

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.05.021

PC/PET 合金的制备及其耐溶剂机理

许凌峰¹,邵景昌^{1,2,3},付俊祺¹,汪洋¹,李斯良¹,王怡博¹(1. 公牛集团股份有限公司,浙江宁波 315311; 2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所,浙江宁波 315201;
3. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:采用聚对苯二甲酸乙二酯 (PET) 与聚碳酸酯 (PC) 共混方式提高材料的耐溶剂应力开裂能力,解决 PC 制品喷漆龟裂、开裂问题。研究了 PET 含量对 PC/PET 合金耐溶剂性能、力学性能、耐热和流动性能的影响。综合 Hansen 溶解度参数、相对能量差异参数、溶剂聚合物渗透速率、晶态聚合物特性等研究了 PC 及 PC/PET 合金的耐溶剂机理。随着 PET 含量的增加,PC/PET 合金的耐溶剂能力逐渐增强,力学性能降低,流动性变好,耐热性能变差。PET 含量 ≥ 30 份的 PC/PET 合金同时具有较好的耐甲苯和四氯化碳能力,PET 含量 ≥ 40 份时,PC/PET 合金的 125℃ 热球压痕直径 > 2.0 mm,不能满足电工电子产品安规要求。非晶态聚合物的耐溶剂能力与相对能量差异参数 (修正后的溶解度参数差异)、溶剂渗透速率及聚合物的应力状态有关。晶态聚合物具有较好的耐溶剂能力主要是因为分子排列规整,堆砌紧密,分子间相互作用力强,溶剂分子渗入聚合物内部困难。

关键词:聚碳酸酯/聚对苯二甲酸乙二酯合金;耐溶剂机理;溶解度参数;渗透速率;晶态聚合物

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)05-0114-04

Preparation and Solvent Resistance Mechanism of PC/PET Alloy

Xu Lingfeng¹, Shao Jingchang^{1,2,3}, Fu Junqi¹, Wang Yang¹, Li Siliang¹, Wang Yibo¹(1. Gongniu Group Co. Ltd., Ningbo 315311, China; 2. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, CAS, Ningbo 315201, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract : polycarbonate (PC) / polyethylene terephthalate (PET) alloy was prepared by melt blending to improve the solvent stress cracking resistance (SSCR) of materials and solve the cracks in painting of PC products. The effects of the PET content on SSCR, mechanical properties, thermal properties and flowability of PC/PET alloy were studied. The mechanism of SSCR on PC and PC/PET alloy were studied by combining Hansen solubility parameters (HSP), relative energy difference (RED), solvent-polymer penetration rate and the characteristics of crystalline polymer. The results show that, with the increase of PET content, the SSCR of PC/PET alloy is enhanced gradually, the mechanical properties are lowered to a certain extent, the flowability becomes better, and the thermal property becomes worse. The PC/PET alloy with PET content ≥ 30 phr has good resistance to toluene and carbon tetrachloride. However, the indentation diameter at 125℃ of PC/PET alloy is over 2.0 mm when the PET content ≥ 40 phr, which can not be accepted in terms of the safety requirements of electrical and electronic products. The solvent resistance of amorphous polymer is related to the RED number (i.e. the modified solubility parameter difference), the solvent penetration rate, and the stress state of the polymer. The solvent resistance of crystalline polymer is better mainly because it is difficult for solvent molecules to penetrate into the polymer due to regular arrangement and close packing among molecules, strong intermolecular interaction force, etc.

Keywords : polycarbonate / polyethylene terephthalate alloy ; solvent resistance mechanism ; solubility parameter ; penetration rate ; crystalline polymer

聚碳酸酯 (PC) 因具备优良的力学性能、电绝缘性和尺寸稳定性被广泛应用于汽车、家电和电子电器等领域,其中电子电器用量最大,占比 35%~

40%^[1]。PC 分子链含有苯环,存在空间位阻,加工时熔体黏度大,流动性差,造成制品含有较多残余内应力,使用中接触有机溶剂或在表面喷漆时易产生应

通讯作者:邵景昌,工程师,同等学历博士生,主要从事塑胶材料的研发和应用开发工作 E-mail: shaojc@gongniu.cn

收稿日期:2020-03-20

引用格式:许凌峰,邵景昌,付俊祺,等. PC/PET 合金的制备及其耐溶剂机理 [J]. 工程塑料应用,2020,48(5): 114~117, 128.

