

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.03.009

# 熔接结构与工艺对 PMMA 双色注塑熔接状态的影响

吴晓兰,黄继忠,颜许,黄园林  
(常州星宇车灯股份有限公司,江苏常州 213000)

**摘要:** 利用具有不同末端熔接夹角的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 双色注塑拉伸试样模具,通过实时监测成型过程中第二次注塑的末端熔体温度、末端熔体压力、末端模具温度等重要注塑工艺参数,分别分析了末端熔接夹角、末端熔体温度、末端熔体压力、末端模具温度对 PMMA 双色注塑试样熔接状态的影响。结果表明,在末端熔接夹角为 70°、末端模具温度不低于 80℃ 的工艺条件下,提高注塑温度,确保第二次注塑的末端熔体温度不低于 250℃,或者末端熔体压力控制在 63 MPa 左右,此时 PMMA 双色注塑试样熔接强度处于较佳状态,而且可以避免 PMMA 双色注塑试样熔接处溶剂应力开裂的风险。

**关键词:** 双色注塑;熔接状态;工艺参数;应力开裂

**中图分类号:** TH162 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)03-0047-06

## Effects of Fusion Structure and Injection Parameters on PMMA Fusion Status of Bi-color Injection

Wu Xiaolan, Huang Jizhong, Yan Xu, Huang Yuanlin  
(Changzhou Xingyu Automotive Lighting Systems Co. Ltd., Changzhou, 213000, China)

**Abstract :** Bi-color injection tensile sample mould with different end fusion angles were used to compare the fusion status of PMMA bi-color injection sample under different process conditions. During the process, the important injection parameters such as end melt temperature, end melt pressure and end mould temperature of the second injection were monitored in real time. The influences of the end fusion angle, end melt temperature, end melt pressure and end mould temperature on the fusion status of the PMMA bi-color injection sample were analyzed separately. From the results, it can be concluded that the end fusion angle should be 70° and the mould temperature should be more than 80℃, at the same time, the injection temperature is increased to ensure that the end melt temperature of the second injection is more than 250℃ or the end melt pressure is controlled around 63 MPa, the fusion status of the PMMA sample is better and the risk of solvent stress cracking at the fusion position of the PMMA sample can be avoided effectively.

**Keywords :** bi-color injection ; fusion status ; parameter ; stress crack

随着汽车行业不断发展,整车厂对汽车造型和外观的要求越来越高。车灯作为汽车的“眼睛”,既要美观实用,同时也要适应技术发展要求<sup>[1]</sup>。近年来,双色注塑成为满足车灯多样化需求的一种常用成型方案,其原理是将多种不同颜色、不同材质的塑料分别在多个料筒中熔化,再按照先后顺序注入模具的同一型腔内冷却成型<sup>[2]</sup>。双色注塑通常有两种结合方式可以实现:覆盖式和拼接式。但无论是哪种结合方式,其两种材料结合的原理是相同的,可以通过分子链扩散理论来解释,材料在吸收热量后温度上升,当温度超过材料的玻璃化转变温度时,材料

分子链的运动开始加剧从而相互扩散,两相间的分子链通过互相扩散、渗透、缠结,形成了界面层<sup>[3]</sup>。

当前汽车信号灯外透镜的材料以聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 为主,成型工艺多采用双色注塑,PMMA 材料具有优异的耐候性能和透光率,普遍用于汽车信号灯外透镜,但 PMMA 材料的缺点是:①冲击强度低,对缺口敏感;②制件应力大,容易发生应力开裂。由此可以看出 PMMA 制品在使用过程中抗应力开裂的能力也较差,尤其是双色或多色注塑的零件,因此,对于 PMMA 制品,需要从材料选择、结构、加工工艺以及后处理等多方面考虑,尽可

通信作者:吴晓兰,高级工程师,博士,研究方向为材料应用 E-mail: wuxiaolan@xyl.cn

收稿日期: 2020-12-03

引用格式: 吴晓兰,黄继忠,颜许,等. 熔接结构与工艺对 PMMA 双色注塑熔接状态的影响 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(3) : 47-52.

Wu Xiaolan, Huang Jizhong, Yan Xu, et al. Effects of fusion structure and injection parameters on PMMA fusion status of bi-color injection[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(3) : 47-52.

