

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.02.015

激光透射焊接异种塑料的实验研究

曲兆展,蔡令波,谢良越,王剑磊,孟宪凤,赵显,王春

(山东大学光学高等研究中心,山东青岛 266237)

摘要: 为了得到无吸收剂添加的聚碳酸酯(PC)和丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)的异种塑料焊接试样,利用热塑性塑料对 1910 nm 的激光具有较高的吸收率的特性,使用 1910 nm 的半导体激光器对上层透明 PC 塑料和下层白色 ABS 塑料进行了激光透射焊接实验研究。实验中通过改变激光功率和焊接速度来改变激光在焊件表面的热输入值。实验结果表明,激光热输入在 3.3 J/mm 时,PC 和 ABS 异种塑料焊接得到的试样焊缝外观效果较好,焊缝最大的剪切力达到了 7.25 MPa。证明了 1910 nm 半导体激光器可有效对 PC 和 ABS 异种塑料进行无吸收剂焊接。

关键词: 激光焊接; 异种塑料; 聚碳酸酯; 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)02-0091-05

Experimental Study on Laser Transmission Welding of Dissimilar Plastic

Qu Zhaozhan, Cai Lingbo, Xie Liangyue, Wang Jianlei, Meng Xianfeng, Zhao Xian, Wang Chun

(Center for Optics Research and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, China)

Abstract : In order to obtain the dissimilar plastic welding samples of polycarbonate (PC) and acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (ABS) without absorbent, taking advantage of the character that the thermoplastic has the characteristics of high absorption rate of 1910 nm laser, the laser transmission welding experiment of transparent PC plastic and white ABS plastic was conducted by 1910 nm diode laser. In the experiment, the heat input on the welding surface was changed by adjusting the laser power and welding speed. The results show that when the laser heat input is 3.3 J/mm, PC and ABS dissimilar plastic welding sample weld appearance is desired, and the maximum shear force of the sample weld reaches 7.25 MPa. It is proved that 1910 nm diode laser can effectively weld PC and ABS dissimilar plastics without absorbent.

Keywords : laser welding ; dissimilar plastic ; polycarbonate ; acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer

塑料具有较强的耐腐蚀性和绝缘性,同时兼具质轻、易加工、成本低等优点^[1]。在过去的几十年当中取代了大量的传统材料,在医疗、汽车制造、食品包装、汽车制造等领域都得到了广泛的应用^[2-3]。

随着制造业的快速发展和产品轻量化的需求,异种热塑性塑料之间的连接需求逐步增加,由于塑料的热导率相对金属材料较低且热敏感度高^[4],此外不同材料之间的熔点、导热率、比热容等参数存在差异,只有相容性较好的异种塑料之间才容易实现焊接^[5],导致异种塑料焊接的难度较大。与常见的热板焊接、超声焊接等方式相比,激光透射焊接具有能量集中、精密度高、加工作用力小等优势^[6-7]。目

前国内已经开展了异种塑料激光透射焊接的相关研究,李品等^[8]使用红外加热辅助方式对透明聚碳酸酯(PC)塑料和涂有 Clearweld 吸收剂的丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)、聚砜(PSU)热塑性塑料进行了激光透射焊接,结果表明该方式可有效提高异种塑料焊接试样的焊缝剪切力;庞振华等^[9]使用激光轮廓焊接的方式对透明 PC 和黑色 ABS 进行了焊接并得到了达到市场需求的试样;伍彦伟等^[10]对异种 PC 和聚苯醚(PPE)进行了激光透射焊接并用响应曲面法对焊接工艺参数进行实验设计与优化,得到了焊接强度最大为 6.51 MPa 的试样;上官同英等^[11]设计了田口实验的方法并提出了面能量

通信作者:王春,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为高端激光技术及其应用

收稿日期:2021-12-05

引用格式:曲兆展,蔡令波,谢良越,等. 激光透射焊接异种塑料的实验研究[J]. 工程塑料应用,2022,50(2):91-95.

Qu Zhaozhan, Cai Lingbo, Xie Liangyue, et al. Experimental study on laser transmission welding of dissimilar plastic[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(2):91-95.