Xu Lingfeng, Shao Jingchang, Fu Junqi, et al. Preparation and solvent resistance mechanism of PC / PET alloy[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(5): 114~117, 128.

力开裂。改善聚合物应力开裂的方法主要有纤维增强和合金共混改性等^[2],将结晶性聚合物与PC共混改性既可保留PC良好的力学性能,又可以较好地改善PC溶剂应力开裂问题^[3-5]。

聚合物耐溶剂机理的研究一般认为和聚合物、有机溶剂的溶解度参数、极性差异等有关。刘小林^[6]认为聚合物和低分子液体溶解度参数之差小于 $3(\text{J}/\text{cm}^3)^{1/2}$ 时有较强的互溶性,PC在甲苯、二甲苯为主的丙烯酸漆中溶解性远高于聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)。陈振嘉等^[7]认为PC/聚对苯二甲酸乙二酯(PET)共混合金的耐溶剂性与溶剂的极性有关,溶剂的极性越大,对PC/PET冲击强度影响越大。王海涛等^[8]认为聚合物环境应力开裂时间与溶剂的溶解度参数、聚合物的结晶性及聚合物中填充物加入有关。目前针对聚合物耐溶剂机理的研究或者采用单一的溶解度参数差异,或者采用单一的极性差异或结晶性解释,对其机理进行全面系统地研究鲜有报道。

PET为高度对称芳环线性聚合物,结晶度40%~60%,具有较好的耐有机溶剂能力。笔者采用PET与PC共混,以提高材料的耐溶剂应力开裂能力,解决PC制品喷漆龟裂、开裂问题。研究了PET含量对PC/PET合金力学性能、耐热和流动性能的影响。同时,综合汉森溶解度参数、相对能量差异参数、溶剂渗透速率、晶态聚合物特性等阐述了合金的耐溶剂机理。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PC:PC-110,奇美实业股份有限公司;

PET:BG-85,中国石化仪征化纤有限责任公司;

增韧剂有机硅-丙烯酸-苯乙烯共聚物:S-2001,日本三菱化学公司;

酯交换抑制剂无水磷酸二氢钠:分析纯,美国Sigma-Aldrich公司;

相容剂马来酸酐接枝聚乙烯(PE-g-MAH)、抗氧剂1010:市售;

丙烯酸油漆:GIP-TA00,嘉卓成科技发展有限公司。

1.2 主要设备及仪器

双螺杆挤出机:SHJ-36型,南京杰亚挤出装备有限公司;

注塑机:HT-250型,海天塑机集团有限公司;

万能试验机:CMT4104型,美特斯工业系统有限公司;

冲击试验机:ZBC7251-B型,美特斯工业系统有限公司;

球压试验装置:SKY4006型,苏州斯开尔测试设备有限公司;

熔体流动速率(MFR)仪:ZRZ1452型,美特斯工业系统有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):S-3400N型,日本日立集团。

1.3 试样制备

将PC和PET在100℃鼓风干燥箱中干燥4h,然后将干燥后的材料和助剂按照表1配方在高速混合机中混合,再加入双螺杆挤出机中挤出、冷却、切粒,挤出机温度为230~260℃,转速为300~400 r/min。将制得的粒料经注塑机注塑成标准试样,注塑温度为260~300℃,注塑压力为110 MPa。

表1 PC/PET合金各组分含量

材 料	配方编号				
	0 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
PC	100	90	80	70	60
PET	0	10	20	30	40
增韧剂	8	8	8	8	8
相容剂		2	2	2	2
酯交换抑制剂		0.4	0.4	0.4	0.4
抗氧剂	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

