[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.02.001

光固化快速模具材料特性与注塑工艺研究进展

张高阳[1],张　阳[2],李东亚[1],刘　禹[1]

(1.江南大学 机械工程学院,江苏 无锡　214122;2.丹麦科技大学 机械工程学院,丹麦 灵比　DK2800)

摘　要:为了缩短传统注塑模具的开发周期与制备成本,基于快速原型技术的快速模具逐渐发展了起来。其中光固化快速原型技术可以实现模具型腔从设计到原型的一步成型,对于产品开发初期的小批量生产具有重要意义。根据近年来国内外光固化快速模具的研究现状,笔者分析光固化快速模具与传统模具的主要区别,探讨了光固化模具的导热特性对注塑产品结晶度、收缩率和机械强度的影响,总结了光固化模具的机械特性与模具失效形式的关系以及光固化模具的导热率与机械特性对注塑工艺选择范围的影响。提出光固化模具适合成型中小尺寸的产品,未来将在含有复杂曲面的微注塑中得到广泛应用。

关　键　词:光固化快速原型;快速模具;导热特性;失效形式;微注塑

中图分类号:TH145.4;TQ320.66　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1005-2895(2021)02-0001-05

Progress of Light Curing Rapid Mold Characteristics and Injection Process

ZHANG Gaoyang[1],ZHANG Yang[2],LI Dongya[1],LIU Yu[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
2. Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby DK 2800, Denmark)

Abstract: In order to shorten the development cycle and preparation cost of traditional injection molds, rapid molds based on rapid prototyping technology have gradually been developed. The light curing rapid prototyping technology can realize the one-step molding of the mold cavity from design to prototype, which is of great significance for small batch production in the early stage of product development. According to the research status of light-curing rapid molds at home and abroad in recent years, the main differences between light-curing rapid molds and traditional molds were investigated, and the effect of thermal conductivity of light-curing molds on the crystallinity, shrinkage rate and mechanical strength of injection molded products was reviewed. At the same time, the relationship between the mechanical characteristics and failure modes of the light-curing mold was analyzed. The influence of thermal conductivity and mechanical properties of light-curing molds on the selection range of injection molding process was concluded. It is suggested that the light-curing molds are suitable for molding small and medium-sized products, and will be widely used in micro-injection molding with complex curved surfaces in the future.

Keywords: light-curing rapid prototyping; rapid mold; thermal conductivity; failure mode; micro-injection molding

快速原型技术(也称为3D打印技术)起源于20世纪80年代[1],它利用逐层堆积的方式将计算机建立的三维模型直接转化为实体模型[2]。利用快速原型技术制备注塑模具能够以较低的成本实现塑料制品的快速小批量生产。其中光固化快速原型技术的成型精度与成型效率优于其它增材制造方式,适合快速模具的制备[3-4]。然而光固化材料的导热特性和机械强度相对于传统模具差别较大,针对光固化材料的特性进行模具结构和注塑工艺的研究对保证最终产品质量和快速模具的使用寿命具有重要意义。笔者分析了光固化快速模具的材料特性对注塑过程的影响,介绍了光固化快速模具的注塑工艺和适用范围,最后总结了光

收稿日期:2021-01-02;**修回日期**:2021-02-05

第一作者简介:张高阳(1995),男,河南安阳人,硕士,主要研究方向为增材制造与软模注塑。E-mail:zgy9506@126.com

固化快速模具的加工特性和未来发展趋势。

1 光固化快速模具

根据制备方式的不同快速模具可以分为直接快速模具和间接快速模具[5]。直接快速模具是利用快速原型技术直接制备模具的型腔,进行简单的表面处理后将型腔镶嵌到标准模架中获得用于小批量注塑生产的模具,如图 1(a)所示[6]。间接快速模具需要首先利用快速原型技术制备产品的模型,将模型放置到框架中用液态或粉末状材料浇注,当浇注材料受外界条件如光照、加热的刺激固化后取出模型,间接得到产品的型腔,如图 1(b)所示[7]。直接快速模具省去了利用原型翻制模仁的工序,它的制备效率更高。快速原型的材料对成型精度和模型表面质量有较大影响,光敏树脂的成型精度通常优于金属粉末与熔融沉积材料,更适合快速模具的制备。然而光敏树脂的材料特性与传统模具的差异会导致注塑过程与产品特性发生变化。