的概念,实现了掺杂玻璃纤维的 ABS 和 PP 塑料的焊接并得到了较好的效果;诸金等^[12]使用 915 nm 的激光配合纳米氧化铟锡吸收剂材料实现了 PC 和 ABS 的激光焊接。

由于热塑性塑料对 1.7~2 μm 波段激光的吸收通常强于近红外波段^[13-14],因此使用该波段的激光可以在不使用激光吸收剂的情况下对异种塑料进行有效的焊接,降低生产成本^[15]。目前国内使用此波段的激光进行异种塑料焊接的相关研究较少,笔者使用波长 1910 nm 的半导体激光器对透明 PC 和白色 ABS 塑料进行透射焊接实验研究,对焊接过程中的物理现象进行了分析,优化焊接参数并使用拉力试验机对试样的焊缝强度进行了测试,找到了适合两种材料焊接的实验条件。

1 实验原理及材料、设备

1.1 实验原理

图 1 所示为激光透射焊接的原理图。传统激光透射焊接是指上层透明塑料对近红外波段的光的吸收率较小,激光经过两层塑料只有较少部分被吸收,难以产生足够的热量使焊接完成,因此需要在下层塑料的上表面添加激光吸收剂,激光被吸收剂吸收后释放热量在其附近形成热作用区,两层塑料板材熔化并在压力和热膨胀的作用下焊接在一起。而热塑性塑料对 1910 nm 的激光吸收较强,因此只需将激光束聚焦于两层塑料的接触面,激光就可以被两层塑料吸收从而避免使用吸收剂。

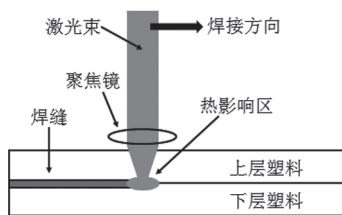


图 1 激光透射焊接原理图

1.2 实验材料

笔者所用的透光层材料为佛山市华夏绿宝建材有限公司生产的透明 PC,具有透光率性能好、抗冲击能力强、及易加工成型等诸多优点;所用的吸收层塑料为深圳市柏莱瑞绝缘材料有限公司生产的白色的 ABS,这种塑料强度高、耐热性好、化学性能稳定,两者都是综合性能优良的热塑性工程塑料。这两种塑料的连接产品综合了各自的优点,常被用于汽车、手机零件等领域。两种材料的相关参数见表 1。异种塑料焊接时,上下层材料的温差属性较

大有可能导致一种材料发生熔融而另一种材料未达到熔融温度导致两层焊接试样融合不充分,焊接强度较低;或是一种材料吸收热量过多率先达到热分解温度另一种塑料还处于熔融状态,这种情况会使一种塑料分解产生外观缺陷。由表 1 可以看出,热作用区的温度在 140~270℃ 区间内两种塑料均发生熔化且未达到分解温度。

表 1 PC 和 ABS 相关参数

材料	尺寸/mm	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	热变形温度 / ℃	分解温度 / ℃
透明 PC	60 × 30 × 1.5	1.2	130-140	340
白色 ABS	60 × 30 × 1.5	1.05-1.18	93-108	270

图 2 为上层 PC 材料在 700~2000 nm 波段内的透过率曲线图(测量设备为 Perkin Elmer 公司 Lambda 950 型紫外可见分光光度计),可以看出 PC 在 1910 nm 处的透光率明显低于可见光波段的透过率,表明上层 PC 材料能透过 1910 nm 激光的同时对其有较好的吸收能力,这解释了 1910 nm 的激光可以在不使用吸收剂的情况下能够焊接透明塑料的原因。在对塑料板材进行焊接之前对其进行超声处理,去除板材表面杂质和油污,并放入干燥箱内烘干,减少对焊接效果的影响。