能控制制品内应力的大小,避免后续使用过程中应力开裂的发生。

为了改善 PMMA 应力开裂的问题,很多研究人员在双色熔接的结构、注塑工艺条件以及后处理等方面做出了不少的贡献。李祥兵等<sup>[1]</sup>分析双色注塑零件开裂的原因,对应地优化结构设计及相关工艺以增大熔接面积,减小熔接处应力集中,避免开裂问题的发生。王钊等<sup>[4]</sup>使用模流分析软件对尾灯灯罩双色注塑工艺进行优化,可用于指导生产变形量较小的制件,降低因变形导致开裂的几率。王海涛等<sup>[5]</sup>研究了 PMMA 材料的耐环境应力开裂性能,得出 PMMA 外透镜不宜接触的化学物质环境。陶永亮等<sup>[6]</sup>研究 PMMA 双色注塑的工艺条件及回火方法,以降低塑件的应力,避免出现开裂。笔者则以拼接式 PMMA 双色注塑试样为研究对象,利用具有不同末端熔接夹角的拉伸试样实验模具进行双色注塑实验。双色注塑过程中第一次注塑的工艺条件对熔接状态的影响远小于第二次注塑工艺条件的影响,因此,主要从第二次注塑的末端熔体温度、末端熔体压力、末端模具温度以及末端熔接夹角四个方面研究这些工艺参数对 PMMA 试样熔接状态的影响。通过注塑试样的拉伸断裂强度、熔接末端开口尺寸及耐酒精应力开裂比例等结果的对比,得出最佳双色材料结合的熔接结构及注塑工艺条件,以提升 PMMA 双色注塑的熔接质量,降低因双色材料熔接不良引起的应力开裂比率。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

PMMA 无色与红色透明材料:8N,熔体体积流动速率为  $3 \text{ cm}^3 / 10 \text{ min}$ ,德国罗姆化学有限公司。

### 1.2 主要仪器与设备

旋转式双色注塑机:IA5300 型,海天塑机集团;

模具温度控制设备:TW-600MA-KS 型,动、定模各配置一台,日本 KAWATA 公司;

万能试验机:Z010 型,德国 Zwick 公司;

高倍显微镜:VHX-7000 型,日本基恩士公司。

### 1.3 拉伸试样实验模具及传感器布置

采用了一种结构简单的高精度双色注塑拼接式旋转模,包括两个定模型腔和两个动模型腔,可实时监测第二次注塑的末端熔体温度、末端熔体压力、末端模具温度,且可通过更换模具上的镶块来实现双色注塑末端熔接夹角的切换,末端熔接夹角分别为  $50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 87^\circ$ ,如图 1 所示。

第二次注塑的末端熔体温度、末端熔体压力、末端模具温度分别通过光纤式温度传感器、接触式压力传感器以及热电偶式温度传感器进行监测。传感器分别安装在如图 2 所示动模与定模的左侧型腔中,布置位置如图 3 所示,监视系统采用了 Futaba 公司 MVS08 系统。

图 2 和图 3 中,接触式压力传感器 I, III 分别

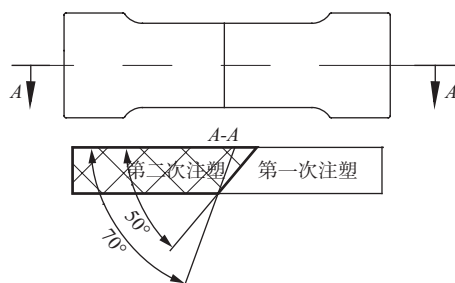
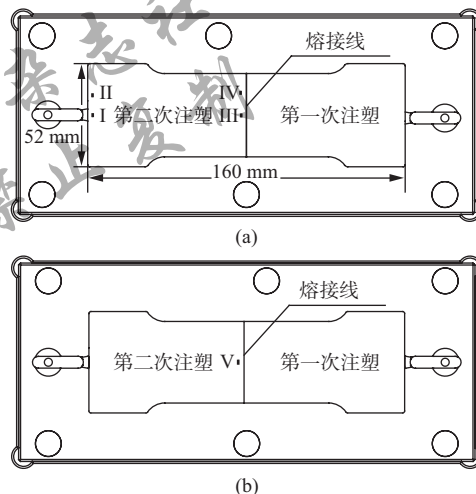
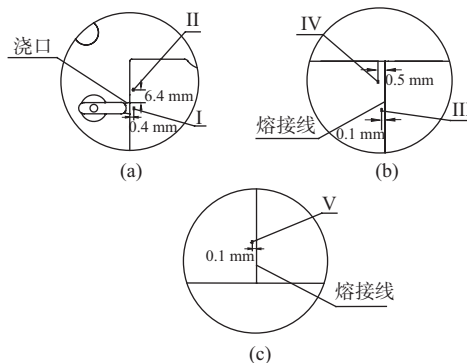