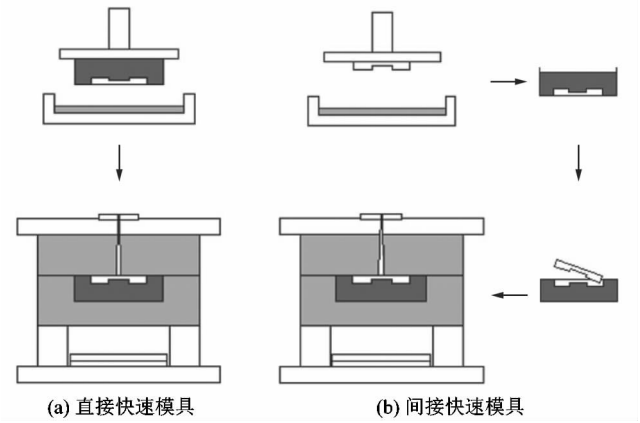

图 1 快速模具制备过程

Figure 1 Preparation process of rapid mold

2 光固化模具导热特性

2.1 导热特性与产品结晶度

注塑过程中熔体的热量通过热对流、热辐射和热传导被冷却液带走或散发到空气中[8]3。熔体热交换的效率主要取决于模具的导热率和冷却管道的布置形式。商业上常用的光固化材料其本质都是环氧树脂或丙烯酸的变体,导热率一般为 0.2 W/(m·K),而普通工具钢为 50 W/(m·K),铝为 200 W/(m·K)[9]。光固化材料较低的导热率使注塑过程中熔体固化的时间较长。当使用结晶类聚合物作为注塑材料时,聚合物在冷却过程中从无定形状态逐渐恢复到结晶状态。光固化模具的导热率使聚合物有足够的时间重新结晶;金属模具的冷却时间较短,熔体固化时分子可能无法重新定向而保持非结晶状态。

注塑产品结晶度的变化会影响产品的收缩率。Harris 等[10]利用 PA66 注塑矩形和圆柱形结构的产品,当注塑工艺相同时光固化模具成型产品的收缩率约是铝模具的 2 倍,注塑产品的结晶度差异造成了上述尺寸收缩率的变化[11]。结晶度的差异同时会使产品的机械特性发生变化。Tábi 等[12]以聚乳酸(PLA)有核化合物为注塑材料,以相同的工艺注塑到光固化模具和金属模具中,光固化模具成型样品的结晶度为 31.9% 而金属模具仅为 13.8%。在万能实验机上对样品进行拉伸和弯曲测试时发现光固化模具注塑样品的抗拉强度、弯曲强度、拉伸模量、弯曲模量相对于金属模具均有 20% 左右的提升。光固化模具注塑产品较高的结晶度使产品具有了较强的力学性能。

2.2 导热特性与辅助冷却

光固化材料的导热特性对冷却效率的影响可以通过辅助冷却的方式进行改善。注塑过程中熔体的大部分热量通过热交换被冷却液带走,合理布置的冷却管道可以补偿模具导热性的不足。光固化材料的成型方式允许模具根据产品的结构布置随形冷却系统。与传统冷却管道不同,随形冷却系统根据产品的冷却需求布置管道的位置和截面形状,它的冷却效率更高,并且模具的散热也更加均匀,如图 2 所示[8]1。Zink 等[13]对比了传统冷却、垂直随形冷却、水平随形冷却和无冷却模具对 2 mm 厚、90°板的成型效率,发现采用相同的注塑参数成型时水平随形冷却所需的冷却时间最短,传统冷却和无冷却所需的冷却时间增加了约 150%。随形冷却系统能够缩短注塑成型的循环周期,提高生产效率,同时降低注塑过程中模具承受的循环热载荷。