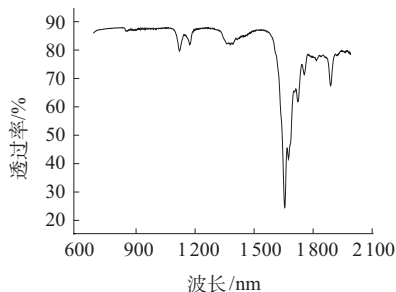


图 2 上层 PC 材料在不同波长下的透过率曲线图

1.3 实验设备

笔者使用的激光器为波长 1910 nm 半导体激光器 [ES-6319 型,中科正源(山东)光电科技有限公司],最大输出功率为 30 W,激光器通过水温设置为 20℃ 的水冷机散热,输出的激光经过光纤耦合传输至焊接头(焊接头被固定在 X-Y-Z 三维移动平台),激光经焊接头聚焦于 X-Y 平面,调整 Z 轴高度使激光焦点位于两层塑料的接触面上,焊接头的运动轨迹可根据三维移动平台内置的程序控制,本次实验的焊缝设置为沿 Y 轴方向的一条直线,长度为 30 mm。将两塑料层叠放置(重合部分的宽度为 20 mm)并使用夹具夹紧,适当的夹持力有利于提高焊接试件的质量,焊接过程如图 3 所示。

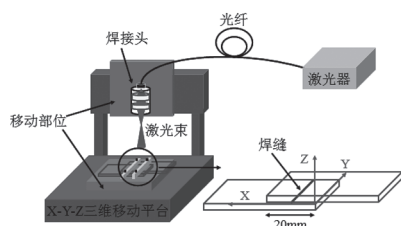


图3 焊接原理图

焊接完成后使用电子显微镜(50X-500X型,米欧特公司)观察焊缝的形貌及材料表面的微观痕迹,并对试样进行拉力测试。电子拉力试验机(DL-5000型,天津市港源试验仪器公司),拉伸速度为5 mm/min,如图4所示。由于拉伸两层塑料板材时力的方向不在同一直线,在夹具的夹持位置加上填充物可以减少附加弯矩的产生从而避免对测试结果产生影响。

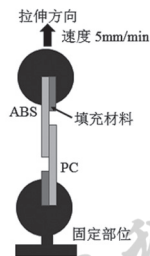


图4 拉力测试过程

笔者采用热输入综合分析工艺参数对焊接试样拉拔力的影响规律,热输入定义为:

$$E = P/v \quad (1)$$

式中: E 为激光的热输入, J/mm ; P 为激光功率, W ; v 为焊接速度, mm/s 。用拉拔力 N 和剪切力 σ 表示试件的强度,其中 N 即为两焊接试样经电子拉力试验机拉伸后从焊缝处分离的力学数值, N ; 试件的剪切力 σ 的计算公式为:

$$\sigma = F/D \cdot L \quad (2)$$

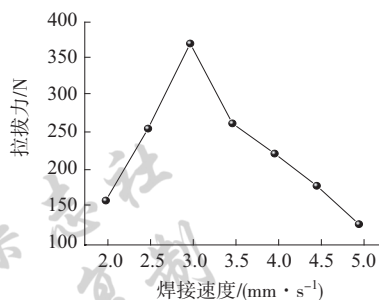
式中: σ 的单位是 N/mm^2 ; D 和 L 分别为焊缝的宽度和长度, mm 。

2 实验结果及讨论

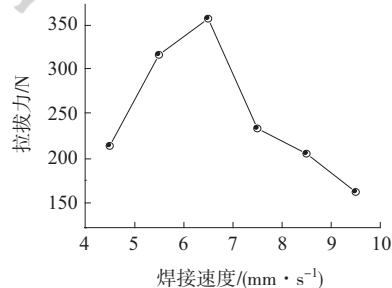
2.1 焊接参数对焊接强度的影响

图5为不同功率下PC/ABS试样拉拔力随焊接速度的变化曲线。首先在激光功率为10 W时对PC/ABS塑料进行了焊接实验,焊接速度为6 mm/s时板材虚焊;焊接速度为5 mm/s时两层塑料焊接成功但焊缝宽度较窄,两层塑料的融合程度一般导致焊接试件强度较低;随着焊接速度的减小焊缝宽

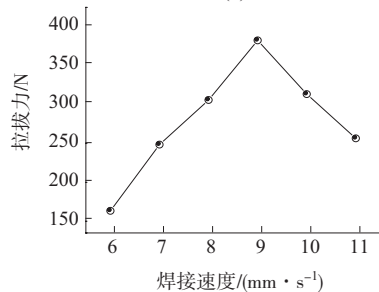
度加宽使两层材料均匀融合且密封性极好,在焊接速度为3 mm/s时,试件焊缝强度最大达到了371.2 N;此后随着焊接速度的减小,焊接板材吸收热量过多,焊缝中出现部分烧焦点,导致试件的拉拔力降低,最终在速度为2 mm/s时,焊缝温度过高导致材料分解,导致试件的焊接强度较低。调整焊接功率分别为20 W和30 W,并改变对应的焊接速度进行实验,结果表明不同功率下焊缝的拉拔力随焊接速度的变化均呈现出先增加后减小的趋势。基于所使用的激光器和塑料板材,激光功率在30 W,焊接速度在9 mm/s时,试样焊缝处最大拉拔力达382.6 N。



