



SOLVAY

asking more from chemistry®

Radel® | Veradel® | Acudel®

**Radel® PPSU, Veradel® PESU
& Acudel® 改性 PPSU
设计指南**

**SPECIALTY
POLYMERS**

引言.	1	疲劳.	17
化学.	2	热特性.	18
化学结构 - 特性关系.	2	玻璃转化温度.	18
产品资料.	3	机械特性的变化.	18
材料选择.	3	热塑性树脂的分类.	18
命名法.	4	温度对模量的影响.	19
认证.	5	温度对拉伸强度的影响.	19
食物接触.	5	载荷下变形温度.	19
ISO 10993.	5	试验变量.	19
美国国家卫生基金会.	5	热变形温度比较.	19
NSF 第 51 号标准: 食品设备材料.	5	热膨胀系数.	20
NSF 第 61 号标准: 饮用水系统部件 -		导热率.	20
对健康的影响.	5	比热.	21
国际饮用水接触标准.	6	燃烧特性.	21
法国 ACS 卫生合格证书.	6	UL 94.	21
英国饮用水法规.	6	氧指数.	21
德国联邦卫生部.	6	自燃温度.	21
保险商实验所.	6	烟气密度.	21
特性数据.	7	热稳定性.	22
短期特性.	7	热重分析.	22
典型特性表.	7	热老化.	23
拉伸特性.	7	UL 相对热指数.	23
应力-应变曲线.	10	电特性.	24
挠曲特性.	12	介电强度.	24
压缩特性.	13	体积电阻率.	24
剪切特性.	13	介电常数.	24
冲击特性.	14	损耗因子.	24
缺口伊佐德.	14	UL 746A 短期特性.	24
缺口敏感度.	15	高压、低电流干态耐电弧性.	24
拉伸冲击.	15	相对漏电起痕指数 (CTI).	24
泊松比.	15	高压电弧起痕率 (HVTR).	25
耐磨损性.	15	热丝点燃 (HWI).	25
长期特性.	16	大电流电弧点燃 (HAI).	25
蠕变.	16	耐环境性.	25
蠕变模量.	16	水解稳定性.	25
同步应力-应变曲线.	17	蒸汽消毒分析.	26
		耐化学性.	26
		Radel 的耐化学性.	27

耐应力开裂.	29	背压	45
抗辐射性.	33	螺杆速度	45
物理特性.	33	注塑速率和排气	46
密度.	33	脱模	46
吸水性.	34	收缩率	46
设计信息.	35	料流动特征.	46
机械设计.	35	残余应力的测量.	47
应力水平.	35	健康及安全考虑.	48
应力-应变的计算	35	确定残余应力的步骤.	48
设计极限	38	挤塑.	48
应力集中	38	预干燥.	48
配合注塑的设计.	39	挤塑温度.	48
壁厚.	39	螺杆设计建议.	49
壁厚变化.	39	口模设计.	49
脱模角度.	39	挤塑成型产品的类型.	49
加强筋结构.	39	线材	49
抽芯.	40	薄膜	49
凸台.	40	薄片	49
加工.	41	管材和软管	49
干燥.	41	起动、关机和清料筒.	50
流变性能.	42	起动步骤	50
熔融加工参数.	44	关机步骤	50
注塑.	44	清料	50
注塑设备.	44	二次加工.	51
螺杆设计	44	机加工.	51
螺杆末端和止逆阀	44	钻孔和攻丝.	51
喷嘴	44	锯切.	51
模具.	44	车削.	51
脱模角度和脱模	44	铣和特形铣.	51
浇口	44	修饰和装饰.	51
排气	44	上漆.	51
模具温度控制	44	电镀.	51
机器设置.	45	热压印.	51
注塑温度	45	印刷.	52
模具温度	45	真空金属喷镀.	52
料筒温度	45	阴极镀膜.	52
料筒中的滞留时间	45	火焰 / 电弧喷涂.	52
注塑成型过程.	45	装配和接合.	52
进料特征	45	超声焊接.	52
		旋转焊接.	52

粘合剂粘合.	53
机械紧固件.	53
模塑螺纹	54
螺纹嵌入件	54
自动攻丝螺钉	54
超声嵌入件	55
搭扣配合.	55

索引. 57

表

表 1: 纯树脂牌号的熔体流动速率	4
表 2: 玻纤增强牌号的熔体流动速率	4
表 3: 通过 NSF 第 51 号标准认证的材料	5
表 4: 通过 NSF 第 61 号标准认证的材料	5
表 5: 符合法国 ACS 标准的 Radel 和 Veradel 树脂	6
表 6: 符合 BS 6920 标准的 Radel 树脂	6
表 7: 符合 KTW 标准的聚砜牌号	6
表 8: 典型特性 - 美制单位	8
表 9: 典型特性 - 国际制单位	9
表 10: 纯树脂的拉伸特性 (ASTM D638)	11
表 11: 纯树脂的挠曲特性	12
表 12: 纯树脂的压缩特性	13
表 13: 纯树脂的剪切强度	13
表 14: 泊松比	15
表 15: 玻璃转化温度	18
表 16: Radel、Veradel 和 Acudel 树脂的变形温度	20
表 17: 线性热膨胀系数*.	20
表 18: 导热率	21
表 19: Radel、Veradel 和 Acudel 树脂的氧指数	21
表 20: 烟气密度	22
表 21: 热重分析的详细情况	22
表 22: 按照 UL 746B 的相对热指数	23
表 23: Radel、Veradel 和 Acudel 树脂的电特性	24
表 24: 按照 UL 746A 的 Radel 和 Veradel 树脂电特性*.	25
表 25: 耐沸水侵蚀性	25
表 26: 长期与热水接触的影响*.	26
表 27: 耐高压蒸汽能力	26
表 28: 耐化学性的一般指标*.	27

表 29: 浸渍情况下 Radel 树脂的耐化学性*	28
表 30: 耐环境应力开裂能力表中的符号说明	29
表 31: 对汽车工作液的耐环境应力开裂能力 (24 小时)	30
表 32: 对有机物的耐环境应力开裂能力 (24 小时)	31
表 33: 对无机物的耐环境应力开裂能力 (24 小时)	32
表 34: 对航空工作液的耐环境应力开裂能力 (24 小时)	32
表 35: Radel、Veradel 和 Acudel 树脂的比重	33
表 36: 最大应力和挠曲方程式	36
表 37: 部分断面的面积和力矩方程式	37
表 38: 间歇载荷的设计容许应力	38
表 39: 恒定载荷的设计容许应力, psi (MPa)	38
表 40: Radel 的剪切速率与粘度的关系数据	42
表 41: Veradel 的剪切速率与粘度的关系数据	42
表 42: 熔融加工参数	44
表 43: 注塑成型起始点条件	45
表 44: 残余应力试验参数	48
表 45: 搭扣配合设计的最大允许应变	56

图

图 1: 化学结构	2
图 2: 桥联基团	2
图 3: 聚砜塑料的相对耐热能力	3
图 4: 聚砜塑料的水解稳定性	3
图 5: 聚砜塑料的耐化学性	4
图 6: 聚砜塑料的耐冲击性	4
图 7: 典型应力-应变曲线	7
图 8: 应力-应变曲线插图 (图 7), 割线与切线模量的关系	7
图 9: Veradel A-301 至屈服点的应力-应变曲线	10
图 10: Radel R-5000 至屈服点的应力-应变曲线	10
图 11: Acudel 22000 至屈服点的应力-应变曲线	10
图 12: Veradel AG-320 至断裂点的应力-应变曲线	11
图 13: Veradel AG-330 至断裂点的应力-应变曲线	11
图 14: 玻纤填充的 Veradel 的拉伸强度	11
图 15: 玻纤填充的 Veradel 的拉伸模量	11
图 16: 挠曲试验装置	12
图 17: 玻纤填充的 Veradel 的挠曲强度	12
图 18: 玻纤填充的 Veradel 的挠曲模量	12

图 19: 玻纤填充的 Veradel 的压缩强度	13	图 60: Veradel A-301 的螺旋流动	46
图 20: 玻纤填充的 Veradel 的压缩模量	13	图 61: Radel R-5000 的螺旋流动	47
图 21: 玻纤填充的 Veradel 的剪切强度	14	图 62: Radel R-5800 的螺旋流动	47
图 22: 伊佐德 (Izod) 冲击测试装置	14	图 63: 能量导向头设计	53
图 23: 纯树脂的缺口伊佐德 (Izod)	14	图 64: 粘合剂粘合的接头设计	53
图 24: 缺口伊佐德 (Izod) 冲击与缺口半径的 函数关系	15	图 65: 适合机械紧固件的设计	54
图 25: 纯树脂的拉伸冲击强度	15	图 66: 内螺纹	54
图 26: 耐磨性	16	图 67: 外螺纹	54
图 27: Veradel A-201 的蠕变模量	16	图 68: 自动攻丝螺钉的凸台设计	55
图 28: Radel R-5000 的蠕变模量	16	图 69: 超声嵌入件的凸台设计	55
图 29: Veradel A-201 的同步应力-应变曲线	17	图 70: 采用直梁的搭扣配合设计	56
图 30: Radel R-5000 的同步应力-应变曲线	17	图 71: 采用锥形梁的搭扣配合设计	56
图 31: Veradel 的挠曲疲劳耐受	18	图 72: 锥形梁的比例常数 (K)	56
图 32: 模量随温度的典型变化	18		
图 33: 纯树脂的挠曲模量与温度的关系	19		
图 34: 纯树脂的拉伸强度与温度的关系	19		
图 35: 纯树脂的变形温度	20		
图 36: 比热	21		
图 37: 氮气中的热重分析	22		
图 38: 空气中的热重分析	22		
图 39: Veradel 和 PEI 的热老化	23		
图 40: Radel 聚亚苯基砜的热老化	23		
图 41: Veradel 的抗辐射性	33		
图 42: Radel 的抗辐射性	33		
图 43: 树脂体积的变化与比重成反比	33		
图 44: 在 23°C 水中的吸水率	34		
图 45: 内拐角的应力集中因子	38		
图 46: 壁厚的转变	39		
图 47: 为脱模而设计	39		
图 48: 建议的加强筋设计	40		
图 49: 凸台设计的一般原则	40		
图 50: Veradel 树脂在空气循环烘箱内的干燥	41		
图 51: Radel 树脂在空气循环烘箱内的干燥	41		
图 52: Acudel 树脂在空气循环烘箱内的干燥	41		
图 53: Veradel A-201 树脂的流变性能	43		
图 54: Veradel A-301 树脂的流变性能	43		
图 55: Veradel AG-330 树脂的流变性能	43		
图 56: Radel R-5000 树脂的流变性能	43		
图 57: Radel R-5800 树脂的流变性能	43		
图 58: 适合注塑的螺杆设计	44		
图 59: Veradel A-201 的螺旋流动	46		

本设计指南包括了关于 **Radel** 聚亚苯基砜、**Veradel** 聚醚砜和 **Acudel** 改性聚亚苯基砜的详细资料。《**Udel** 聚砜设计指南》是有关 **Udel** 聚砜材料的主要参考资料。

本指南的目的是为设计工程师提供所需的详细资料，从而使他们能有效地利用这些材料。除了短期的机械特性、热特性、电特性和物理特性等数据之外，本指南还包括了长期特性方面的信息，例如：抗蠕变性、耐疲劳性和热稳定性，对化学品及其它环境因素的耐受性，以及有关机构认证方面的信息。另外还包括了有关这些材料的加工、零部件设计以及二次加工处理等方面的建议。

本指南的内容主要集中在 **Radel**、**Veradel** 和 **Acudel** 树脂的标准牌号。诸如为满足商用飞机产业严格的安全要求而专门配制的 **Radel** 材料等特殊牌号则不属于本指南的范围。要想获得关于其它产品系列或 **Radel** 聚亚苯基砜特殊牌号的更多信息，请访问我们的网站 www.solvayplastics.com 或与您的销售代表联系。

Radel、**Veradel** 和 **Acudel** 树脂综合了多项高性能特性，包括：

- 优异的热稳定性
- 卓越的韧性
- 良好的耐环境应力开裂
- 高的热变形温度 — 超过 213°C
- 无需添加剂即具有耐燃烧性
- 透明
- 经过认证可与食品和饮用水接触

Radel 聚亚苯基砜的缺口伊佐德 (Izod) 值为 690 J/m，具有几乎不受限制的蒸汽消毒性和优异的耐含氯热水能力。**Veradel** 聚醚砜的 UL 相对热指数为 190°C。对于某些应用，用 **Acudel** 树脂代替 **Radel** 聚亚苯基砜具有更好的成本效益。

除了上述特性之外，这些材料还具有易于加工的特点，因此成为人们在多种情况下的理想选择。

Radel 聚亚苯基砜的应用范例包括：医疗卫生保健行业的可消毒盒和托盘、牙科器械、医疗设备部件、飞机内饰以及食品服务设备。

Veradel 聚醚砜的应用范例包括：炊具、水净化膜、涂料和复合材料的助粘剂。

Radel 聚亚苯基砜和 **Acudel** 改性聚亚苯基砜可应用于塑料管道系统的管道配件和歧管。

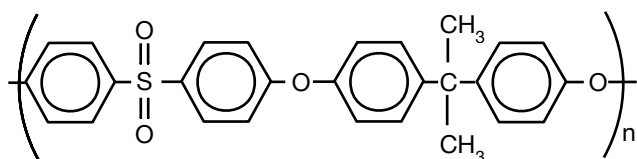
化学

Radel 聚亚苯基砜和 Veradel 聚醚砜具有 Udel 聚砜典型的优异特性。与 Udel 聚砜相比，Radel 聚亚苯基砜具有更佳的耐热能力、固有的阻燃性、更优的耐化学性及更好的机械特性，包括优异的耐冲击性。与 Radel 聚亚苯基砜相比，Veradel 聚醚砜还具有更佳的热性能，而且其耐化学性介于 Udel 和 Radel 树脂之间。

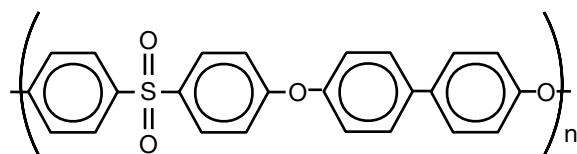
Udel 聚砜、Radel 聚亚苯基砜和 Veradel 聚醚砜的化学结构如图 1 所示。

图 1: 化学结构

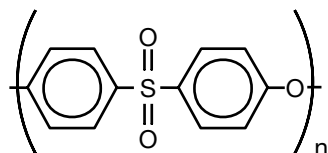
Udel 聚砜



Radel 聚亚苯基砜



Veradel 聚醚砜



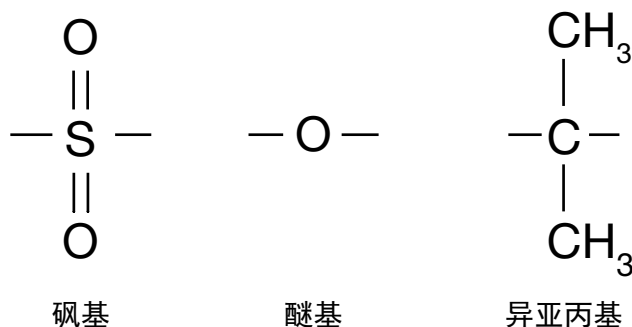
化学结构 - 特性关系

砜基团的立体结构阻止了这些聚合物熔融结晶的趋势，因此它们是无定形的，并表现出高清晰度和高透明度。

这些聚合物由芳香基团（亚苯基）与砜基及醚基连接起来所构成，在 Udel 聚砜中则是与异亚丙基相连接。

这些“桥联”基团（见图 2）使聚砜具有了特殊的性能特征：水解稳定性、热氧化稳定性和熔融稳定性、高使用温度以及延展性。在电负性的砜基中，硫原子处于其最高氧化态，为聚合物提供了出色的热氧化稳定性，同时提高了长期使用温度。

图 2: 桥联基团



亚苯基醚链段则增加了聚合物主链的柔韧性，表现为高的韧性、伸长率、延展性以及易于进行熔融加工。卓越的水解稳定性是聚砜与其它的热塑性工程材料的不同之处，它归结于亚苯基砜基和醚基的抗水解性。与之相反，许多竞争性产品例如聚碳酸酯、聚酯、聚芳酯和聚醚酰亚胺，在它们的重复单元中都含有可水解的桥联基团，因此当它们处于侵蚀性水环境例如沸水、蒸汽、腐蚀剂或酸性溶液时，会表现出分子量的降低并导致严重的性能损失。

聚醚砜聚合物的重复单元中具有最高含量的砜基团。这一极性的基团可吸水，从而使聚醚砜成为所有商业化砜类聚合物中吸水量最高的一种。

Radel 树脂拥有的亚联苯基单元具有提高耐冲击强度、降低缺口敏感度的独特性质，使得缺口伊佐德 (Izod) 值大于 690 J/m。

材料选择

砒类聚合物产品系列包括 **Radel** 聚亚苯基砒、**Veradel** 聚醚砒以及 **Udel** 聚砒，它们都是无定形塑料，并且集优异的热稳定性、高强度和韧性、优异的水解稳定性、透明度和良好的耐环境应力开裂能力于一身。**Mindel** 改性聚砒和 **Acudel** 改性聚亚苯基砒则在成本和性能两方面都具有进一步的优势。

这一部分将着重阐述砒类聚合物之间的不同之处，以帮助 您决定哪一种材料最符合您的要求。

Udel 聚砒在系列产品中的价位最低、使用范围最广。它的颜色最淡、透明度最高，在水解稳定性方面也仅次于性能高得多的 **Radel** 聚亚苯基砒。有关 **Udel** 聚砒的更多资料请参阅《**Udel** 聚砒设计指南》，您可以向苏威公司的代表索取或从我们的网站获得。

图 3 比较了 **Radel**、**Veradel** 和 **Acudel** 树脂与 **Udel** 聚砒及聚碳酸酯的相对耐热能力，结果表明 **Radel** 和 **Veradel** 树脂更适于在高温环境下应用。

图 4 显示了这些塑料的水解稳定性与聚碳酸酯及聚砒的比较情况。聚砒具有优异的水解稳定性，仅次于 **Radel** 聚亚苯基砒或 **Acudel** 改性聚亚苯基砒。

图 5 显示了 **Radel** 和 **Veradel** 树脂暴露于有机溶剂时的相对性能情况。此图表明，**Radel** 聚亚苯基砒在有机溶剂中具有耐侵蚀能力和/或耐应力开裂能力远远强于其它材料。**Veradel** 聚醚砒、**Acudel** 改性聚亚苯基砒和 **Udel** 聚砒明显优于聚碳酸酯。

在许多应用中，耐冲击性是一个关键特性。这种特性很难进行量化。有些试验测量对缺口的敏感度，另一些则测量耐高速穿透性。图 6 显示了对 **Radel** 树脂的实际耐冲击性的评估，其中包括了坠落冲击等级以及拉伸冲击试验结果。此图表明，这些塑料是坚韧的、可延展的材料并且它们都具有优异的实际耐冲击性。

图 3: 聚砒塑料的相对耐热能力

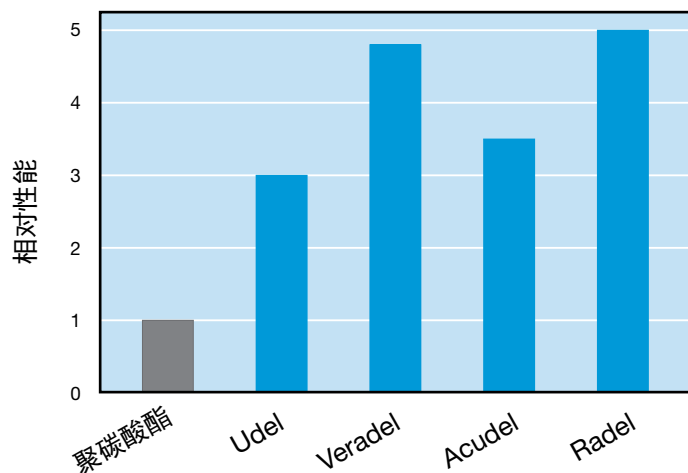
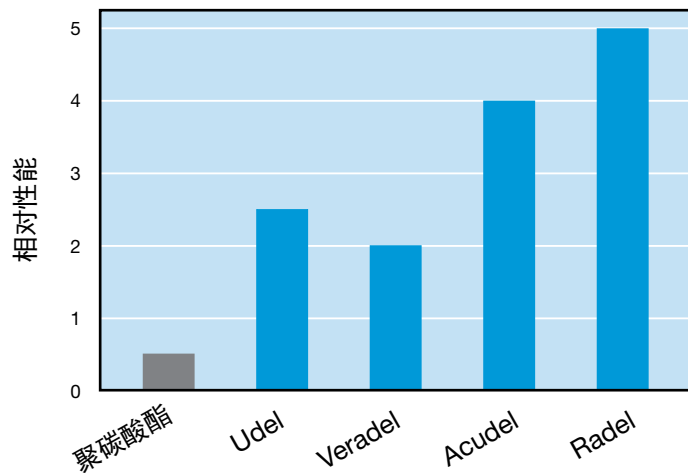


图 4: 聚砒塑料的水解稳定性



Veradel 聚醚砒可以未填充牌号和玻纤增强牌号供应。每种类型可有多种熔体粘度供选择。

当需要一种具有比聚砒更强的耐热能力、固有阻燃性、更优的耐化学性及更好的机械特性的砒类聚合物时，可以使用 **Veradel** 聚醚砒。

玻纤增强品级具有更高的劲度和尺寸稳定性，并且具有抗蠕变性、耐化学性及较低热膨胀率等伴随益处。

图 5: 聚砜塑料的耐化学性

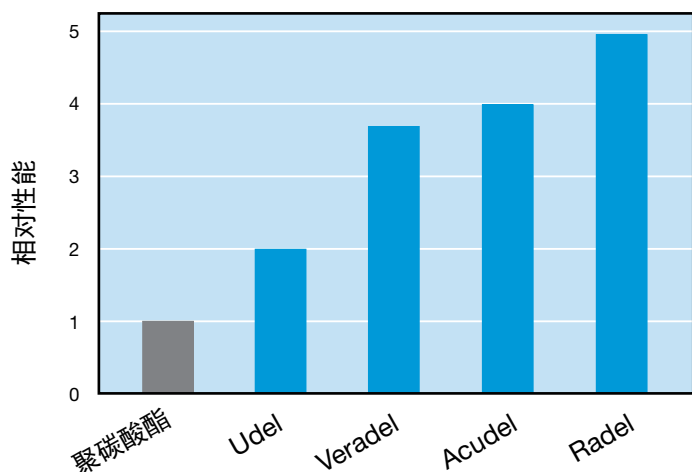
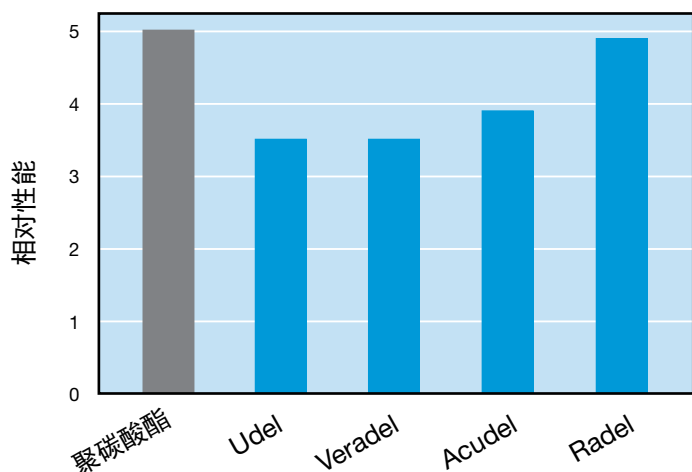


图 6: 聚砜塑料的耐冲击性



Veradel AG-320 和 AG-330 塑料是特别具有成本效益的玻纤增强牌号，分别含有 20% 和 30% 的玻璃纤维。

在需要具有超强韧性，并且要求耐水解性和耐化学腐蚀性优于所有其它透明的商品化塑料或需要耐受商用高压消毒环境的情况下，您可以选择 Radel 聚亚苯基砜。

Radel 聚亚苯基砜有若干牌号可供选择：R-5000，通用透明牌号；R-5100，彩色牌号；R-5500，挤塑牌号；R-5800 和 R-5900，具有更高流动性、适用于注塑成型、透明牌号；以及 RG-5030，30% 玻纤增强牌号。

Acudel 树脂是未填充的不透明改性聚亚苯基砜，设计用以满足一系列富有挑战性的应用设计和最终使用需求。

Radel 聚亚苯基砜和 Veradel 聚醚砜都可与范围广大的透明或不透明颜色匹配。

命名法

对于 Veradel 树脂而言，牌号编号的第一个数字用来表明相对熔体粘度。除特殊说明的情况之外，纯的 Veradel 树脂和玻纤填充牌号的 Veradel 树脂在所有的熔体粘度下都具有相同的机械特性、物理特性、热特性以及耐化学特性。

表 1 显示了未填充聚砜牌号和对应的相对熔体粘度，用美国材料试验协会（ASTM）的试验方法 ASTM D1238 表述为熔体流动速率。

在基本产品类别描述符号前面加上“G”，表明为玻纤增强牌号。表 2 显示了玻纤增强 Radel 和 Veradel 树脂的组成和熔体流动速率。

表 1: 纯树脂牌号的熔体流动速率

树脂牌号	典型熔体流动速率 (g/10 min)
Radel 树脂, 365°C, 5.0 kg	
R-5500*	11
R-5000/5100	17
R-5800	25
Acudel 树脂, 380°C, 2.16 kg	
22000	12
Veradel 树脂, 380°C, 2.16 kg	
A-201	20
A-301	30

* 挤塑牌号

表 2: 玻纤增强牌号的熔体流动速率

组成	熔体流动速率 (g/10 min)
Radel 树脂, 365°C, 5.0 kg	
RG-5030 30% 玻璃纤维	15
Veradel 树脂, 380°C, 2.16 kg	
AG-320 20% 玻璃纤维	14
AG-330 30% 玻璃纤维	12

认证

Radel 和 Veradel 树脂符合多国政府和/多家认证机构的要求，如下所示。由于对产品的认证要求是一种持续不断的行为，所以，有关需要机构认证或认可的特定应用方面的信息，请与苏威公司的代表联系。

食物接触

美国食品与药物管理局（FDA）– Veradel 聚醚砜符合 21CFR177.2440 规定的要求，因此已获 FDA 批准，可用于重复使用的、与食品接触的物品或物品部件。Radel 聚亚苯基砜符合食品接触通告第 000083 号的规定，在 FDA 规定的 B 到 H 条件下，可用于与各种类型食品接触应用的重复使用。

欧洲委员会标准 2002/72/EEC – 有关与食品接触的塑料材料和物品的委员会标准。多种牌号的 Radel、Acudel 和 Veradel 获得了这些标准的认证。现有清单上具体牌号的资料可向苏威公司的代表索取。

ISO 10993

我们有多种牌号的聚砜塑料符合 ISO 10993 的要求，因此这些产品也适于在第 II 和 第 III 级医疗装置中使用。欲了解进一步详情，请与您的销售代表联系。

只有标明是 Solviva®⁽¹⁾ 生物材料系列的苏威产品，才可以考虑用于各种植入人体内的医疗应用和接触人体液或组织超过 24 小时的装置。

美国国家卫生基金会

NSF 国际标准是一个非营利性质的非政府组织，为公共卫生与安全制定标准。同时也提供符合该组织标准的材料清单。想要获得更多关于 NSF 的完整资料，请访问他们的网站：www.nsf.org。在他们众多的标准中，有两条对于砜类聚合物尤其重要，第 51 号标准“食品设备材料”和第 61 号标准“饮用水材料”。

