

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.03.017

聚砜医疗干粉吸入器底座成型与注塑模设计

石峰¹, 王伟伟², 邹锋¹, 朱超挺¹, 周天绮¹

(1. 浙江医药高等专科学校, 浙江宁波 315100; 2. 浙江工商职业技术学院机电工程学院, 浙江宁波 315012)

摘要: 使用聚砜(PSU)塑料注射成型医疗干粉吸入器底座塑件。成型前,对PSU材料进行干燥处理的工艺参数为温度125~135℃,时间4~6 h,平铺,铺料厚度18~22 mm,含水量控制在0.1%以下。针对塑件的注射成型设计了1副一模一腔热流道两板注塑模具,使用单点热浇口进行浇注;模具分2次分型打开,1次用于塑件定模侧斜孔的抽芯脱模,1次用于塑件模腔的打开;型腔的表面粗糙度为0.4以上,排气孔的深度应控制在0.08 mm;针对塑件14个斜孔内壁的脱模,设计了定模斜杆复合顶出机构,针对14个斜孔外壁的脱模,设计了动模“万能斜顶”复合机构。运用CAE分析获得了模具中所需的成型时间为1.542 s,注塑压力为58 MPa。塑件成型后须退火处理,控制参数为空气浴,温度150℃,时间2~4 h。

关键词: 医疗塑件;聚砜塑料;热流道;注塑工艺;模具设计;脱模

中图分类号: TG243 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)03-0091-06

Injection Molding and Mould Design for Base of Medical Dry Powder Inhaler Made of Polysulfone

Shi Feng¹, Wang Weiwei², Zou Feng¹, Zhu Chaoting¹, Zhou Tianqi¹

(1. Zhejiang Pharmaceutical College, Ningbo 315100, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Zhejiang Business Technology Institute, Ningbo 315012, China)

Abstract: The injection molding for base plastic parts of medical dry powder inhaler were done with polysulfone plastic. Before molding, the drying process parameters of polysulfone were as follow, the drying temperature/time was 125-135℃/(4-6 h), the way of paving materials was tiling, the thickness of paving materials was 18-22 mm, and the water content was controlled below 0.1%. In the injection molding of plastic parts, a kind of hot runner two-plate injection mould which has one mould with one cavity was designed. In the mould, the single point hot-gate was used for gating, the mould was opened twice, one for core-pulling and demoulding of the angled hole of the fixed mould, and one for opening of the mould cavity. The surface roughness of the mould cavity is above 0.4, the depth of air vent should be controlled 0.08 mm. For demoulding the inner walls of 14 angled holes of the plastic parts, the angle bar composite ejection mechanism on fixed mould was designed, and for demoulding the outer walls of 14 angled holes, the "universal lifter" composite mechanism on moving mould was designed. The CAE analysis showed that the molding time was 1.542 s and the injection pressure was 58 MPa. The plastic parts must be annealed after molding, the control parameters were: air bath, temperature 150℃, time 2-4 h.

Keywords: medical plastic part; PSU plastic; hot-runner; injection molding process; mould design; demoulding

1 塑件分析

图1所示为一种医疗干粉吸入器底座塑件,塑件俯视外形呈葵花形状,侧视外形呈球冠形状。塑件外沿圆周上布置了14个斜圆柱孔(简称斜孔),其内径为8 mm、外径为10 mm、高度为14 mm,

斜孔轴心线与塑件中心线夹角为5°。中间直径127 mm圆周内布置了4个内径为8 mm的直圆柱孔和6个内径为4 mm小孔,直圆柱孔的外径为10 mm,高度为12 mm。塑件最小壁厚1.8 mm,最大2.4 mm,平均壁厚2 mm。

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目(LGF20E050002),浙江工商职业技术学院科研基金项目(2020Z05,2020Y03)

通信作者: 石峰,副教授,从事机电一体化、机械制造、模具设计研究 E-mail: 37120353@qq.com

收稿日期: 2021-01-08

引用格式: 石峰,王伟伟,邹锋,等.聚砜医疗干粉吸入器底座成型与注塑模设计[J].工程塑料应用,2021,49(3):91-96.

Shi Feng, Wang Weiwei, Zou Feng, et al. Injection molding and mould design for base of medical dry powder inhaler made of polysulfone[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(3): 91-96.