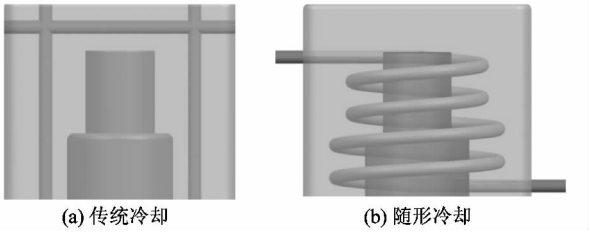

图 2 光固化模具冷却系统

Figure 2 Cooling system of light-curing mold

2.3 导热特性总结

光固化模具与金属模具导热特性的差异使注塑过程和产品特性发生了变化。光固化模具较低的导热率使熔体在型腔内的固化时间较长。对于结晶速率较低的聚合物,较长的固化时间提升了产品的结晶度。结

晶度会对产品的收缩率和机械特性产生影响,较高的结晶度会提升注塑产品的收缩率,同时注塑产品的机械强度也会随着结晶度的提升而增强。光固化模具导热特性的不足可以通过布置随形冷却管道的方式进行补偿。

3　光固化模具机械特性

光固化模具在注塑的过程中需要承受熔体的循环热冲击,光固化材料的机械特性是决定模具使用寿命和产品成型质量的关键因素。通常根据标准 ASTM D638 进行光固化材料的拉伸强度测试,根据标准 ASTM D790 进行弯曲测试[14],光固化材料的拉伸强度与弯曲强度均低于金属材料。快速原型工艺会影响成型样品的强度,如成型层厚的增加与后固化时间的缩短能提升样品的拉伸强度[15]。通过经验关系建立快速原型工艺与样品强度的函数模型,能够根据样品的强度要求选择打印工艺[16]。光固化树脂的强度也受使用温度的影响,光固化树脂的拉伸强度和剪切强度随着温度的升高而降低,冲击强度随着温度的升高而上升[17]742。当温度高于样品的玻璃化转变温度时,样品的储能模量快速下降[18]。因此在注塑过程中需要根据模具的强度要求,调整冷却时间控制模具的使用温度。

3.1　机械强度与失效形式

光固化材料的机械特性与成型方式决定了模具的失效形式。注塑时熔体以较高的速度和压力注入型腔,光固化模具承受的熔体压力大于模具的极限强度时将发生弯曲失效或剪切失效[17]743。弯曲失效时模具特征结构绕支撑点发生旋转断裂,如图 3(a)所示;剪切失效时模具的薄壁特征在熔体的压力下,沿熔体流动方向发生剪切断裂,如图 3(b) 所示[19]717;熔体填充时弯曲应力会使模具表面应力集中处产生裂纹,在注塑循环中裂纹扩展导致模具失效,如图 3(c)[17]744;剪切失效也会在微观尺度下发生,熔体持续侵蚀模具表面,在剪切力的作用下模具表面发生微观剥落,微观碎片的累积造成光固化模具表面恶化而失效,如图 3(d)[20]9所示;熔体在型腔内固化后,通过模具顶针的弹出力脱离模具,注塑产品和模具之间的摩擦力使脱模的过程中模具承受拉应力,光固化模具承受的拉应力大于抗拉强度时将会发生拉伸失效,如图 3(e)[21]253所示。

减小注塑压力能够降低模具的弯曲应力,但是需要提高熔体温度补偿材料在型腔内的流动[19]718。拉应力与模具粗糙度和熔体冷却时间成正比,粗糙度增大时产品和模具之间的摩擦因数增大,冷却时间增加时产品和模具之间的正压力增加,两者都会导致脱模过程中模具承受的拉应力增大[21]254。光固化模具采用逐层堆积的成型方式,减小成型时各层的厚度能够提升模具的表面质量[22]502。此外,模具设计过程中增大拔模角度也能减小脱模过程中模具承受的拉应力,降低模具拉伸失效的风险[22]503。