表 3: 通过 NSF 第 51 号标准认证的材料

	最高使用温度 (°C)
Radel 聚亚苯基砜	
R-5000	191
R-5100 NT15	191
R-5900 NT	191
Acudel 改性聚亚苯基砜	
22000 BK937	100
22000 NT15	100
Veradel 聚醚砜	
AG-320 NT	191
AG-330 NT	191

NSF 第 51 号标准：食品设备材料

表 3 列出了通过这一标准认证的砜类聚合物和所认证的最高使用温度。该标准列出了这些食品类型：干燥固态、水溶液、酸性、奶产品、油制品和酒精饮料。所列出的材料通过用于所有食品类型的认证。

NSF 第 61 号标准：饮用水系统部件 – 对健康的影响

表 4 列出了在 82°C 条件下通过 NSF 第 61 号标准认证的砜类聚合物。

这些表格仅供您参考。用于需要认证的应用之前，强烈建议您登录 www.NSF.org/business/search_listings 以获得最新的清单。

表 4: 通过 NSF 第 61 号标准认证的材料

Radel 聚亚苯基砜		
R-5000 NT	R-5100 BK937LF	R-5100 BK937
R-5100 BU1197	R-5100 GY1037	R-5100 GY1037LF
R-5100 NT15		
Acudel 改性聚亚苯基砜		
22000 BK937	22000 WH6417	22000 NT15
Veradel 聚醚砜		
3000P	3100	3200P
3300	3330NT	3400
3500		

⁽¹⁾ Solviva® 是苏威国际化学及制药集团的下属企业苏威高性能塑料公司的注册商标。

国际饮用水接触标准

清单所列材料的认证有过期时限，是否会被重新认证将受市场需求的影响。有关最新清单的信息，请与苏威公司的代表联系。

法国 ACS 卫生合格证书

表 5 列出了已获得法国卫生合格证书（Attestation de Conformité Sanitaire “ACS”）的 Radel 和 Veradel 牌号，这些产品适用于相应的材料和附件。

表 5: 符合法国 ACS 标准的 Radel 和 Veradel 树脂

Radel R-5100 BK937
Radel R-5100 BU1197
Radel R-5100 NT15
Veradel 3330GF
Veradel AG-330 NT

英国饮用水法规

表 6 列出了通过了水质影响测试 — BS 6920 标准的 Radel 和 Veradel 牌号，这些牌号的产品适合与饮用水接触，并且将列入《用水配件与材料目录》的第二部分，即《材料》章节。这些产品同时经过认证可与冷水以及高达 85°C 的热水接触使用。

表 6: 符合 BS 6920 标准的 Radel 树脂

Radel R-5000 NT
Radel R-5100 NT15
Radel R-5100 BK937
Radel R-5100 GY1037
Radel R-5100 BU1197

德国联邦卫生部

表 7 列出了已经过测试和检查，并在高达 90°C 条件下符合德国联邦卫生部的 KTW 建议的塑料产品。

表 7: 符合 KTW 标准的聚砜牌号

Veradel AG-330 NT	Radel R-5100 GY1037
Radel R-5000 NT	Radel R-5100 NT15
Radel R-5100 BK937	Acudel 22000 GY1037
Radel R-5100 BU1197	Acudel 22000 BK937

保险商实验所

多种商品牌号的 Radel 聚亚苯基砜、Acudel 聚亚苯基砜和 Veradel 聚醚砜列在了保险商实验所（UL）已认证的部件目录中。与短期性能相关的数据见第 25 页的表 24。长期性能数据在第 23 页的表 22 中列出。想要获得最新清单的资料，请登录保险商实验所（UL）的网站：www.UL.com。

材料的机械特性为零部件设计中的重要基础。设计者采用的材料，其机械特性需要符合设计者所设计部件的应用要求，才能获得最佳的零件设计。

对于聚合物材料而言，它们的机械特性比金属更依赖于时间和温度，在某些方面也更容易受到环境因素的影响。要想将聚合物材料成功地应用于产品设计中，设计者不仅需要材料的短期机械特性，而且还要考虑其在各种应用中的使用时间、使用温度和使用环境上的要求。

短期特性

材料供应商提供的数据表上的机械性能通常是指短期机械性能。在某些情况下，可以把这些数据视为该材料的绝对最大指针。

获得这些数据的典型方法为：准备一件特定的试样，然后让该试样承受不断增大的载荷直至试样遭到破坏（通常为断裂）为止。用于试验的试样往往经过专门设计，以能够获得可重复的结果，因而所得到的数值可能会比使用从实际零件加工的试样进行测试得到的数值要大。由于试验进行得很快，可以认为时间的影响极小。

通过在受控的环境下进行试验，可以消除环境因素的影响，从而避免了由于接触化学品而造成其机械特性的降低。短期的机械特性通常包括拉伸强度和模量、挠曲强度和挠曲模量、缺口伊佐德（Izod）冲击、压缩强度、剪切强度和表面硬度。

典型特性表

Radel、Veradel 和 Acudel 树脂的典型特性列在表 8 和 9 中。

拉伸特性

拉伸特性是按照美国材料试验协会（ASTM）的试验方法 ASTM D638，将试样两端夹在试验机的夹头内进行拉伸，并且以规定的速率分开夹头来测定的。将分离这两个夹头所需的力除以试样的最小横截面积就是拉伸应力。试样在应力的作用下会伸长，用所伸长的量除以试样的原始长度就是应变。

如果把所施加的应力和所产生的应变作图，就可以为类似聚砜的韧性聚合物得到与图 7 所示相似的曲线。

应力-应变曲线的最初部分如图 8 所示，它具有特殊的意义。此图表明，在一定的应力范围内，应变与应力成正比。这个区域被称为“虎克”区域，其极限应力被称为比例极限。拉伸模量是当试样承受拉伸载荷时其应力 / 应变曲线的斜率。要测量曲线的斜率事实上是很困难的，因此逐渐发展出各种标准化测试，以降低实验结果的可变性。

图 7: 典型应力-应变曲线

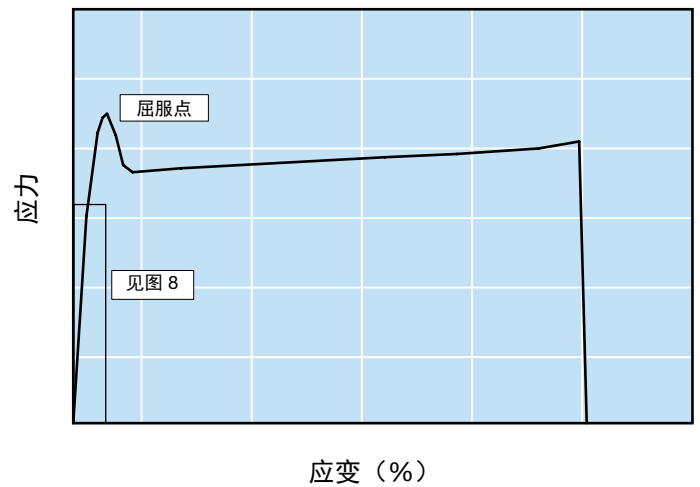


图 8: 应力-应变曲线插图（图 7），割线与切线模量的关系

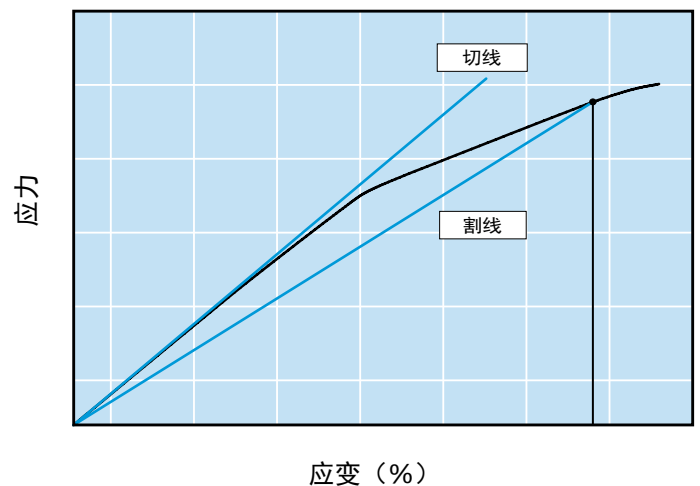


表 8: 典型特性⁽¹⁾ – 美制单位

特性	ASTM 试验 方法	单位	Radel		Veradel			Acudel
			R-5800 R-5500 R-5100 R-5000	RG-5030	A-301A A-201A	AG-320	AG-330	22000
机械								
拉伸强度	D638	kpsi	10.1	17.4	12.0	15.2	18.3	11.2
拉伸模量	D638	kpsi	340	1,330	385	825	1,250	390
拉伸伸长率	D638	%						
屈服点			7.2		6.5	3.2	1.9	6.7
断裂点			60-120	2.4	25-75	3.2	1.9	25-75
挠曲强度	D790	kpsi	15.2	25.1	16.1	21.0	26.0	15.7
挠曲模量	D790	kpsi	350	1,170	420	750	1,170	400
压缩强度	D695	kpsi	14.4		14.5	21.9	25.6	
压缩模量	D695	kpsi			388	875	1,120	
剪切强度	D732	kpsi	8.8		8.0	8.8	9.5	8.4
伊佐德 (Izod) 冲击强度	D256	ft-lb/in						
缺口			13.0	1.4	1.6	1.1	1.4	2.0
无缺口			NB ⁽²⁾	12	NB ⁽²⁾	12	10	NB ⁽²⁾
拉伸冲击	D1822	ft-lb/in ²	190		160	31	34	175
洛氏硬度	D785		R122		R127		R121	
热								
热变形温度 ⁽³⁾	D648	°F						
66 psi			417		417	424	428	
264 psi			405	410	399	417	420	387
维卡软化点	D1525B	°F			418	422	424	
热膨胀系数	E831	µin/in°F	31	10	27	17	17	35
导热率	E1530	⁽⁵⁾	2.08		1.66		2.08	1.66
玻璃转化温度	DSC	°F	428	428	428	428	428	428 ⁽⁶⁾
燃烧⁽⁴⁾								
氧指数	D2863	%	38		39	40	40	38
在 0.8 mm 时的 UL 94 等级	UL 94		94 V-0		94 V-0	94 V-0	94 V-0	
自燃温度	D1929	°F			936			
电								
介电强度	D149	volt/mil	360	400	380	440	440	470
体积电阻率	D257	ohm-cm	>10 ¹⁵	>9x10 ¹⁵	1.7x10 ¹⁵	>10 ¹⁶	>10 ¹⁶	>9x10 ¹⁵
介电常数	D150							
在 60 Hz			3.44		3.51	3.84	4.11	
在 10 ³ Hz			3.45		3.50	3.84	4.13	
在 10 ⁶ Hz			3.45	3.90	3.54	3.88	4.17	3.40
损耗因子	D150							
在 60 Hz			0.0006		0.0017	0.0015	0.0019	
在 10 ³ Hz					0.0022	0.0018	0.0018	
在 10 ⁶ Hz			0.0076	0.0090	0.0056	0.0081	0.0094	0.0080
物理								
比重	D792		1.29	1.53	1.37	1.51	1.58	1.28
折射率			1.672		1.651			
吸水率 ⁽⁷⁾ , 24 小时	D570	%	0.4	0.3	0.5	0.4	0.4	0.3
吸水率 ⁽⁷⁾ , 30 天	D570	%	1.1	0.7	1.8			0.8

⁽¹⁾ 典型值 – 各批次产品的实际值会在规格所要求的范围内有所变化

⁽²⁾ NB = 不断裂

⁽³⁾ 已退火的 0.125 英寸试棒

⁽⁴⁾ 涉及燃烧和可燃性的数据仅是小规模实验室测量的结果, 不能准确反映这些材料或任何其它材料在实际燃烧条件下的火灾危害程度。

⁽⁵⁾ 单位: $\frac{\text{BTU} \cdot \text{in}}{\text{hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{°F}}$

⁽⁶⁾ 所给出的数据为主要成分的值

⁽⁷⁾ 从完全干燥开始测量

表 9: 典型特性⁽¹⁾ – 国际制单位

特性	ASTM 试验 方法	单位	Radel		Veradel			Acudel
			R-5800 R-5500 R-5100 R-5000	RG-5030	A-301A A-201A	AG-320	AG-330	22000
机械								
拉伸强度	D638	MPa	70	120	83	105	126	77
拉伸模量	D638	GPa	2.34	9.17	2.65	5.70	8.62	2.69
拉伸伸长率	D638	%						
屈服点			7.2		6.5	3.2	1.9	6.7
断裂点			60-120	2.4	25-75	3.2	1.9	25-75
挠曲强度	D790	MPa	105	173	111	145	179	108
挠曲模量	D790	GPa	2.41	8.07	2.90	5.17	8.07	2.76
压缩强度	D695	MPa	99		100	151	177	
压缩模量	D695	GPa			2.68	6.03	7.72	
剪切强度	D732	MPa	61		55	61	65	58
伊佐德 (Izod) 冲击强度	D256	J/m						
缺口			694	75	85	59	75	106
无缺口			NB ⁽²⁾	640	NB ⁽²⁾	640	530	NB ⁽²⁾
拉伸冲击	D1822	kJ/m ²	400		336	65	71	
洛氏硬度	D785		R122		R127		R121	
热								
热变形温度 ⁽³⁾	D648	°C						
0.45 MPa			214		214	218	220	
1.82 MPa			207	210	204	214	216	197
维卡软化点	D1525B	°C			214	217	218	
热膨胀系数	E831	µm/m-°C	56	18	49	31	31	63
导热率	E1530	W/m-K	0.30		0.24		0.30	0.24
玻璃转化温度	DSC	°C	220	220	220	220	220	220 ⁽⁵⁾
燃烧⁽⁴⁾								
氧指数	D2863	%	38		39	40	40	38
在 0.8 mm 时的 UL 94 等级	UL 94		94 V-0		94 V-0	94 V-0	94 V-0	
自燃温度	D1929	°C			502			
电								
介电强度	D149	kV/mm	15	16	15	17	17	18
体积电阻率	D257	ohm-cm	>10 ¹⁵	>9x10 ¹⁵	1.7x10 ¹⁵	>10 ¹⁶	>10 ¹⁶	>9x10 ¹⁵
介电常数	D150							
在 60 Hz			3.44		3.51	3.84	4.11	
在 10 ³ Hz			3.45		3.50	3.84	4.13	
在 10 ⁶ Hz			3.45	3.90	3.54	3.88	4.17	3.40
损耗因子	D150							
在 60 Hz			0.0006		0.0017	0.0015	0.0019	
在 10 ³ Hz					0.0022	0.0018	0.0018	
在 10 ⁶ Hz			0.0076	0.0090	0.0056	0.0081	0.0094	0.0080
物理								
比重	D792		1.29	1.53	1.37	1.51	1.58	1.28
折射率			1.672		1.651			
吸水率 ⁽⁶⁾ , 24 小时	D570	%	0.4	0.3	0.5	0.4	0.4	0.3
吸水率 ⁽⁶⁾ , 30 天	D570	%	1.1	0.7	1.8			0.8

(1) 典型值 – 各批次产品的实际值会在规格所要求的范围内有所变化

(2) NB = 不断裂

(3) 已退火的 3.2 mm 试棒

(4) 涉及燃烧和可燃性的数据仅是小规模实验室测量的结果, 不能准确反映这些材料或任何其它材料在实际燃烧条件下的火灾危害程度

(5) 所给出的数据为主要成分的值

(6) 从完全干燥开始测量

其中的一种方法是用沿曲线所画切线的斜率来表示，另一种方法是用通过原点和某个任意指定的应变值所画切割线的斜率来表示。本指南的数据是采用切线法获得的。

韧性聚合物在断裂前都会经过“屈服点”。在夹头开始分离前，应力（即为了伸长试样所需要的力）与伸长率（应变）成正比。随着试验的继续进行，试样会表现出较大的永久形变，直至达到一个临界点，在该点只需使用比按比例小一点的应力就可以得到额外的伸长率。这个点即称为“屈服点”，其应力值常被叫作屈服拉伸强度。此处的伸长率称为屈服伸长率或屈服应变。随着试验的进行，试样会继续被拉长，直至断裂为止。该点的应力值称为断裂拉伸强度或极限拉伸强度。用来确定拉伸特性的试验方法，ASTM D638，将屈服应力与断裂应力中的较大值作为拉伸强度值。

应力-应变曲线

通常情况下，通过将具体数据列表给出拉伸特性数据，例如拉伸强度、拉伸模量和拉伸伸长率。在大多数用途中，这些数据已经能够满足需要。而实际的应力-应变曲线则给出了材料对载荷反应的额外信息，这对设计工程师评价零件设计的耐用性会有所帮助。

以下各图给出了多种 Radel、Veradel 和 Acudel 塑料的应力-应变曲线。对未填充塑料的测试进行到屈服点结束，而对玻纤增强牌号的测试一直进行到断裂点为止。

Veradel A-301 的曲线见图 9，Radel R-5000 的曲线见图 10，Acudel 22000 的曲线见图 11，Veradel AG-320 的曲线见图 12，Veradel AG-330 的曲线见图 13。

图 9: Veradel A-301 至屈服点的应力-应变曲线

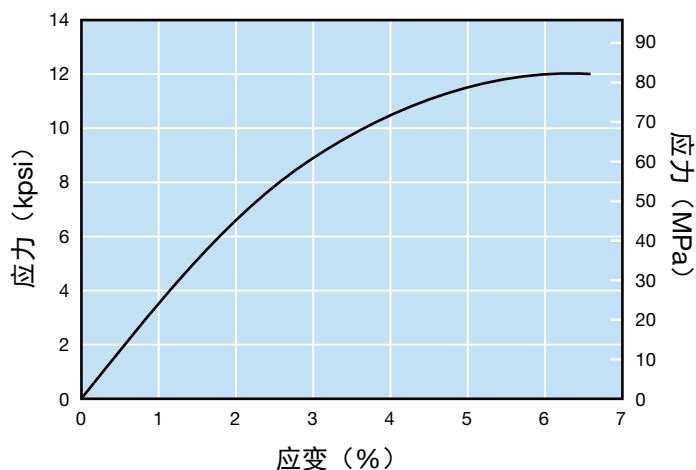


图 10: Radel R-5000 至屈服点的应力-应变曲线

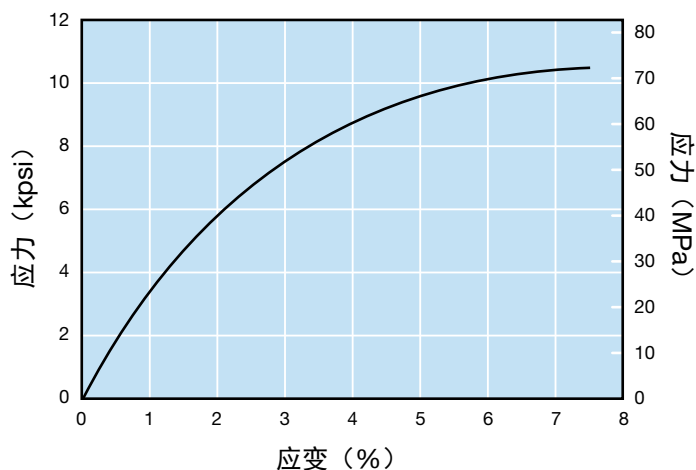


图 11: Acudel 22000 至屈服点的应力-应变曲线

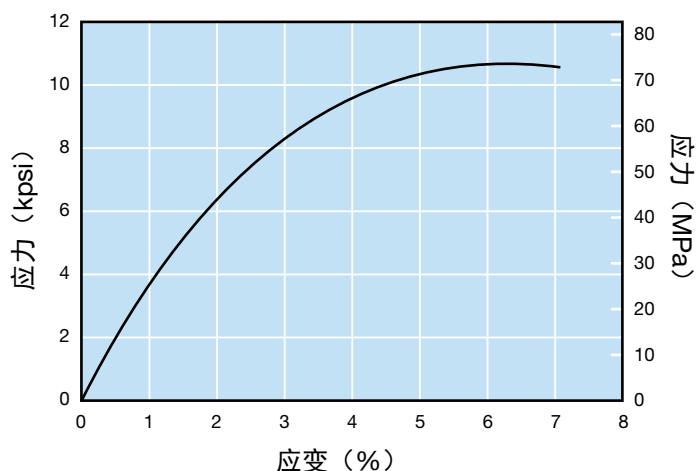


图 12: Veradel AG-320 至断裂点的应力-应变曲线

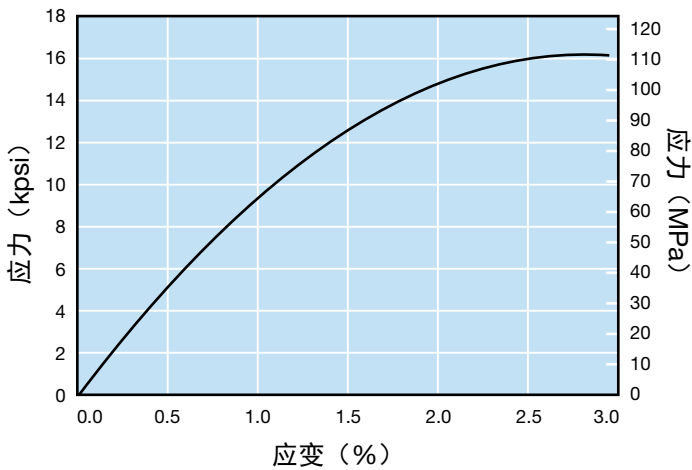


图 13: Veradel AG-330 至断裂点的应力-应变曲线

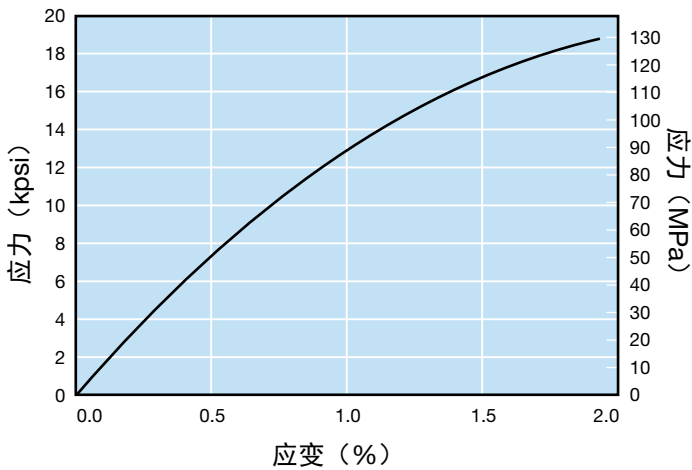


表 10 表明，Veradel 聚醚砜的拉伸强度比 Udel 聚砜或 Radel 聚亚苯基砜高出 20%。Radel 聚亚苯基砜在屈服点和断裂点都具有较大的伸长率和较小的模量，表明具有较好的延展性。较高的延展性使其具有较强的韧性和对应力集中较低的敏感性。

表 10: 纯树脂的拉伸特性 (ASTM D638)

	强度 (MPa)	模量 (GPa)	屈服伸长率 (%)	断裂伸长率 (%)
Radel	70	2.34	7.2	60-120
Veradel	83	2.65	6.5	25-75
Acudel	77	2.69	6.7	25-75
Udel	70	2.48	5-6	50-100

图 14 显示了玻纤增强牌号的 Veradel 聚醚砜在室温下的拉伸强度。正如所预料的，添加玻璃纤维增强使拉伸强度增大。

如图 15 所示，Veradel 聚醚砜的拉伸模量随着玻纤含量的增加而增大。

图 14: 玻纤填充的 Veradel 的拉伸强度

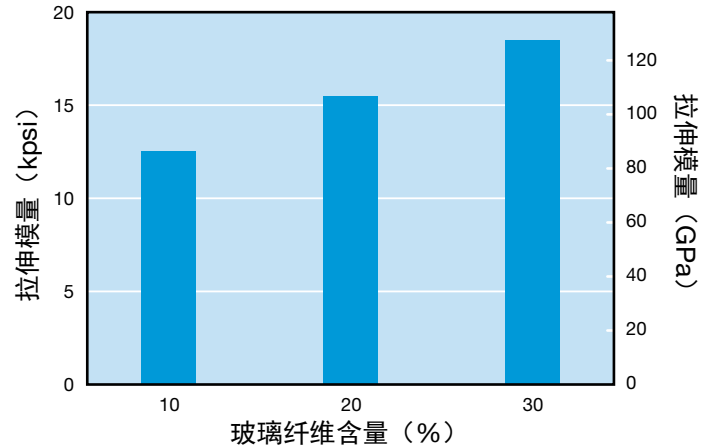
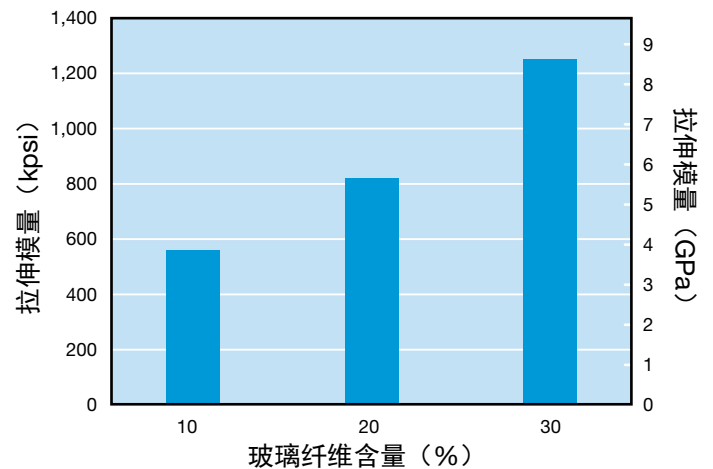


图 15: 玻纤填充的 Veradel 的拉伸模量



挠曲特性

挠曲特性的测量是按照 ASTM D790 的方法 I，使用如图 16 所示的三点载荷法进行的。在该方法中，127 x 13 x 3.2 mm 的试样以两点支撑，而载荷被放在中间。试样会发生挠曲直至断裂或其纤维应变达到 5%。