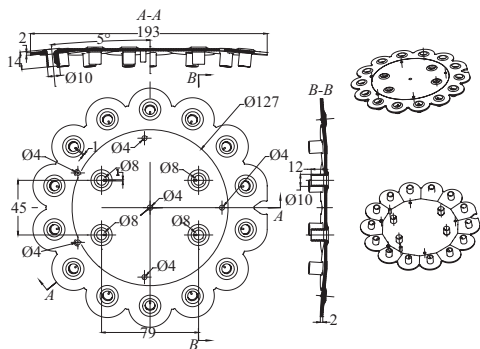


图1 塑件

塑件使用聚砜 (PSU) 材料进行注射成型, 该材料为一种坚韧且强度高的透明塑料, 与聚碳酸酯相比能提供较高的耐热性和更好的水解稳定性^[1-3]; 具有良好的力学性能和耐化学性能, 与蒸汽、氧化剂接触时具有优异的尺寸稳定性; 有透明与不透明的各种彩色可供选择。PSU 的收缩率为 0.4%~0.8%, 不同方向收缩差异小, 塑件脱模斜度一般取 0.02°。PSU 材料在医卫器材零部件制造方面应用较为广泛, 典型有外科手术盘、喷雾器、加湿器等塑件零件^[4-6]。

2 注射成型方案及浇注系统设计

塑件的注射成型方案设计受两个因素的影响, 第一个是塑件的材料, 第二个是塑件的结构。就材料而言, PSU 是一种非结晶聚合物, 成型温度 280℃ 以上, 流动性差, 流长比为 80 左右, 塑件的壁厚须控制在 1.5 mm 以上, 吸入器底座塑件的平均壁厚为 2 mm, 因而可以使用 PSU 材料进行注射成型。PSU 材料对缺口较为敏感, 塑件上的直角或者锐角都须使用圆弧过渡进行处理。PSU 材料对含水量敏感, 塑件成型前, 须对材料进行干燥处理, 尽可能降低材料中含水量, 塑件加工前, 材料含水量控制在 0.1% 以下, 以防高温下熔体降解。

就塑件结构而言, 塑件整体形状为圆片状, 其包容圆的外径为 193 mm, 为中等偏大型塑件。为保证注塑时浇口到各流动末端的长度接近, 以保证塑件各局部位置的充填均衡性, 塑件的最佳浇口位置以开设在塑件的几何中心位置为最佳。塑件模腔的冷流道设计要求高, 流道设计时, 其基本要求为: 主流道尽可能短且粗, 以利于熔体流动, 主流道直径 2 mm 以上, 脱模斜度 3°~5°, 分流道用圆形或梯形流道, 流动路径避免采用弯道形式。

对于塑件的脱模, 其上所设置的 14 个斜孔, 需要使用 14 个抽芯方向不同的圆柱型芯镶件进行抽

芯脱模, 显然, 塑件不宜采用多腔布局成型, 采用单腔布局既能保证塑件的成型精度, 又能降低模具中机构件的安装难度。

塑件的浇注系统设计方案为: 使用 1 模 1 腔单腔布局, 使用单点热流道直接浇口进行浇注^[7], 浇口设置在塑件的几何中央位置, 这样可以避免冷流道的开设, 以免影响模腔的充填。该方案的 CAE 流动分析如图 2 所示, CAE 分析中, 塑件材料选用巴斯夫公司 (BASF) 牌号为 P1700 的 PSU, 浇口为圆柱形 Ø1.2 mm 浇口, 浇口长度 1.0 mm, 进料口的位置设置在模腔几何中央厚壁处。模具温度设置为 140℃, 熔体温度 360℃、最大温度 380℃, 顶出温度 165℃。注塑速率采用中速, 以免高速造成熔体破裂, 充模困难。

