

注塑件熔接痕强度预测及提高新技术

杨风霞 王雪静 王爱荣

(河南科技学院化学化工学院,新乡 453003)

蔡忠义

(沈阳金碧兰化工有限公司,沈阳 110163)

摘要 介绍了注塑件熔接痕强度预测及提高的几种新技术。综述了基于扩散理论和 Flory-Huggins 晶格理论的预测模型及基于 BP 神经网络的预测模型,给出了模型的适用范围。简述了热流道多浇口进料顺序控制、注射成型和模具设计等几种提高熔接痕强度、减少或避免熔接痕出现的新技术的作用机理及应用实例,指出进一步完善熔接痕强度预测模型和强度提高技术是今后熔接痕研究的一个重要方向。

关键词 注塑件 熔接痕强度 预测模型 提高 新技术

注射成型是聚合物加工中最重要也是最具发展前景的加工手段之一,特别适用于制造结构复杂的制品。它的特点是生产周期短、适应性强、生产率高且易于自动化,因此广泛用于塑料制品的生产中,注塑件占目前塑料制品产量的 20% ~ 30%^[1]。近年来,大型复杂制件逐渐增多,人们对制件外观和内在性能的要求也越来越高,而熔接痕是注塑件最常见也是最难避免的缺陷之一,因此人们对注塑件熔接痕的分析给予了普遍关注^[2]。熔接痕经常会产生在多浇口或有嵌件的注塑件中,不仅使注塑件的外观质量而且使其力学性能如拉伸强度等受到不同程度的影响,如何准确预测熔接痕强度,并设法提高熔接痕强度使之满足不同使用场合的需要是个很有意义的课题。提高熔接痕强度的方法很多^[3-5],笔者现着重介绍熔接痕强度预测和提高的新技术。

1 熔接痕强度预测模型

1.1 基于扩散理论和 Flory-Huggins 晶格理论的预测模型

该预测模型主要用于预测玻璃态无定形聚合物、不相容共混物和无定形共混物的熔接痕强度。

(1) 玻璃态无定形聚合物熔接痕强度预测模型

S. G. Kim 等^[6]认为影响熔接痕强度的主要因素是熔接痕处的弱连接和分子链沿熔接痕方向取向。他们提出了熔接痕强度与熔体温度和熔合时间的函数关系式,见式(1)。

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_b} = 1 - \exp - \frac{CD}{KT} (2\gamma - KT\delta_0\delta_{0A}\ln\frac{1}{2})t \quad (1)$$

式中: σ_w ——有熔接痕试样的拉伸强度;

σ_b ——无熔接痕试样的拉伸强度;

C ——常数;

D ——自扩散系数;

K ——Boltzmann 常数;

T ——热力学温度;

γ ——表面张力;

δ ——界面扩散层厚度;

δ_0 ——单位体积中的晶格数;

t ——接触时间。

该模型假定熔接痕处的分子扩散只是一种单纯的分子跨越界面的扩散,界面由一个充分熔接区和一个非熔接区构成,熔接痕强度以熔接度表示。如果已知材料参数、成型条件、熔体温度,很快就会预测出粘结度。对于聚苯乙烯(PS),实验值与预测值能较好地吻合。

(2) 不相容共混物和无定形共混物熔接痕强度预测模型

N. Mekhilef 等^[7]用 S. G. Kim 模型预测了聚碳酸酯(PC)的熔接痕强度,模型预测结果与实验结果有很好的 consistency。然而却不能使用该模型来预测高密度聚乙烯(HDPE)的熔接痕强度,预测结果表明熔接痕的存在并没影响 HDPE 的拉伸强度。他们将模型拓宽到不相容体系如 PC/PE,在 S. G. Kim 预测模型的基础上,考虑与熔接相关的 3 个不同的扩散系数,建立了不相容聚合物熔接痕强度随熔接时间和熔体温度变化的理论预测模型,见式(2):