挠曲试验可为材料的弯曲行为提供信息。在该试验中，试棒同时受到张力和压缩的作用。

如表 11 所示，Veradel 树脂具有最大的挠曲强度和挠曲模量。Radel 树脂的柔韧性则表现为较低的挠曲模量。

表 11: 纯树脂的挠曲特性

	强度 (MPa)	模量 (GPa)
Radel	105	2.41
Acudel	108	2.76
Veradel	111	2.90
Udel	106	2.69

如图 17 所示，添加玻璃纤维提高了 Veradel 树脂的挠曲强度。

图 18 表明，玻纤填充牌号所具有的模量要比纯材料高得多，因此玻纤填充材料应该用于需要较高刚性和 / 或较低蠕变的场合。

图 16: 挠曲试验装置

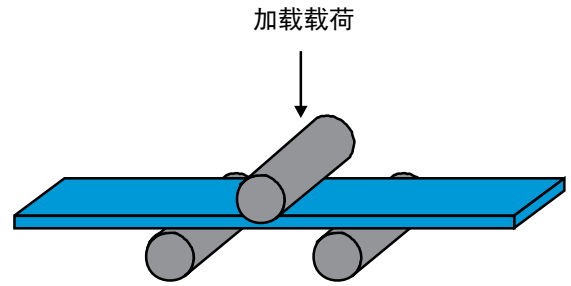


图 17: 玻纤填充的 Veradel 的挠曲强度

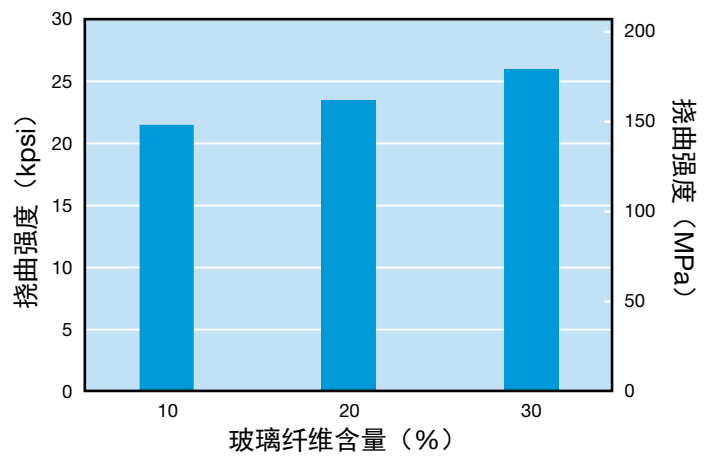
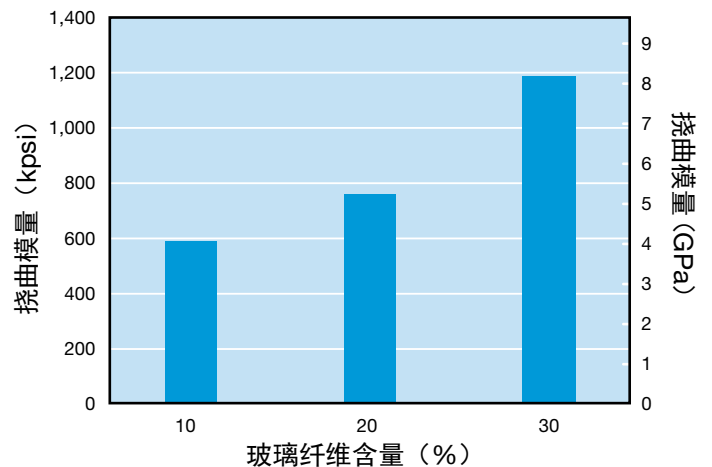


图 18: 玻纤填充的 Veradel 的挠曲模量



压缩特性

压缩强度和压缩模量的测量都是按照 ASTM D695 进行的。在此试验中把试样放在两块平行的金属板之间。对这两块金属板施加载荷，使金属板之间的距离逐渐减小，同时记录金属板间之应力以及金属板之间的距离。该试样所能承受的最大应力（通常是断裂点的载荷）就是压缩强度，而应力 / 应变曲线的斜率则是压缩模量。

Radel 聚亚苯基砜、Veradel 聚醚砜和 Udel 聚砜的压缩强度是相似的，如表 12 所示。Veradel 聚醚砜的压缩模量与 Udel 聚砜非常相近。玻璃纤维能够显著增加压缩强度，如图 19 所示。如图 20 所示，压缩模量同样也显著增加。

表 12: 纯树脂的压缩特性

特性	Udel	Veradel	Radel
强度 (MPa)	96	100	99
模量 (GPa)	2.6	2.7	

图 19: 玻纤填充的 Veradel 的压缩强度

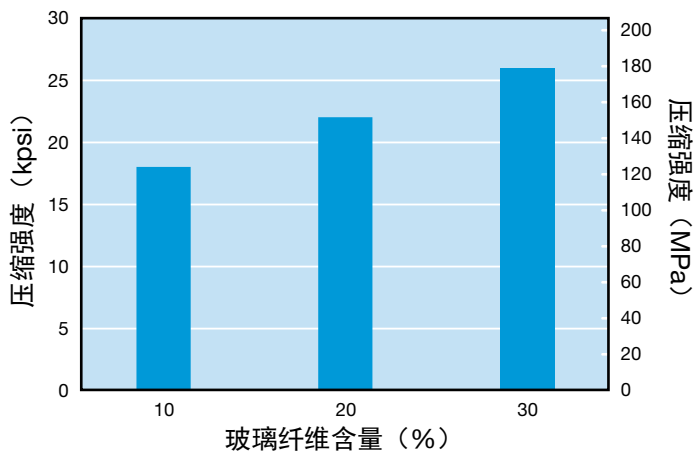
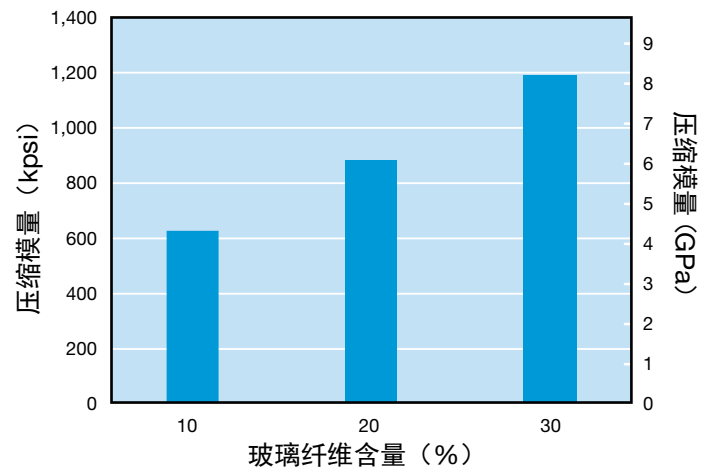


图 20: 玻纤填充的 Veradel 的压缩模量



剪切特性

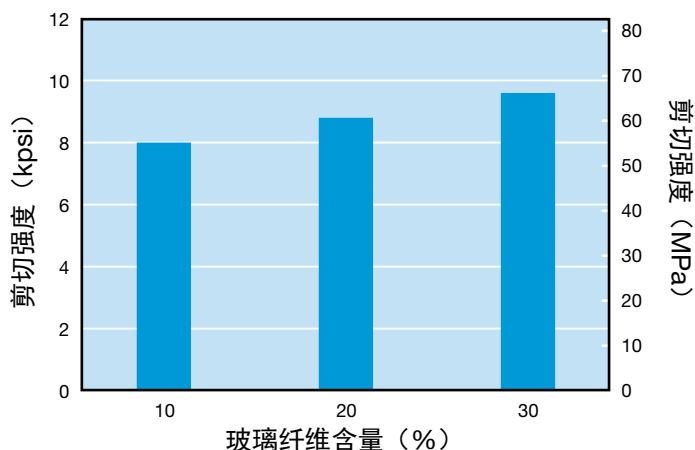
剪切特性的测量是按照 ASTM 的 D 732 试验方法进行的。该试验中把一张试样薄板放在一块钻孔的金属板上。将直径比金属板上的孔径稍小的冲子推过该材料，使能冲打出一个圆盘。其最大应力就是剪切强度。

纯聚砜塑料的剪切强度如表 13 所示。添加玻璃纤维增强可获得较高的剪切强度，如第 14 页的图 21 所示。

表 13: 纯树脂的剪切强度

	kpsi	MPa
Udel	9.0	62
Veradel	8.3	57
Radel	8.8	61
Acudel	8.4	58

图 21: 玻纤填充的 Veradel 的剪切强度



冲击特性

由于聚合物是粘弹性物，它们的各种特性与载荷的加载速率有关。当加载速率很快时，称零部件遭受到的是冲击载荷。

常见冲击载荷实例为坠落试验。在该试验中将一个塑料件从已知高度坠落到一个坚硬平坦的表面（如混凝土地面）上。如果塑料件在碰撞后不受损害，那么它就必须能够在撞击发生前吸收零件本身含有的动能。吸收能量的能力是由塑料件形状、大小、厚度及塑料的类型所决定的。目前所用的耐冲击性试验方法并不能提供设计者可用来进行分析的资料。这些试验只能用来确定相对耐冲击性以及比较材料的缺口敏感度。

缺口伊佐德

缺口伊佐德试验（ASTM D256）是最广泛使用于进行聚合物材料比较的方法之一。在该试验中，用机械在试样上加工出一个半径为 0.25 mm，深度为 2.5 mm，呈 45° 角的缺口。然后如图 22 所示用摆锤击打该缺口试样。摆锤在冲击之后会继续摆动，但由于撞击作用会使其能量减小。所失去的能量就是伊佐德（Izod）冲击强度，其单位为英尺磅/英寸板厚或焦耳/米板厚。

图 22: 伊佐德（Izod）冲击测试装置

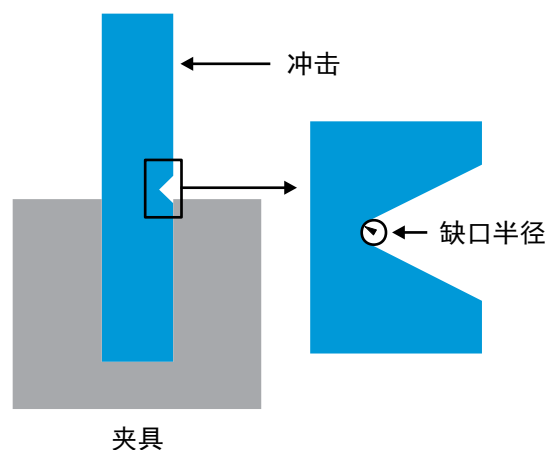
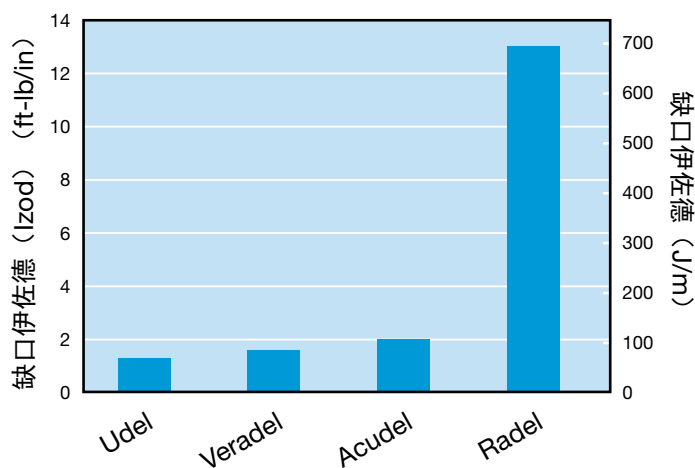


图 23: 纯树脂的缺口伊佐德（Izod）



如图 23 所示，在缺口伊佐德（Izod）方法中，Radel 聚亚苯基砜表现出了优异的耐冲击性。通常认为 Udel 聚砜和 Veradel 聚醚砜已具有良好的耐冲击性，而 Radel 聚亚苯基砜的耐冲击性则要高出一个数量级。

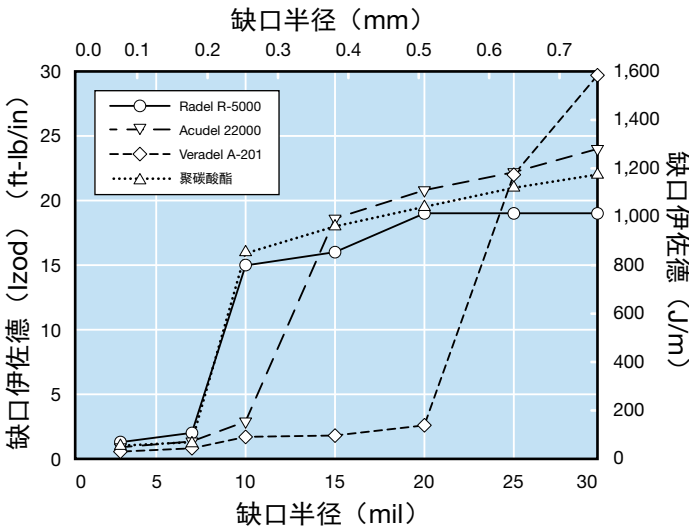
要让材料在冲击条件下受到破坏，就需要有一道裂缝形成，然后从这道裂缝向试样内蔓延。在缺口伊佐德（Izod）试验中，缺口就是起着裂缝的作用，而试验所主要测量的是材料的耐龟裂蔓延性。如果进行试验时试样上没有缺口，那它肯定会先形成裂缝然后再蔓延。聚砜塑料具有极高的抗裂缝形成能力，事实证明，纯树脂在无缺口的测试中均未发生断裂。

缺口敏感度

评估缺口敏感度的另一种方法是使用各种缺口半径来测量缺口伊佐德 (Izod)。对缺口非常敏感的材料对狭窄的缺口 (即小半径缺口) 会表现出非常强烈的负面反应。

如图 24 所示, Radel 聚亚苯基砜对由于狭窄缺口造成的特性丧失表现出了优异的抵抗能力。事实上, 它在这方面与聚碳酸酯很相似。Veradel 聚醚砜对狭窄缺口敏感, 但是当缺口半径大于 0.5 mm 时则表现出了优异的韧性。当缺口半径为 0.4 mm 或更大时, Acudel 树脂具有良好的韧性。

图 24: 缺口伊佐德 (Izod) 冲击与缺口半径的函数关系

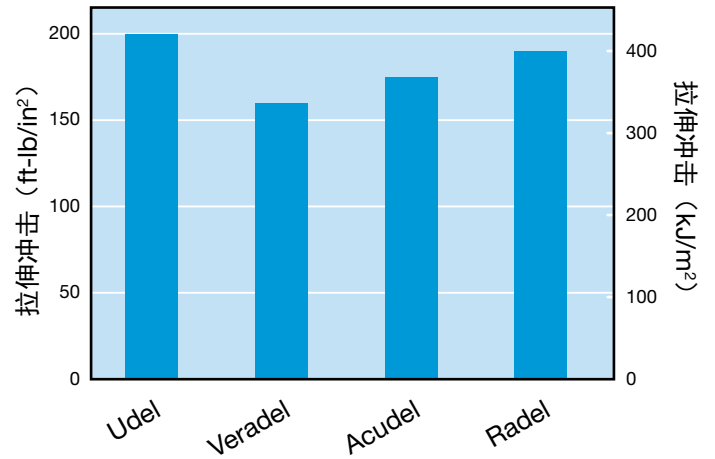


拉伸冲击

拉伸冲击和伊佐德 (Izod) 冲击试验相似, 两者都使用了摆锤。但在拉伸冲击中, 试样承受了高速的拉伸载荷, 与伊佐德 (Izod) 试验中的挠曲载荷不同。在这个试验中, 试样也没有缺口。该试验所采用的是 ASTM D1822 中所描述的方法。其试验结果能够比缺口伊佐德 (Izod) 试验更贴近实际的耐冲击性。

图 25 表明, 该试验中的三类砜类聚合物都具有良好的延展性。Acudel 树脂也具有良好的延展性。

图 25: 纯树脂的拉伸冲击强度



泊松比

泊松比是指在比例极限内横向应变与纵向应变的比值。例如, 考虑一个受到拉伸应力的圆柱形试棒, 在长度 (L) 增加的同时其直径 (D) 会减小。泊松比 (ν) 可以通过下列公式计算出来:

$$\nu = \frac{-\frac{\Delta D}{D}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

泊松比的测量是按照 ASTM E132 进行的。所得结果见表 14。

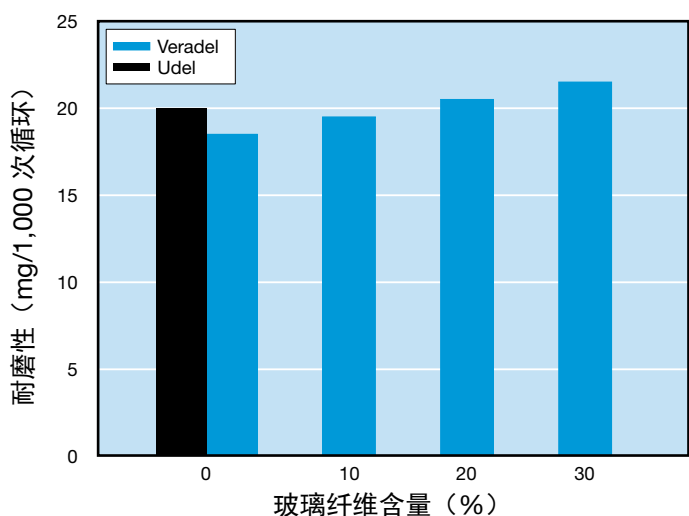
表 14: 泊松比

牌号	材料类型	ν
Radel	纯树脂	0.43
Veradel	纯树脂	0.41
Udel	纯树脂	0.37
Veradel AG-320/330	玻纤填充	0.42
Acudel 22000	玻纤填充	0.41

耐磨损性

为了评估相对耐磨损性, 使用带有 CS-17 型号轮子和 1,000 克载荷的泰伯 (Taber) 磨损测试方法。如图 26 所示, Veradel 树脂的耐磨损性与 Udel 聚砜的非常相似, 玻璃纤维增强没有明显的效果。

图 26: 耐磨性



长期特性

材料的机械特性受应变速率和载荷施加状态的影响。这些影响对于聚合物材料比对于金属更加重要，但结果相似。设计者必须注意到，持续的应力所产生的形变会比由短期模量所预测的形变更大。用户也须认识到循环载荷的影响。这部分提供的是关于疲劳和蠕变的资料。

蠕变

当一根棒状聚合物材料受到持续恒定应力的作用时，其尺寸会由于受应力的作用而产生变化。这种现象通常被称为“蠕变”。在最简单的拉伸状态下，试棒在所受应力下会随作用时间而伸长。术语“应变”就是用来描述这种情况的，它的数值是将长度的增加量或长度的增加量除以原始长度。

蠕变可以在弯曲或挠曲状态下，或者在压缩状态下观察到或测量到。在挠曲状态下，应变是指弯曲的外层表面所伸长的量。在压缩状态下，试棒实际上会缩小，而应变值就是指缩小的量。

本手册所提供的蠕变资料是在拉伸状态下建立起来的。

蠕变模量

当在设计部件时，常考虑到材料的强度、刚性及耐冲击性等短期特性。通常会计算出部件的最大形变量，因为形变会影响其功能。当部件持续或长期受到应力的作用，其形变程度会比根据短期特性预测的值要大。

应用蠕变模量可以准确地预测形变。蠕变模量值可以这样计算出：让试样受力一定时间后，把所施加的应力除以测得的应变即得此数值。使用蠕变模量可以更准确地预测材料在长期受力后的形变值。

图 27 提供了当 Veradel 聚醚砜在 20.7 MPa 应力条件下进行测试时，模量数据随时间的变化情况。尺寸变化或蠕变程度也是温度的函数。当测试温度增加时，模量降低。

Radel 聚亚苯基砜的蠕变模量见图 28。Radel 树脂具有出奇好的抗蠕变性，特别是在高温条件下。

图 27: Veradel A-201 的蠕变模量

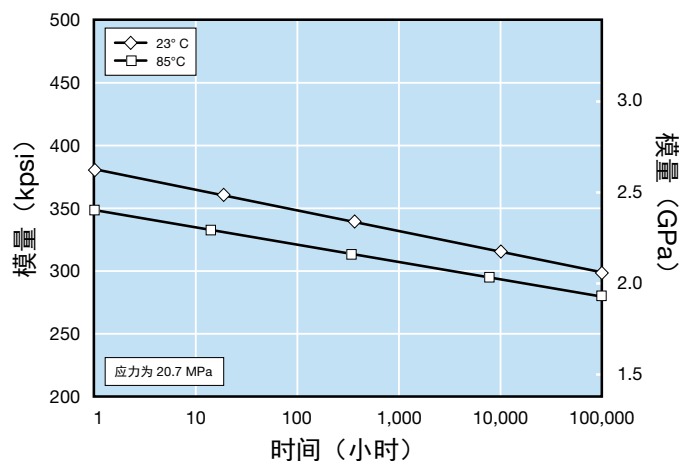
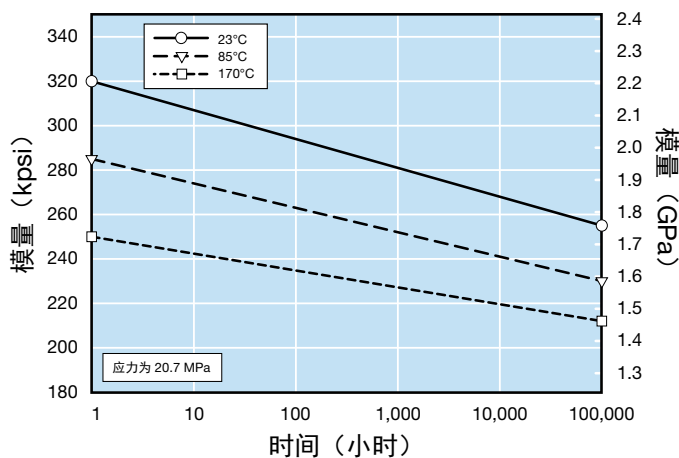


图 28: Radel R-5000 的蠕变模量



同步应力-应变曲线

提供蠕变数据的另一种方法是同步应力-应变图。将每隔一定的时间间隔得到的应变做图，即可得到同步图。这种方法的优点是它能够提供大量数据的简要总结。任意一点的表观模量都可通过将所得到的应变去除应力而获得（请注意，图中以百分数显示应变；实际应变值等于图中数值除以 100）。

图 29 显示了 Veradel 聚醚砜在承受 100 小时持续加载的载荷条件下的应力 / 应变曲线。任意一点的表观模量都可通过将所指示的应变去除应力而获得。

图 30 提供了玻纤增强的纯 Radel 树脂的同步曲线。

图 29: Veradel A-201 的同步应力-应变曲线

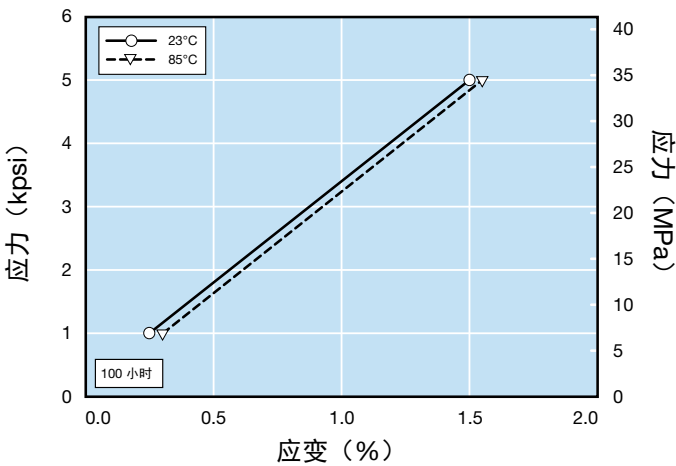
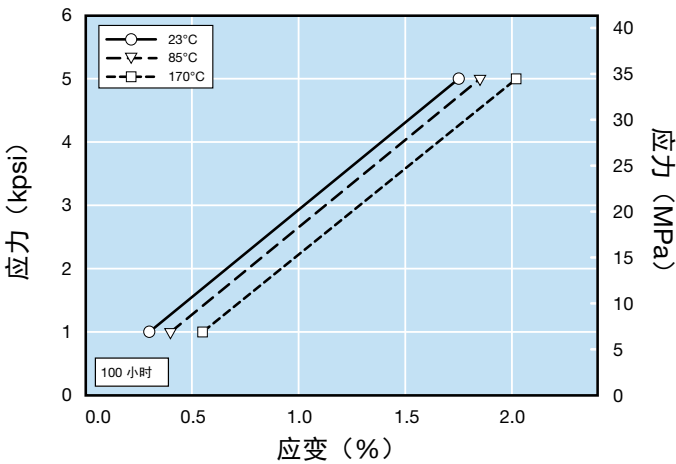


图 30: Radel R-5000 的同步应力-应变曲线



疲劳

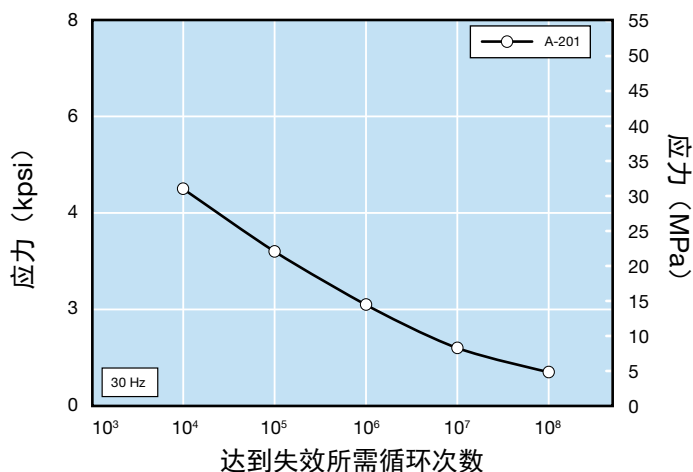
当材料受循环应力作用时，材料会在低于其短期极限强度的应力水平下发生破坏或断裂。涉及循环应力应用的一个典型范例是齿轮。当主动齿轮转动并带动从动齿轮转动时，每个轮齿都会按照先后顺序受到应力，然后是一段应力较低或者为零的时间，随后在轮齿啮合时再次受到应力。尽管对于循环载荷来讲并不明显，但许多应用都具有疲劳的方面。其它范例包括引导转轴的轴衬、承受振动的部件以及泵或压缩机中的任何转动的部件。

这种现象在金属中众所周知，而且冶金学家已经定义了“疲劳耐受限度”这个术语来表示某种金属在具有无限生命的情况下可以承受的最大循环应力。这个应力水平通常对应于在 1000 万次 (10^7) 循环载荷之内不会导致破坏的最高应力水平。尽管在涉及到塑料材料的设计讨论中会用到“疲劳耐受限度”这个术语，但塑料对循环应力的反应比金属复杂，因此对耐受限度没有严格的定义。

当测量和 / 或比较塑料材料的疲劳强度时，指明状态（拉伸、压缩或挠曲）、频率以及应力情况很关键。疲劳耐受数据是使用美国材料试验协会的试验方法 ASTM D671 得出的。这种方法使用了施力幅度恒定的悬臂梁构型。具体数据为：“A”类试样，30 Hz 的频率，并采用型号为 SF-01-U 的 Sontag 通用试验机。

纯的和玻纤增强牌号的 Veradel 聚醚砜的挠曲疲劳耐受曲线如第 18 页的图 31 所示。尽管这些试验只是对 Veradel A-201 塑料系列产品进行的，A-301 塑料系列产品预计也会得到类似的结果。

图 31: Veradel 的挠曲疲劳耐受



热特性

材料对环境温度影响所产生变化的方式称为该材料的热特性。这些响应包括强度和刚性的变化、尺寸的变化、因热分解或氧化分解所造成的化学变化；软化、熔化、畸变；因温度改变产生形态改变及一些简单变化。材料在熔化时的各种特性将在加工一节中讨论，材料在燃烧时的各种行为将在燃烧特性一节中讨论。

玻璃转化温度

一般情况下，聚合物材料在受热后刚性会逐渐降低，直到转变为橡胶态。材料从玻璃态转化为橡胶态时的温度被定义为玻璃转化温度 (T_g)。由于在该温度下材料会发生一些根本变化，所以该温度非常重要。这些变化包括聚合物的自由体积、折射率、焓及比热的变化。下表列出了 Radel 聚亚苯基砜、Veradel 聚醚砜和 Udel 聚砜的玻璃转化温度。Radel 和 Veradel 树脂的玻璃转化温度比 Udel 聚砜高出 35°C 。这一差别表明其具有更好的热性能。

表 15: 玻璃转化温度

材料	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{F}$
Radel	220	428
Veradel	220	428
Udel	185	365