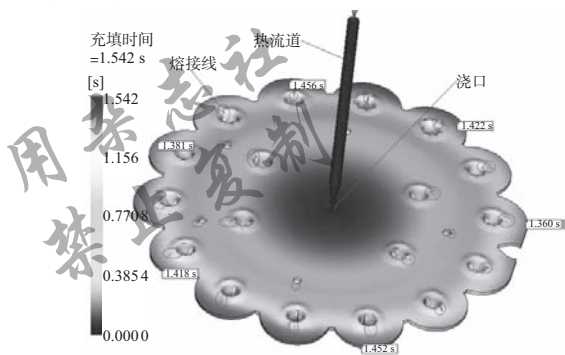


图2 浇注系统 CAE 分析

从图 2 可以看出, 在该成型方案下, 模腔的充填性能好, 各末端能获得均衡充填, 整体充填时间为 1.542 s 左右, 能满足塑件的生产周期要求。充填所需压力为 58 MPa 左右, 对注塑机的使用要求不高。流动路径上熔接线主要出现在孔的末端位置处, 形态为熔合线, 可以通过提高模具温度的方式来消除。流动路径上气孔较多, 需要增强模腔的排气来消除。流动分析中, 不利的结果为: 塑件成型中所产生的内应力难以消除, 只能通过保压措施来尽可能减小。

3 分型及成型件设计

如前所述, 塑件采用单腔模式成型时, 将考虑收缩率后的塑件表面作为成型件的成型面, 选用外沿分型线、各内孔分型线以上的面作为型腔面, 以下的面则作为型芯面, 如图 3 所示。其中, 型芯面中, 各斜孔内侧的局部区域面必须分割出来, 以用作斜顶的分型面, 用于设计斜顶以实现斜孔内侧倒扣的成型和脱模^[8-12]。

图 4 为单个斜孔内侧局部区域面 (图 4 中倒扣区域) 的成型件设计。在图 4 中, 针对 14 个斜孔的

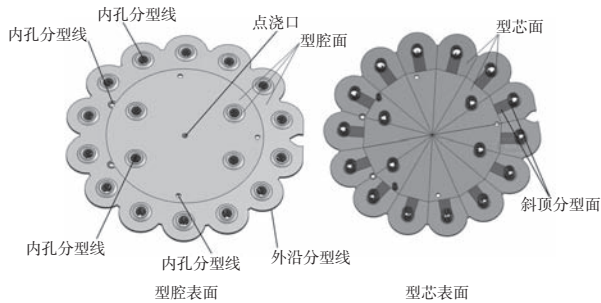


图3 成型面分割

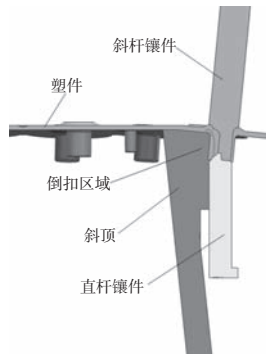


图4 单个斜孔内侧局部区域面的成型件设计

脱模,使用斜杆镶件成型斜孔的上端部分,这样可以将斜孔的下端设置成直杆镶件,从而可以最大限度降低14个斜孔的脱模机构设计难度。因而,针对斜孔部位的脱模可以采用以下方式:斜孔内壁的成型与脱模由位于型腔镶件一侧的斜杆镶件来实现,对于斜孔外壁倒扣区域的脱模,则使用斜顶顶出方式实现。

使用图3中所示外沿分型线对模腔进行分型后,将所获得的型腔镶件、型芯镶件及斜孔的斜顶、斜杆镶件和直杆镶件进行拼合组装,由此构成的模腔(局部)如图5所示。设计斜顶时,必须设置高度挂台、水平挂台两个限位措施以保证斜顶复位时在高度方向、水平方向都有定位。设置外沿分型面时,分型面设置为延拓面+水平面的组合形式,以便于排气槽开设、分型面的加工及模腔的闭合配模。加工型腔镶件成型面时,表面粗糙度控制在0.4