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_w}{\sigma_b} = & 1 - \phi_A^2 \exp - \frac{C_A D_A}{KT} (2\gamma_A - KT\delta_{0A}\delta_{0A}\ln\frac{1}{2})t \\ & - \phi_B^2 \exp - \frac{C_B D_B}{KT} (2\gamma_B - KT\delta_{0B}\delta_{0B}\ln\frac{1}{2})t - \\ & (1 - \phi_A^2 - \phi_B^2) \exp - \frac{C_{AB} D_{AB}}{KT} (\gamma_A + \gamma_B) + \\ & [RT\delta_{0AB} (\frac{R}{M_A} \phi'_A \ln \phi'_A + \frac{R}{M_B} \phi'_B \ln \phi'_B + x_{AB})]t \quad (2) \end{aligned}$$

式中: ϕ_A 、 ϕ_B ——A、B 的体积分数;

C_A 、 C_B 、 C_{AB} ——常数;

D_A 、 D_B 、 D_{AB} ——在 A 相、B 相、A 相在 B 相的扩散系数;

γ_A 、 γ_B ——A、B 的表面张力;

ρ_A 、 ρ_B ——A、B 的密度;

M_A 、 M_B ——A、B 的平均分子量;

ϕ'_A 、 ϕ'_B ——对相间扩散有贡献的 A 和 B 的体积分数。

用这个模型可预测共混物在不同组成与温度下的熔接痕强度,对于 PC/PE(80/20) 共混物,220 ~ 300℃ 时实验结果与预测结果有很好的 consistency。但扩散模型包含过多的材料参数,限制了它的使用,特别是没有考虑到材料常数随材料相态的变化。

(3) 修正后的熔接痕强度预测模型

Guo Shaoyun 等^[8]通过引入界面扩散层厚度对 S. G. Kim 模型和 N. Mekhilef 模型进行了修正,在他们的模型中引入界面扩散层厚度和熔接时间之间的函数关系式(3):

$$\delta = 2(Dt)^{1/2} \quad (3)$$

将式(3)分别带入式(1)和式(2),修正后的式(1)用于预测玻璃态无定形聚合物,式(2)用于预测无定形共混物。用修正公式对玻璃态无定形聚合物 PS、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和无定形共混物 PS/PMMA(80/20, 70/30)的熔接痕强度进行了预测,理论预测结果和实验结果有很好的 consistency。然而对于 PS/PMMA(20/80, 30/70),模型的预测结果要比实验结果高得多,PS/PMMA(20/80, 30/70)的熔接痕区域显示缺乏 PS 分散相,在靠近熔接痕区域,分散相 PS 沿着熔接痕高度取向。

1.2 基于 BP 神经网络的预测模型

刘娜^[9]选择 BP 神经网络构建了模具温度、熔体温度、注射速度和保压压力 4 个工艺参数与制品熔接区域拉伸强度之间关系的模型,神经网络结构为 4-13-1,利用实验获取的 25 组训练样本数据对 BP 网络进行训练,并用实验获取的 9 组检验样本检验训练好的神经网络模型的预测精度。结果表明,将人工神经网络方法运用于研究注塑工艺参数与尼龙 6(PA6)/蒙脱土纳米复合材料注塑件熔接痕拉伸强度的关系是有效、可行的,利用这种方法还可以对熔接区域的力学性能作更深一步的研究。

此外, I. S. Dairanieh 等^[2]利用数值方法研究了粘度、密度、PVT 状态方程对熔接痕的影响,并用

粘度来表征熔接痕的强度。

2 提高熔接痕强度新技术

熔接痕的出现降低了制品的力学性能,人们想方设法通过优化工艺参数和制品设计、采用新型注塑机或模具结构来提高熔接痕强度,笔者现着重介绍后一种。

2.1 热流道多浇口进料顺序控制

通过设置控制阀和控制多浇口进料顺序的方法可以避免或大大减少大型制件上的熔接痕,提高制品强度。

牛磊^[10]通过在原有注塑机热流道基础上加装用组态软件控制液压回路实现的多浇口(或多喷嘴)顺序控制系统,有效消除了某轿车前保险杠注塑涂装过程中频繁出现的熔接痕缺陷。其研究成果可直接应用于现有注塑机的热流道注射成型,对既有注塑机改造及设计新型注塑机具有较高的实用价值。