图 1 双色注塑试样末端熔接夹角 ( $50^\circ$  与  $70^\circ$ ) 截面示意图



I—浇口处接触式压力传感器; II—浇口处光纤式温度传感器;  
III—熔接处接触式压力传感器; IV—熔接处光纤式温度传感器;  
V—熔接处热电偶式温度传感器  
a—动模; b—定模

图 2 双色注塑拉伸试样实验模具型腔



a—浇口处传感器 I, II 位置; b—熔接处传感器 III, IV 位置;  
c—熔接处传感器 V 位置

图 3 传感器布置示意图

用于监测浇口处熔体压力和熔接处末端熔体压力,传感器型号为SSB01KN08X06,测量范围200~1000 N;光纤式温度传感器II,IV分别用于监测浇口处熔体温度和熔接处末端熔体温度,传感器型号为EPSSZL-03.0X30 N50,测定范围60~430℃,响应度8 ms;热电偶式温度传感器V用于监测熔接处末端模具温度,传感器型号为STF04.0,测量范围0~220℃,反应速度0.34 s。

#### 1.4 试样制备

塑料粒子在注塑前进行预处理,在真空烘箱中80℃的条件下干燥4~6 h。单色拉伸试样的注塑工艺条件设定如下:注塑温度260℃,注塑压力70 MPa,注塑速度30 cm<sup>3</sup>/s,模具温度80℃。

双色拉伸样试样第二次注塑工艺条件设定如下:注塑速度为30 cm<sup>3</sup>/s,然后通过设定不同的注塑温度和模具温度组合来获得不同的末端熔体温度、末端熔体压力和末端模具温度,注塑温度分别为240,250,260,270℃,模具温度分别为60,70,80,90℃,微调注塑压力,确保试样的质量控制(23±0.5) g范围内。

成型的双色熔接拉伸哑铃型试样如图4所示,尺寸为160 mm×40 mm×2.5 mm,第一次注塑材料为无色透明PMMA,第二次注塑材料为红色透明PMMA。

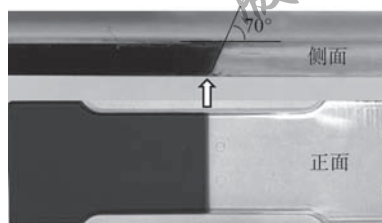


图4 双色注塑的哑铃型试样

#### 1.5 测试与表征

##### (1) 拉伸断裂强度测试。

参照ISO527-2:2012测试双色熔接试样拉伸断裂强度,拉伸速率为50 mm/min,每组样条测试5个,取平均值。

##### (2) 熔接末端开口尺寸测试。

在双色注塑过程中,第二次注塑的充填会对第一次注塑后冷却的部件产生压力,为了防止第一次注塑部件出现开裂,需要控制第二次注塑熔体的填充压力,因此,第二次注塑充填的末端很难完全填充完整,在末端与第一次注塑部件之间往往会形成V形缺口,而且当第二次注塑后冷却时,树脂材料会产

生收缩,导致V形缺口变大,相应的缺口处内应力也随之增大。因此,将V形缺口的开口尺寸作为判断双色熔接状态的指标之一。利用显微镜观察试样熔接处的截面,测量熔接末端开口尺寸,如图5中的a所示。