(a)



(b)



(c)

激光功率: a—10 W; b—20 W; c—30 W

图5 不同激光功率下PC/ABS试样拉拔力随焊接速度的变化

根据以上数据可得到激光热输入值与试样拉拔力的变化关系,如图6所示,热输入为3.3 J/mm附近时,试样焊接强度最大。不同功率下得到的热输入和试样拉拔力的关系曲线有很好一致性,为提高焊接效率,可选择30 W的功率下进行材料焊接。

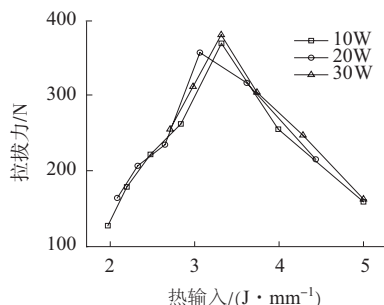
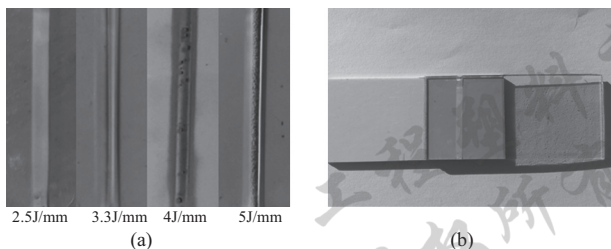


图6 不同功率下 PC/ABS 试样拉拔力随激光热输入的变化

2.2 焊接参数对焊接外观的影响

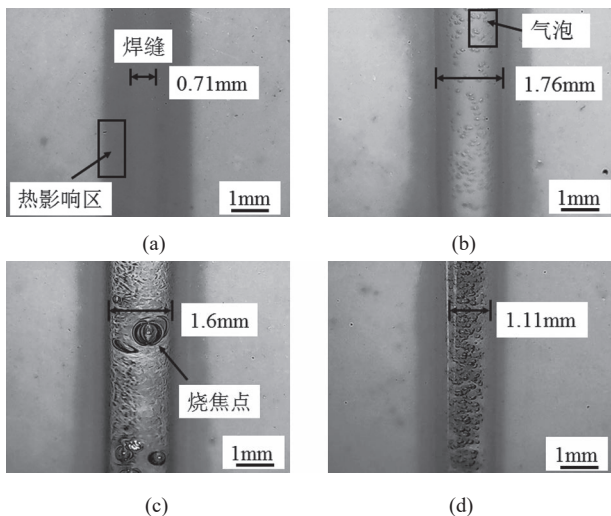
图7为几组不同热输入下的焊接试样。热输入为 2.5 J/mm 时,焊缝宽度均匀、整体气密性较好;随着热输入增加至 3.3 J/mm,可以看出 PC 和 ABS 焊缝的中心处留下了一条清晰的融合线,此时试样拉拔力最大达到了 382.6 N;随着热输入的持续增加至 4 J/mm,焊缝中产生了部分烧焦点导致试样强度降低;当热输入增加值 5 J/mm 时塑料吸收热量过多产生分解,进行拉力测试时试样强度明显降低。



a—不同热输入下焊接试样焊缝; b—完整焊接试样

图7 PC/ABS 焊接试样外观

使用电子显微镜对以上几组试件的焊缝形貌进行观察,如图8所示。由图8可知,当热输入为 2.5 J/mm 时,焊缝宽度较窄且相对于焊缝周围的热



热输入: a—2.5 J/mm; b—3.3 J/mm; c—4 J/mm; d—5 J/mm

图8 不同热输入下 PC/ABS 试样的焊缝微观形貌

影响区分界线不明显。当热输入增加至 3.3 J/mm 时,焊缝宽度明显加宽且焊缝中存在些许肉眼不可见的气泡,焊缝与热影响区之间存在清晰的边界,此时焊缝的强度较高;随着激光热输入继续增加至 4 J/mm 焊缝中产生了少许烧焦点且焊缝宽度降低。当热输入为 5 J/mm 时塑料吸收激光能量较多产生的热量使上层 PC 塑料整体发生烧焦并向上凸起,焊缝宽度和热影响区的面积均减小,焊缝强度明显降低。由此可知当焊缝中存在部分气泡且无烧焦时对透明 PC 和纯白 ABS 塑料的焊接更加有利。