董林^[11]在原有注塑机系统上加装时序控制系统,通过控制各个浇口的开闭时间有效消除了洗衣机双联桶外表面上的熔接痕。该控制系统是在大型注塑机及其热流道模具的基础上,通过注塑机的射胶信号作为注塑机与该控制信号的接口,在不改变注塑机原有控制系统的前提下实现多浇口的时序控制。多浇口进料顺序控制工艺^[12]如图 1 所示。喷嘴的打开和关闭取决于熔料填充过程,先打开的喷嘴注射出的熔体作为流动前沿,而后打开的喷嘴流出的熔料直接进入先前流出的熔体内部,做到一个充型方向上只有一个流动前沿(即中心喷嘴产生的流动前沿),从而消除分支流动的多前沿相遇问题,使熔接痕消失或被驱赶到不重要的两侧。首先,打开中心浇口喷嘴,熔体前沿分别向两侧的 2 个喷嘴推进(见图 1a);然后,当熔体前沿刚流过两侧的浇口喷嘴时,关闭中心浇口,打开两侧的浇口喷嘴,使新的熔体从内部进入原熔体,保持原有流动前沿,达

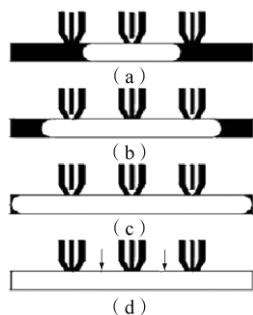


图 1 多浇口顺序进料

到熔体进一步向型腔内部转移(见图1b);当熔体充填完毕后,进入保压阶段,此时所有浇口喷嘴全部打开进行保压补缩(见图1c);最后,保压过程结束,所有浇口喷嘴关闭,进入下一注射循环(见图1d)。褚建忠^[13]也采用针阀式热喷嘴控制的顺序浇注系统有效消除了汽车前保险杠上的熔接痕。

顺序进料方法相应的成型控制系统已初步研究成功,并已得到汽车等大型零件生产企业关注^[14]。谭文胜等^[15]将某平板注塑件的模具浇注系统流道设计为热流道,应用注塑CAE技术,结合自动控制技术,通过控制阀门的动作、流体的速度和压力从而实现对注塑充填过程的优化控制,其原理如图2所示。两侧浇口采用阀式浇口控制,阀式浇口采用自动方式打开,改变熔体的流动方向和流量。结果表明,采用阀式浇注技术实现了塑料熔体充填模式的动态控制,避免了平板注塑件表面常见的熔接痕,得到了理想的充填效果,模拟结果与实际相符。

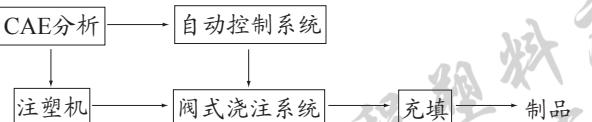
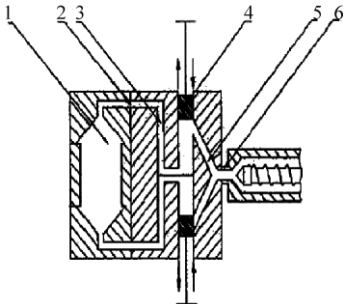


图2 阀式浇注系统的控制原理图

2.2 注射成型新技术

(1) 基于剪切控制取向的注射成型

剪切控制取向注射成型技术^[16]又称动态保压注射成型,是在注塑机喷嘴和模具之间设置一个带有2个流道的附件,该附件的流道上设有2个可独立运动的保压活塞,且该附件的2个流道分别连接模具的2个浇口。熔体注入模腔后,通过两个活塞以同样的频率呈反方向推动熔体在模腔中反复流动,直到最后模腔中的熔体完全冷却固化,通过控制活塞运动的频率、熔体温度等加工参数,可获得在流动方向上性能有较大改善的注塑件,可解决厚壁制件存在的熔接痕问题。其实验装置如图3所示。研