图5 双色注塑试样熔接处截面末端开口尺寸示意图

##### (3) 应力开裂测试。

通常情况下,应力开裂测试有温度变化法、溶剂法、仪器法以及应变应力电阻法<sup>[7-8]</sup>。考虑到试样的尺寸及非完全透明性,故采用温度变化与溶剂结合的方法,也是汽车灯具上常用的检测方法。具体的测试条件如下:将试样按统一方向放置于80℃烘箱中保持2 h,取出后60 s内使用浸泡96.5%酒精的抹布擦拭试样的熔接处,之后在室温条件下保持0.5 h,检查是否有开裂,随后将试样继续放置于80℃烘箱中保持24 h,取出后观察双色注塑试样熔接处是否有开裂现象发生。每种工艺条件下,取5根样条进行测试,开裂比例的计算公式如式(1)所示。

$$x=(n/m) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $x$ ——开裂比例;

$n$ ——开裂样条的数量;

$m$ ——测试样条的总数量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 双色与单色注塑试样拉伸性能对比

表1为双色与单色注塑试样的拉伸断裂强度。从表1看,双色熔接试样的拉伸断裂强度小于单色试样的拉伸断裂强度,双色熔接试样在拉伸测试后所有的破坏均在双色材料的熔接面处,如图6所示。

表1 双色与单色注塑试样的拉伸断裂强度 MPa

| 项 目  | 双色熔接试样<br>(无色透明+红色透明) | 单色试样 |      |
|------|-----------------------|------|------|
|      |                       | 无色透明 | 红色透明 |
| 拉伸强度 | 20~32                 | 48   | 47   |

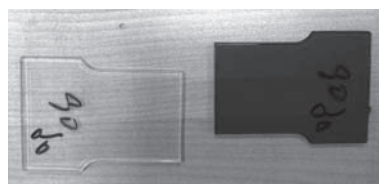


图6 拉伸破坏后的双色熔接试样

由此可以得出, PMMA 双色熔接试样的熔接强度差于材料自身强度, 熔接处于最佳状态时, 其拉伸断裂强度可以达到单色试样的 70% 左右, 最脆弱的位置是在双色材料的熔接处, 这也是应力开裂风险最大的位置, 因此研究熔接处的强度和状态具有重要的意义。

## 2.2 第二次注塑末端熔接夹角对熔接状态的影响

图 7~图 9 为不同末端熔接夹角下双色注塑试样的拉伸断裂强度、末端开口尺寸和开裂比例。由图 7~图 9 可以看出, 在注塑温度 260℃、模具温度 80℃ 的设定工艺条件下, 末端熔接夹角为 50° 时, 拉伸断裂强度最小, 末端开口尺寸最大且开裂比例最大; 随着末端熔接夹角增加至 70°, 拉伸断裂强度增大, 末端开口尺寸变小, 开裂比例也降低; 当末端熔接夹角增大至 87° 时, 此时拉伸断裂强度反而有所减小, 末端开口尺寸和开裂比例略有增大。当末端熔接夹角从 50° 增大至 70° 时, 拉伸断裂强度增加, 主要是由于随着末端熔接夹角的增加, 熔体在尖角处遇到的阻力变小, 填充得更完整, 同时这也会导致

开口尺寸变小、注塑内应力降低最终导致应力开裂比例减小<sup>[9-10]</sup>。但当末端熔接夹角增加至 87° 时, 熔体的快速填充导致夹角处气体迅速压缩, 瞬间增大的压力影响了熔体在末端的填充, 从而导致末端开口尺寸变大, 开裂比例也随之增大, 而且此时随着角度的变化, 双色材料熔接面积减小的趋势明显, 因此, 拉伸断裂强度出现了略微下降的现象。

## 2.3 第二次注塑末端熔体温度对熔接状态的影响

图 10~图 12 为不同末端熔体温度下双色注塑试样的拉伸断裂强度、末端开口尺寸和开裂比例。由图 10~图 12 可以看出, 在末端熔接夹角 70° 的条件下, 随末端熔体温度升高, 试样的拉伸断裂强度增加, 末端开口尺寸总体减小, 应力开裂比例也随之降低, 末端熔体温度达到 250℃ 以上, 开裂风险最小。而且还可以看出, 在末端熔体温度达到 250℃ 后, 拉伸断裂强度、末端开口尺寸、应力开裂比例的变化相对比较平缓, 这是因为当温度升高到一定程度, 分子在熔接界面的扩散、渗透对温度敏感度降低, 对双色注塑试样的熔接强度提高有限。