玻璃转化温度是指在热容开始变化时由示差扫描量热法所测得的温度。通常将所测得的温度约到其最接近的 5°C 。

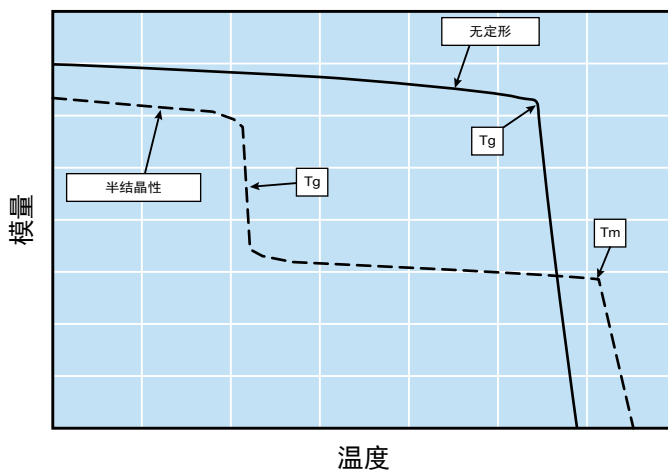
机械特性的变化

随着环境温度的升高，热塑性材料会越来越软，直至变成流体。在变成流体之前，可通过将弹性模量与环境温度作图来监测材料的软化情况。

热塑性树脂的分类

热塑性材料通常可分为两大类：无定形和半结晶性。图 32 显示了这两种塑料类型通常随温度的变化情况而不同。在到达玻璃转化温度 (T_g) 前，无定形塑料的模量一般随温度的升高慢慢减小。无定形塑料一般不在高于其玻璃转化温度的环境温度条件下使用。在到达玻璃转化温度前，半结晶性塑料模量的变化一般与无定形塑料相同。而在 T_g ，其模量很快降到一个较低的值，但会保持在这个新值附近直至到达其熔点 (T_m)。半结晶性塑料常常会在环境温度高于其玻璃转化温度但低于其熔点的情况下使用。

图 32: 模量随温度的典型变化

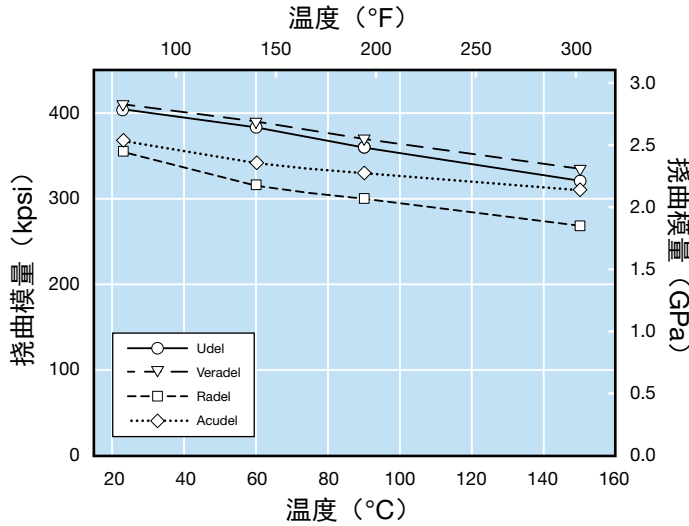


温度对模量的影响

Radel 聚亚苯基砒、Veradel 聚醚砒和 Udel 聚砒都是无定形塑料。温度对它们挠曲模量的影响如图 33 所示。

在这三种砒类聚合物当中，Veradel 聚醚砒的最初模量最大，温度升高以后的模量仍然最大。

图 33: 纯树脂的挠曲模量与温度的关系



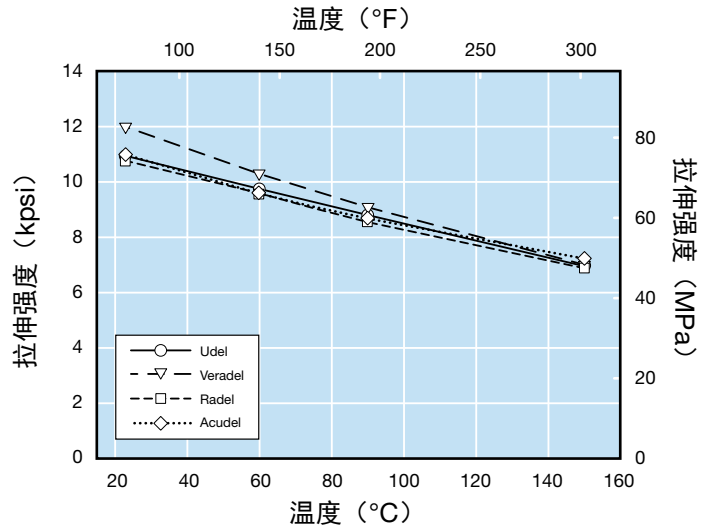
温度对拉伸强度的影响

环境温度升高时，材料的刚性会降低，强度也会降低。图 34 显示了温度对纯聚砒拉伸强度的影响。

载荷下变形温度

短期热性能的一种量度是采用 ASTM 试验方法 ASTM D648 中所描述的挠曲载荷试验所测得的变形温度。在该试验中，要求把长为 127 mm 的试棒放在两个相隔 102 mm 的支撑物上。给试棒施加载荷，使其纤维应力达到 0.45 MPa 或 1.8 MPa。当温度以指定的速率升高时，监测试棒的纵向形变。当纵向形变达到 0.25 mm 这个规定的终点时，记录下此时的温度。这个温度就是热变形温度，或 HDT。该试验实际所测量的是，当试验应力为 0.45 MPa 时材料的挠曲模量大约是 240 MPa，或者当试验应力为 1.8 MPa 时材料的挠曲模量大约是 965 MPa 的情况下的变形温度。

图 34: 纯树脂的拉伸强度与温度的关系



试验变量

某些试验参数会对结果有重大影响，设计者应该认识到这些影响。这些试验参数是试样厚度和受热历程。本试验所采用的试样是注塑成型的长方形截面试棒，厚度为 3.2 mm 或 6.4 mm。本试验可以在刚完成模塑时或者是在热处理或退火之后进行。Udel 聚砒的退火条件为 170°C，1 小时；Veradel 或 Radel 树脂的退火条件为 200°C，1 小时。

注塑成型条件会影响模塑应力水平，从而影响刚完成模塑的试棒的表现变形温度。退火会降低模塑应力，并且通常会使得所测得的变形温度值升高。刚完成模塑的试样和完成退火的试样的变形温度是不同的，其差异受模塑应力值的影响，使用较细的试棒时模塑应力值通常比较高。因为变形温度的测量值随着模塑应力值的变化而变化，所以通常进行退火处理，以获得可再现的值。退火值比刚完成模塑的值能够更加精确反映出塑料的热性能。

退火和试样厚度对纯树脂的影响程度较大。使用玻纤填充塑料得到的结果受这些变量的影响较小。

热变形温度比较

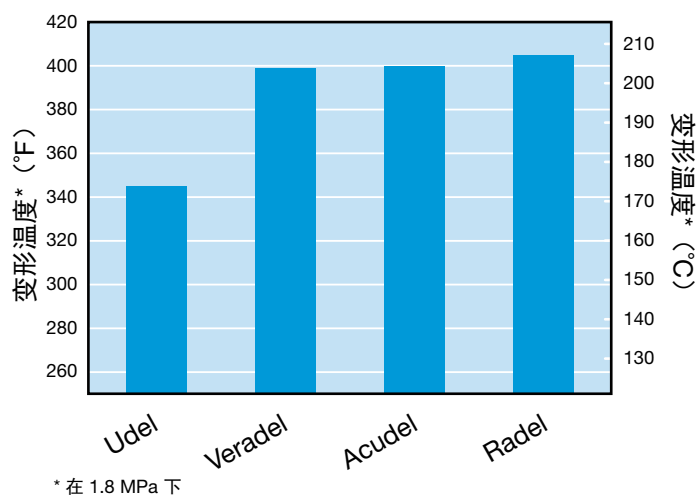
与 Udel 聚砒相比，Radel 聚亚苯基砒和 Veradel 聚醚砒具有更好的热性能。

表 16 包含了纯的 Radel、Veradel 和 Acudel 树脂以及玻纤填充的 Veradel 在两种应力水平下的变形温度数据（试棒厚度为 3.2 mm，已退火）以及玻纤填充的 Radel 树脂的变形温度数据。

材料	应力 (MPa)			
	0.45		1.82	
	°C	°F	°C	°F
Radel				
R-5000	214	417	207	405
RG-5030			210	410
Veradel				
A-201, A-301	214	417	204	399
AG-320	218	424	214	417
AG-330	220	428	216	420
Acudel				
22000			197	387

图 35 比较了纯的 Udel 聚砜、Veradel 聚醚砜、Radel 聚亚苯基砜和 Acudel 改性聚亚苯基砜的热变形温度。Radel 和 Veradel 树脂的热变形温度均比聚砜高出约 30°C。Radel 聚亚苯基砜的热变形温度比 Veradel 聚醚砜高出约 3°C。

图 35: 纯树脂的变形温度



热膨胀系数

随着温度的升高，大多数材料的尺寸都会增大。尺寸增大的量由下式给出：

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

其中：L₀ 是原始长度，而 ΔL 和 ΔT 则分别是长度和温度的变化值。线性热膨胀系数 (α) 的测量依照 ASTM D696 进行。

表 17 所列为 Radel、Veradel 和 Acudel 树脂及一些常见金属的线性热膨胀系数。当把具有不同热膨胀系数的材料连接组成构件时，就会产生热应力。根据表 17 中的数值，设计工程师应当能计算出由于热膨胀所导致的任何热应力的大小。

材料	μm/m °C	μin/in °F
Veradel A-201	49	27
Veradel AG-320	31	17
Veradel AG-330	31	17
Radel R-5000	56	31
Radel RG-5030	18	10
Acudel 22000	63	35
锌压铸合金	27	15
铝压铸合金	25	14
不锈钢	18	10
碳钢	14	8

*沿流动方向测量

导热率

聚合物材料一般是热的不良导体。对于许多应用而言这是所期望的，因为聚合物材料可以被用于提供热绝缘。表 18 列出了 Radel、Veradel、Acudel 和 Udel 塑料及一些其它常用材料的相对导热率，它们是采用 ASTM E1530 测量得到的。

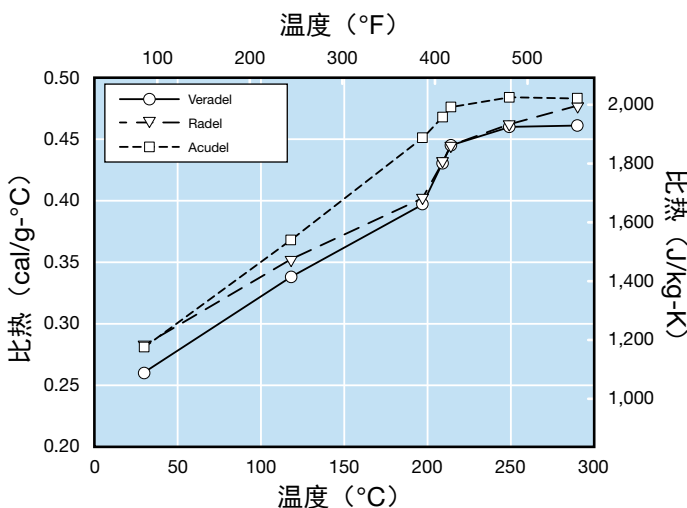
表 18: 导热率

材料	导热率	
	Btu-in/hr-ft ² F	W/m-K
Udel P-1700	1.80	0.26
Veradel A-201	1.66	0.24
Veradel AG-330	2.08	0.30
Radel R-5000	2.08	0.30
Acudel 22000	1.66	0.24
不锈钢	140-250	20-36
碳	36-60	5-9
木料 (碎木板)	12	1.7
橡胶	1.00	0.14

比热

比热是指将一个单位质量的物体的温度改变 1°C 所需要的热量。这个特性是使用美国材料试验协会 (ASTM) 的试验方法 E1269 测得的。图 36 表明, Radel 和 Veradel 树脂的比热是温度的函数, 并且当温度处于玻璃转化温度时比热会发生明显的变化。Acudel 改性聚亚苯基砜的比热也随温度而改变, 但其变化更平缓一些。

图 36: 比热



燃烧特性

UL 94

试样厚度为 1.6 mm 的 Veradel 纯树脂被认定为 94 V-0 级。试样厚度为 0.8 mm 的玻纤增强牌号被认定为 94 V-0 级。试样厚度为 0.8 mm 的 R-5000、R-5100 和 R-5500 牌号的 Radel 都被认定为 94 V-0 级。

氧指数

ASTM D2863 将氧指数定义为: 在该试验方法所规定的条件下, 支持最初处于室温下的材料有焰燃烧的氧氮混合气中氧气的最低浓度 (以体积百分比表示)。

由于平常的空气中含有大约 21% 的氧气, 如果一种材料的氧指数略高于 21, 那么就可以认为这种材料具有耐燃性, 因为它只能在富氧的气氛中燃烧。Radel、Acudel 和 Veradel 树脂具有内在的阻燃性, 这可以从表 19 中的氧指数看出。

表 19: Radel、Veradel 和 Acudel 树脂的氧指数

材料	氧指数
Veradel AG-320 20% GR 树脂	40
Veradel AG-330 30% GR 树脂	40
Radel R-5000	44
Acudel 22000	38

自燃温度

材料的自燃温度是指: 在没有点火源的情况下, 由试样的自热特性引起点火或引起自身起火 (表现为爆炸、火焰或持续发光) 的最低环境空气温度。该特性是采用 ASTM D1929 方法测得的。

Veradel 聚醚砜的自燃温度是 502°C。

烟气密度

材料在燃烧时会产生烟气。在许多应用中, 所产生烟气的量和密度都是很重要的。美国材料试验协会 (ASTM) 的试验方法 E662 提供了一种评估相对烟气密度的标准方法。该试验最初是由美国国家标准局 (NBS) 开发的, 因而常常被称为 NBS 烟气密度试验。

表 20 中的数据就是用该燃烧条件得出的。采用一个六管燃烧器让一排小火焰接触试样的整个底边。用一个垂直瞄准的光度测量系统, 测量烟气积累时的透光率。从透光率即可计算出比光密度 (D_s)。最大光密度用 D_m 表示。

这些数据表明, Radel 聚亚苯基砜和 Veradel 聚醚砜均只产生极低烟气。

热稳定性

热重分析

表 20: 烟气密度

测量参数	Veradel	Radel
1.5 分钟时的 D_s	0	0.3
4.0 分钟时的 D_s	1.0	0.4
D_m	5-15	35
试样厚度 = 1.6 mm		

热重分析是评估材料热稳定性的方法之一。在该试验中，将少量的材料试样加热，同时持续监测其重量的变化。通常要分别在惰性的氮气中及空气中进行试验。试验结果之间的差异能够体现氧气在热分解中的重要作用。

图 37 和 38 分别显示了对 Radel 聚亚苯基砒、Veradel 聚醚砒和 Udel 聚砒在氮气中和空气中以每分钟 10°C 的速率进行加热而得到的热重分析结果。结果表明，所有五种塑料都具有优异的热稳定性。在 427°C 下没有发生明显的重量损失，这比推荐的最高加工温度高出了 28°C 。表 21 给出了发生所列出的重量损失时的温度。从这些数据可清楚地看到，在所有进行试验的塑料产品中 Radel 聚亚苯基砒的热稳定性最好。

表 21: 热重分析的详细情况

	失重			
	1%	2%	5%	10%
氮气中的温度 ($^{\circ}\text{C}$)				
Udel	480	489	500	509
Veradel	472	487	511	530
Radel	504	519	541	556
Acudel	491	498	512	521
空气中的温度 ($^{\circ}\text{C}$)				
Udel	470	487	502	513
Veradel	472	487	506	525
Radel	496	514	537	558
Acudel	476	491	508	519

图 37: 氮气中的热重分析

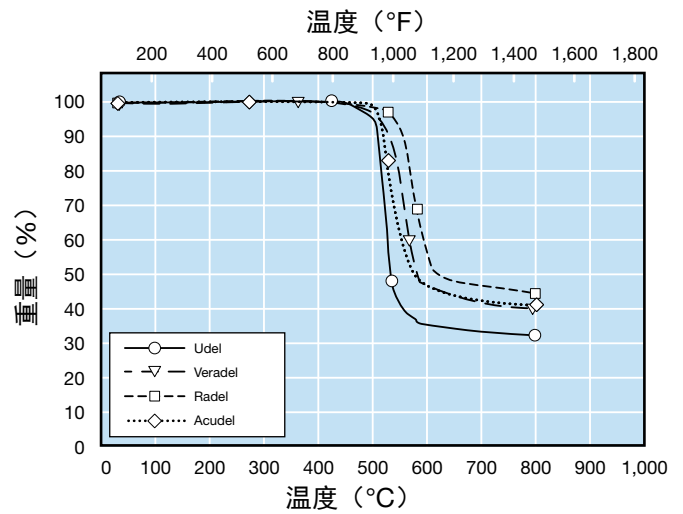
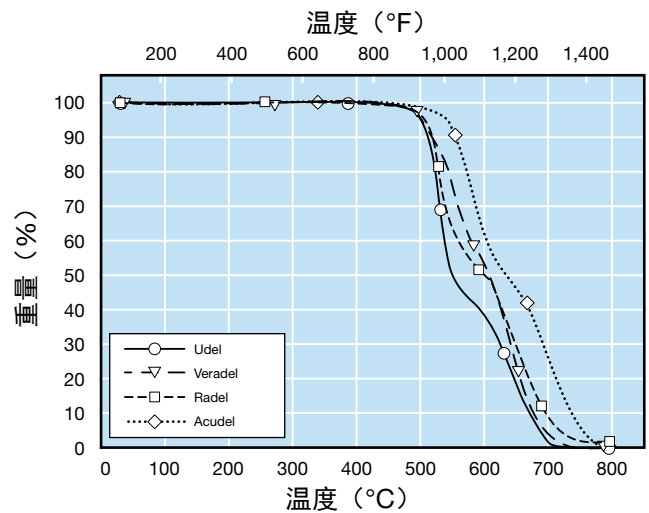


图 38: 空气中的热重分析



热老化

聚合物的可承受长期使用温度受其热氧化稳定性的限制。为了评估高环境温度对 Veradel 聚醚砜特性的长期影响，在烘箱内对试样进行了多种不同温度的老化试验。周期性地将样棒取出，并在室温下测试其拉伸强度。图 39 显示了对纯 Veradel 树脂进行测试所得到的结果。作为比较，图中还包括了聚醚酰亚胺 (PEI) 的测试数据。Veradel 聚醚砜的热稳定性优于聚醚酰亚胺。

对 Radel 树脂的热老化特征的评估正在进行之中。目前已得到的结果如图 40 所示。很明显，Radel 聚亚苯基砜在老化测试中表现出了曾在 TGA 中所表现出的较好的热稳定性。

图 39: Veradel 和 PEI 的热老化

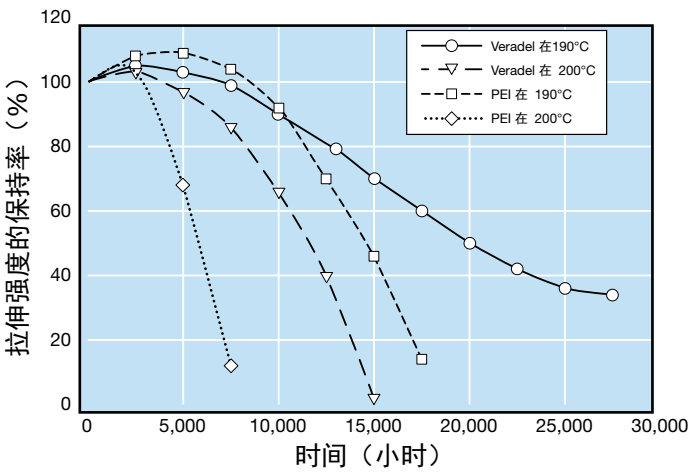
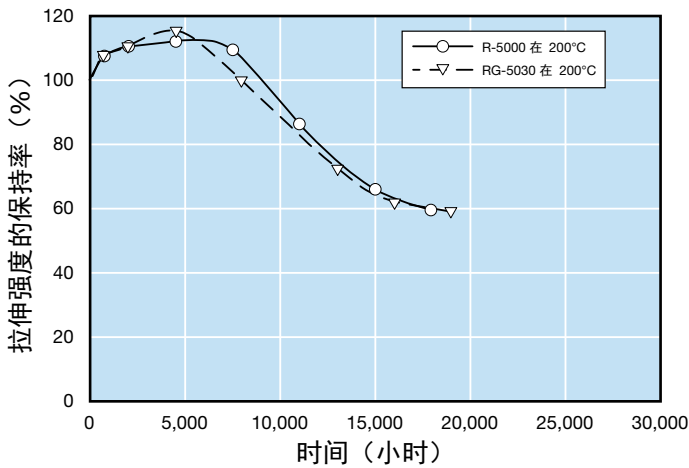


图 40: Radel 聚亚苯基砜的热老化



UL 相对热指数

按照保险商实验所 (UL) 的 746B 标准，可利用类似于前面介绍的热老化数据来建立相对热指数 (RTI)。采用此方法可以确定材料在暴露于特定温度下 100,000 小时后仍然具有百分之五十其原始特性时的温度。此指数温度通常被认为是最高连续使用温度。表 22 给出了保险商实验所 (UL) 指定的 Radel 和 Veradel 热指数。欲获得最新的完整资料，请访问保险商实验所 (UL) 的网站: www.ul.com。

表 22: 按照 UL 746B 的相对热指数

	厚度 (mm)	电 (°C)	机械 (°C)	
			冲击	强度
Radel 聚亚苯基砜				
R-5000	0.75	160	160	160
	1.5	160	160	160
	3.0	160	160	160
R-5100	0.36	160	160	160
	0.75	160	160	160
	1.5	160	160	160
	3.0	160	160	160
	0.79	160	160	160
	0.75	160	160	160
R-5800	1.5	160	160	160
	3.0	160	160	160
	3.0	160	160	160
Veradel 聚醚砜				
A-201	0.8	180	170	180
	1.5	180	170	180
	3.0	180	170	180
A-301	0.8	180	170	180
	1.5	180	170	180
	3.0	180	170	180
A-702	1.5	180	170	180
	3.0	180	170	180

电特性

热塑性树脂的许多应用依赖于其作为电绝缘体的功能。一些试验方法可供设计者对某一特定塑料的绝缘性能进行判断。

介电强度

介电强度是材料抵抗高电压而不产生介电击穿能力的量度。将试样放置在电极之间，并通过一系列步骤升高所施加的电压直到发生介电击穿，以此测得介电强度。尽管所得结果以 **kV/mm** 为单位，但并不表明这与试样的厚度无关。因此，只有在试样厚度相同的条件下得到的各种材料数据才有可比性。

体积电阻率

体积电阻率的定义是材料每单位立方体积的电阻。该试验是按以下方式进行的：将材料在 **500 伏特** 电压下保持 **1 分钟**，并测量所产生的电流。体积电阻率越高，材料用作电绝缘部件的效能就越高。

介电常数

介电常数被定义为，用所试验材料作为电介质制得的电容器的电容与由真空取代电介质制得的相同电容器的电容之间的比率。绝缘材料用于两种截然不同方式：1) 用于支持部件并使它们相互之间隔离或与地隔离，和 2) 用作电容器的电介质。在第一种情况下，期望材料具有低的介电常数。在第二种情况下，高的介电常数则可使电容器的物理形体更小些。

损耗因子

损耗因子（也指损耗正切或 $\text{tg } \delta$ ）是交流电能被转换为热能的介电损耗（耗散的能量）的量度。在一般情况下，期望损耗因子低。

UL 746A 短期特性

标题为“聚合物材料短期特性评估标准”的保险商实验所（UL）746A 标准中包括了某些电特性，而这些电特性在性能级别分类表中也有所报告。对于每一试验，UL 都有特定的试验结果范围以及相应的性能级别分类。所期望的或最佳性能的 PLC 值被指定为 **0**。因此，该数值越低，材料的性能越好。

高压、低电流干态耐电弧性

该试验是测量某一绝缘材料抵抗由局部的热分解以及化学分解和腐蚀形成导电通路的时间。该试验（ASTM D495）旨在接近电流通常限制在 **0.1 安培** 以下的高压下工作的交流回路的工作条件。

相对漏电起痕指数 (CTI)

该试验所确定的是，试样在每 **30 秒 1 滴** 的速率下经受 **50 滴** 电解液的作用后，形成永久导电通路所需的电压。该试验被用来测量某一绝缘材料对起痕的敏感度。

表 23: Radel、Veradel 和 Acudel 树脂的电特性

	介电强度 ASTM D149	体积电阻率 ASTM D257	介电常数 ASTM D150			损耗因子 ASTM D150		
	kV/mm	ohm-cm	60 Hz	1 KHz	1 Mhz	60 Hz	1 Hz	1 Mhz
Veradel								
A-201A, A-301A	15	1.7×10^{15}	3.51	3.50	3.54	0.0017	0.0022	0.0056
AG-320	17	$>10^{16}$	3.84	3.84	3.88	0.0015	0.0018	0.0081
AG-330	17	$>10^{16}$	4.11	4.11	4.17	0.0019	0.0018	0.0094
Radel								
R-5000, R-5100, R-5500, R-5800	15	9×10^{15}	3.44	3.45	3.45	0.0006		0.0076
Acudel								
Acudel 22000	18	$>9 \times 10^{15}$			3.40			0.0080

表 24: 按照 UL 746A 的 Radel 和 Veradel 树脂电特性*

	厚度 (mm)	D 495, 弧		CTI, 伏		HVTR		HWI, sec		HAI, 弧	
		数值范围*	数值范围*	数值范围*	数值范围*	数值范围*	数值范围*	数值范围*	数值范围*	数值范围*	
		弧	0-7	伏	0-5	mm/min	0-4	秒	0-5	弧	0-4
Veradel											
A-201, 301	0.8					147	3	13	4	13	4
	1.6					99	3	25	3	11	4
	3.2	94	6	155	4	97	3	85	1	20	3
AG-320	0.8							13	4	4	4
	1.6							25	3	4	4
	3.2	94	6	140	4	97	4	85	1	4	4
AG-330	0.8							48	2	4	4
	1.6							77	1	4	4
	3.2	121	6	140	4	203	4	96	1	4	4
Radel											
R-5000	0.8							>150	0	>150	0
	3.2	135	5	62	5	0	0				

* 0 = 最好

高压电弧起痕率 (HVTR)

该试验所确定的是绝缘材料在高压、低电流电弧作用下表面起痕或形成明显碳化导电通路的敏感度。高压电弧起痕率是材料在标准试验条件下，表面能够产生导电通路的速率，其单位为毫米/每分钟。

热丝点燃 (HWI)

该试验所确定的是塑料材料抵抗被电热丝点燃的能力。在一定的操作或故障情况下，部件会变得异常热。当这些受热过度的部件与绝缘材料紧密接触时，绝缘材料可能会被点燃。试验的目的就是要确定在这种条件下绝缘材料抵抗被点燃的相对能力。

大电流电弧点燃 (HAI)

该试验对绝缘材料抵抗电弧点燃的相对能力进行测量。在某些条件下，绝缘材料可能会处于电弧放电的环境中。如果电弧放电的强度剧烈并持久，绝缘材料会被点燃。

耐环境性

水解稳定性

水解稳定性可定义为耐水解或耐水侵蚀的能力。因此，水解稳定性是耐化学性中的一种特殊情况。由于水的普遍存在性以及对于许多聚合物具有侵蚀性，水解稳定性就显得特别重要。测试水解稳定性的一个快速方法是将材料浸渍在沸水中。如表 25 所示，聚砜具有优异的耐水解性。在砜类聚合物中，Radel 聚亚苯基砜表现优异。