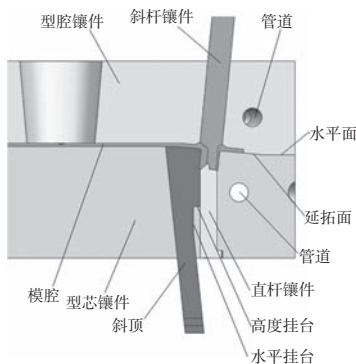


图5 模腔成型件的构成

以上以确保塑件的表面光亮。中速注塑时,模腔分型面上须开设环绕型排气间隙及排气槽,排气间隙0.02,用于引气的排气槽的深度0.08 mm。

综上所述,最终成型件的设置及组装如图6所示。

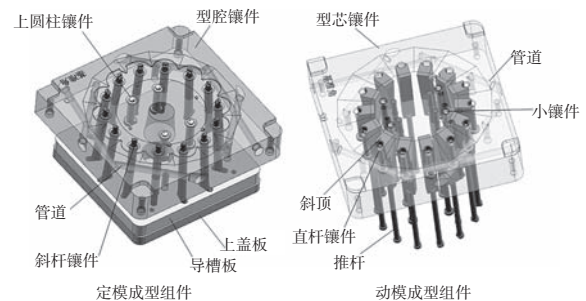


图6 成型件设计

定模成型组件中,包括1个型腔镶件、14个斜杆镶件、4个上圆柱镶件。14个斜杆镶件的上端通过横位销安装在导槽板上对应的滑动槽内,导槽板上端用上盖板盖住,以防止斜杆镶件滑落。14个斜杆镶件通过导槽板和上盖板组装后,构成定模斜杆复合顶出机构,再插入型腔镶件中各自对应的斜孔内。定模成型件的材料使用M461预硬镜面塑胶模具钢。

动模成型组件中,包括1个型芯镶件、14个直杆镶件、14个斜顶。14个斜顶采用“万能斜顶”结构形式,由推杆推动其上端的斜顶顶出。14个直杆镶件采用肩台定位方式固定安装在型芯镶件内。14个斜顶通过相应的14根推杆推动,推杆安装在模具的顶针推板上,构成动模“万能斜顶”复合机构。动模材料成型件使用Cr12MoV模具合金钢。

4 模具结构布置

功能零部件在模具结构中的布置如图7所示,模具使用两板模结构,2次分型打开。所选用模架为一种非标准模架,由两板模模架改造而获得,改造的地方在于:定模板与定模座板之间增加1次分型打开,并增加4副模腔导柱进行导向。模具中的模腔布置为1模1腔。型腔镶件、型芯镶件均使用双边定位方式,通过楔紧块楔紧方式安装在定模板、动模板内。定模板、动模板的精确闭合定位由定模板导柱、模腔导柱、边锁共同实现^[13-14]。定模板导柱主要用于定模板打开/闭合时的滑动导向;模腔导柱主要用于定模板和动模板之间打开/闭合时的滑动导向。定模板与定模座板之间的打开使用4根定距拉杆进行定距控制。定模板与动模板的临时闭合,使用模板锁控制。

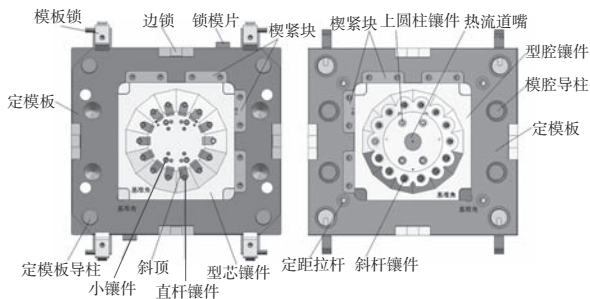


图7 模具布局

5 模具机构件组装

机构件在模具上的组装如图8所示。模具的定模由定模座板3、定模板4及附属机构零件构成,动模由动模板8、方铁9、动模座板10等零件构成。盖板11、顶针推板12等零件构成动模的顶出机构,注塑机顶杆通过顶杆套13推动顶针推板12。定模板4和定模座板3之间的开模面为 P_1 ,定模板4与定模座板3之间的分离距离通过定距拉杆5限制;动模板8与定模板4之间的开模面为 P_2 。开模面打开的顺序为 $P_1 \rightarrow P_2$,闭合顺序也为 $P_1 \rightarrow P_2$ 。开模时, P_1 面打开, P_2 面闭合,该闭合控制由图7中所示的模板锁进行控制,模板锁由锁钩杆6等8个零件组成。闭模前, P_1 、 P_2 面都处于打开状态,闭合时,模板锁控制模具按 $P_1 \rightarrow P_2$ 顺序闭合。型芯镶件17、型腔镶件18分别通过螺钉紧固安装在动模板8、定模板4内。