3 结论

(1) 对异种塑料焊接的相关研究及激光透射焊接的原理进行了总结与分析,并找到了适合透明 PC 和纯白色 ABS 焊接实验的温度范围约为 140 ~ 270℃。

(2) 实验中焊接试样可承受的拉拔力最大时,焊缝中无烧焦点但存在肉眼不可见的气泡,焊缝的宽度最宽。

(3) 结果表明,1910 nm 的半导体激光器是一种能在不添加吸收剂情况下实现异种塑料焊接的理想光源。本次试验在激光功率为 30 W、焊接速度为 9.1 mm/s 时,试样的剪切力达到了 7.25 MPa,对应的热输入值为 3.3 J/mm。

参考文献

- [1] 张杰. ABS 塑料激光透射焊接工艺研究[J]. 塑料科技, 2019, 47(12):75-78.
Zhang Jie. Research on laser transmission welding process for ABS plastic[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(12):75-78.
- [2] 宋清华, 肖军, 文立伟, 等. 玻璃纤维增强热塑性塑料在航空航天领域中的应用[J]. 玻璃纤维, 2012(6):40-43.
Song Qinghua, Xiao Jun, Wen Liwei, et al. Applications of glass fiber reinforced thermoplastics in aerospace sector[J]. Fiber Glass, 2012(6):40-43.
- [3] 孔茗, 傅戈雁. 塑料激光焊接技术在汽车制造中的应用[J]. 塑料科技, 2018, 46(12):68-71.
Kong Ming, Fu Geyan. Application of plastic laser welding technology in automobile manufacturing[J]. Plastics Science and Technology, 2018, 46(12):68-71.
- [4] Pedro O, Fernandez V I, Groves R M, et al. Experimental assessment of the influence of welding process parameters on Lamb wave transmission across ultrasonically welded thermoplastic composite joints[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2018, 99:197-218.
- [5] Achaerjee B. Laser transmission welding of dissimilar plastics:3-D FE modeling and experimental validation[J]. Welding in the World,