表 25: 耐沸水侵蚀性

牌号	拉伸 强度	拉伸 伸长率
Udel	113	21
Veradel	94	8
Radel	99	105

10 天之后的特性保持率 (%)

在管道应用中，水解稳定性非常重要。为了了解长期与热水接触对 Radel R-5000 聚亚苯基砜和 Acudel 22000 产生的影响，我们曾进行了长期的研究。对刚完成模塑的两种塑料的机械特性进行了测定。然后将用这些材料模塑而成的试样与 60°C 和 90°C 的水接触长达 8,000 小时 (333 天)。在接触之后，对试样的机械特性进行了测试。将最终值除以接触之前的值，再乘以 100，即是每一种特性的百分保持率。

研究结果归纳于表 26。Radel R-5000 和 Acudel 22000 的各项特性基本上没有受到与热水接触的影响。唯一明显下降的特性是断裂伸长率，可以将其理解为脆化的表现。但是，冲击强度试验表明材料保持了良好的耐冲击性，说明实际韧性得到了保留。

表 26: 长期与热水接触的影响*

	Acudel 22000		Radel R-5000	
	60°C	90°C	60°C	90°C
拉伸强度	100.0	104.7	97.2	99.9
拉伸模量	90.2	91.9	95.7	94.1
屈服伸长率	92.5	85.0	92.5	85.0
断裂伸长率	56.9	34.7	100.8	30.9
挠曲强度	100.9	105.5	102.0	105.3
挠曲模量	108.2	111.6	103.9	106.0
缺口伊佐德	64.3	53.6	100.8	117.6
器械坠落冲击	112.9	114.5	102.9	102.9

* 16,000 小时之后的特性保持率 (%)

蒸汽消毒分析

因为高压蒸汽消毒锅被广泛应用于医疗装置的消毒，所以耐蒸汽消毒的能力对于在医疗装置中的应用十分重要。

为了用一种与实际应用相一致的方法评估这种特性，向蒸汽中加入吗啉来模拟典型的消毒锅添加剂，并将试棒置于悬臂梁，使其承受 6.9 MPa 的外层纤维应力，模拟在大多数部件中常见的残余应力或模塑应力。

本试验是在温度为 132°C，蒸汽压为 2 巴的高压蒸汽消毒锅中进行的。蒸汽中吗啉的含量为 50 ppm。试样是尺寸为 127 x 13 x 3 mm 的模塑试棒。

评估的结果列于表 27 中。

表 27: 耐高压蒸汽能力

牌号	至出现微裂纹所需循环次数	至断裂所需循环次数
Udel	80	150
Veradel	100	275
Radel	>1,000*	>1,000*

*试验在进行了 1,000 次循环之后停止；既没有断裂，也没有出现微裂纹。

耐化学性

在一般情况下，聚砜塑料具有良好的耐化学性，尤其是对水溶液。表 28 给出了它们对于各种常用试剂的相对耐化学性的一般指标。聚砜塑料产品系列以及聚醚酰亚胺塑料都具有极好的耐酸性水溶液能力。对于能够强烈侵蚀聚醚酰亚胺的苛性碱液，砜类聚合物也具有耐腐蚀性。

Radel 聚亚苯基砜也表现出了在高温下具有卓越的耐含氯水的能力。暴露于游离氯水平为 5 ppm，温度为 90°C 的循环用水环境中 1500 小时，并没有造成塑料拉伸强度或试棒重量的下降。其它工程塑料，包括聚酰胺 66 和一种脂肪族聚酮树脂在类似的测试中表现出了明显的重量损失。

一些氯化烃类是砜类聚合物和聚醚酰亚胺的溶剂，而另一些氯化烃类则可能引起不同程度的环境应力开裂。一般情况下，此类化学品与这些塑料不相容。但是，Radel 聚亚苯基砜则具有最好的耐受性。

芳香溶剂和氧化溶剂，如酮和醚，可以造成砜类聚合物和聚醚酰亚胺的应力开裂。在这一组塑料中，Radel 聚亚苯基砜则显示出了最好的耐受性。玻璃纤维增强牌号的 Radel 树脂可以应用于众多此类环境中并且不会发生应力开裂。

表 28: 耐化学性的一般指标*

试剂	Udel	Veradel	Radel	PEI
正丁烷	G	E	E	E
异辛烷	G	E	E	E
苯	P	P	F	P
甲苯	P	P	F	P
乙醇	G	E	E	E
丁酮	P	P	P	F
2-乙氧基乙烯	P	P	G	F
1,1,1-三氯乙烷	P	P	G	F
四氯化碳	P	G/E	E	E
盐酸 (20%)	E	E	E	E
醋酸 (20%)	E	E	E	E
硫酸 (20%)	E	E	E	E
氢氧化钠 (10%)	E	E	E	P

* 接触情况: 在室温下浸渍七天。

等级体系

E = 优: 极少或没有影响

G = 良: 特性丧失程度不严重

F = 尚可: 有些不利影响, 但仍保持某些有用的特性

P = 差: 受到严重侵蚀或断裂

Radel 的耐化学性

因为筛选试验表明 Radel 聚亚苯基砜具有优异的耐化学性, 因此对其进行了更加广泛的测试。将 Radel 聚亚苯基砜试样于室温下在多种试剂中浸渍七天。通过测量重量的变化以及观察外观的变化, 监测试剂对其所产生的影响。评估的结果列于第 28 页的表 29 中。通过对这些数据的总结表明: 除了酮以外, Radel 聚亚苯基砜不会严重受到有机物的影响。在进行试验的无机物中, 只有高浓度的强酸对其具有不良的影响。同时对几种在运输领域中常见的功能性流体进行了试验。其中只有 Skydrol® 500B 飞机液压液能够引起微裂纹。

表 29: 浸渍情况下 Radel 树脂的耐化学性*

试剂	浓度 (%)	重量变化 (%)	注释
有机物			
1,1,1-三氯乙烷	100	+0.0	无变化
丙酮	100	+9.0	表面变软
苯	100	+0.7	变混浊
丁醇	100	-0.0	无变化
乙酸丁酯	100	+0.0	无变化
卡必醇溶剂	100	-0.0	无变化
四氯化碳	100	+0.0	无变化
环己烷	100	+0.0	无变化
乙醇	100	+0.3	黑点
乙酸乙酯	100	+3.7	边缘变白
乙二醇	100	-0.4	无变化
甲醛	40	+0.4	无变化
丙三醇	100	-0.0	无变化
甲醇	100	+0.9	变混浊
甲苯	100	+0.8	变白
冰醋酸	100	+0.0	轻微受侵蚀
醋酸酐	100	+1.0	出现微裂纹
柠檬酸	100	+0.5	无变化
蚁酸	10	+0.6	无变化
无机物			
盐酸	20	+0.2	无变化
盐酸	37	+0.2	被漂白
硝酸	20	+0.5	无变化
硝酸	71	+26.9	不透明开裂
十八烯酸	100	0.0	无变化
氢氧化钾	10	+0.5	无变化
氢氧化钠	10	+0.5	无变化
硫酸	50	+0.1	无变化
硫酸	97	-11.3	被侵蚀
功能性流体			
制动液	100	-0.2	变混浊
汽油	100	+0.1	无变化
LO-1 液压油	100	+0.0	无变化
JP-4 喷气发动机燃料	100	+0.0	变混浊
煤油	100	+0.0	无变化
10W-40 机油	100	+0.0	变混浊

*在室温下七天

耐应力开裂

为了评估 Radel 树脂耐环境应力开裂的能力，把 127 mm 长，13 mm 宽，3.2 mm 厚的试样夹在弧形的夹具上。夹具的半径诱使试样产生应变。根据每一材料的拉伸模量计算得到相应的应力。然后将试剂施加于被夹具夹住的试样的中心部位。接触 24 小时后，检查试样被腐蚀的痕迹，并确定等级。表 30 定义了在下文的耐环境应力开裂能力表中所出现的等级。

表 30: 耐环境应力开裂能力表中的符号说明

符号	定义
OK	外观没有变化，不开裂、软化或褪色
D	溶解，有溶剂化、软化或膨胀的迹象
C	出现微裂纹
R	断裂

对汽车工作液进行试验的结果见第 30 页的表 31。对有机物的试验见第 31 页的表 32。对无机物的试验结果和对航空化学品的试验结果分别见第 32 页的表 33 和第 32 页的表 34。

环境应力开裂中重要的变量有：温度、应力水平、时间以及试剂。如果某一试剂在给定的时间、温度和应力水平下可导致应力开裂，通常可采用以下通则：在较低应力水平下，除非暴露的时间很长或温度较高，否则可能不会发生开裂。较高的温度通常会使开裂加速。稀释试剂能否消除应力开裂，取决于试剂的性质以及试剂与稀释剂的互溶能力。

进行部件设计时，考虑到化学环境因素是非常重要的，特别是当部件会处于应力条件下时。

表 31: 对汽车工作液的耐环境应力开裂能力 (24 小时)

试剂	浓度 (%)	温度		牌号	应力水平 (MPa)			
		°C	°F		无	6.9	13.8	27.6
防冻液 (Prestone®)	50	23	73	A-201	OK	OK	OK	OK
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
	100	100	212	A-201	OK	OK	OK	OK
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
	100	23	73	A-201	OK	OK	OK	OK
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
100	100	212	A-201	OK	OK	OK	OK	
			AG-330	OK	OK	OK	OK	
			R-5000	OK	OK	OK	OK	
			RG-5030	OK	OK	OK	OK	
汽油 (无铅)	100	23	73	A-201	OK	OK	OK	C
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	C
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
酒精-汽油混合燃料 (15% 甲醇)	100	23	73	A-201	OK	OK	OK	C
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
10W-40 机油	100	23	73	A-201	OK	OK	OK	OK
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
	100	100	212	A-201	OK	OK	OK	OK
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
动力转向工作液	100	23	73	A-201	OK	OK	OK	OK
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
	100	100	212	A-201	OK	OK	OK	OK
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
参考燃料 C	100	23	73	A-201	OK	OK	C	C
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	C
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
变速器油	100	23	73	A-201	OK	OK	OK	OK
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
	100	100	212	A-201	OK	OK	OK	OK
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
浓的挡风玻璃喷洗液	50	23	73	A-201	OK	OK	OK	OK
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK

表 32: 对有机物的耐环境应力开裂能力 (24 小时)

试剂	浓度 (%)	温度		牌号	应力水平 (MPa)			
		°C	°F		无	6.9	13.8	27.6
丁酮	100	23	73	A-201	R	R	R	R
				AG-330	D	D	D	D
				R-5000	D	R	R	R
				RG-5030	D	D	D	D
1,1,1-三氯乙烷	100	23	73	A-201	OK	C	R	R
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
甲苯	100	23	73	A-201	C	R	R	R
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	C	C
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
二氯甲烷	100	23	73	A-201	D	D	D	D
				AG-330	D	D	D	D
				R-5000	D	D	D	D
				RG-5030	D	D	D	D
甲醇	100	23	73	A-201	OK	OK	OK	OK
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
异丙醇	100	23	73	A-201	OK	OK	C	C
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
丙酮	100	23	73	A-201	R	R	R	R
				AG-330	D	D	D	D
				R-5000	D	C	C	C
				RG-5030	D	D	D	D
溶纤剂 (2-乙氧基乙烯)	100	23	73	A-201	C	C	C	C
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	C	C
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
卡必醇 (二甘醇单乙醚)	100	23	73	A-201	C	C	R	R
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	C	C
				RG-5030	OK	OK	OK	OK

表 33: 对无机物的耐环境应力开裂能力 (24 小时)

试剂	浓度 (%)	温度		牌号	应力水平 (MPa)			
		°C	°F		无	6.9	13.8	27.6
氢氧化钠	20	23	73	A-201	OK	OK	OK	OK
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
		100	212	A-201	OK	OK	OK	OK
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
盐酸	20	23	73	A-201	OK	OK	OK	R
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
		100	212	A-201		C	C	C
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
硫酸	50	23	73	A-201	OK	OK	OK	OK
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
		100	212	A-201	OK	OK	OK	OK
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK

表 34: 对航空工作液的耐环境应力开裂能力 (24 小时)

试剂	浓度 (%)	温度		牌号	应力水平 (MPa)			
		°C	°F		无	6.9	13.8	27.6
液压液 (Skydrol® 500B)	100	23	73	A-201	C	R	R	R
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
喷气发动机燃料 A	100	23	73	A-201	OK	OK	OK	OK
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK
飞机防冰剂	100	23	73	A-201	OK	OK	OK	OK
				AG-330	OK	OK	OK	OK
				R-5000	OK	OK	OK	OK
				RG-5030	OK	OK	OK	OK

抗辐射性

将 Veradel A-201 暴露于照射剂量为 4、6 和 8 兆拉德的伽马射线。对暴露后的试样进行特性测定，并将所得结果与未暴露试样的特性进行比较。Veradel 树脂几乎不受射线的影响，如图 41 所示。

类似地，使用照射强度为 5、7.5 和 10 兆拉德的伽马射线对 Radel 聚亚苯基砜的抗伽马辐射性进行了评估。如图 42 所示，即使照射强度更大，射线对 Radel 也基本没有影响。

图 41: Veradel 的抗辐射性

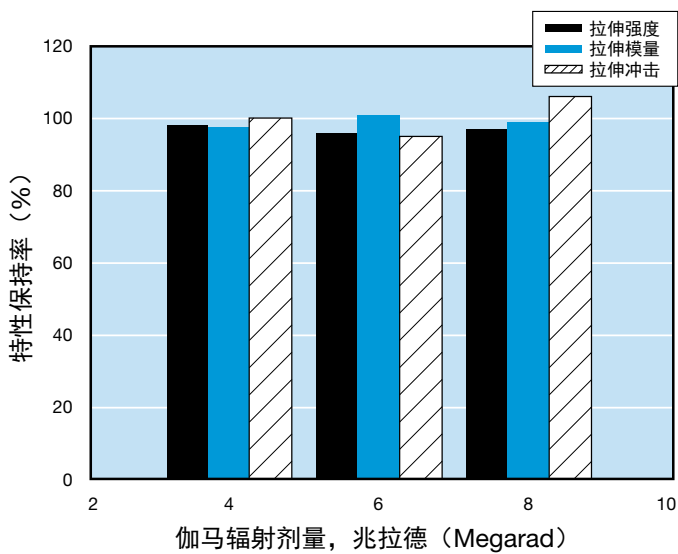
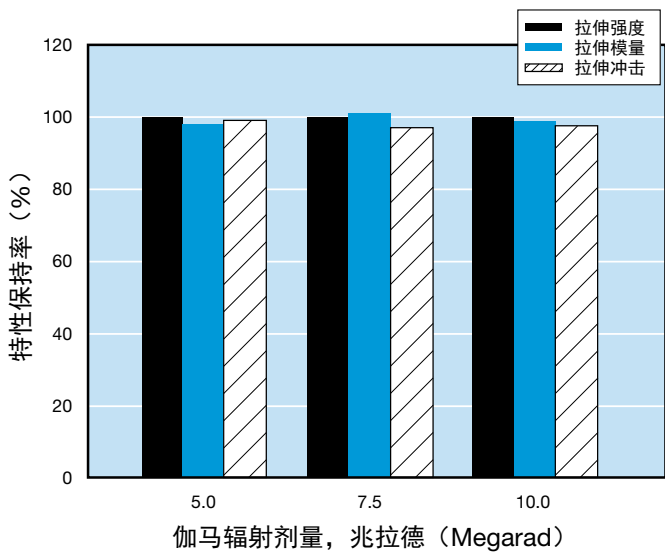


图 42: Radel 的抗辐射性



物理特性

密度

塑料是按照重量进行买卖的，但却要按照体积进行使用。定义体积与重量之间关系的特性就是密度。术语“比重”是指某种材料的密度与水密度的比值，水的密度在 4°C 被定义为 1.0000 g/cc。图 43 表明，单位重量的塑料体积与塑料的比重成反比。换言之，比重越低，每公斤产品所能生产的制品数量就越多。表 35 列出了 Radel、Veradel 和 Acudel 树脂的比重。

图 43: 树脂体积的变化与比重成反比

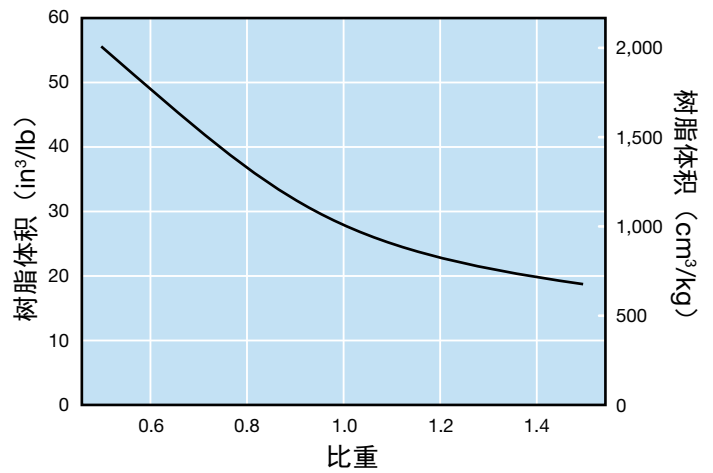


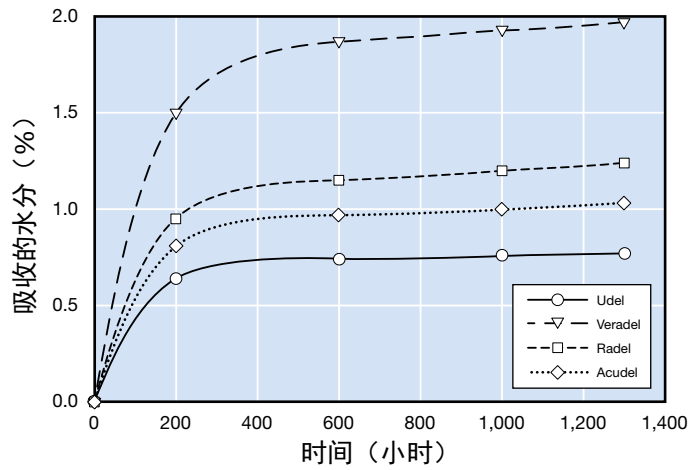
表 35: Radel、Veradel 和 Acudel 树脂的比重

材料类型	比重
Veradel A-201, A-301	1.37
Acudel 22000	1.28
Radel R-5000, 5100, 5500, 5800	1.29
Veradel AG-320	1.51
Veradel AG-330	1.58
Radel RG-5030	1.53

吸水性

大多数聚合物都会从环境中吸收水分，但是它们吸收水分的速率和量有着明显的差异。图 44 显示了利用厚度为 3.2 mm 的试样得出的 Radel、Veradel 和 Acudel 树脂的吸水性随时间关系的曲线。

图 44: 在 23°C 水中的吸水率



Udel 聚砜以其吸水性低而闻名，Radel 树脂的吸水量稍大一些，而 Veradel 树脂则更多。Acudel 塑料的吸水性高于 Udel 塑料，但比 Radel 树脂低。

这一节给出了基本的设计原则和一般性建议，这些一般性建议可能会对设计工程师开发新的部件有所帮助。塑料部件的设计目的就是要充分考虑到由于装配、温度改变、加工以及环境因素所引起的应力对部件的影响，以最小的材料体积满足在物理强度及形变上的要求。

机械设计

使用典型的应力和挠曲方程式是部件设计的第一步。除了所用的物理常数必须反映聚合物的粘弹性外，采用聚砜塑料的机械设计计算与采用其它工程材料的机械设计计算相似。材料特性会随应变速率、温度及化学环境的变化而变化。因此物理常数如弹性模量必须适合于所预期的工作条件。

例如，如果工作条件涉及到承受长时间的持续载荷，就应该用表观模量或蠕变模量，而不用短期弹性模量。如果是循环载荷和长期载荷，那么设计寿命中的疲劳强度将成为限制因素。

应力水平

设计分析的初始步骤是确定部件将承受的载荷并计算所造成的应力和形变或应变。这些载荷可能是外部加载的载荷，也可能是由于温度改变或装配而使部件发生形变所产生的载荷。

外部加载载荷的例子之一就是作用在消毒盘上的医疗器械的重量。当用螺钉将开关盒固定在底板上，或是当装配件的温度增加而塑料部件的尺寸变化比与其固定在一起金属部件的尺寸变化大时，就会引起形变载荷。

应力-应变的计算

在使用典型方程式时，需进行如下的简化假设：

1. 可将部件视为一个或多个简单的结构进行分析
2. 可认为材料有线性弹性且是各向同性的
3. 载荷是单独集中的或是在短时间内逐渐施加的分布均匀的静态载荷
4. 部件没有残余应力或模塑应力

采用梁弯曲模型可以对多种部件进行分析。表 36 列出了部分所选梁的最大应力和挠曲方程式。最大应力出现在离中性表面最远的梁面上，并可由下式给出：

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{Z}$$

其中

M = 弯曲矩 (英寸磅)

c = 与中性轴的距离 (英寸)

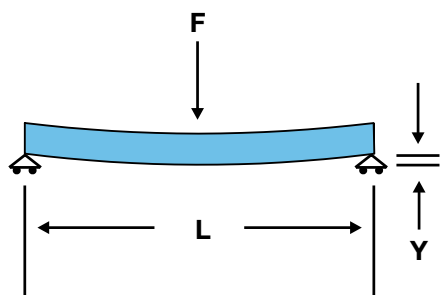
I = 惯性矩 (英寸⁴)

Z = $\frac{I}{c}$ = 断面模量 (英寸³)

表 37 给出了几种常见断面的横截面积 (A)、惯性矩 (I)、与中性轴的距离 (c) 以及断面模量 (Z)。

表 36: 最大应力和挠曲方程式

简单支撑梁
载荷集中在中间



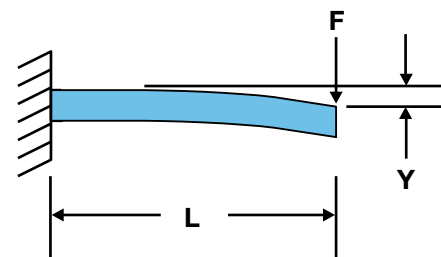
$$\sigma = \frac{FL}{4Z}$$

(在载荷处)

$$Y = \frac{FL^3}{48EI}$$

(在载荷处)

悬臂梁 (一端固定)
载荷集中在自由端



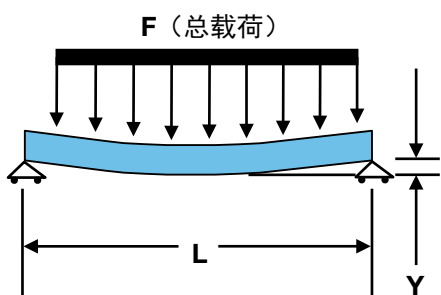
$$\sigma = \frac{FL}{Z}$$

(在支撑处)

$$Y = \frac{FL^3}{3EI}$$

(在载荷处)

简单支撑梁
载荷均匀分布



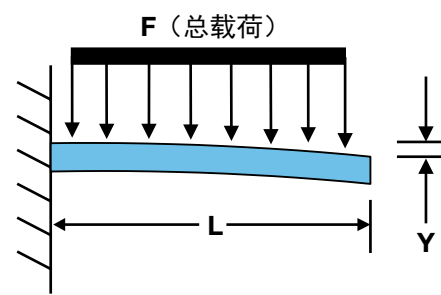
$$\sigma = \frac{FL}{8Z}$$

(在中间)

$$Y = \frac{5FL^3}{384EI}$$

(在中间)

悬臂梁 (一端固定)
载荷均匀分布



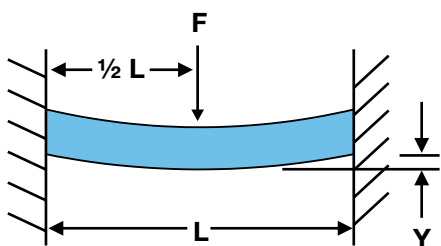
$$\sigma = \frac{FL}{2Z}$$

(在支撑处)

$$Y = \frac{FL^3}{8EI}$$

(在支撑处)

两端固定
载荷集中在中间



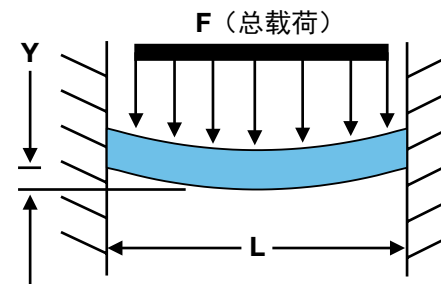
$$\sigma = \frac{FL}{8Z}$$

(在支撑处)

$$Y = \frac{FL^3}{192EI}$$

(在载荷处)

两端固定
载荷均匀分布



$$\sigma = \frac{FL}{12Z}$$

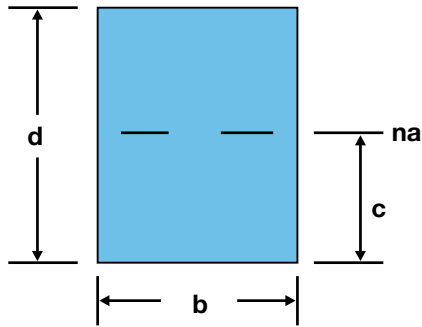
(在支撑处)

$$Y = \frac{FL^3}{384EI}$$

(在中间)

表 37: 部分断面的面积和力矩方程式

长方形



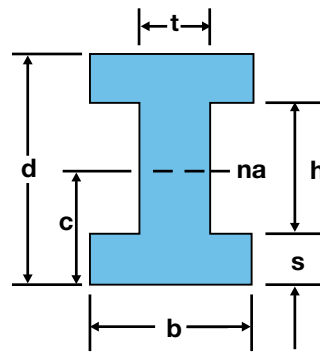
$$A = bd$$

$$c = \frac{d}{2}$$

$$I = \frac{bd^3}{12}$$

$$Z = \frac{bd^2}{6}$$

I 型梁



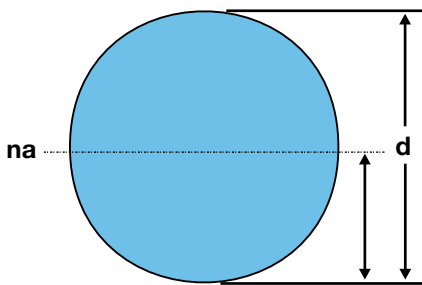
$$A = bd - h(b-t)$$

$$c = \frac{d}{2}$$

$$I = \frac{bd^3 - h^3(b-t)}{12}$$

$$Z = \frac{bd^3 - h^3(b-t)}{6d}$$

圆形



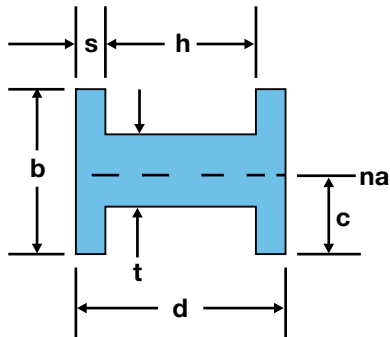
$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$c = \frac{d}{2}$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$Z = \frac{\pi d^3}{32}$$