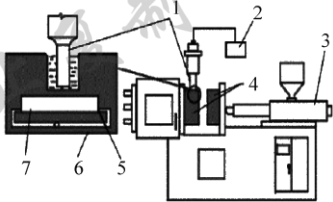
1—模腔; 2—连接器; 3—流道; 4—活塞; 5—浇口; 6—喷嘴

图3 动态保压注射成型装置

究表明,动态保压可以大幅度提高玻纤(GF)增强体系及液晶聚合物的熔接痕强度,对于长GF和短GF增强聚丙烯(PP),施加振动后,其熔接痕强度接近本体部分,而液晶聚合物的熔接痕强度也提高至本体部分的80%左右。但施加振动对PP、(丙烯腈/丁二烯/苯乙烯)共聚物(ABS)、高抗冲聚苯乙烯(HIPS)熔接痕强度没有改善^[17]。

(2) 基于超声振动的注射成型

Guo Shaoyun等^[17-21]将超声振动引入注射模具型腔,实验装置如图4所示。采用全过程施加超声振动和充模后施加超声振动两种方式,分别对PS、PP、PS/PA6(70/30)、PS/HDPE(80/20,90/10)、PP/HDPE(80/20)、PS/PMMA(50/50,20/80,80/20)体系进行了实验,结果发现在注射成型过程中施加超声振动可以促进熔体分子链在熔接痕处的扩散,提高熔接痕强度。



1—超声波探头; 2—超声波发生器; 3—注塑机;

4、6—模具; 5—浇口; 7—型腔

图4 带有超声振动装置的注塑机及其模具

对于无定形聚合物PS,施加超声振动后其熔接痕强度比未施加超声振动样品提高了30%;对于分散相在熔接痕处以纤维状分布的PS/PA6(70/30)共混体系,施加超声振动可以将体系的熔接痕强度提高83.7%;对于分散相在熔接痕处以片状分布的PS/HDPE(80/20)共混体系,施加超声振动不足以改变片状结构,因而对熔接痕强度的提高不明显;对于分散相在熔接痕处以球状分布的PS/HDPE(90/10)共混体系,施加超声振动可以提高熔接痕强度,在充模后施加超声振动比在注射过程中施加超声振动更能有效改善熔接痕强度,与未施加超声振动样品相比,其熔接痕强度提高了71.4%;对于分散相在熔接痕处以球状分布的PS/PMMA(80/20)共混体系,施加超声振动可以将熔接痕强度提高70%;对于分散相在熔接痕处以条纹状分布的PS/PMMA(50/50,20/80)共混体系,施加超声振动不足以改变分散相的取向,因而对熔接痕强度的提高不明显;对于结晶聚合物PP,其熔接痕强度与本体部分接近,施加超声振动使熔接痕强度略有提高;对于结晶

聚合物 PP/HDPE(80/20) 共混体系,施加超声振动后熔接痕强度提高不大。

2.3 模具设计新技术

D. O. Kazmer^[22] 等在模具流道上设置两个阀门,在熔接痕形成后,关闭其中一个阀门,此时由于型腔内两端压力不平衡,使熔体流向阀门关闭的一端,熔体的流动也带动熔接痕的位置发生相应改变,使其向关闭阀门方向移动;然后关闭的阀门打开,而打开的阀门关闭,此时,熔体的流向又发生改变,带动熔接痕移动。以上过程重复几次后,熔体在型腔内冷却。实验结果表明,采用该方法可以提高 GF 增强 PC 的熔接痕强度。

S. Piccarolo 等^[23] 通过改变模具两端浇口的尺寸来提高熔接痕强度,将模具两端浇口设计成一个大、一个小。由于浇口尺寸不同,因而两端熔体的注塑压力不同,当熔体相遇时,形成的熔接痕不是平面形状,而是一端熔体嵌入另一端熔体,这样形成的熔接痕长度要比浇口尺寸一样时大,有利于熔接痕强度的提高。通过对 PA/GF 体系进行试验,发现嵌入尺寸从 0.8 mm 增加到 1.7 mm,熔接痕拉伸强度从 96 MPa 提高到 109 MPa,冲击强度从 13.21 kJ/m² 提高到 21.73 kJ/m²。

Chen Shia-Chung^[24] 分别采用数值模拟和实验观察方法运用电磁感应加热结合冷冻液冷却技术达到控制动模表面温度的目的,4 s 内可以把模具表面温度从 110℃ 升高到 200℃,21 s 内再冷却回到 110℃。模具表面温度升温速率可达 22.5℃/s,降温速率达 4.3℃/s。而且在升降温过程中,模板温度均匀,对一个双浇口 ABS 拉伸样件模具在熔体注射前感应加热几秒钟到玻璃化转变温度以上,可使制件的熔接痕消除,相应的强度提高。