- 2021, 65(7):1429–1440.
- [6] Bideskan A S, Ebrahimzadeh P, Teimouri R. Fabrication of bi-layer PMMA and aluminum 6061-T6 laminates by laser transmission welding: Performance prediction and optimization[J]. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2020, 3(2):150–159.
- [7] Hubeatir K A. Laser transmission welding of PMMA using IR semiconductor laser complemented by the Taguchi method and grey relational analysis[J]. *Materials Today:Proceedings*, 2020, 20(4):466–473.
- [8] 李品,孙跃东,谭文胜. 红外加热辅助激光透射焊接异种聚合物[J]. *激光技术*, 2019, 43(3):307–313.
Li Pin, Sun Yuedong, Tan Wensheng. Laser transmission welding of heterogeneous polymers assisted by infrared heating[J]. *Laser Technology*, 2019, 43(3):307–313.
- [9] 庞振华,张卫,任豪,等. 激光技术在异种塑料材料焊接中的应用[J]. *机电工程技术*, 2014, 43(4):96–100.
Pang Zhenhua, Zhang Wei, Ren Hao, et al. Applications of laser technology on the welding of dissimilar plastics[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2014, 43(4):96–100.
- [10] 伍彦伟,刘会霞,李品,等. 激光透射焊接聚碳酸酯和聚苯醚实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(5):147–153.
Wu Yanwei, Liu Huixia, Li Pin, et al. Experimental study of laser transmission welding between polycarbonate and polyphenylene oxide[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5):147–153.
- [11] 上官同英,刘冬敏,陈志. 激光透射焊接掺杂玻璃纤维 ABS 和 PP 塑料工艺研究[J]. *应用激光*, 2019, 39(1):93–97.
Shangguan Tongying, Liu Dongmin, Chen Zhi. Laser transmission welding of fiberglass-doped ABS and PP[J]. *Applied Laser*, 2019, 39(1):93–97.
- [12] 诸金,尹秀萍,钱佳为,等. 一种激光焊接易加工的 PC/ABS 合金材料及其制备方法: CN201911370458.5[P]. 2019-12-26.
Zhu Jin, Yin Xiuping, Qian Jiawei, et al. The invention relates to PC/ABS alloy material easily machined by laser welding and its preparation method: CN201911370458.5[P]. 2019-12-26.
- [13] Mamuschkin V, Haeusler A, Engelmann C, et al. Enabling pyrometry in absorber-free laser transmission welding through pulsed irradiation[J]. *Journal of Laser Applications*, 2017. DOI:10.2351/1.4983515.
- [14] Mingareev I, Weirauch F, Olowinsky A, et al. Welding of polymers using a 2 μ m thulium fiber laser[J]. *Optics and laser technology*, 2012, 44(7):2095–2099.
- [15] Nguyen N P, Behrens S, Brosda M, et al. Modelling and thermal simulation of absorber-free quasi-simultaneous laser welding of transparent plastics[J]. *Welding in the World*, 2020, 64:1–8.
-
- (上接第 82 页)
- [8] 陈小鹿,林家庆,王海兰,等. 电子电器注塑件典型缺陷分析及其解决措施[J]. *广州化工*, 2019, 47(8):120–124.
Chen Xiaolu, Lin Jiaqing, Wang Hailan, et al. Analysis of typical defects in electronic appliance injection parts and solving measures[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2019, 47(8):120–124.
- [9] 王红亮,尤志军,张栋. 保险杠拖车钩孔气痕浅析[J]. *模具制造*, 2016, 16(12):53–54.
Wang Hongliang, You Zhijun, Zhang Dong. Research on bumper gas mark in trailer coupling hole position[J]. *Die & Mould Manufacture*, 2016, 16(12):53–54.
- [10] 陈文. 薄壁塑件翘曲变形控制及工艺优化[D]. 荆州: 长江大学, 2020.
Chen Wen. Warpage deformation control and process optimization of thin-walled plastic parts[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2020.
- [11] 段家现,闫西坡. 手机壳体注塑成型困气缺陷的消除方法[J]. *工程塑料应用*, 2015, 43(9):49–53.
Duan Jiaxian, Yan Xipo. Method of eliminating air trap defects for injection molding of phone shell[J]. *Engineering Plastics Application*, 2015, 43(9):49–53.
- [12] 王梦寒,涂顺利,余春丽. 基于 Kriging 和 NSGA- II 的辅以困气改善的熔接痕优化策略[J]. *化工学报*, 2018, 69(10):4449–4455.
Wang Menghan, Tu Shunli, Yu Chunli. Optimization strategy of weld line assisted by air traps improvement based on Kriging and NSGA- II [J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(10):4449–4455.
- [13] Raju B S, Sekhar U C, Drakshayani D N. Optimizing multiple quality characteristics of stereolitho-graphy process via taguchi method-based grey analysis for SL5530 epoxy resin material to enhance part quality[J]. *Procedia Materials Science*, 2014(5):2532–2541.
- [14] 夏玉峰,杜婉婉,陈邦华,等. 顺序注塑成型在消除空调导风板熔接痕中的应用[J]. *工程塑料应用*, 2013, 41(2):48–51.
Xia Yufeng, Du Wanwan, Chen Banghua, et al. Application of sequential injection molding on eliminating weld lines of air conditioning wind deflector[J]. *Engineering Plastics Application*, 2013, 41(2):48–51.
- [15] 石波,刘斌. 注塑成型过程中制品质量的控制研究现状分析[J]. *塑料工业*, 2012, 40(10):9–13.
Shi Bo, Liu Bin. Analysis of present research on product quality control in the injection molding process[J]. *China Plastics Industry*, 2012, 40(10):9–13.
- [16] 王华金,唐西西,杨娟. 基于 Moldflow 的计算机面板注塑成型方案对比分析[J]. *塑料科技*, 2020, 48(2):98–104.
Wang Huajin, Tang Xixi, Yang Juan. Contrastive analysis of injection moulding schemes for notebook panel based on moldflow[J]. *Plastics Science and Technology*, 2020, 48(2):98–104.