H 型梁



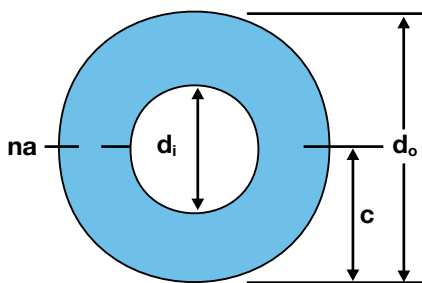
$$A = bd - h(b-t)$$

$$c = \frac{b}{2}$$

$$I = \frac{2sb^3 + ht^3}{12}$$

$$Z = \frac{2sb^3 + ht^3}{6b}$$

管形



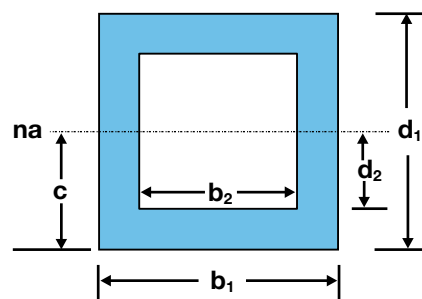
$$A = \frac{\pi(d_o^2 - d_i^2)}{4}$$

$$c = \frac{d_o}{2}$$

$$I = \frac{\pi(d_o^4 - d_i^4)}{64}$$

$$Z = \frac{\pi(d_o^4 - d_i^4)}{32d_o}$$

中空长方形



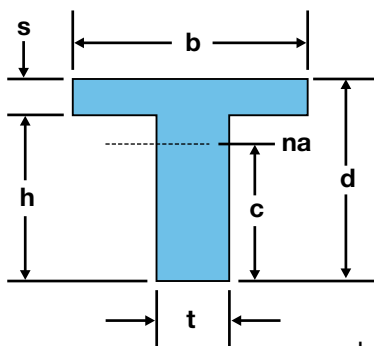
$$A = (b_1 d_1 - b_2 d_2)$$

$$c = \frac{d_1}{2}$$

$$I = \frac{(b_1 d_1^3 - b_2 d_2^3)}{12}$$

$$Z = \frac{(b_1 d_1^3 - b_2 d_2^3)}{6d_1}$$

T 型梁或加强筋



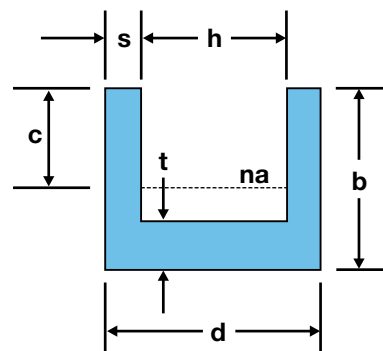
$$A = bs + ht$$

$$c = d - \frac{d^2 t + s^2 (b-t)}{2(bs + ht)}$$

$$Z = \frac{I}{c}$$

$$I = \frac{tc^3 + b(d-c)^3 - (b-t)(d-c-s)^3}{3}$$

U 型梁



$$A = bd - h(b-t)$$

$$c = b - \frac{2b^2 s + ht^2}{2A}$$

$$I = \frac{2b^3 s + ht^3}{3} - A(b-c)^2$$

$$Z = \frac{I}{c}$$

设计极限

设计者在计算出最大应力水平和挠曲后，即可将该应力值与适当的材料特性，如拉伸强度、压缩强度或剪切强度等进行比较。然后对其设计是否具有足够的安全系数进行判断，或者决定是否需要通过改变壁厚或添加筋结构或异形结构增加断面模量来改善设计。

术语“设计容许值”定义为对所预期的载荷方式具有足够的安全系数的预测材料强度。表 38 列出了对于短期间歇载荷的设计容许值。表 39 列出了恒定载荷情况下的设计容许应力。在这种情况下，蠕变是主要的设计考虑因素。在这些表中，温度是唯一被考虑的环境因素。化学品的存在会大大降低设计容许值。

表 38: 间歇载荷的设计容许应力⁽¹⁾

	23°C		93°C		177°C	
	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa
Veradel						
A-201, A-301	6,100	42	4,570	32	2,640	18
AG-320	7,710	53	5,840	40	3,810	26
AG-330	9,140	63	6,850	47	4,160	29
Radel						
R-5000, 5100, 5500, 5800	5,180	36	3,300	23	2,540	18

表 39: 恒定载荷的设计容许应力⁽¹⁾

	23°C		93°C		177°C	
	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa
Veradel						
A-201, A-301	3,000	21	2,250	16	1,300	9
AG-320	3,800	26	2,875	20	1,875	13
AG-330	4,500	31	3,375	23	2,050	14
Radel						
R-5000, 5100, 5500, 5800	2,550	18	1,625	11	1,250	9

⁽¹⁾ 环境因素可能会造成容许应力水平的降低

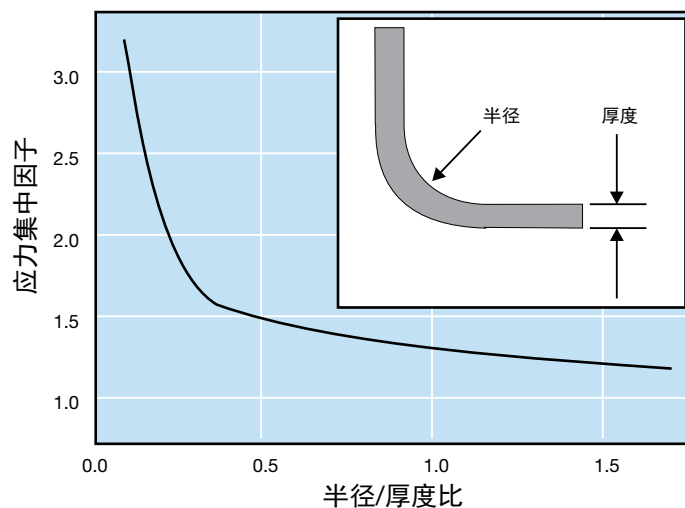
应用机械设计方程式得出的设计在初始阶段是很有用的，但该分析并没有考虑到一些关键因素。例如，一种设计的耐冲击性与其吸收冲击能量而不断裂的能力直接相关。增加壁厚通常可提高模塑部件的耐冲击性。然而，壁厚的增加会使部件变得太硬而不能弯曲和分散冲击能量，从而影响耐冲击性。因此，设计的耐冲击能力必须通过对原型部件进行耐冲击性试验来加以检查。

应力集中

应力集中可能会造成过早损坏，特别是在受到冲击或材料疲劳的情况下。减少尖角可以降低应力集中并使部件具有更高的结构强度。为避免应力集中问题，内拐角半径应等于标称壁厚的一半。0.5 mm 的倒角半径应被认为是最小值。

要使壁厚保持均匀，外拐角的半径应等于内拐角半径与壁厚之和。图 45 所示为半径对应力集中因子的影响。

图 45: 内拐角的应力集中因子



配合注塑的设计

由于聚砜塑料的许多应用都是将其注塑成部件，因此在部件设计中必须考虑可模塑性的影响因素。这些因素包括壁厚以及壁厚的过渡、脱模角度、筋结构、凸台以及抽芯。

壁厚

在一般情况下，进行部件设计时应采用可达到承受所预期的载荷所需的足够结构强度的最薄壁厚，并将挠曲控制在设计的标准限度内，具有充分流动性，而且满足对可燃性及冲击性的要求。采用这种设计方式所得到的部件将具有最轻的重量、最短的注塑循环，并因此具有最低的成本。

有时，模塑所需的壁厚要大于机械设计分析所需的壁厚。与其它热可塑性材料一样，聚砜塑料的流动性不但与壁厚有关，也与模具设计及加工变数，如注塑速率、模具温度、熔融温度以及注塑压力有关。壁厚的实际限度通常在 0.7 mm 到 6.5 mm 之间。如果流程很短则可模塑出 0.25 mm 厚的壁部。有关各种聚砜牌号的流程与壁厚关系的详细资料，请参见第 46 页。

壁厚变化

尽管均匀的壁厚是理想情况，但考虑到结构、外观以及脱模角度等因素，可能有必要让壁厚有所变化。当需要改变壁部的厚度时，设计者应考虑采用一个逐渐的过渡，例如图 46 所示的 3 比 1 的锥度比。由于冷却速率的差异及湍流的产生，壁厚的急剧过渡会导致外观及尺寸稳定性方面的问题。

此外，从结构的角度讲，急剧过渡会引起应力集中，从而影响部件在承受载荷及冲击时的性能。

脱模角度

为了有助于将部件从模具中取出，通常在部件沿模具运动的方向上设计一个锥度。只要模具开始移动，该锥度就产生一个间隙，使部件可以自如脱模。锥度通常被称为“脱模斜度”，而锥度的量则称为“脱模角度”。图 47 举例说明了脱模角度的使用。

图 46: 壁厚的转变

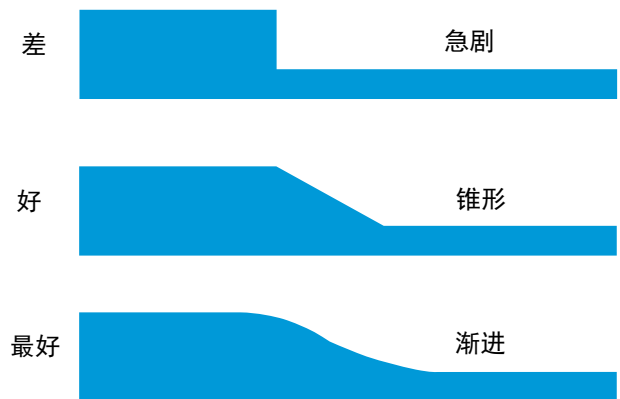
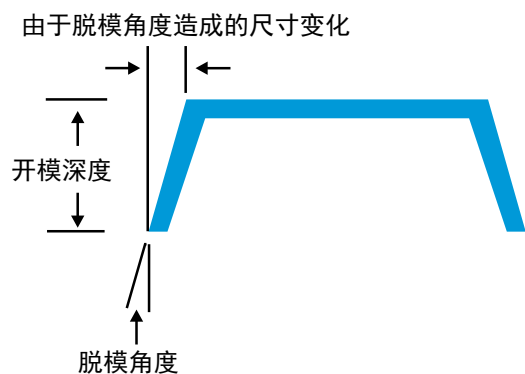


图 47: 为脱模而设计



为使部件易于从模具中取出，必须设计足够的脱模角度。对于聚砜塑料，通常在其内外壁上设计每侧具有 1° 到 2° 的脱模角度。在一些特殊情况中，由于模具表面的拉伸抛光，还可用更小的脱模角度。

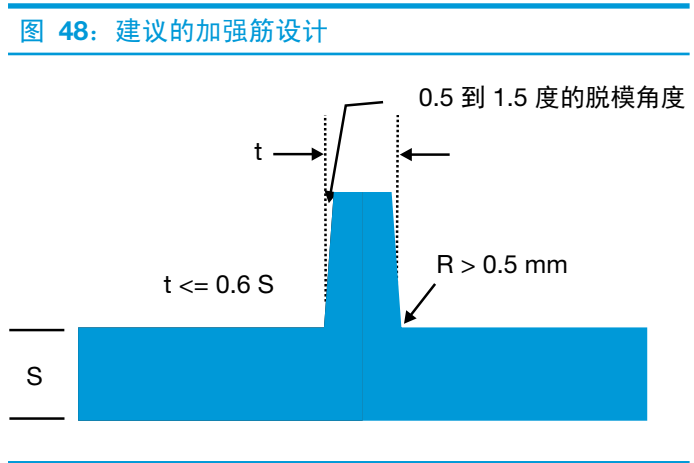
对于深撑压或使用模芯时，则应采用更大的脱模角度。纹理装饰会对脱模角度的要求有所提高，每 0.025 mm 的纹理深度在每侧要至少增加 1° 的脱模角度。

加强筋结构

通过对筋的适当设计及布置，无须增加壁厚就可增强部件设计的结构刚性。适当的加筋设计可以减小壁厚，从而节省材料及重量、缩短注塑循环并消除厚壁，而厚壁则容易产生凹陷等模塑问题。正确布置的筋结构还可以具有内部流道的作用，帮助材料在注塑过程中流动。

在一般情况下，对筋进行设计时要遵循以下的指导准则。筋底部的厚度应为其相邻壁厚的一半。当筋与外观区域相对时，其宽度应尽可能的小。如果模塑部件上的某些区域的结构比外观更重要，那么其筋通常是外壁厚度的 75% 甚至是 100%。只要可能，筋应与其它结构部件如侧壁、凸台及装配垫等平滑相连。筋的高度或宽度不必固定，通常与部件上的应力分布相匹配。所有加强筋都应有一个每侧最小为 $1/2^\circ$ 的脱模角度，并在底部有一个最小为 0.5 mm 的半径。

图 48 所示为建议的筋尺寸间的关系。



抽芯

恰当的设计应使整个部件的壁部具有均匀的厚度。部件中的厚断面会延长注塑的循环时间、引起凹陷并增大模塑应力。

应对厚断面进行抽芯以使壁厚均匀。为了模塑的简便性及经济性，模芯应与模具的开模方向相平行。置于任何其它方向上的模芯通常需要某种侧向动作或需要人工装上或卸下松散的模芯。

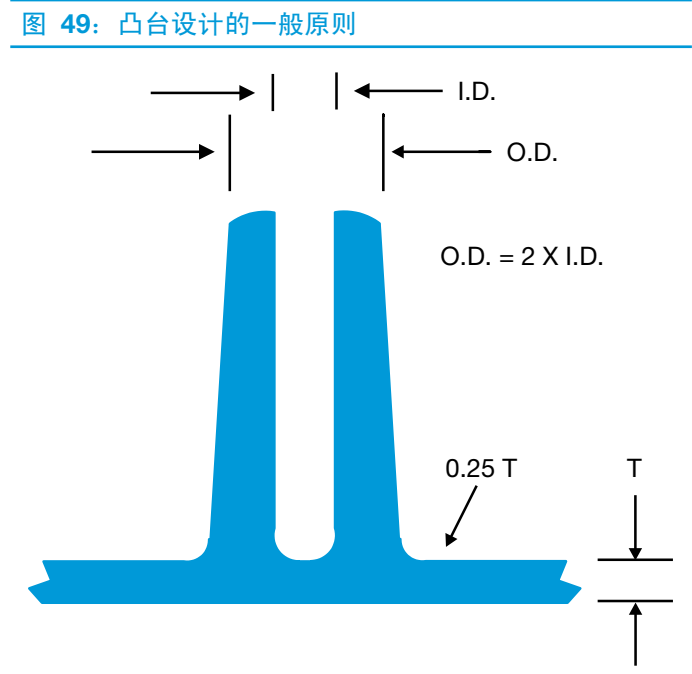
伸入模穴中的模芯要承受较高的压力。对于直径大于 1.6 mm 的暗芯，其长度不应超过直径的三倍；对于直径小于 1.6 mm 的暗芯，其长度不应超过直径的两倍。对于通芯，这些建议值则可加倍。为了能更好地脱模，所有的模芯都要有脱模角度，而所有的模具都要进行抛光处理。

凸台

凸台是突出部件标称壁的部分，最终会用作装配点或紧固点。凸台的设计在很大程度上取决于其在给定部件中的作用。抽芯的凸台可与压配、自动攻丝螺钉或超声嵌入件配合使用。这些紧固件会对凸台的壁部施加不同程度的环向应力。

作为一般性的设计原则，每个凸台的外径应是其孔内径的二倍，而且每个凸台的壁厚不应超过部件的壁厚。图 49 举例说明了这些设计原则。

作用在凸台上的附加力会传递到凸台下并进入标称壁。由于这一原因，对凸台底座的设计要求其最小半径是壁厚的 25%，从而提供足够的强度并减少应力集中。在凸台周围利用角撑板进行支撑可以进一步加固凸台，还可以利用设计得当的筋结构将凸台与附近的壁相连接。为防止部件表面出现凹陷，应避免厚断面。



Radel 和 Acudel 树脂的加工方法有注塑成型、挤塑和吹塑成型。

干燥

在进行熔融处理之前，必须使 Radel 聚亚苯基砒、Acudel 改性聚亚苯基砒和 Veradel 聚醚砒完全干燥。尽管这些聚合物是水解稳定的，也不会发生分子量的降低，但干燥不彻底还是会使制成的塑料部件出现外观缺陷，轻则产生表面条纹，重则严重起泡。但是，可将这些部件作为回用料进行回收处理。

聚砒塑料的粒料可在空气循环烘箱内的料盘上或在料斗干燥器中进行干燥。最短干燥时间是：在 177°C 下 2.5 小时，在 150°C 下 4 小时，或者在 135°C 下 4.5 小时。建议干燥温度不低于 135°C，以免干燥时间过长。小心处理干燥过的塑料，避免其从大气中重新吸收水分，可以使用干燥容器或者带盖的料斗。

建议注塑操作时的最高水分含量为 500 ppm，挤塑操作时为 100 ppm。

Radel 聚亚苯基砒、Acudel 改性聚亚苯基砒和 Veradel 聚醚砒的典型干燥曲线见图 50 至 52。

图 50: Veradel 树脂在空气循环烘箱内的干燥

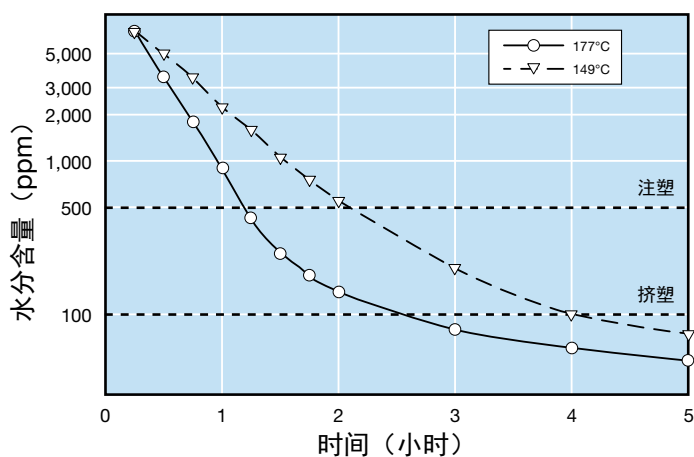


图 51: Radel 树脂在空气循环烘箱内的干燥

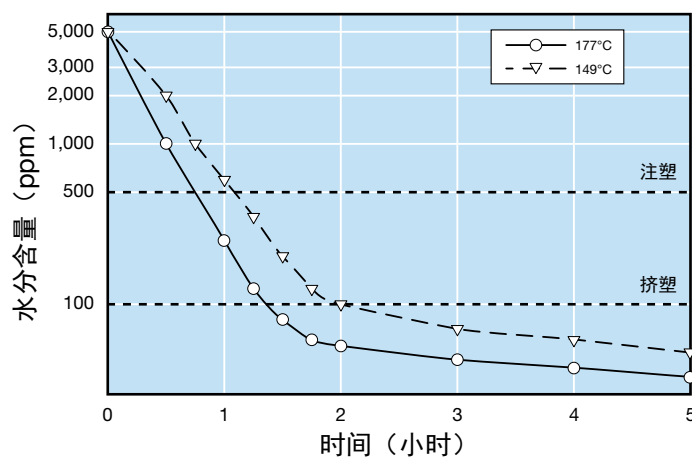
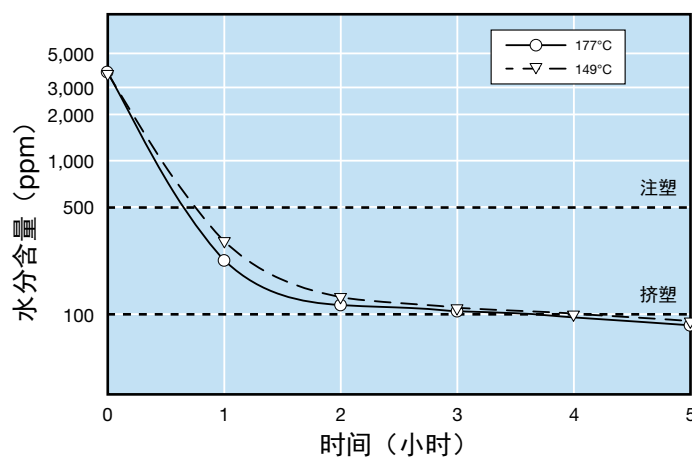


图 52: Acudel 树脂在空气循环烘箱内的干燥



流变性能

为了帮助制造商设计合理的模具和加工设备，对一系列不同条件下聚砜塑料的流变性能进行了测量。其粘度与剪切速率的关系数据见表 40 和 41。

表 40: Radel 的剪切速率与粘度的关系数据

Radel	温度 (°C)	剪切速率, (sec ⁻¹)	真粘度 (泊)
R-5000/ R-5100	340	30	32,810
		100	30,474
		500	15,293
		1,000	9,465
		3,000	3,803
	360	30	16,996
		100	16,000
		500	10,244
		1,000	6,780
		3,000	3,084
	380	30	9,669
		100	9,317
		500	6,723
		1,000	4,864
		3,000	2,446
	400	30	6,808
		100	6,451
		500	4,767
		1,000	3,637
		3,000	2,000
R-5800	340	30	24,224
		100	22,725
		500	12,948
		1,000	8,225
		3,000	3,549
	360	30	11,972
		100	11,499
		500	8,071
		1,000	5,613
		3,000	2,699
	380	30	7,165
		100	7,109
		500	5,297
		1,000	3,995
		3,000	2,133
	400	30	4,936
		100	4,768
		500	3,661
		1,000	2,914
		3,000	1,724

表 41: Veradel 的剪切速率与粘度的关系数据

Veradel	温度 (°C)	剪切速率, (sec ⁻¹)	真粘度 (泊)
A-201	345	100	9,756
		1,000	4,660
		10,000	1,496
	365	100	6,695
		1,000	3,198
		10,000	1,027
	385	100	4,595
		1,000	2,195
		10,000	705
A-301	340	23	34,686
		104	28,173
		499	16,070
		1,507	7,589
		3,514	3,380
	360	23	17,982
		104	14,864
		499	10,065
		1,507	5,781
		3,514	2,886
	380	23	12,640
		104	10,132
		499	6,905
		1,507	4,281
		3,514	2,347
400	23	7,449	
	104	6,086	
	499	4,539	
	1,507	3,184	
	3,514	2,100	
AG-330	340	23	32,271
		104	25,071
		499	13,818
		1,507	7,499
		3,514	3,373
	360	23	19,337
		104	13,460
		499	7,933
		1,507	4,672
		3,514	2,476
	380	23	12,941
		104	8,511
		499	5,284
		1,507	3,346
		3,514	2,027
400	23	9,536	
	104	6,869	
	499	4,241	
	1,507	2,832	
	3,514	1,872	

各种 Radel 和 Veradel 牌号的流变性能数据如图 53 至 57 所示。

图 53: Veradel A-201 树脂的流变性能

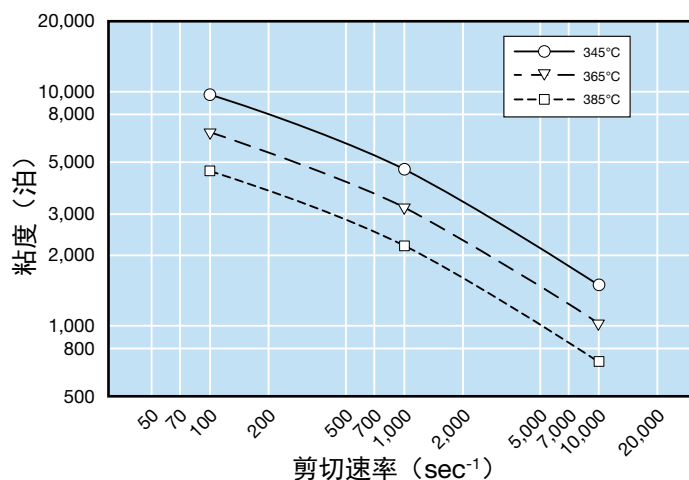


图 54: Veradel A-301 树脂的流变性能

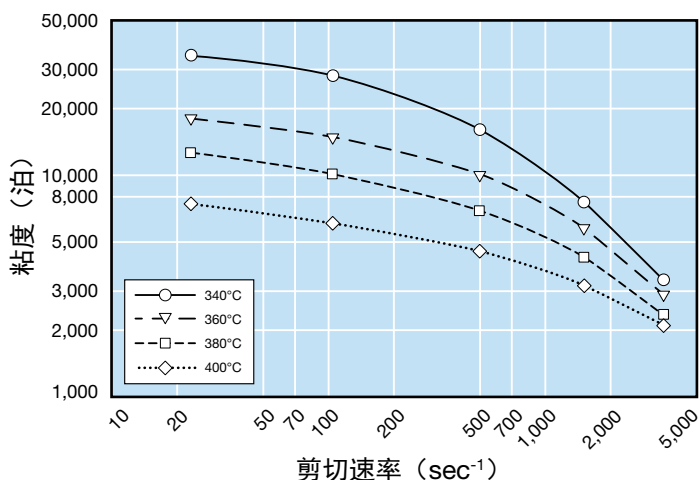


图 55: Veradel AG-330 树脂的流变性能

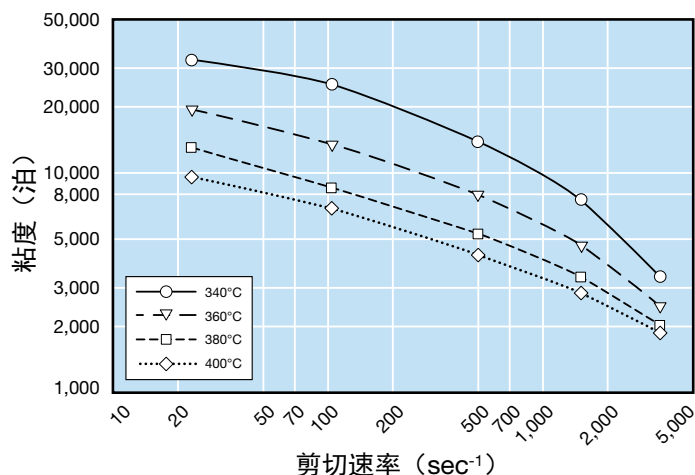


图 56: Radel R-5000 树脂的流变性能

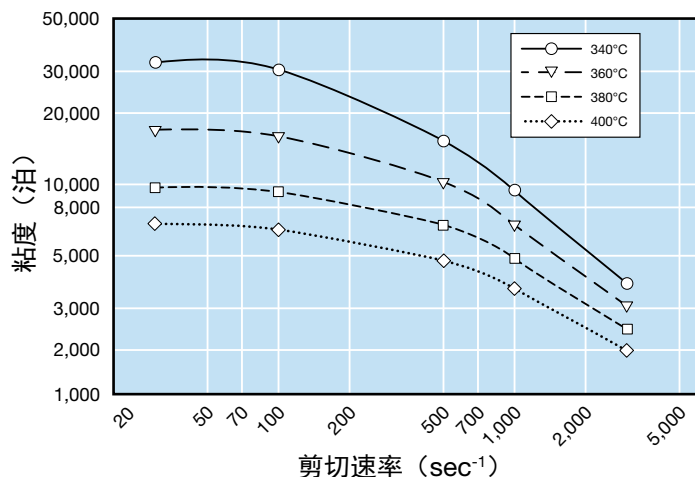
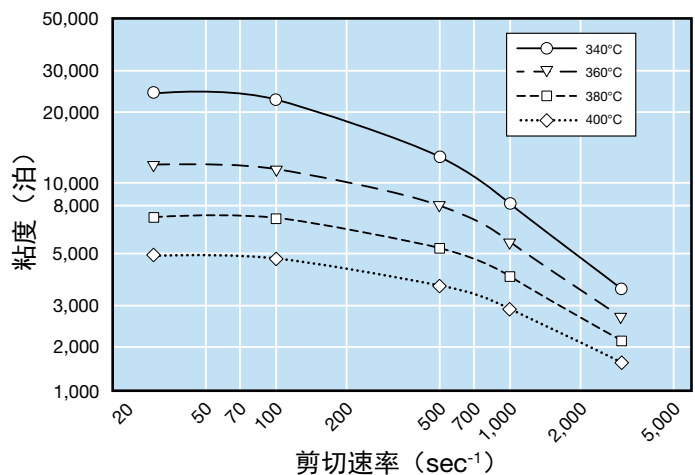