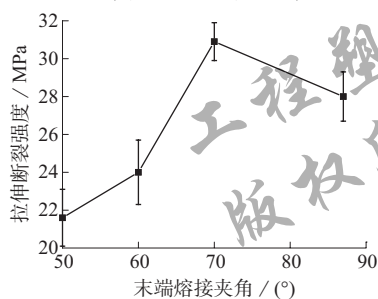


图 7 不同末端熔接夹角下双色注塑试样的拉伸断裂强度

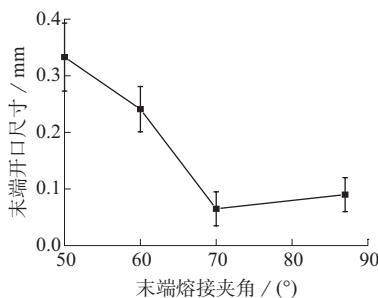


图 8 不同末端熔接夹角下双色注塑试样的末端开口尺寸

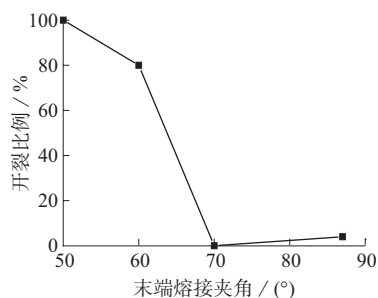


图 9 不同末端熔接夹角下双色注塑试样的开裂比例

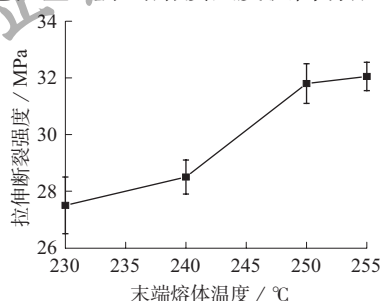


图 10 不同末端熔体温度下双色注塑试样的拉伸断裂强度

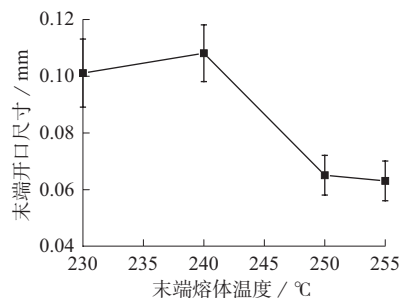


图 11 不同末端熔体温度下双色注塑试样的末端开口尺寸

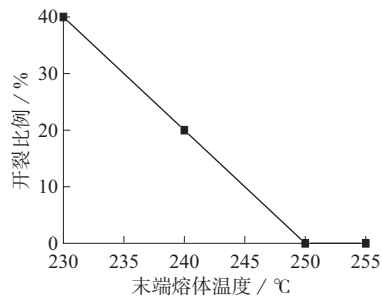


图 12 不同末端熔体温度下双色注塑试样的开裂比例

## 2.4 第二次注塑末端熔体压力对熔接状态的影响

除了第二次注塑末端熔体温度会影响双色注塑试样的熔接状态,末端熔体压力也同样会影响熔接状态。图 13~图 15 为不同末端熔体压力下双色注塑试样的拉伸断裂强度、末端开口尺寸和开裂比例。