1.4 测试与表征

(1) 物理力学性能测试。

拉伸性能按ISO 527-2-2012测试,1A型试样,拉伸速率50 mm/min。

弯曲性能按ISO 178-2010测试,测试速率2 mm/min。

悬臂梁缺口冲击强度按ISO 180-2000测试,180/A型试样,冲击能2.75 J。

125℃热球压压痕直径按照IEC 60695-10-2-2014测试,试样厚度3.0 mm。

MFR按ISO 1133-1-2011测试,试验温度300℃,标称负荷1.2 kg。

(2) 耐溶剂性表征。

浸泡油漆表面微观状态:试样在油漆中浸泡30 min,70℃干燥2 h,表面喷金处理,采用SEM在10 kV条件下观察油漆腐蚀后表面微观状态。

缺口冲击强度保持率:将缺口冲击试样在溶剂中浸泡5 min,70℃干燥2 h,室温调节24 h,测试缺口冲击强度,与未浸泡溶剂试样测试的缺口冲击

强度比较。

涂覆溶剂开裂时间:将拉伸试样固定在贝尔根椭圆夹具上,表面涂覆溶剂,观察出现裂纹时间^[9]。

2 结果与讨论

2.1 PET含量对PC/PET合金性能的影响

表2为不同PET含量PC/PET合金材料的力学性能、耐热和流动性测试结果。由表2可见,随着PET含量的增加合金材料的力学性能均有不同程度降低,缺口冲击强度降低明显。PET本身分子链结构规整易结晶,结晶材料韧性差,缺口冲击强度仅5~8 kJ/m²,PC与PET共混为部分相容体系,两相界面粘结不牢^[10]。虽然添加了PE-g-MAH以改善PC与PET的相容性,但当PET的含量超达到30份后,共混体系表现出脆性断裂,缺口冲击强度下降明显。另外PC和PET都含有酯基,在高温下容易发生酯交换反应,引起分子链规整度和分子量降低,影响合金材料的强度、刚性,添加少量无水磷酸二氢钠作为酯交换抑制剂可以抑制合金材料强度的下降趋势^[11],故随PET含量增加,拉伸和弯曲强度下降幅度相对较小。

表2 不同PET含量PC/PET合金物理力学性能

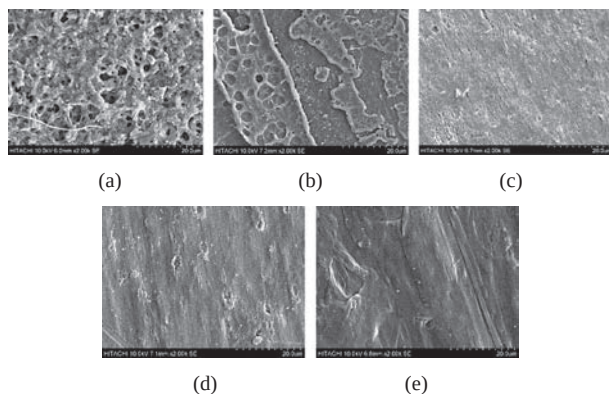
项 目	配方编号				
	0 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
缺口冲击强度 / (kJ·m ⁻²)	72	67	60	52	40
拉伸强度 / MPa	59	56	52	49	47
弯曲强度 / MPa	88	78	72	68	65
125℃热球压压痕直径 / mm	1.25	1.31	1.49	1.67	2.23
MFR/[g·(10 min) ⁻¹]	12.3	14.7	16.9	19.8	26.4

由表2还可看出,随着PET含量的增加合金材料的热球压压痕直径和MFR逐渐增加,合金材料的耐热性变差,流动性变高,这与PET本身的耐热性低、结晶材料的MFR高有关。流动性变高有助于成型加工,进一步降低制品的残余内应力,但当PC/PET合金材料的125℃热球压压痕直径大于2.0 mm时已不能满足电工电子产品的安规要求。

2.2 PC/PET合金耐溶剂性及耐溶剂机理

图1是不同PET含量PC/PET合金试样浸泡油漆后的表面微观形貌。由图1可以看出,PC试样经油漆腐蚀后表面出现较多的溶蚀洞,随着PET含量的增加试样溶蚀洞逐渐变小、变浅,PET含量为30份的PC/PET合金试样浸泡后表面基本无明显溶蚀。喷漆实验也发现PET含量为30份的PC/PET合金材料注塑成型的制品经正常喷漆工艺处理后表面无龟裂,卡扣无断裂,有效解决了PC制品

喷漆龟裂、断裂问题。聚合物在化学介质中的纹裂,可以理解为由于溶剂渗入材料表面,使材料在极其有限的部位产生塑性流动所致^[12]。因此,聚合物抵抗溶剂腐蚀的能力可以间接表征材料耐应力纹裂能力。



PET含量: a—0份; b—10份; c—20份; d—30份; e—40份

图1 不同PET含量PC/PET合金浸泡油漆表面SEM照片

图2是不同PET含量PC/PET合金分别浸泡甲苯和四氯化碳后缺口冲击强度的保持率,表3列出了不同PET含量PC/PET合金试样固定在贝尔根椭圆夹具上,表面分别涂覆甲苯和四氯化碳后裂纹开裂情况。