图 57: Radel R-5800 树脂的流变性能



熔融加工参数

计算机模拟预测流动和冷却的广泛应用，要求必须具备材料的某些常数和参数。Radel 和 Veradel 树脂的这些参数在下面的表 42 中列出。

表 42: 熔融加工参数

特性	单位	牌号		
		A-201 A-301	AG-330	R-5000
熔融热扩散率	cm ² /s	9.72 x 10 ⁻⁴	9.02 x 10 ⁻⁴	1.66 x 10 ⁻³
熔融比热	cal/g-C	0.438	0.408	0.480
熔融密度, 69MPa	g/cm ³	1.3432	1.5963	1.2855
不流动温度	°C	220.0	219.7	219.7
凝结温度	°C	206.0	214.0	215.0
固态密度	g/cm ³	1.3554	1.5633	1.2900
玻璃转化温度				
开始	°C	220	220	220
结束	°C	225.9	227.3	221.0

注塑

注塑设备

Radel 和 Veradel 树脂的模塑特征与 Udel 聚砜相似。大多数螺杆注塑机都能很容易地将聚砜塑料注塑成型。

螺杆设计

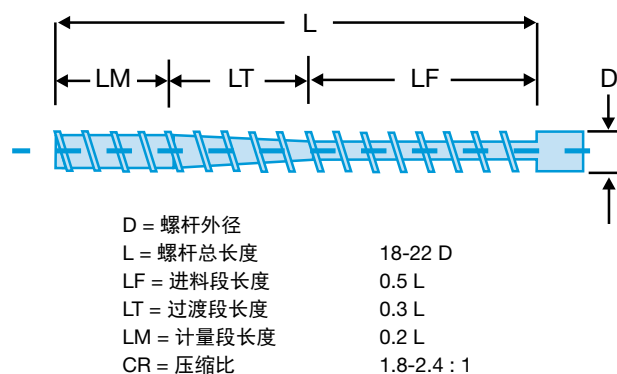
典型的通用螺杆就能很好地聚砜塑料挤出。用于加工聚砜工程塑料的典型螺杆设计见图 58。

螺杆末端和止逆阀

螺杆末端及止逆阀的设计对进行正常的加工很重要。单向阀或止逆阀可防止熔体在注塑和保温过程中越过螺杆的螺槽向后流动。如果不使用止逆阀，要保持始终一致的缓冲是非常困难甚至是不可能的。

所设计的止逆阀或逆止环系统设计须适于平滑流动，避免死角或背压。不建议采用球型止逆阀。螺杆末端也应该进行改进以确保螺杆前的熔体滞留量最少。

图 58: 适合注塑的螺杆设计



喷嘴

在敞口注塑嘴和阀式注塑嘴中，优先选用敞口注塑嘴。注塑嘴的内孔构造应该与螺杆末端非常匹配。

模具

标准模具设计指南适用于聚砜塑料。

脱模角度和脱模

在一般情况下，为聚砜塑料设计的注塑模具的脱模角度应该是 1° 到 2°。顶针或脱模板的接触面积应该尽可能的大，以避免脱模过程中的部件变形或被穿透。

浇口

所有常规的浇口类型，包括热流道，都适用于聚砜塑料。有些热流道设计可能会出现一些问题，诸如滞留时间延长或出现使材料聚积并分解的死角。浇口必须具有足够大的尺寸，藉此无需特别高的注塑温度或压力就能充填部件。在填充完成之前就凝固的浇口可能会导致内部真空或凹陷。

排气

用于聚砜塑料的模具必须在流道的端点以及预期的熔合线位置进行排气。排气口应该具有 2 mm 到 3 mm 的背长和最大 0.08 mm 的深度。

模具温度控制

控制模具温度对获得高品质的部件至关重要。对于特别复杂的部件，各模瓣可能需要单独的控制。采用以油为流体的流体传热系统或电加热器即可达到对聚砜塑料成型所需的温度。

相对于电加热器，要优先选用流体传热系统。尽管电加热器有助于达到最低的模具温度，但它们无法为模具排热。模具温度有可能会高过所需的温度，特别是在成型较大部件时。

机器设置

注塑温度

各种聚砜塑料的建议注塑熔融温度见表 43。一般情况下，由于存在热分解的风险，不宜采用更高的温度。作为一条基本原则，应避免采用高于 395°C 的注塑熔融温度。

模具温度

模具温度是一个重要参数，它决定着收缩率、翘曲、公差保持、模塑部件表面光洁度的品质以及部件内的模塑应力水平。

Radel、Acudel 和 Veradel 树脂的模具温度通常设置在 120°C 到 160°C 的范围内。唯一需要较高温度来实现最佳光洁度的产品是玻纤增强牌号的 Radel 和 Veradel 树脂。表 43 列出了各牌号的建议模具温度。

在模具和压板之间嵌入保温材料可减小热损失。高品质的模塑部件需要设计良好的冷却腔道系统和正确的模具温度设置。

料筒温度

如果带式加热器所设置的温度是沿料斗到注塑嘴的方向增加，那么 Radel、Acudel 和 Veradel 树脂可在温和的条件下熔融，并可在料筒内承受相对长的滞留时间。如果滞留时间短，可将所有的料筒加热器设置为相同的温度。注塑嘴至少需要一个带式加热器（额定值为 200 W 到 300 W）。由于辐射和传导的原因，传向模具的热损失在这里可能会很严重。通过对注塑嘴进行保温，可以减小热损失。

应该对带式加热器的控温系统进行监控。例如，如果某段料筒的加热器出现故障时，及时的警报可以避免螺杆损坏。将料斗附近的温度保持在大约 80°C，可改善塑料粒的进料速度。

料筒中的滞留时间

塑料在塑化筒内停留时间的长短对注塑成型质量具有显著影响。如果时间太短，塑料就不会充分熔融。如果时间太长，则有可能发生热分解，使模塑部件上出现褪色、黑纹甚至焦烧颗粒。通过装配一个较小的塑化单元常常可以缩短滞留时间。如果注塑量为料筒容量的 30% 到 70%，便可得到合适的滞留时间。在表 43 所列的熔融温度下，这些树脂都能耐受 10 – 20 分钟的滞留时间。

注塑成型过程

进料特征

第 44 页的图 58 所示的螺杆能让砜类聚合物塑料粒平稳地沿料管移动并在所建议的温度下均匀地塑化。

进料段的温度不应设置太高，否则料粒可能会过早熔融而导致螺槽阻塞和堵死。

背压

背压常被用来维持恒定的塑化时间，以避免夹气，从而改善熔体的均匀性。施加适量的背压通常是有益的，但如果背压太高则会导致高摩擦热。

螺杆速度

只要可能，所设置的螺杆速度应使循环周期内的塑化时间得到充分利用。也就是说，循环时间越长，螺杆速度越低。例如，对于一个直径为 50 mm 的螺杆，60 rpm 到 100 rpm 的螺杆速度通常就足够了。当螺杆在高熔融温度下运转时这一点特别重要，以确保熔体不会在螺杆末端的空间停滞过长时间。低螺杆速度也可消除摩擦引起的温度升高。

表 43: 注塑成型起始点条件

	熔融温度 (°C)	模具温度 (°C)	收缩率 (%)
Radel R-5000/5100	365-393	150-163	0.6-0.7
Veradel A-201	365-390	138-160	0.6-0.7
Veradel A-301	350-390	138-160	0.6-0.7
Veradel AG-320	360-390	138-160	0.4
Veradel AG-330	360-390	138-160	0.3
Acudel 22000	365-393	150-163	0.6-0.7

注塑速率和排气

用来填充模具的注塑速率是决定模塑部件品质的另一重要因素。应采用中等的注塑速度。该速度应足够快，以实现熔体的均匀性；但也要足够的慢，以避免引起剪切焦烧。快速注塑可提供均匀的固化和良好的表面光泽性，尤其针对玻纤增强牌号而言。

模具的设计必须能够使注塑过程中的气体轻易地排出模穴。如果不这样，模穴中气体快速压缩所产生的高温会引起局部过热和焦纹。为了消除内部真空，螺杆的前进时间和保压压力必须足够高，以补偿冷却过程中出现的体积收缩。

必须有足够大的浇口，这样聚合物在保压时间内才不会在其附近凝固。在浇口及其附近所形成的任何堵塞物会阻碍保压压力对模具内部的填充。

脱模

Radel、Acudel 和 Veradel 部件可轻易地脱模，不会粘在模具壁上，即使是在热的情况下。作为一项原则，用于这些树脂注塑的模具脱模角度应该在 1° 到 2° 的范围内。由于玻纤增强牌号产品的收缩率较低，需要稍大的脱模角度。顶杆和脱模板的面积应该尽可能的大。顶针不要太细，否则在快速循环或高的模具温度下有可能会压入部件内并使部件变形。

收缩率

室温下模具的尺寸和模塑部件之间的差别被定义为收缩率。这是热塑性树脂的一项基本特性，它是模塑产品在模具中冷却收缩而产生的。影响收缩量的其它因素有：部件的几何形状、壁厚、浇口的尺寸和位置以及加工参数。由于这些因素的相互作用，要准确预测收缩率很困难，但可以得出近似的典型数值，见第 45 页的表 43。

塑料流动特征

获得某种材料流动特征的一种方法是测量其在不同厚度、温度以及注塑压力下在某个螺旋形模穴内的流程。各种牌号的螺旋流动数据如图 59 至 62 所示。

图 59: Veradel A-201 的螺旋流动

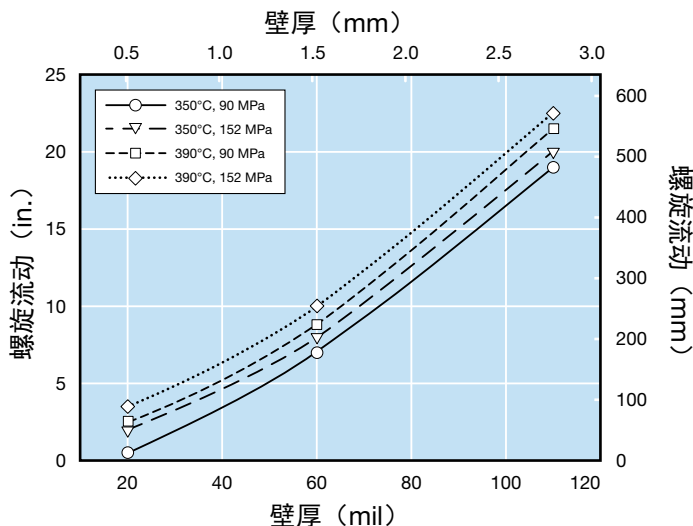


图 60: Veradel A-301 的螺旋流动

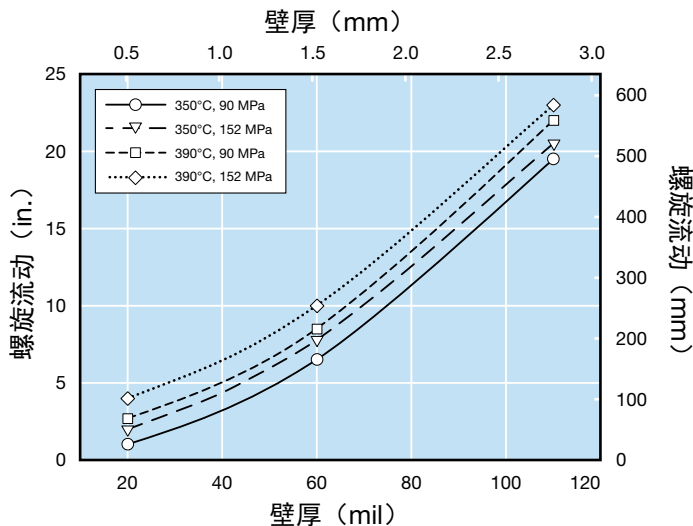


图 61: Radel R-5000 的螺旋流动

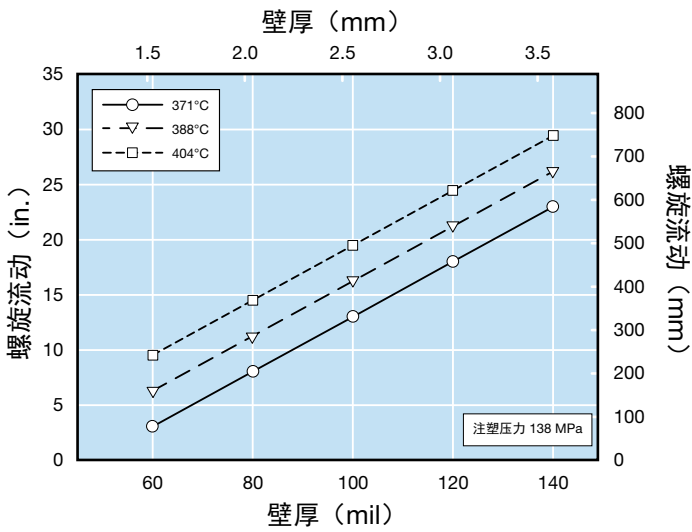
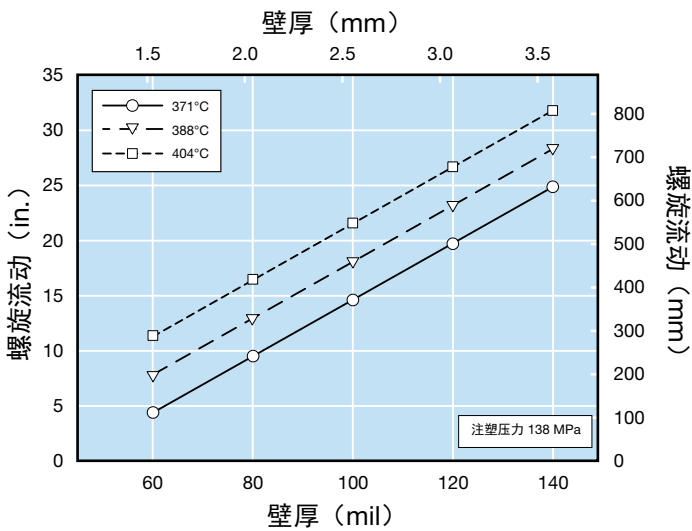


图 62: Radel R-5800 的螺旋流动



残余应力的测量

对热塑性材料进行注塑成型时，会诱使塑件内部产生残余应力或模塑应力。尽管由机械载荷和热载荷在塑料部件内所产生的应力可采用传统的方法计算得出，但目前还没有可靠的方法可以用来预测残余应力水平。许多性能参数都会受到部件内部残余应力的影响。由于不能计算出这些应力水平，如何对它们进行测量就变得尤为重要。

目前已开发出一种用来测量由未填充的 Radel、Veradel 和 Acudel 树脂模塑成型部件的残余应力的方法。它需要将所制得的部件与一些已知能使处于某一应力水平的材料产生微裂纹或开裂的化学试剂接触。而在无载荷的条件下将部件与试剂接触，则可对残余应力水平进行量化。

下表给出了该试验所用试剂的详细信息以及其导致材料开裂时的应力水平。所给出的数据是在室温、试剂浓度为 100%、接触时间为 1 分钟的试验条件下获得的。

这些试剂在所注明的应力水平下导致材料开裂所需要的接触时间为 1 分钟。采用这个接触时间是为了进行快速测试，并降低由于接触时间过长或过短而造成误差的可能性。较长的接触时间会使材料在低于规定值的应力水平下产生开裂。

要确定一个模塑成型的 Radel 或 Veradel 部件的残余应力水平，可从表 44 中选择相应牌号的试剂清单并按照所示的步骤进行，要从清单中的第一个试剂开始。

部件的应力水平处于下一页的表 44 中给出的造成开裂的试剂与它上方的试剂所对应的应力水平之间。

表 44: 残余应力试验参数

试剂	产生断裂的最小应力水平 (MPa)
Veradel 聚醚砜	
2-乙氧基乙烯 (纤维素溶剂)	15
乙酸乙酯 (EA)	8
50%* MEK / 50%* EA	6
丁酮 (MEK)	3
Radel 聚亚苯基砜	
乙酸乙酯 (EA)	12
丁酮 (MEK)	8
5%* N 甲基吡咯烷酮 / 95%* MEK	6

* 体积百分比

通过与试剂进行接触来确定应力水平在本质上是粗略的。试验条件 (环境温度、接触时间或试剂浓度等等) 的微小差异都可导致试验结果的细微变化。试验结果与实际应力水平的误差应该在 20% 以内。

残余应力水平取决于许多模塑参数, 这些参数在模塑时可能不断变化。所以, 各试样可能会表现出不同的应力水平。因此建议对多个部件进行测量。

某个部件可接受的模塑应力水平应该由其最终用途, 特别是由其所接触的化学环境所决定。Radel、Acudel 和 Veradel 树脂是无定形热塑性材料, 具有良好的耐化学性。通常认为残余应力水平低于 5 MPa 的部件是模塑成型较好的部件。

健康及安全考虑

在对所选择进行试验的特定试剂进行操作之前, 请查阅供货商的材料安全数据表, 并遵照制造厂家使用说明中的有关操作注意事项进行。

所有试验都必须在装有排风装置的实验室通风罩内或在通风良好的地方进行。这些试剂都是易燃性的有机物, 应储存在密闭的容器内, 并远离明火、电火花或温度可能会升高的地方。应根据国家、省市或当地的适用规章制度妥善处置这些材料。

确定残余应力的步骤

1. 让部件冷却到室温, 然后用异丙醇淋洗。
2. 将部件与试剂接触一分钟, 然后用水淋洗。
3. 在强光下检查部件上是否有开裂或出现微裂纹的区域。毛细裂缝可能会很难发现。
4. 如果部件没有开裂或出现微裂纹, 说明其残余应力水平比表 44 中该试剂所对应的应力水平要低。换用下一个试剂, 然后重复步骤 2 和 3。

挤塑

Radel 聚亚苯基砜和 Veradel 聚醚砜都可以在常规的挤塑设备上挤塑成型。

预干燥

进行挤塑之前必须将聚砜塑料彻底干燥, 以防止挤出料中有气泡。塑料必须干燥至水分含量低于 100 ppm。适宜的干燥时间和温度见第 41 页的图 50 和 51。若采用料斗进行干燥, 则要求有足够的保温和最小程度的系统泄漏。进气温度必须足够高而进气水分含量要足够低, 使聚合物塑料粒在 150°C 以上的温度下保持于露点为 -40°C 的空气中。必须在这样的条件下维持足够长的时间, 才能将聚合物的水分含量降到 100 ppm 以下。

挤塑温度

取决于特定的挤塑操作, 挤出料的熔融温度应该在 343°C 到 400°C 的范围内。

对于大多数操作, 建议将挤塑机进料端的实际料筒温度设置在 330°C 到 370°C 的范围, 模头的料筒温度设置在 330°C 到 370°C 的范围。如果沿料筒的温度设置均匀维持在 340°C 到 400°C 的温度范围内, 应该能达到所要求的挤出料温度。

如果所用螺杆具有相对浅的计量段, 就可能需要设置较高的料筒温度, 以便在设备的压力和功率限制范围内更好地对操作过程进行控制。

螺杆设计建议

一般情况下，建议采用长径比从 20:1 到 24:1 的螺杆。采用 2:1 到 2.5:1 的压缩比已证明可得到合适的结果。螺杆的螺距应等于螺杆的直径，而且进料段应该逐渐过渡到计量段。过渡段和计量段都应该比进料段长。过渡段应该是最长的，以提供足够的时间和热量输入使塑料在被压出之前充分软化。一种基本的构型是：进料段 4 个螺槽，过渡段 14 个螺槽，而计量段 6 个螺槽。

也可采用两段螺杆，以便在要求熔体具有最佳压实状态时进行真空排气。两段螺杆设计包含一个减压段，藉此在第一个计量段之后进行真空排气。在减压段之后是另一个过渡区和计量区，这与单段螺杆的设计原则一致。

作为一项原则，如果将适用于聚烯烃的螺杆设计用于聚砜塑料，将无法得到可接受的结果。

口模设计

口模加热器必须能够达到并保持 430°C 的温度。由于聚砜塑料的粘度对温度敏感，因此必须对口模温度进行精密控制，以得到均匀的挤出料。

应始终使用流线型的口模。流道的流线型设计与挤片模头两端的清机板（即渗料口塞头）相结合，消除了材料在口模中挂料以及出现熔体停滞的可能性。

模口应该能够在高达 240 巴的压力下持续运作。流道、模唇及接触面应该高度抛光并镀铬，以使挤出料具有最佳的外观。

挤塑成型产品的类型

线材

采用半管或管十字口模可将 Radel 和 Veradel 树脂挤出到线材上。线材的插入温度应该接近于聚合物熔体的温度。Radel 和 Veradel 树脂可实现聚合物熔体管的高垂伸。建议在十字头上采用真空，这有助于提高聚合物管与线缆之间的粘合。不应应对包裹后的线缆进行淬火，最好是采用弥雾器或水浴进行缓慢地冷却。

薄膜

由于聚砜塑料具有高熔体强度，在制备薄膜时可表现出优异的垂伸特性。缝模流铸薄膜在相当宽的温度范围内具有高模量、良好的冲击强度以及良好的电特性。这种薄膜可进行热合，而且无需预处理就可进行印刷。

一个 64 mm 挤塑机所用的典型薄膜挤塑条件是：

口模：可选用衣架式设计和直的异型节流杆设计的标准薄膜口模。对于厚为 0.025 mm 到 0.25 mm 的薄膜，应采用 1 mm 到 1.5 mm 的模唇开口。口模必须能够在 240 巴的压力下持续运作。

破料板/网叠：破料板不是必需，并且它可引起“口模条纹”，但当它和网叠一起使用时，可以生成前后一致且没有缺陷的挤出料。另外也可以用套筒，它可使模头接套与挤塑机密闭。

压延辊：需要一台在 180°C 温度下工作直径为 215 mm 的辊子来防止薄膜的起皱。

薄片

可选用具有节流杆的标准圆球和泪珠状异型挤片模头。一般情况下，模口比希望达到的最终厚度值大 10% 到 20%。薄片的挤塑过程中，引出辊的温度必须保持足够高，以防止卷曲并使薄片中的应变最小。倘若可以获得 180°C 到 230°C 的辊子温度，利用“S”缠绕技术或者直通压延技术都可以得到令人满意的结果。直通压延技术要求在辊隙中间维持一条料垄（熔融料条）。

厚度高达 2.5 mm 的薄片采用电动剪来切分薄片的长度。对于更厚的薄片，建议采用电锯来切分。

管材和软管

采用标准的轴销和模芯组件，可挤出 Radel 和 Veradel 树脂的管材和软管。控制原料温度对获得高品质挤出料至关重要。建议采用 340°C 到 370°C 的原料温度。

控制尺寸的定径板和真空槽法令人满意。为对熔体的最佳控制，挤塑模应比定径模大 70% 到 100%。

为获得高品质的挤塑产品，必须使加工所引起的应力减小到最低程度。要达到这一目的，必须在保证尺寸要求的同时使真空定径槽中的冷却程度尽量小。为了达到这一目的，时间较短的水浴（聚乙烯通常水浴时间的 $\frac{1}{4}$ 到 $\frac{1}{5}$ ）较为理想。

起动、关机和清料筒

起动步骤

以 15 rpm 至 20 rpm 的螺杆速度，将经过预干燥处理的热塑料注入到经过预热的挤塑机。一旦注满了进料段，马上将速度降为 5 rpm 至 10 rpm，直到材料开始从口模排出。调整螺杆速度，以达到理想的挤出速率。

关机步骤

如果在挤塑成型过程中需要关机，必须注意以下几点。让塑料在挤塑机中长时间停滞在挤出温度下是不好的。在这种情况下可能会有一定程度的分解发生，而且会导致设备难以重新启动和清料筒。

如果关机时间较短（两个小时或更短），用 Udel 聚砜清洁挤塑机。将挤塑机排空，然后用饥饿加料方式重新启动。如果关机时间较长，应该先使用 Udel 聚砜清料筒，然后将挤塑机排空。应关掉挤塑机加热器，并使其冷却到室温。在第二天开启挤塑机时，应至少提前 1 小时开启口模加热器，但最好是提前两个小时，然后才打开挤塑机的加热器。挤塑机的温度一旦达到 315°C 至 343°C，螺杆就可以定期旋转直至达到挤出温度为止。首先以低的螺杆速度进行饥饿加料，直到材料开始从口模排出。

清料

可以用多种技术将 Radel、Veradel 和 Acudel 树脂从挤塑加工设备中清除。因为 Radel 树脂是坚韧、稳定的高温材料，所以最有效的清料程序是将 Radel 树脂替换为一种更易清除的低温塑料。通常情况下，推荐使用的清料材料是聚乙烯，但也可以使用其它适宜的商品清料用品。

最有效的清料程序是分步骤清料，最开始使用自然系列的聚砜塑料，例如 Udel P-1700，接下来使用低熔融流动性、高密度的聚乙烯。要一直添加聚砜，直到从模口流出的是清洁的料为止。用聚砜替换了 Radel、Veradel 或 Acudel 树脂以后，挤塑机的料筒温度可降低 15°C 到 25°C。在温度为 330°C 到 340°C 时，可向挤塑机中加入聚乙烯以清除聚砜，直到挤出料大部分为聚乙烯为止。当到达这一点的时候，可以拆下口模、接套和破料板，等待聚乙烯冷却便可将其清除，此时机器清料继续进行。当挤塑机排出的料中再也看不到聚砜的时候，可将温度安全地降至 150°C。然后可以使用多种清洁剂（如需要）。

另外一种清料程序是在 Radel、Veradel 或 Acudel 树脂后面直接添加低熔融指数、高密度的聚乙烯进行清料。在聚砜塑料的挤塑完成时，将机器中的塑料排空并引入聚乙烯继续挤塑，直到排出的料中没有明显的 Radel、Veradel 或 Acudel 复合物。口模、接套和破料板可以拆卸下来进行清洗。继续用聚乙烯进行清料，直到排出的料中没有明显的聚砜塑料，此时可将温度降到 150°C。

当清料结束并且挤塑机排空的时候，可以拆卸螺杆，将螺杆和料筒都刷干净。如果刷洗不能够去除残余的 Radel 树脂，可以小心将其烧掉。另外一种技术是将部件浸渍于 N 甲基吡咯烷酮（NMP）中直到残余的塑料充分软化以轻松将其去除。

机加工

可用常规的金属加工工具对 Radel、Veradel 和 Acudel 树脂进行机加工。由于其软化温度高，可用相对高的切削速度而不至于引起胶粘。这些材料固有的坚韧性使得可以切削深且平滑的切口而不会造成碎屑或脱粒。如果需要冷却，喷洒水的效果就很好。

钻孔和攻丝

建议使用标准的高速螺旋钻。建议采用 0.15 mm/rev 到 0.40 mm/rev 的进料速度和 90 m/min 的切削速度。应使用两槽或三槽高速钢制螺旋点丝锥进行攻丝。

锯切

每厘米 4 个锯齿的标准带锯在 900 m/min 到 1,500 m/min 的锯切速度下切割效果良好，但也可以使用其它的木料切割设备。

车削

可以使用常规变速的具有圆头或尖头刀具的金属车削车床。建议采用具有 3° 刀面角、10° 间隙角和 5° 侧角的尖锐刀具。

建议使用 150 m/min 到 600 m/min 的切削速度和 0.05 mm/rev 到 0.25 mm/rev 的进料速度。

铣和特形铣

可在无冷却液或润滑剂的条件下高速完成铣和特形铣。用于铝材加工的刀具效果很好。例如，一个 13 mm 宽和 2.5 mm 深的槽可以 115 mm/min 的进料速度和 1,750 rpm 的转速进行端铣。