定模斜杆复合顶出机构中,上盖板27、导槽板28用螺丝紧固组合在一起,再通过螺丝紧固安装在定模座板3所开设的槽内,斜杆镶件25的上端通过

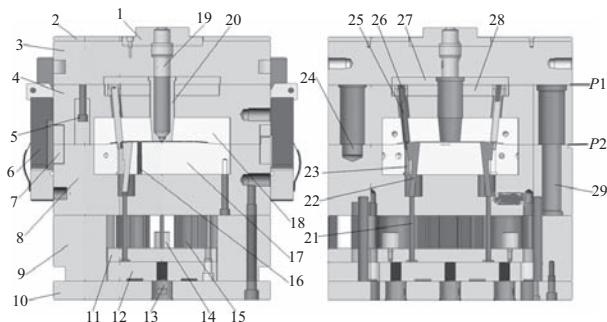


图8 模具结构安装

横销26进行开模方向的限位后,安装在导槽板28开设的滑动槽内,下端插入型腔镶件18内的斜孔内。 P_1 面打开时,定模板4往下运动,将塑件从14个斜杆镶件25上推出。

动模“万能斜顶”复合机构中,斜顶22安装在型芯镶件17内,其下端设置有T型槽,与顶杆21上端所设置的T型导轨滑动连接,顶杆21用顶针推板12推动。 P_2 面打开后,模腔打开,注塑机顶杆通过顶针推板12推动斜顶22对塑件进行顶出。

模具中,模板锁机构为一种新型模板开闭控制机构,如图9所示。机构的组成零件包括锁钩杆6、件30~件37。导动凸块30安装在定模座板3上,其上设置有导动销31的导动凸台;锁钩杆6与锁钩37用锁钩螺丝38组装在一起,锁钩杆6用转动销32与底座35铰接在一起,底座35用螺丝紧固安装在动模板8的侧边。耐磨锁块36用螺丝安装在定模板4上;外簧片33和内簧片34叠装在一起,用螺丝紧固组装在底座35上,用于阻挡锁钩杆6按 T_1 转动方向转动。锁钩37勾住耐磨锁块36用于锁紧动模板8和定模板4。

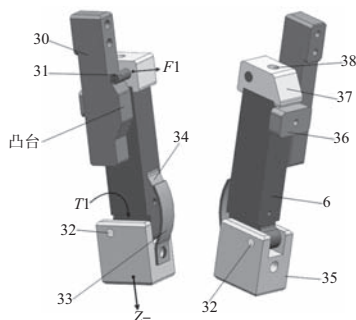


图9 模板锁机构

模板锁机构的动作原理为:当模具动模按 Z -向下行时,导动销31暂时不能接触导动凸块30上的导动凸台,因而,锁钩杆6在外簧片33和内簧片34的弹压下,不能绕转动销32的中心按 T_1 转动方向转动,此时动模板8和定模板4被锁钩37和耐磨锁块36锁闭,模具只能在 P_1 面打开; P_1 面打开一定距离后,导动销31被导动凸块30上的导动凸台按 F_1 向推动,迫使锁钩37和耐磨锁块36脱离接触,从而,动模板8与定模板4分离,模具在 P_2 面处打开。闭合时, P_1 面先闭合,模具继续闭合过程中,锁钩37被耐磨锁块36先推开而后再勾住耐磨锁块36,从而实现再次锁紧动模板8和定模板4的功能。

6 模具工作原理

结合图 8 所示,模具分 2 次分型打开,第一次打开在 $P1$ 面处打开,该面打开时,14 个斜杆镶件 25 从模腔内塑件上对应的 14 个斜孔中抽芯抽出。第二次在 $P2$ 面处打开,塑件从型腔镶件 18 内脱出并留于型芯镶件 17 上。而后,随着模具动模的继续下行,注塑机顶杆顶住顶针推板 12,从而推动 14 根顶杆 21 和 14 个斜顶 22 将塑件从型芯镶件 17 上顶出,实现塑件的完全脱模。

模具复位时,顶针推板 12 先复位,确保动模“万能斜顶”复合机构先复位;模具闭合时,先在 $P1$ 面处闭合,确保定模斜杆复合顶出机构先复位,而后在 $P2$ 面处闭合复位,等待下一次注塑循环。