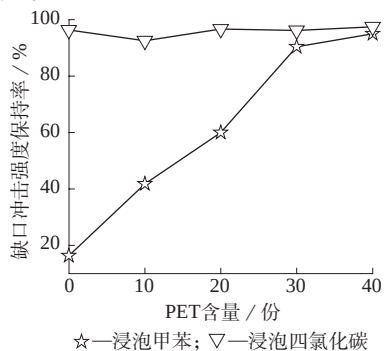


图2 不同PET含量PC/PET合金分别浸泡甲苯和四氯化碳后的缺口冲击强度保持率

表3 不同PET含量PC/PET合金试样分别涂覆甲苯和四氯化碳裂纹开裂情况

PET含量 / 份	涂覆甲苯开裂情况	涂覆四氯化碳开裂情况
0	U	A
10	U	6 min 开裂
20	U	18 min 开裂
30	U	U
40	U	U

注:U表示连续观察30 d未出现裂纹,A表示立即出现裂纹。

图2和表3数据表明,PC在无外加应力情况下对甲苯敏感,施加外加应力情况下对四氯化碳敏感;随着PET含量的增加,PC/PET合金的耐溶剂能力逐渐变强,PET含量大于等于30%的PC/PET

合金对甲苯和四氯化碳均表现较好的耐溶剂性。

聚合物溶剂应力开裂的原因一般认为和聚合物在溶剂中的溶解有关。汉森等将希尔布莱德单一溶解度参数 δ 分解为色散力部分参数 δ_D 、极性力部分参数 δ_P 和氢键粘合力部分参数 δ_H 三部分,并结合聚合物汉森空间半径 R_0 ,根据模拟计算和试验验证将聚合物在溶剂中的溶解能力概括为相对能量差异参数 RED^[13-15],有关计算见式(1)~式(3)。同时认为聚合物和溶剂的相对能量差异参数 RED 小于 1 时聚合物易溶解或应力开裂;相对能量差异参数 RED 越大,聚合物越不受溶剂影响。PC、PET 及甲苯和四氯化碳的汉森溶解度参数,聚合物汉森空间半径及以此计算的相对能量差异参数见表 4。PC 与甲苯和四氯化碳的相对能量差异参数 RED 分别为 0.86 和 1.05,即相比四氯化碳,PC 更易被甲苯溶解。PC 存在对缺口敏感的特性,带有缺口的 PC 试样浸泡甲苯后缺口位置被腐蚀溶解,产生裂纹,冲击测试时更易断裂,缺口冲击强度低。PET 与甲苯的相对能量差异参数 RED 为 0.91,相比 PC 变化不大,但 PC/PET 合金却表现出较好的耐甲苯能力。这是因为 PET 为晶态聚合物,结晶性聚合物分子排列规整,堆砌紧密,分子间相互作用力强,溶剂分子渗入聚合物内部困难^[16],PC/PET 合金的耐甲苯能力随 PET 含量的增加逐渐增强。以上说明,晶态聚合物的耐溶剂机理不能单一地用汉森溶解度参数解释。

$$\delta^2 = \delta_D^2 + \delta_P^2 + \delta_H^2 \quad (1)$$

$$R_a^2 = 4(\delta_{D1} - \delta_{D2})^2 + (\delta_{P1} - \delta_{P2})^2 + (\delta_{H1} - \delta_{H2})^2 \quad (2)$$

$$RED = R_a / R_0 \quad (3)$$

表 4 汉森溶解度参数及聚合物溶解相关数据

项 目	δ			R_0	RED	
	δ_D	δ_P	δ_H		PC	PET
甲苯	18.0	1.4	2.0		0.86	0.91
四氯化碳	17.8	0.0	0.6		1.05	1.03
PC	18.0	9.0	6.0	10.0		
PET	21.3	4.5	12.3	13.9		

施加外加应力时,PC 涂覆甲苯连续观察 30 d 未出现裂纹,但涂覆四氯化碳后立即开裂。这可能与溶剂分子在聚合物表面的渗透速率有关^[17],甲苯的摩尔体积比四氯化碳大,且甲苯带有苯环结构,不如四氯化碳在聚合物表面渗透速率快。施加外加应力时,试样产生内应力以抵抗外力,该内应力与聚合物注塑时因取向和温度不均形成的内应力都是不平衡构象,处于高势能态,由分子链间作用力和相互缠结力包裹。涂覆溶剂或喷漆时渗透速率较快的溶剂