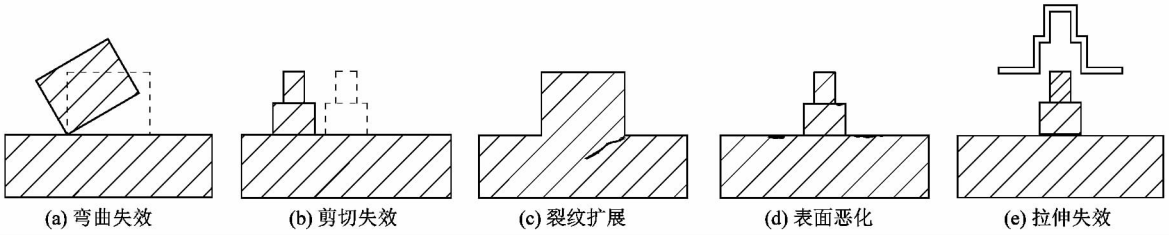

图 3　光固化模具失效形式

Figure 3　Failure modes of light-curing mold

3.2　机械特性的纤维增强

光固化材料较弱的机械特性限制了模具的使用寿命,普通光敏树脂制备的模具,最佳使用寿命仅为 50~100 次[20]3。提高光固化材料机械性能的方式主要包括调整树脂组分、树脂化学改性和填充纤维,其中填充纤维是最简单有效的增强方式[23]5400。纤维增强聚合物(FRP)中纤维承受外界载荷保证材料的强度和刚度,聚合物作为基体材料保证纤维的定位和取向[24]。纤维增强的光敏树脂机械性能有较大的提升,如直径 15 μm、长度 1.6 mm 的玻璃纤维混合到聚氨酯丙烯酸基体中,纤维的体积分数达到 20% 时,测试样品的刚度可以提高到基体材料的 2 倍[25]。添加体积分数为 16% 的玻璃纤维,光敏树脂的抗拉强度最高能增强到 72 MPa[26]。

纤维提高光固化材料机械性能的同时也会带来某些负面影响,如填充纤维的团聚以及对光的散射导致树脂的黏度上升和透明度下降,影响光固化材料的成型分辨率[27]2391。纳米尺度的纤维在提高光固化材料

机械性能的同时所带来的负面影响较小[23]5400。如二氧化硅(SiO_2)纳米颗粒混合到丙烯酸树脂中,质量分数达到 17% 时,复合材料的黏度仅有较小提升且材料的透光率保持不变[27]2395。此外,纳米复合材料在耐热性、固化收缩率等方面的优势也会使光固化模具的使用寿命提升。

3.3 机械特性总结

光固化模具的制备中成型层厚、固化时间和构建方向等影响模具的机械特性,根据制备工艺与机械特性的经验关系能够确定模具制备的工艺参数。此外光固化模具的机械特性受温度的影响较大,需要避免模具在极限温度下强度过低而失效。光固化模具的机械特性决定了模具的使用寿命和常见失效形式,熔体填充时光固化模具会发生弯曲失效、剪切失效、裂纹扩展和表面恶化失效等,产品弹出时模具容易出现拉伸失效等。利用填充纤维的方式可以增强光固化材料的机械特性,提高光固化模具的使用寿命。随着纳米复合材料的发展以及耐热性与机械强度较高的工程塑料(如聚酰亚胺)在光固化快速原型中的应用[28],光固化快速模具将更好地应用于中、小批量的注塑生产。

4 注塑工艺与产品特点

4.1 光固化模具注塑工艺

注塑工艺直接影响注塑产品的成型质量和生产效率[29],根据模具结构和注塑材料的流变学、热机械性能选择最佳的注塑工艺能够促进产品质量的提升[30]。光固化模具注塑成型时提高模具温度和注射速度有利于注塑产品表面质量的提升[31]706。熔体流动距离较长时产品表面容易出现垂直于流动方向的明、暗条纹,这种流动缺陷会影响产品的外观和表面粗糙度[32]。提高注射速度能够增大熔体和模具之间的切应力从而减小流动缺陷,但注射速度过高时熔体流动的非稳定性增加反而不利于填充进行。提高模具温度能够使聚合物在固化前松弛也有利于流痕的消失[31]709,但模具温度较高会对光固化模具的机械强度产生影响,增大模具失效的风险。

此外适当增加保压压力与冷却时间会使注塑产品的翘曲变形减小[33],有利于提升注塑产品的尺寸精度。但增加保压压力与冷却时间会使产品的脱模力增大,容易导致光固化模具出现拉伸失效[34]。总之优化注塑工艺能够提升光固化模具的成型质量,但工艺参数的优化范围受光固化模具材料特性的限制,确定光固化模具的注塑工艺时需要考虑模具材料特性和模具使用寿命等边界条件的限制。