7 注塑工艺事项

注塑时,注塑工艺需要注意以下事项:

① 注塑前,须对 PSU 进行干燥,干燥方式为热风干燥,温度为 $125 \sim 135^{\circ}\text{C}$,时间为 $4 \sim 6\text{ h}$,铺料方式为平铺,铺料厚度为 $18 \sim 22\text{ mm}$,含水量控制在 0.1% 以下;

② 不能使用脱模剂;

③ PSU 的成型温度较高,在注塑前必须将料筒内清洁干净;

④ 成型后须对塑件进行退火处理,退火方式使用空气浴方式,退火温度为 150°C ,退火时间为 $2 \sim 4\text{ h}$ 。

8 结语

(1) 使用 PSU 塑料对医疗用干粉吸入器底座塑件进行注射成型。运用 CAE 分析获得了塑件热流道单腔模腔所需的成型时间为 1.542 s ,注塑压力为 58 MPa 。

(2) 设计了塑件 1 模 1 腔两板热流道模具;浇注使用单点热浇口进行浇注;模具分 2 次分型打开,1 次用于塑件定模侧斜孔的抽芯脱模,1 次用于塑件模腔的打开。针对塑件 14 个斜孔内壁的脱模,设计了定模斜杆复合顶出机构,针对 14 个斜孔外壁的脱模,设计了动模“万能斜顶”复合机构。

(3) 模具型腔的表面粗糙度为 0.4 以上,排气间隙 0.02 mm ,排气槽的深度 0.08 mm 。

(4) 注塑前,PSU 材料热风循环干燥工艺参数为:温度 $125 \sim 135^{\circ}\text{C}$,时间 $4 \sim 6\text{ h}$,铺料厚度 20 mm 左右,确保含水量控制在 0.1% 以下。成型后塑件的退火工艺使用热风空气浴方式退火,温度 150°C ,时间 $2 \sim 4\text{ h}$ 。

参考文献

- [1] 魏柯,张道海,秦舒浩,等.聚砜分离膜的亲水改性研究进展[J].高分子材料科学与工程,2018,34(8):179-183.
Wei Ke, Zhang Daohai, Qin Shuhao, et al. Advances in hydrophilic modification of polysulfone separation membrane[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34 (8):179-183.
- [2] 芦文慧,黄肖容.抗菌性聚砜超滤膜的制备与表征[J].中国新技术新产品,2018(9):1-5.
Lu Wenhui, Huang Xiaorong. Preparation and characterization of antibacterial polysulfone ultrafiltration membrane[J]. China New Technologies and Products, 2018(9):1-5.
- [3] 姬春梅.超声波对聚砜酰胺结晶性能影响研究[J].橡塑技术与装备,2018,44(20):9-15.
Ji Chunmei. Effect of ultrasonic wave on crystallization properties of polysulfonamide[J]. China Rubber / Plastics Technology & Equipment, 2018, 44(20):9-15.
- [4] 项启生,肖国华,徐生.救护车医疗床方向舵外壳复合哈弗滑块模具设计[J].模具技术,2020(5):28-32.
Xiang Qisheng, Xiao Guohua, Xu Sheng. Design of compound Haff slider mould for rudder shell of ambulance medical bed[J]. Die and Mould Technology, 2020(5):28-32.
- [5] 罗军.气辅注射技术在医疗分析仪器罩注射模设计中的应用[J].模具制造,2009(3):54-57.
Luo Jun. Application of gas-assisted injection molding technology in injection mold for the cover of apparatus using in medical[J]. Die & Mould Manufacture, 2009(3):54-57.
- [6] 凌亮文.输液器挤出滴斗模具设计[J].中国医疗器械信息,2018,24(23):18-19.
Ling Liangwen. Design of extrusion dripper mold for infusion set[J]. China Medical Device Information, 2018, 24 (23):18-19.
- [7] Baranek S L. 延长模具寿命的热流道系统[J].现代塑料,2007(7):62-63.
Baranek S L. Hot runner system for prolonging mold life[J]. Modern Plastics, 2007(7):62-63.
- [8] 杨志立,黄诚驹.斜滑块内侧抽芯注射模设计[J].模具工业,2013(12):52-54.
Yang Zhili, Huang Chengju. Slanted slider inside core-pulling injection mould for lamp back cover[J]. Die & Mould Industry, 2013(12):52-54.
- [9] 于盛睿,曹利钢,冯浩,等.家用吸尘器盖板的侧轨道抽芯注塑模设计[J].工程塑料应用,2010,38(4):65-67.
Yu Shengrui, Cao Ligang, Feng Hao, et al. Design of injection mould with side core-pulling mechanism for flat of vacuum cleaner[J]. Engineering Plastics Application, 2010, 38(4):65-67.
- [10] 于同敏,刘铁山.注塑模脱模机构智能化设计系统及关键技术研究[J].机械设计与制造,2004(2):72-75.
Yu Tongmin, Liu Tieshan. Research on the key technology of the