分子快速渗入聚合物内部,内应力平衡瞬间受损,应力快速释放,产生开裂。如前所述,因 PET 为晶态聚合物,溶剂分子渗入困难,PC/PET 合金随 PET 含量的增加耐四氯化碳能力逐渐增强。

3 结论

(1) PET 与 PC 共混可以提高材料的耐溶剂应力开裂能力,PET 含量大于等于 30 份的 PC/PET 合金同时具有较好的耐甲苯和四氯化碳能力,注塑成型的制品经正常喷漆工艺处理后表面无龟裂,卡扣无断裂,有效解决了 PC 制品喷漆龟裂、断裂问题。

(2) 随着 PET 含量的增加,PC/PET 合金的力学性能有不同程度降低,同时流动性变好,耐热性变差。当 PET 含量大于等于 40 份时,PC/PET 合金的 125℃热球压压痕直径大于 2.0 mm,已不能满足电工电子产品安规要求。

(3) 非晶态聚合物的耐溶剂能力与相对能量差异参数(修正后的溶解度参数差异)、溶剂渗透速率及聚合物的应力状态有关。晶态聚合物具有较好的耐溶剂能力主要是因为结晶聚合物分子排列规整,堆砌紧密,分子间相互作用力强,溶剂分子渗入聚合物内部困难。

参考文献

- [1] 许江菱. 2017~2018 年世界塑料工业进展 (II)[J]. 塑料工业, 2019, 47(4):1-10.
Xu Jiangling. Progress of the world's plastics industry in 2017-2018 (II)[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(4):1-10.
- [2] Robeson L M. Environmental stress cracking: A review[J]. Polymer Engineering and Science, 2012, 53(3):453-467.
- [3] 钱志国,尹继磊,李正梅,等. 耐化学高抗冲 PC/PBT 合金的制备[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(1):49-52.
Qian Zhiguo, Yin Jilei, Li Zhengmei, et al. Preparation of chemical resistant and high impact PC/PBT alloys[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(1):49-52.
- [4] 卢家荣,吴水珠,赵建青,等. PC/PA6 共混体系的耐溶剂性及其结晶行为的研究[J]. 塑料工业, 2008, 36(10):9-12.
Lu Jiarong, Wu Shuizhu, Zhao Jianqing, et al. Study on solvent resistance and crystallization behavior of PC/PA6[J]. China Plastics Industry, 2008, 36(10):9-12.
- [5] Seidel A, Eckel T. Impact-modified polycarbonate blends:US7067567[P]. 2006-06-27.
- [6] 刘小林. 丙烯酸漆对 PC/PBT 共混物性能和微观结构的影响[J]. 塑料工业, 2016, 44(6):77-81.
Liu Xiaolin. Effect of acrylic paint on properties and microstructure of PC/PBT blend[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(6):77-81.

(下转第 128 页)