修饰和装饰

聚砜塑料是极好的成品底材，几乎能满足任何装饰或功能修饰的要求。

上漆

采用有机涂料和常规的上漆技术可以给聚砜塑料涂上各种颜色。上漆是获得所期望外观的一种经济的方法。

对涂料的一项重要要求是必须粘合好而且不脆化。为获得合适的涂料粘合度，一定要将部件表面的外来物质如灰尘、油点、油脂和脱模剂等从表面除去。当存在污染物时，应先对部件进行清洗。操作得当的部件可能不用清洗，无需处理就可进行上漆。

尽管有时也用辊涂和浸渍，常用的上漆方法则是喷涂。

涂料的选择取决于对成品装饰或功能的要求以及所采用的上漆方法。用于涂敷的材料有：聚氨酯、聚酯、环氧树脂、丙烯酸树脂和醇酸树脂。

取决于所用的涂料，可以通过空气干燥或烘箱烘烤进行固化。如果需要烘烤，Radel、Veradel 和 Acudel 树脂的高耐热性使其可采用相对高的烘箱温度。

电镀

电镀的塑料部件十分耐用，可作为铸件和金属板的轻质替代品。经过特殊预处理在塑料部件上形成导电的表面后，就可以用与金属电镀类似的方法进行电镀加工。

热压印

热压印是一种一步完成且经济的方法，用于将高品质的图像印到塑料部件上。加热的压模将图案从转印带上转印到平整的塑料表面上。图案可以是字母，也可以是有颜色的装饰性花样、木纹或金属修饰物。

可采用卷轧式或垂直式设备对聚砜塑料进行成功的热压印。进行热压印没有特殊的工艺要求，压模温度、压力和保压时间都在常规范围内。

印刷

可采用丝网印刷技术和墨滚传递印刷技术成功地对聚砜塑料进行印刷。墨滚传递印刷可进行高速复制生产，具有良好的经济性。通过多色同步印刷设备，还可以复制单色或多色的图像。丝网印刷主要用于有限批量的生产。虽然丝网印刷比墨滚传递印刷速度慢，但是它能对异型面进行装饰，从而成为模塑部件的理想印刷方法。

适于在 Radel、Veradel 和 Acudel 树脂上使用的印刷墨水包括各种空气干燥墨水、多组分墨水以及紫外线固化墨水。

增强牌号的 Radel 和 Veradel 树脂可以接受激光打标。

真空金属喷镀

聚砜塑料已成功地进行真空金属喷镀，以接受装饰或功能性的金属涂层。虽然铝是最常用的涂层材料，但其它金属如金、银、黄铜和铜也可以采用。

对大多数热塑性材料来说，真空喷镀工序的第一步是用搪瓷或漆打底以平整部件表面，这样可提高表面亮度。底层同时也有粘合剂功能，将模塑部件和金属涂层接合起来。

然后将部件放置在真空室内，金属蒸气在真空室内形成并沉积在部件上成为涂层。接着在薄薄的金属涂层外再涂上一层具有保护性的透明面层，以增加耐磨损性和耐环境性。Radel 和 Veradel 树脂的高耐热性，使其可采用需要高温烘烤但耐用、耐磨的涂层。

在模塑部件上添加金属表面会使模塑件表面的缺陷更加突出，因此模具表面应该高度打磨抛光。

阴极镀膜

Radel 和 Veradel 树脂的高耐热性允许其进行阴极镀膜。低蒸汽压的金属使用最多，例如铜和银。其它可以接受的金属包括铂、钯和金。

阴极镀膜可以精确的控制金属涂层的厚度并且改善涂层与部件之间的粘合。这两方面对于诸如亚微型电气线路类的应用都十分关键。

火焰 / 电弧喷涂

火焰和电弧喷涂金属薄层可以成功用于 Radel 和 Veradel 树脂。

这种方法需要将纯铝、铜或锌粉定量置于专用喷枪内。利用火焰或电弧将金属粉末熔融并且喷涂到部件上面，形成坚硬、致密的金属涂层。

装配和接合

超声焊接

超声焊接是一种用来把塑料部件粘结在一起的装配技术。该技术非常快速，可全自动地获得高速、大批量生产。超声焊接需要注意诸如接头设计、焊接参数、夹具以及水分含量等细节。

超声接头设计的原则是，一开始将能量集中在一个小的接触面内。高频振动使材料熔融，在振动停止后熔体凝固时需要保持压力。所形成的焊接可与原始材料一样坚固。

可焊性取决于单位面积上振动能量的强度。与聚碳酸酯相比，Radel 和 Veradel 树脂具有较高的熔融温度，因而需要更多的能量使材料在接头位置熔融并流动。

具有能量导向头的基本对焊接头如图 63 所示。V 形的能量导向头将超声能量集中到该区域，它会随着部件被挤压到一起而迅速熔融并产生一个熔融池。如果期望将接头密封，则应选用一个相配的流程道。

有助于确保获得最佳结果的其它建议如下：

焊接角应该具有适当的接触面积

接点/焊缝区域应尽可能接近焊接角接触塑料部件的位置
避免大的交配面和紧配合的接头

允许熔融材料的充分流动

旋转焊接

旋转焊接是粘接具有圆焊缝接口部件的一种快速方法。其中的一个部件保持固定，另一部件在特定压力下旋转并与其接触。在接口的界面间会产生摩擦热。发生熔融后即可停止相对运动，并在压力下使焊接处固化。

图 63: 能量导向头设计

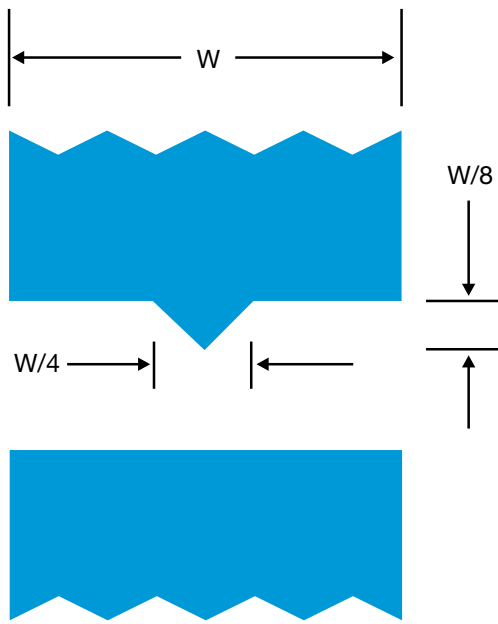
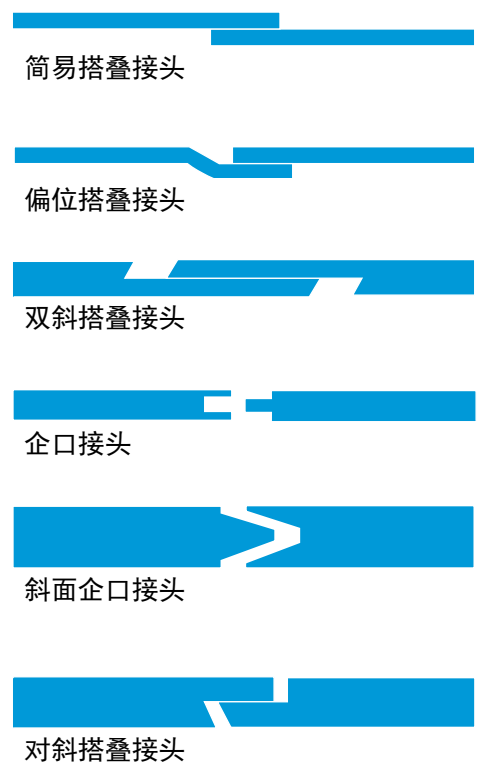


图 64: 粘合剂粘合的接头设计



粘合剂粘合

采用市面上已有的粘合剂，可以把 Radel 和 Veradel 树脂模塑的部件与这些树脂的其它模塑部件或其它材料粘合起来。粘合剂粘合的成功取决于最终使用的环境因素，如工作温度、接头设计、所施加的应力和所接触的化学品。

建议用于热塑性材料的粘合剂有：环氧树脂、丙烯酸树脂、酚醛树脂、聚氨酯、聚酯和乙烯树脂。有关粘合剂的详细建议可与粘合剂供应商联系获得。但是，设计者应该在实际的最终使用环境中对粘接处的性能进行试验。

同样重要的是，表面不能含有任何的污染物，如油脂、油点、指纹印和脱模剂等，这些污染物会削弱粘合强度。在某些情况下，要粘合的材料表面必须先进行化学刻蚀或机械糙化处理，使粘合剂具有坚固的粘着力。夹钳的压力应足够大，以确保界面的良好接触。但也不能过高以至于使部件变形或将粘合剂从粘接处挤出。

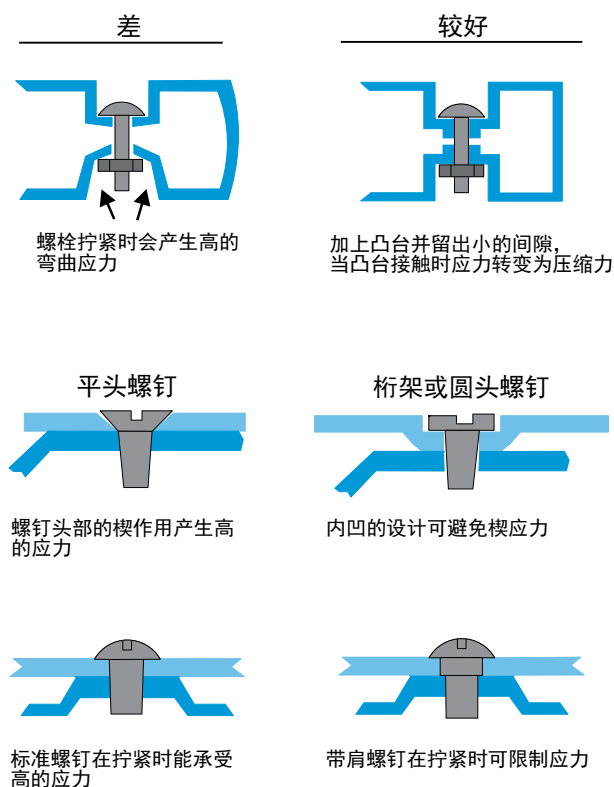
粘接区域的设计应使得两个部件能够准确地配合在一起。图 64 显示了所推荐的用于粘合剂粘合的接头设计。所用部件应是具有低残余应力和精确尺寸的模塑件。

机械紧固件

常与注塑成型的塑料部件一起使用的紧固件包括螺钉、螺栓、螺母、防松垫圈和锁定螺母。在使用金属的机械紧固件时，应采用适当的设计原则以避免使装配件中的塑料部件应力超限。

避免高应力装配件最显而易见的方法是采用可调的转矩限制器来控制机械紧固件的紧固。在无法控制转矩的情况下，例如进行现场装配，可以用带肩螺钉来限制塑料部件上的受压。其它的可选方法有：使用凸头螺钉、大的垫圈或者带肩垫圈。图 65 所示为使用机械紧固件的一些首选设计。

图 65: 适合机械紧固件的设计



模塑螺纹

通过模塑螺纹，将内螺纹和外螺纹模塑到需要装配的部件上。模塑内螺纹通常要求模具具有某种旋松或折叠机制，如图 66 所示。在有些情况下，可沿分模线分割模塑成型外螺纹，如图 67 所示。模塑非常细的、长度超过 28 齿距的螺纹通常是不实际的。

螺纹嵌入件

金属螺纹嵌入件是在塑料部件中加入永久性的金属螺纹。嵌入件的尺寸和类型可以各种各样。嵌入件通常安装在模塑的凸台中，凸台则具有专门为嵌入件而设计的内径。有些嵌入件要被强制压入凸台中，而另一些嵌入件则可采用应力较小但连接更强的方法进行安装。

超声嵌入是一种非常流行的嵌入件类型。这类嵌入件采用与超声焊接相同的设备进行安装。由于超声焊接是将金属嵌入件周围的材料熔融，所以这样的安装通常是既坚固又相对无应力。

除内螺纹外，嵌入件还可以是外螺纹、定位栓和轴衬。推荐的安装方法和凸台尺寸可与嵌入件供应商及塑料生产商联系获得。

图 66: 内螺纹

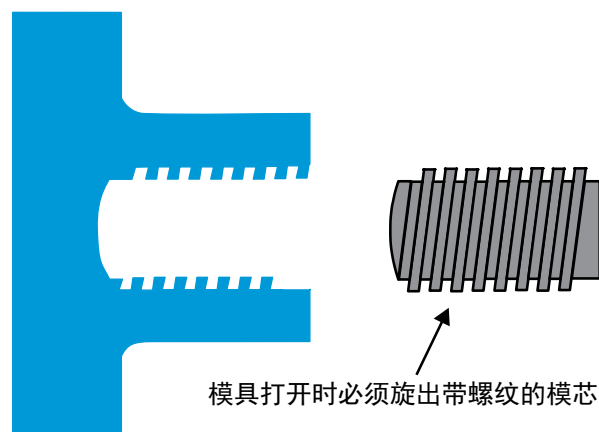
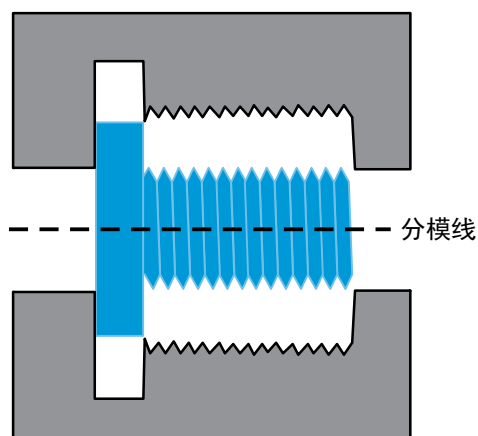


图 67: 外螺纹



自动攻丝螺钉

自动攻丝螺钉适用于 Radel 和 Veradel 树脂。自动攻丝攻丝螺钉是连接塑料部件的一种经济的方法，因为它们省掉了模塑内螺纹或者进行另外的攻丝操作。

自动攻丝螺钉的主要类型是螺纹成型螺钉和螺纹切削螺钉。两种自动攻丝螺纹各有优缺点，这取决于不同的应用。螺纹切削螺钉机械地除去材料而形成螺纹，与使用丝锥形成螺纹一样。螺纹切削螺钉所需的驱动转矩较小，因而凸台应力也小，而且其拆卸转矩和拔拉强度都较小。螺纹成型螺钉在拧入时使材料变形，从而在塑料部件中形成螺纹。螺纹成型螺钉产生较高的凸台应力，而且需要较高的驱动转矩，但也提供较高的拆卸转矩和拔拉强度。建议使用的螺钉类型最好由原型试验来确定。

图 68 举例说明了配用自动攻丝螺钉的基本设计原则。这包括：

使用直径等于螺纹中径的螺孔，以获得最高的拆卸转矩和驱动转矩比。

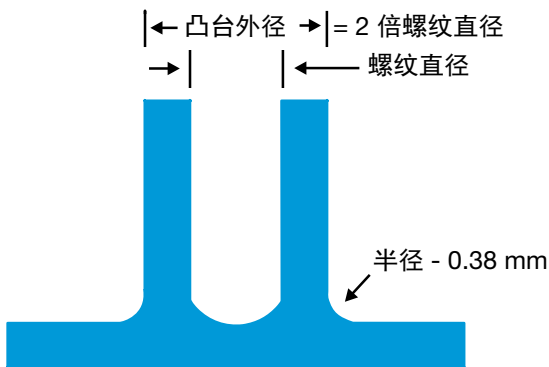
建议使用直径为螺钉直径两倍的凸台。太薄的凸台可能会开裂，而更厚的凸台也不会增加拆卸转矩。

拆卸转矩随着啮合长度的增加而迅速增大，在啮合长度大约等于螺钉螺纹中径的 2.5 倍以后趋于稳定。

在装配线上采用可控制转矩的驱动器，以避免出现部件脱离或高应力的装配件。

采用自动攻丝螺钉时，应避免反复装配和拆卸。如果需要反复装配，建议采用螺纹成型螺钉。

图 68：自动攻丝螺钉的凸台设计



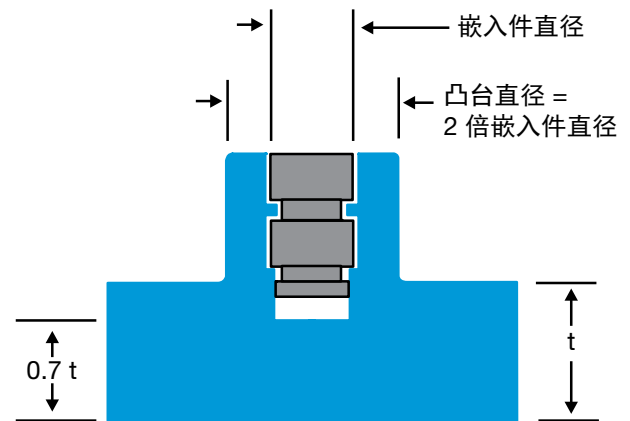
超声嵌入件

除了模塑嵌入件和压配嵌入件外，还可通过超声将金属件嵌入到塑料部件中。经过适当的设计，超声嵌入法可获得比其它嵌入法更小的残余应力。

超声嵌入件的类型很多，但它们的设计原则非常相似。都是通过嵌入件的压力和超声振动使金属与塑料界面的材料熔融，从而将嵌入件插入到模塑或机钻的孔中。塑料被熔融并被大直径的嵌入件挤出，然后流入一个或多个凹槽内固化并锁住嵌入件。

图 69 显示了推荐用于聚砜塑料的嵌入件和凸台的设计。

图 69：超声嵌入件的凸台设计



搭扣配合

Radel 树脂的延展性及其强度使得其非常适合用于制作搭扣配合的装配件。在所有的搭扣配合设计中，模塑部件的某些部分必须象弹簧一样可弯曲，经过所设计的扰动后返回其不可弯曲的位置，从而将两个或更多个部件装配在一起。搭扣配合设计的关键是在不超过材料弹性或疲劳限度的条件下使设计具有足够的握持力。

最常见的两类悬臂梁的搭扣配合是直梁和锥形梁。图 70 和图 71 所示的是这些典型的搭扣配合设计及计算装配过程中最大应变的相应方程式。图 72 给出了锥形梁设计所用的比例常数。设计的最大应变不应超过表 45 中所列的允许应变。

表 45: 搭扣配合设计的最大允许应变

	最大允许应变
Veradel A-201	6.0
Veradel AG-320	1.5
Veradel AG-330	1.0
Radel R-5000/5100	6.7

建议让搭扣配合的弹力件位置远离尖角、浇口或接合线。如果需要大量的装配循环，应该考虑材料的疲劳寿命，并且要求具有较低的应变极限。

图 70: 采用直梁的搭扣配合设计

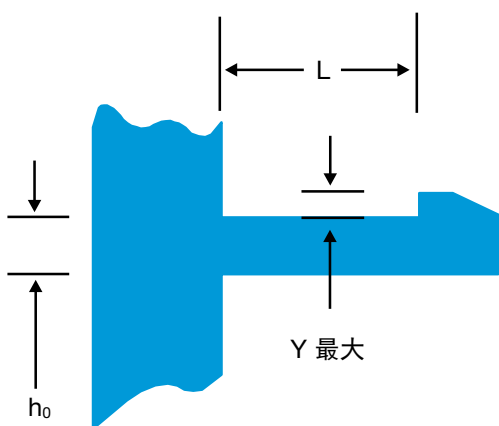


图 71: 采用锥形梁的搭扣配合设计

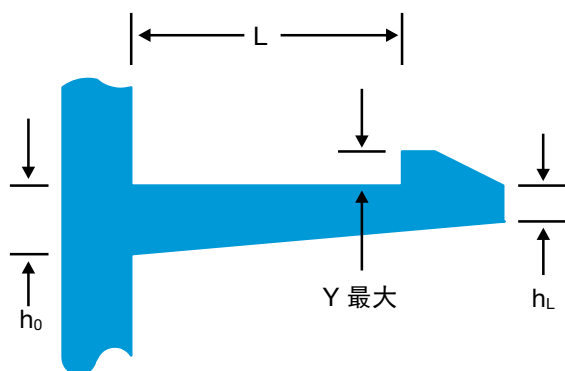
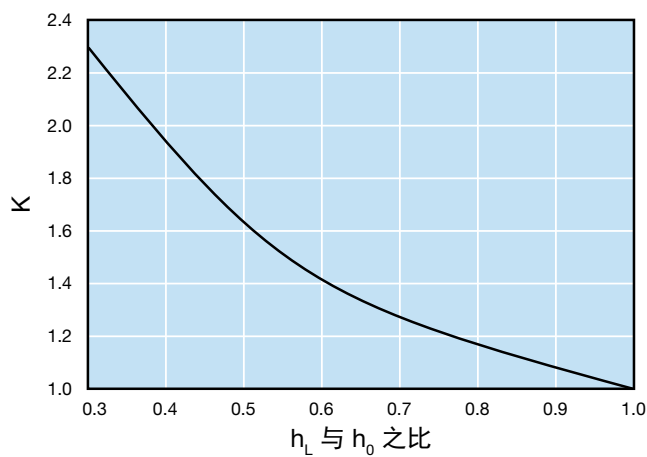


图 72: 锥形梁的比例常数 (K)



ISO 10993.	. 5	挠曲特性	. 12
NSF 第 51 号标准: 食品设备材料	. 5	挤塑.	. 48
NSF 第 61 号标准: 饮用水系统部件	. 5	挤塑成型产品的类型	. 49
对健康的影响	. 5	挤塑温度	. 48
Radel 的耐化学性	. 27	损耗因子	. 24
UL 94	. 21	排气.	. 44
UL 746A 短期特性	. 24	搭扣配合	. 55
UL 相对热指数	. 23	收缩率	. 46
上漆.	. 51	料筒中的滞留时间.	. 45
二次加工	. 51	料筒温度	. 45
产品资料	. 3	旋转焊接	. 52
介电常数	. 24	机加工	. 51
介电强度	. 24	机器设置	. 45
体积电阻率.	. 24	机械特性的变化	. 18
保险商实验所	. 6	机械紧固件.	. 53
修饰和装饰.	. 51	机械设计	. 35
健康及安全考虑	. 48	材料选择	. 3
关机步骤	. 50	模具.	. 44
典型特性表.	. 7	模具温度	. 45
冲击特性	. 14	模具温度控制	. 44
凸台.	. 40	模塑螺纹	. 54
剪切特性	. 13	残余应力的测量	. 47
加工.	. 41	比热.	. 21
加强筋结构.	. 39	氧指数	. 21
化学.	. 2	水解稳定性.	. 25
化学结构 - 特性关系	. 2	泊松比	. 15
印刷.	. 52	法国 ACS 卫生合格证书	. 6
压缩特性	. 13	注塑.	. 44
口模设计	. 49	注塑成型过程	. 45
同步应力-应变曲线	. 17	注塑温度	. 45
吸水性	. 34	注塑设备	. 44
命名法	. 4	注塑速率和排气	. 46
喷嘴.	. 44	流变性能	. 42
国际饮用水接触标准	. 6	浇口.	. 44
料流动特征.	. 46	清料.	. 50
壁厚.	. 39	温度对拉伸强度的影响	. 19
壁厚变化	. 39	温度对模量的影响.	. 19
大电流电弧点燃 (HAI)	. 25	火焰 / 电弧喷涂	. 52
密度.	. 33	烟气密度	. 21
导热率	. 20	热丝点燃 (HWI)	. 25
线材.	. 49	热压印	. 51
干燥.	. 41	热变形温度比较	. 19
应力-应变曲线.	. 10	热塑性树脂的分类.	. 18
应力-应变的计算	. 35	热特性	. 18
应力水平	. 35	热稳定性	. 22
应力集中	. 38	热老化	. 23
引言.	. 1	热膨胀系数.	. 20
德国联邦卫生部	. 6	热重分析	. 22
抗辐射性	. 33	熔融加工参数	. 44
抽芯.	. 40	燃烧特性	. 21
拉伸冲击	. 15	物理特性	. 33
拉伸特性	. 7	特性数据	. 7

玻璃转化温度	18
电特性	24
电镀	51
疲劳	17
相对漏电起痕指数 (CTI)	24
真空金属喷镀	52
短期特性7
确定残余应力的步骤	48
管材和软管	49
粘合剂粘合	53
索引	57
缺口伊佐德	14
缺口敏感度	15
美国国家卫生基金会5
耐化学性	26
耐应力开裂	29
耐环境性	25
耐磨损性	15
背压	45
脱模	46
脱模角度	39
脱模角度和脱模	44
自动攻丝螺钉	54
自燃温度	21
英国饮用水法规6
蒸汽消毒分析	26
薄片	49
薄膜	49
螺杆末端和止逆阀	44
螺杆设计	44
螺杆设计建议	49
螺杆速度	45
螺纹嵌入件	54
蠕变	16
蠕变模量	16
装配和接合	52
认证5
设计信息	35
设计极限	38
试验变量	19
起动、关机和清料筒	50
起动步骤	50
超声嵌入件	55
超声焊接	52
车削	51
载荷下变形温度	19
进料特征	45
配合注塑的设计	39
钻孔和攻丝	51
铣和特形铣	51
锯切	51
长期特性	16
阴极镀膜	52
预干燥	48
食物接触5
高压、低电流干态耐电弧性	24
高压电弧起痕率 (HVTR)	25



特种聚合物

全球总部

SpecialtyPolymers.EMEA@solvay.com

Viale Lombardia, 20
20021 Bollate (MI), Italy

美洲总部

SpecialtyPolymers.Americas@solvay.com

4500 McGinnis Ferry Road
Alpharetta, GA 30005, USA

亚洲总部

SpecialtyPolymers.Asia@solvay.com

No.3966 Jindu Road
Shanghai, China 201108
上海市金都路3966号
邮编: 201108

www.solvay.com

发送电子邮件或者联系您的销售代表, 均可获取相应的安全数据表(SDS)。在使用我公司的任何产品之前, 请您务必参考相应的安全数据表。

苏威特种聚合物公司及其子公司对于与该产品或该产品使用方面的有关信息, 无论是明示或者是暗含的, 包括适销性或适用性, 均不予以承担任何保证或者接受任何责任义务。某些适用法律、法规, 或者国家/国际标准可能会对苏威产品的某些建议应用领域进行规范或者限制。并且, 在苏威建议的某些情况中, 包括食品/饮料、水处理、医疗、制药以及个人护理等方面, 也可能对苏威产品进行管制和限制。只有指定作为 Solviva® 的生物材料类的产品才可用作植入式医疗器械的备选产品; 苏威特种聚合物公司不允许也不赞成在任何植入式器材中使用任何其他产品。产品用户必须最终确认所有信息或者材料在拟用于任何方面时是否适用, 是否符合相关法律的规定, 使用方式是否得当, 以及是否侵犯了任何专利权。本信息供专业技术人员酌情使用, 并自行承担相关风险, 并且与该产品结合任何其他物质或者任何其他工艺的使用无关。本文件未授予使用任何专利或者其他任何所有权的许可。

所有的商标或者注册商标均归属于组成苏威集团的各公司或者各所有者拥有。
© 2014, Solvay Specialty Polymers. All rights reserved. D 2004 | R 03/2014 | Version 5.5