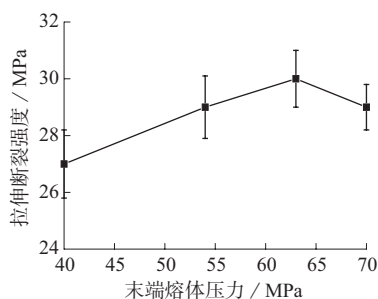


图 13 不同末端熔体压力下双色注塑试样的拉伸断裂强度

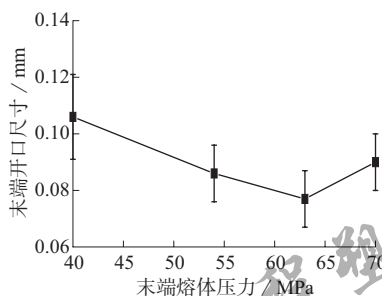


图 14 不同末端熔体压力下双色注塑试样的末端开口尺寸

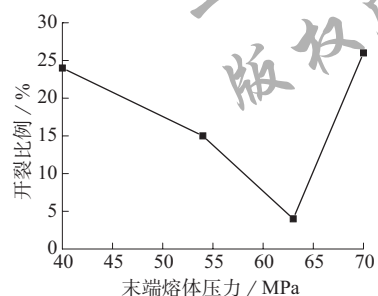


图 15 不同末端熔体压力下双色注塑试样的开裂比例

从图 13~图 15 可以看出,在末端熔接夹角  $70^\circ$  的条件下,随着末端熔体压力的增加,拉伸断裂强度增大,末端开口尺寸变小,应力开裂比例减少,但当压力增大到 63 MPa 后,拉伸断裂强度、末端开口尺寸、开裂比例反而向相反的方向变化。此时由于压力过大,对第二次注塑熔体与第一次注塑试样结合的阻力变大,故两次注塑材料之间的熔接变差,拉伸断裂强度开始减少,末端开口尺寸随之变大,同时由于阻力导致试样成型后内应力变大,开裂比例也增大。

同时对比图 12 和图 15 可知,与控制末端熔体压力相比,控制末端熔体温度减少开裂比例的效果更为明显。

## 2.5 第二次注塑末端模具温度对熔接状态的影响

图 16~图 18 为不同末端模具温度下双色注塑试样的拉伸断裂强度、末端开口尺寸和开裂比例。由图 16~图 18 可以看出,末端模具温度对双色注塑试样的熔接强度也有较大的影响,在末端熔接夹角  $70^\circ$ 、注塑温度  $260^\circ\text{C}$  条件下,末端模具温度为  $80^\circ\text{C}$  与  $90^\circ\text{C}$  时,末端开口尺寸变小,应力开裂比例也小于末端模具温度为  $60^\circ\text{C}$  与  $70^\circ\text{C}$  时;同样,随着末端模具温度的升高,拉伸断裂强度也随之不断增加。末端模具温度的升高,减少了熔体在模具内流动热量的损耗,保持了熔体中分子的活性,大大提高了分子在熔接界面的渗透能力<sup>[11]</sup>,从而保证了良好的界面熔接状态。

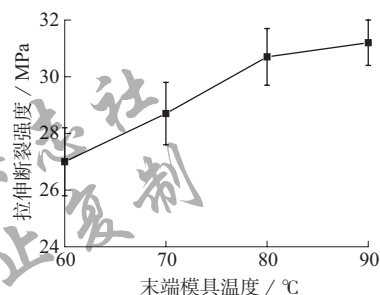


图 16 不同末端模具温度下双色注塑试样的拉伸断裂强度

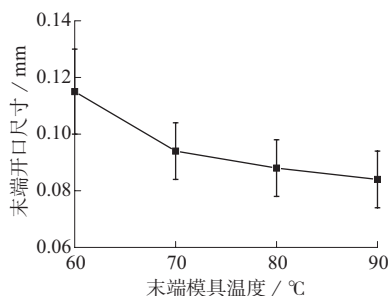


图 17 不同末端模具温度下双色注塑试样的末端开口尺寸

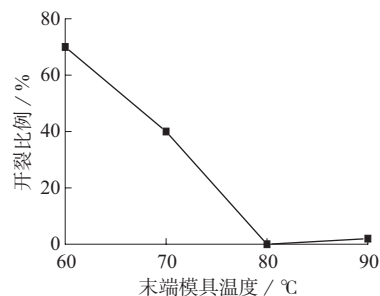


图 18 不同末端模具温度下双色注塑试样的开裂比例

## 3 结论

(1) 双色注塑试样熔接处结合强度可以通过拉伸断裂强度、末端开口尺寸、应力开裂比例来评价其熔接状态。

(2) PMMA 双色注塑试样的熔接强度差于材料自身性能,熔接处于最佳的状态时,可以达到单色注

塑试样自身强度的70%左右,最脆弱的位置是在双色材料的熔接处上,也是开裂风险最大的位置。

(3) 为了降低或避免 PMMA 双色熔接开裂的问题,需要从两个方面来考虑:①从熔接结构来看,末端熔接夹角对熔接状态的影响较大,末端熔接夹角为  $50^\circ$  时,试样拉伸断裂强度最小,末端开口尺寸最大,开裂比例最高,此时熔接状态较差;随着夹角的增加,熔接状态得到改善,当夹角超过  $70^\circ$  时,熔接状态的改善变得不再明显,甚至当夹角增大至  $87^\circ$  时,由于熔体填充速度以及熔接面减小的影响,此时拉伸断裂强度反而减小,末端开口尺寸和开裂比例略有增大,熔接状态比夹角为  $70^\circ$  时略差。②从工艺角度来看,模具温度(末端模具温度)不低于  $80^\circ\text{C}$  以及保证材料性能的前提下,提高第二次注塑时的注塑温度,确保第二次注塑末端熔体温度不低于  $250^\circ\text{C}$ ,或者末端熔体压力控制在 63 MPa 左右,减小末端熔接 V 形缺口的尺寸,控制 V 缺口处的内应力,可以有效地降低甚至避免开裂风险。