- [2] 张鸿,蒋平平,潘杰,等.马来酸单三甘醇酯钙/锌热稳定剂的制备及其对PVC制品热稳定性能影响的研究[J].中国塑料,2019,33(8):76-82.
Zhang Hong, Jiang Pingping, Pan Jie, et al. Preparation of calcium/zinc triglycol ester acid maleate heat stabilizer and its effect on thermal stability of PVC products[J]. China Plastics, 2019, 33(8):76-82.
- [3] 黎良田.塑料管材自动切割控制系统的设计研究[J].塑料工业,2016,44(10):53-55.
Li Liangtian. Design research on automatic cutting control system for plastic pipes[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(10):53-55.
- [4] 韩以伦,邱鹏程,姬光青,等.基于PLC与液压的塑料管材自动切割装置的设计[J].制造业自动化,2016,38(6):90-92.
Han Yilun, Qiu Pengcheng, Ji Guangqing, et al. The design of automatic plastic pipe cutting device based on PLC and hydraulic pressure[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(6):90-92.
- [5] 张晓然,赵青龙,何更新.我国绿色建材技术及其标准化概述[J].施工技术,2018,47(6):94-97.
Zhang Xiaoran, Zhao Xiaolong, He Gengxin. Green building materials technology and standardization overview[J]. Construction Technology, 2018, 47(6):94-97.
- [6] 李元,邓琪钰.基于模糊综合评价法的老年长期照护保险制度实施效果分析[J].人口与经济,2019(6):82-96.
Li Yuan, Deng Qiyu. Analysis of the implementation effect of long-term care insurance policy for the elderly based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Population & Economics, 2019(6):82-96.
- [7] 刘彤彤,周绿林,詹长春,等.大病保险实施效果评价指标体系构建及应用[J].中国卫生经济,2018,37(9):27-29.
Liu Tongtong, Zhou Lulin, Zhan Changchun. The construction and application of evaluation index system for the implementation effect of serious illness insurance[J]. Chinese Health Economics, 2018, 37(9):27-29.
- [8] 曹丽华,徐皎瑾,李勇.基于灰色关联度的火电厂节能减排效果评价方法研究[J].环境工程,2014,32(6):140-143.
Cao Lihua, Xu Jiaojin, Li Yong. Evaluation on performance of energy-saving and emission reduction in thermal power plants based on grey relation method[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(6):140-143.
- [9] 孟瑞珂,李小青,高峰,等.绿色产品认证实施效果评价技术研究[J].科技与创新,2018(19):28-32.
Meng Ruike, Li Xiaoqing, Gao Feng, et al. Study on the evaluation of green products certification implementation effect[J]. Science and Technology & Innovation, 2018(19):28-32.
- [10] 韩中庚.数学建模方法及其应用[M].北京:高等教育出版社,2017:136-141.
Han Zhonggeng. Mathematical modeling method and its application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2017:136-141.
- [11] 王莹,李小青,高峰,等.绿色日化产品认证实施效果评价案例研究[J].中国洗涤用品工业,2019(8):99-106.
Wang Ying, Li Xiaoqing, Gao Feng, et al. Case study on evaluation of green daily chemical products certification implementation effect[J]. China Cleaning Industry, 2019(8):99-106.
- (上接第117页)
- [7] 陈振嘉,吴水珠,卢家荣,等.耐溶剂PC/PET合金的制备及其性能探讨[J].塑料工业,2009,37(8):18-21.
Chen Zhenjia, Wu Shuizhu, Lu Jiarong, et al. Preparation and properties study of PC/PET alloy with solvent resistance[J]. China Plastics Industry, 2009, 37(8):18-21.
- [8] 王海涛,潘宝荣,杜国强,等.车灯塑料的环境应力开裂性能研究[J].聚合物科学与工程,2004,20(6):180-183.
Wang Haitao, Pan Baorong, Du Guoqiang, et al. Study on the property of environmental stress cracking of automotive lamp plastics[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2004, 20(6):180-183.
- [9] Wyzgoski M G, Jacques C H M. Stress cracking of plastics by gasoline and gasoline components[J]. Polymer Engineering and Science, 1977, 17(12):854-860.
- [10] Liao Z L, Chang F C. Mechanical properties of the rubber-toughened polymer blends of polycarbonate (PC) and poly(ethylene terephthalate)(PET)[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1994, 52(8):1115-1127.
- [11] Wang Feng, Meng Xiangfu, Xu Xinfeng, et al. Inhibited transesterification of PET/PBT blends filled with silica nanoparticles during melt processing[J]. Polymer Degradation and Stability, 2008, 93(8):1397-1404.
- [12] Bernier G A, Kambour R P. The role of organic agents in the stress crazing and cracking of poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide)[J]. Macromolecules, 1968, 1(5):393-400.
- [13] Hansen C M. Hansen solubility parameter: A user's handbook[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [14] Kjellander C K, Nielsen T B, Ghanbari-Siahkali A, et al. ESC resistance of commercial grade polycarbonates during exposure to butter and related chemicals[J]. Polymer Degradation and Stability, 2008, 93(8):1486-1495.
- [15] Hansen C M, Just L. Prediction of environmental stress cracking in plastics with hansen solubility parameters[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2001, 40(1):21-25.
- [16] 何曼君,张红东,陈维孝,等.高分子物理[M].3版.上海:复旦大学出版社,2007.
He Manjun, Zhang Hongdong, Chen Weixiao, et al. Polymer physics[M]. 3rd ed. Shanghai: Fudan University Press, 2007.
- [17] Al-Saidi L F, Mortensen K, Almdal K. Environmental stress cracking resistance. Behaviour of polycarbonate in different chemicals by determination of the time-dependence of stress at constant strains[J]. Polymer Degradation and Stability, 2003, 82(3):456-461.