4.2 光固化模具适用范围

光固化模具虽然成功地成型了某些高熔点聚合物,但在极限工作条件下模具的使用寿命十分有限。光敏树脂的玻璃化转变温度决定了光固化模具更适合成型流动性好、加工温度较低的聚合物,如聚丙烯(PP),丙烯腈丁二烯苯乙烯(ABS)和聚苯乙烯(PS)。这类聚合物要求模具温度在 45 ~ 50 ℃之间,低于光固化材料的玻璃化转变温度[20]4,在该温度范围内光固化模具的使用寿命较长。此外非结晶类材料受冷却速率的影响较小,当产品对收缩率的要求较高时应优先选择非结晶类聚合物作为光固化模具的注塑材料[35]。

光固化模具作为一种低成本的快速工具,主要用于成型尺寸较小的塑料制品。产品尺寸较大时熔体的散热较为困难,光固化型腔容易在高温熔体填充时受热变形而失效[36]。为了避免熔体冲击导致的模具失效,光固化模具的浇口附近壁厚应较大,垂直于熔体流动方向上不应设置高展弦比的特征结构。此外光固化模具应设有排气孔,避免熔体填充时局部空气过热造成表面烧蚀[20]16。

5 结语

利用光固化快速原型技术直接制备光固化模具,在制备成本、效率和灵活性等方面均优于传统模具。笔者阐述了光固化模具导热特性和机械特性与传统模具的差异,以及光固化模具注塑产品的特点。光固化快速原型的优势在于成型复杂的产品结构,未来光固化模具成型复杂曲面和微结构的能力将会被开发。耐高温光敏树脂的出现与多材料快速原型技术的成熟也将进一步拓展光固化模具成型材料的适用范围和使用寿命。

参考文献:

[1] 张强,张意,胡峻铭,等. 基于数字光处理技术的多材料增材制造装置研究[J]. 轻工机械,2020,38(4):88.

[2] 王永信,刘光辉,梁晋,等. 注射模光固化型芯快速制造关键技术研究[J]. 模具工业,2015,41(1):51.

[3] ZHANG Yang, PEDERSEN D B, GOTJE A S, et al. A soft tooling process chain employing additive manufacturing for injection molding of a 3D component with micro pillars [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 27: 138.

[4] KOVACS J G, SZABO F, KOVACS N K, et al. Thermal simulations and measurements for rapid tool inserts in injection molding applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 85: 50.

[5] NAGAHANUMAIAH, SUBBURAJ K, RAVI B. Computer aided rapid tooling process selection and manufacturability evaluation for injection mold development[J]. Computers in Industry, 2008, 59(2/3): 262.

[6] NAGAHANUMAIAH, RAVI B, MUKHERJEE N P. Rapid tooling

manufacturability evaluation using fuzzy-AHP methodology [J]. International Journal of Production Research,2007,45(5):1161.

[7] RAJAURU J, DUKE M, AU C K. Development of rapid tooling by rapid prototyping technology and electroless nickel plating for low-volume production of plastic parts [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2015,78(1/2/3/4):31-40.

[8] ZINK B, SZABO F, HATOS I, et al. Enhanced injection molding simulation of advanced injection molds[J]. Polymers,2017,9(2):77.

[9] HARRIS R A,HAGUE R J M,DICKENS P M. Thermal conditions in stereolithography injection mould tooling and their use for polyether-ether-ketone moulding [J]. International Journal of Production Research,2004,42(1):120.

[10] HARRIS R A,NEWLYN H A,HAGUE R J M,et al. Part shrinkage anomilies from stereolithography injection mould tooling [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2003,43(9):879-887.

[11] HARRIS R A, HAGUE R J M, DICKENS P M. The structure of parts produced by stereolithography injection mould tools and the effect on part shrinkage[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2004,44(1):59-64.

[12] TABI T, KOVACS N K, SAJO I E, et al. Comparison of thermal, mechanical and thermomechanical properties of poly(lactic acid) injection-molded into epoxy-based rapid prototyped (PolyJet) and conventional steel mold [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2016,123(1):349-361.

[13] ZINK B, KOVACS N K, KOVACS J G. Thermal analysis based method development for novel rapid tooling applications [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2019,108:104297.

[14] DIZON J R C, ESPERA A H, CHEN Qiyi, et al. Mechanical characterization of 3D-printed polymers [J]. Additive Manufacturing,2018,20:49.