(4) 上述研究结果为解决 PMMA 双色及多色注塑制件的开裂问题提供了方向性的指导。在前期设计时,对双色熔接末端夹角和模具进行优化,在注塑过程中调整温度等工艺条件,可将应力开裂的风险降到最低。

#### 参考文献

- [1] 李祥兵,王坦,刘永清. 灯具多色注塑透镜开裂形成机理及对策[J]. 汽车电器,2018(9):80-82.  
Li Xiangbing, Wang Tan, Liu Yongqing. Crack mechanism of auto lamp bi-color plastic injection outer lens and countermeasures[J]. Auto Electric Parts, 2018(9):80-82.
- [2] 冯刚,田雅萍,张朝阁,等. 双色注射成型技术研究进展[J]. 工程塑料应用,2014,42(8):111-115.  
Feng Gang, Tian Yaping, Zhang Chao, et al. Research overview and prospects of bi-color injection molding technology[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(8):111-115.
- [3] 刘红,杨哲人,蒋兰芳. 车灯塑件退火状态下应力松弛规律研究[J]. 机电工程,2016,33(5):551-555.  
Liu Hong, Yang Zheren, Jiang Lanfang. Stress relaxation law of plastic part of automotive lamp under annealing[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(5):551-555.
- [4] 王钊,魏翔宇,倪君杰,等. 双色尾灯灯罩注射成型影响因素多目标优化[J]. 现代塑料加工应用,2020,32(1):50-53.  
Wang Zhao, Wei Xiangyu, Ni Junjie, et al. Multi-objective optimization of influencing factors for automobile two-color taillight lampshade injection molding[J]. Modern Plastics Processing and Application, 2020, 32(1):50-53.
- [5] 王海涛,潘宝荣,杜强国,等. 车灯塑料的环境应力开裂性能研究[J]. 高分子材料科学与工程,2004,20(6):180-183.  
Wang Haitao, Pan Baorong, Du Qiangguo, et al. Study on the property of environmental stress cracking of automotive lamp plastics[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2004, 20(6):180-183.
- [6] 陶永亮,谢鹏程. 汽车后灯配光镜的内应力缺陷实验[J]. 高分子材料科学与工程,2013,29(9):123-127.  
Tao Yongliang, Xie Pengcheng. Residual stress experiments on defects of automobile taillight lenses[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2013, 29(9):123-127.
- [7] Kamaludin M A, Patel Y, Williams J G, et al. A fracture mechanics approach to characterising the environmental stress cracking behavior of thermo-plastics[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2017, 92:373-380.
- [8] Kamaludin M A, Patel Y, Blackman B R K, et al. Fracture mechanics testing for environmental stress cracking in thermoplastics[J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 2:227-234.
- [9] 周沃华,黄明瑜,黄宝奎,等. 基于 Moldflow 解决 LED 灯罩的开裂问题[J]. 塑料工业,2019,47(3):43-46.  
Zhou Wohua, Huang Mingyu, Huang Baokui, et al. Solve the cracking problem of LED lampshade based on moldflow[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(3):43-46.
- [10] 陈斌,黄昭君,梁定前. PMMA 透镜内应力问题及解决方案[J]. 机电技术,2019(5):50-56.  
Chen Bin, Huang Zhaojun, Liang Dingqian. Solution of internal stress of PMMA lens[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2019(5):50-56.
- [11] 李文林,牛艳华,王志刚. 聚合物熔体界面扩散理论与研究方法[J]. 高分子学报,2013,29(7):817-826.  
Li Wenlin, Niu Yanhua, Wang Zhigang. Theories and methods for studies on polymer melt diffusion interfaces[J]. Acta Polymerica Sinica, 2013, 29(7):817-826.