另外,G. Gardner 等^[25] 采用往复式钉销、D. O. Kazmer^[26] 通过增加阀浇口来实现体积收缩动态控制,改善熔接痕性能。

3 结语

熔接痕会造成聚合物特别是无定形聚合物及共混物制件的性能有较大或部分损失,而在注射成型过程中,熔接痕又是不可避免的。通过熔接痕强度预测公式可以预测无定形聚合物及其共混物的熔接痕强度,通过 BP 神经网络可以预测不同工艺参数下的熔接痕强度;在熔接痕形成过程中施加往复剪切及超声振动,对模具的结构进行改进、对大型制品采用热流道多浇口进料顺序控制都可较大幅度提高

注塑件的熔接痕强度,为改善熔接痕强度提供了新的途径,而这些新技术的进一步完善必将成为今后熔接痕研究的一个重要方向,为扩大注塑件的市场占有率打下良好的基础。

参考文献

- [1] 王贵恒. 高分子材料成型加工原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991.
- [2] Dairanieh I S, Haufe A, Wolf H J, et al. Computer simulation of weld lines in injection molded poly (methyl methacrylate) [J]. Polym Eng Sci, 1996, 36: 2050 - 2057.
- [3] 杨风霞, 郝海玲, 游红伟. 材料性质对熔接痕的影响[J]. 工程塑料应用, 2006, 34(7): 40 - 43.
- [4] 杨风霞, 姜小莹, 汤波. 工艺参数对熔接痕的影响[J]. 塑料工业, 2006, 34(9): 33 - 36.
- [5] 杨风霞, 刘萍, 亓新华, 等. 注塑件熔接痕位置预测技术的研究进展[J]. 合成树脂及塑料, 2008, 25(5): 78 - 82.
- [6] Kim S G, Suh N P. Performance prediction of weldline structure in amorphous polymers[J]. Polym Eng Sci, 1986, 26(17): 1200 - 1206.
- [7] Mekhilef N, Ait-Kadi A, Ajji A. Weld lines in injection-moulded immiscible blends: Model predictions and experimental results [J]. Polymer, 1995, 36(10): 2033 - 2042.
- [8] Guo Shaoyun, Ait-Kadi A, Bousmina M. A modified model predictions and experimental results of weld-line strength in injection molded PS/PMMA blends[J]. Polymer, 2004, 45: 2911 - 2920.
- [9] 刘娜. 注塑工艺参数对尼龙 6/蒙脱土纳米复合材料熔接线拉伸性能影响的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2007.
- [10] 牛磊. 热流道多浇口顺序控制消除熔接痕的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [11] 董林. 消除注塑件熔接痕的技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [12] 芦亚萍. 熔接痕的形成机理及控制方法[J]. 模具工业, 2006, 32(12): 61 - 64.
- [13] 褚建忠. 应用顺序浇注系统消除大型塑件的熔接痕[J]. 轻工机械, 2008, 26(1): 93 - 96.
- [14] 闵雄伟. 程序控制浇口技术在大型注塑模具中的应用[J]. 上海汽车, 2002(10): 15 - 18.
- [15] 谭文胜, 周建忠. 基于阀式浇注技术的注塑件熔接痕控制[J]. 工程塑料应用, 2006, 34(7): 37 - 39.
- [16] 傅强. 聚烯烃注射成型——形态控制与性能[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [17] 陆昶. 聚合物共混物融合缝结构与性能及超声振动下融合缝形态演变及其机理的研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [18] Lu Chang, Yu Xiaofeng, Guo Shaoyun. The mechanism of ultrasonic improvement of weld line strength of injection molded polystyrene and polystyrene/polyethylene blend parts[J]. J Polym Sci, Part B: Polym Phys, 2006, 44: 1520 - 1530.
- [19] Lu Chang, Yu Xiaofeng, Guo Shaoyun. Ultrasonic improvement of weld line strength of injection-molded polystyrene and polystyrene/polyethylene blend parts[J]. Polym Engin Sci, 2005, 45:

- 1666-1672.
- [20] Yu Xiaofeng, Lu Chang, Wu Hong, et al. Effect of ultrasonic oscillations on weld line strength of PS, PMMA, and their blends [J]. J Appl Polym Sci, 2006, 102: 2990-2997.
- [21] Guo Shaoyun, AIT-KADI A. A study on weld line morphology and mechanical strength of injection molded polystyrene/poly (methyl methacrylate) blends [J]. J Appl Polym Sci, 2002, 84: 1856-1865.
- [22] Kazmer D O. Increasing weld-line strength through dynamic control of volumetric shrinkage. ANTEC'1994: 630-635.
- [23] Piccarolo S, Scargiali F, Grippa G, et al. Relation between packing flow and mechanical properties of weld zones in injection-moulded thermoplastic polymers [J]. Plast Rub Comp Proc Appl, 1993, 19: 205-210.
- [24] Chen Shia-Chung, Jong Wen-Ren, Chang Jen-An. Dynamic mold surface temperature control using induction heating and its effects on the surface appearance of weld line [J]. J Appl Polym Sci, 2006, 101: 1174-1180.
- [25] Gardner G, Mally R. A moving boundary technique strengthens weld lines in injection molding. ANTEC'1994: 624-630.

NEW TECHNOLOGY FOR MODEL PREDICTION AND IMPROVEMENT OF WELD LINE STRENGTH IN INJECTION-MOLDED PARTS

Yang Fengxia, Wang Xuejing, Wang Airon

(School of Chemistry & Chemical Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

Cai Zhongyi

(Shenyang G. Billow Chemical Co. Ltd., Shenyang 110163, China)

ABSTRACT Several new techniques for model prediction and improvement of weld-line strength in injection-molded parts were introduced. The theoretical approaches and practical examples based on diffusion and Flory-Huggins theory of the free energy of mixing and BP neural network to predict the weld-line strength were reviewed, and the scopes of application of prediction formulas were given. The mechanism and practical examples of new techniques for improving weld-line strength, avoiding the weld-line or reducing it in injection-molded parts such as hot runner multi-gates sequence control, injection molding and mold designing were briefly discussed. Further perfection of the model for weld-line strength prediction and techniques for weld-line improvement was an important direction of the study about weld-line in the future.

KEYWORDS injection-molded part, weld line strength, prediction model, improvement, new technique

优惠销售 2000 ~2008 年中国工程塑料加工应用技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国工程塑料工业协会加工应用专委会为了配合 2000 ~2008 年先后召开的中国工程塑料加工应用技术研讨会共编辑、出版了 9 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术,以及文献综述、评论等,尤其突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析,应对 REACH、RoHS 的对策等行业规则、政策。现尚有部分《论文集》以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘,以优惠价格(含邮费)销售,欢迎订阅。

1. 《论文集》, 优惠价为 240 元/套, 单册价格如下:

《2008 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 351 页, 50 元/册;

《2007 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 343 页, 45 元/册;

《2006 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 346 页, 含中国工程塑料工业“十一五”发展规划, 40 元/册;

《2005 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 338 页, 35 元/册;

《2004 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 337 页, 30 元/册;

《2003 年塑料助剂和塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 105 篇, 正文 373 页, 25 元/册;

《2002 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 351 页, 20 元/册;

《2001 年中国工程塑料加工及模具技术研讨会论文集》, 论文 80 篇, 正文 270 页, 20 元/册;

《2000 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 339 页, 20 元/册。

2. 论文集光盘, 优惠价为 160 元/盘。

本光盘除收录上述 9 本《论文集》的全部内容外, 还包括约 1800 人次的会议代表通讯录。

凡需购买《论文集》或论文集光盘的读者, 请尽快办理邮购手续。汇款时请注明“论文集”或“论文集光盘”。

邮局汇款

收款单位: 山东济南市 108 信箱杂志社 邮编: 250031

电话: (0531) 85878057 85878223 85878278

传真: (0531) 85947355 85878057

银行汇款

户名: 中国兵器工业集团第五三研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

帐号: 1602001229014425546

网上订购 <http://www.epa1973.com>