[15] KAZEMI M, RAHIMI A. Stereolithography process optimization for tensile strength improvement of products [J]. Rapid Prototyping Journal,2018,24(4):688-697.

[16] CHOCKALINGAM K, JAWAHAR N, CHANDRASEKAR U, et al. Establishment of process model for part strength in stereolithography [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208(1/2/3):361.

[17] RAHMATI S, DICKENS P. Rapid tooling analysis of Stereolithography injection mould tooling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2007,47(5):740-747.

[18] GRIFFITHS C A, DIMOY S S, FISCHER S, et al. Micro-stereolithography tools for small-batch manufacture of polymer micro-parts[J]. Journal of Engineering Manufacture,2012,226(4):714.

[19] GHEISARI R,BARTOLO P,GODDARD N,et al. An experimental study to investigate the micro-stereolithography tools for micro injection molding[J]. Rapid Prototyping Journal,2017,23(4):717-718.

[20] BAGALKOT A, PONS D, SYMONS D, et al. Categorization of failures in polymer rapid tools used for injection molding [J]. Processes,2019,7(1):17.

[21] HOPKINSON N, DICKENS P. A comparison between stereolithography and aluminium injection moulding tooling [J]. Rapid Prototyping Journal,2000,6(4):253-254.

[22] HARRIS R A,NEWLYN H A,DICKENS P M. Selection of mould design variables in direct stereolithography injection mould tooling [J]. Journal of Engineering Manufacture,2002,216(4):502-503.

[23] KUMAR S,HOFMANN M,STEINMANN B,et al. Reinforcement of stereolithographic resins for rapid prototyping with cellulose nanocrystals [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2012, 4(10):5400.

[24] ARPITHA G R,YOGESHA B. An overview on mechanical property evaluation of natural fiber reinforced polymers[J]. Materials Today: Proceedings,2017,4(2):2755.

[25] CHEAH C M, FUH J Y H, NEE A Y C, et al. Mechanical characteristics of fiber-filled photo-polymer used in stereolithography[J]. Rapid Prototyping Journal,1999,5(3):112-119.

[26] GOH G D, YAP Y L, AGARWALA S, et al. Recent progress in additive manufacturing of fiber reinforced polymer composite [J]. Advanced Materials Technologies,2019,4(1):1800271.

[27] GURR M, HOFMANN D, EHM M, et al. Acrylic nanocomposite resins for use in stereolithography and structural light modulation based rapid prototyping and rapid manufacturing technologies [J]. Advanced Functional Materials,2008,18(16):2391-2395.

[28] GUO Yuxing, JI Zhongying, ZHANG Yun, et al. Solvent-free and photocurable polyimide inks for 3D printing[J]. Journal of Materials Chemistry A,2017,5(31):16307-16314.

[29] DANG X P. General frameworks for optimization of plastic injection molding process parameters[J]. Simulation Modelling Practice and Theory,2014,41:15.

[30] KASHYAP S, DATTA D. Process parameter optimization of plastic injection molding: a review [J]. International Journal of Plastics Technology,2015,19(1):2.

[31] AN C C, CHEN R H. The experimental study on the defects occurrence of SL mold in injection molding[J]. Journal of Materials Processing Technology,2008,201(1/2/3):706-709.

[32] 刘斌,谢毅. 材料流变性能对注塑制品熔接痕的影响[J]. 工程塑料应用,2008,36(6):30.

[33] 刘成娟,刘成刚,刘艳,等. 基于 CAE 与正交试验法的工艺参数对翘曲变形的影响分析[J]. 中国塑料,2018,32(1):106.

[34] AN C C,CHEN R H. Experimental study of demolding properties on stereolithography tooling[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering,2007,129(4):847.

[35] GRIFFITHS C, DIMOV S, HIRSHY H, et al. Prototype tooling for producing small series of polymer microparts [J]. Journal of Engineering Manufacture,2011,225(12):2189-2205.

[36] ATTANASIO D C, HOPKINSON N, KEHRBERGER R, et al. Application and modelling of hybrid stereolithography injection mould tooling[J]. Virtual and Physical Prototyping,2006,1(3):197-206.