- intellectualized design system for ejection mechanism of injection mold[J]. Machinery Design & Manufacture, 2004(2):72-75.
- [11] 杨安,董扬德,胡宏伟,等. 法兰盖滑块脱模机构及注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(10):82-86.
- Yang An, Dong Yangde, Hu Hongwei, et al. Design of slider demoulding mechanism and injection mold for flange cover[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(10):82-86.
- [12] 石海水. 双向卡扣脱模设计分析和创新[J]. 模具制造, 2012(4):55-57.
- Shi Haishui. Two-way undercut release structure innovation design in plastic injection product[J]. Die & Mould Manufacture, 2012(4):55-57.
- [13] 何柏海,何骏. 一种带推管侧顶脱模机构的注塑模设计[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(2):92-95.
- He Baihai, He Jun. Design of injection mould with pushing tube side ejection demoulding mechanism[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(2):92-95.
- [14] 朱海旭,王金莲. 基于CAE技术的餐盒盖叠层热流道注射模具设计[J]. 装备制造技术, 2016(8):241-243, 246.
- Zhu Haixu, Wang Jinlian. Design of hot runner stack injection mould for meal cover based on CAE[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2016(8):241-243, 246.

(上接第84页)

- [7] 李竞,李尚平,蒲明辉,等. 注塑机模板的有限元—拓扑优化设计[J]. 机械设计与制造工程, 2002(6):47-48.
- Li Jing, Li Shangping, Pu Minghui, et al. Topological optimal design of the platen of injection molding machine by FEM[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2002(6):47-48.
- [8] 刘旭红,尹辉峻. 注塑机模板的有限元—拓扑优化设计研究[J]. 塑料工业, 2008, 36(1):32-34, 48.
- Liu Xuhong, Yin Huijun. Study of finite element-topological optimal design for platen of injection machine[J]. China Plastics Industry, 2008, 36(1):32-34, 48.
- [9] Ren Bin, Zhang Shuyou, Tan Jianrong. Structural scheme optimization design for the stationary platen of a precision plastic injection molding machine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(4):714-721.
- [10] 梅帅,陈飙松,张盛,等. 开放式结构拓扑优化软件设计与研发[J]. 机械工程学报, 2015, 51(9):144-152.
- Mei Shuai, Chen Biaosong, Zhang Sheng, et al. Design and development of open style software system for structural topology optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(9):144-152.
- [11] Bendsoe M P, Sigmund O. Topology optimization: Theory, methods and applications[M]. Berlin: Springer, 2003: 1-69.
- [12] 张哲衍,董凌波,李国平,等. 二板式注塑机动模板有限元仿真的关键技术问题分析[J]. 塑料工业, 2020, 48(7):51-55.
- Zhang Zheyuan, Dong Lingbo, Li Guoping, et al. Analysis of key technical problems in finite element simulation of the two plate injection molding machine moving template[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(7):51-55.
- [13] 王平,张国玉,刘家燕,等. 机载光电平台内框架拓扑优化设计[J]. 机械工程学报, 2014, 50(13):135-141.
- Wang Ping, Zhang Guoyu, Liu Jiayan, et al. Topology optimization design for inner frame of airborne electro-optical platform[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(13):135-141.
- [14] 张少星. 拓扑优化结构刚度性能精确制造中的精度设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- Zhang Shaoxing. Tolerance design of topology-optimized structures for precise manufacturing of stiffness performance[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.