

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.08.026

注塑模具随形冷却水道的设计方法与分析^{*}

刘斌, 吴茜

(华南理工大学聚合物成型加工工程教育部重点实验室, 聚合物新型成型装备国家工程研究中心, 广州 510641)

摘要: 随着3D打印技术的发展, 注塑模具的冷却水道设计由传统的直线型设计优化为随形水道设计。对国内外随形冷却水道的设计方法和发展现状进行了综述, 并对随形冷却水道的设计原则、截面形状变化、布局以及优化技术进行了详细的阐述, 并做了归纳总结。注塑模具采用随形水道设计, 可使冷却介质与型腔表面距离一致, 能提高冷却效率、成型效率和模具型腔表面温度分布的均匀性, 从而使成型制品的质量和性能得到较大改善和提高。

关键词: 随形冷却水道; 注塑模具; 设计方法; 3D打印

中图分类号: TQ 322.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)08-0123-06

Analysis and Design Method of Conformal Cooling Channel of Injection Mould

Liu Bin, Wu Xi

(The Key Laboratory of Polymer Processing Engineering of Ministry of Education, National Engineering Research Center of Novel Equipment for Polymer Processing, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract : With the development of 3D printing technology, the design of cooling channel of injection mould is optimized from the traditional straight-line design to the conformal cooling channel design. The design methods and development status of conformal cooling channel at home and abroad were reviewed in detail. The design principle, the change of cross section shape, the layout and optimization technology of conformal cooling channel were expatiated and summarized. The design of the conformal cooling channel of the injection mould can make the same distance between the cooling medium and the cavity surface, improve the cooling efficiency, molding efficiency and the uniformity of the mould cavity surface temperature. The quality and performance of molded products can be improved greatly.

Keywords : conformal cooling channel ; injection mould ; design method ; 3D printing

随形冷却技术于20世纪90年代在模具行业提出。在注塑模具设计中, 随形冷却水道的几何布局是建立在制品形状的基础上, 跟随制品的形状变化而改变, 水道的中心与型腔表面距离保持不变, 冷却效果较传统冷却水道要好, 能够改善制品的品质, 提高成型过程中的冷却效率, 缩短成型周期。

1 随形冷却水道的研究现状

1.1 国外随形冷却技术的研究现状

早在1997年, 美国麻省理工学院的E. Sachs等^[1]采用三维打印技术中的选择性激光烧结(SLS)工艺进行激光烧结, 对注塑模具随形冷却水道的设计与制造进行探索, 制造型芯和型腔, 并将其与传统的直线型冷却水道注塑模具对比, 得出结论为随形冷却效果优于传统冷却效果。

2000年到2005年, J. C. Ferreira等众多学者利用各种增材制造技术制造出相应的随形冷却系统^[2], 验证了Jacobs随形冷却系统能够显著提高冷却效率和制品质量的结论。同时, 美国麻省理工学院的Xu Xiaorong等^[3]首次确立了随形冷却水道的6个设计原则, 并基于瞬时传热模型, 提出了

冷却单元的思想。带有随形冷却水道的模具比传统的直线型冷却水道模具, 制品的翘曲变形量减少了15%, 成型周期缩短了20%左右。由于Xu Xiaorong等提出的冷却单元仅是二维的, 精度比较低, 不符合实际三维的传热结构, 与实际验证结果存在一定差距。Xu Xiaorong还对随形冷却系统的加工方法进行了初步的研究, 得到针对三维打印技术的随形冷却的设计范围。

2004年在冷却系统的优化上, 新加坡南洋理工大学的Y. C. Lam等^[4]做出了更深入的研究。对冷却水道的排布或者只针对冷却水道的工艺参数进行优化的现象, Y. C. Lam基于遗传算法, 优化了随形冷却水道的排布, 借助计算机辅助分析软件对制品成型进行了模拟分析, 综合冷却水道的排布设计和工艺参数进行了整体优化。

2005年, 英国伯恩茅斯大学的D. E. Dimla等^[5]针对深

^{*} 广东省科技计划项目(2014B010132002)

联系人: 刘斌, 工学博士, 主要研究方向为模具CAD/CAE/CAM和材料成型装备及数控技术

收稿日期: 2017-05-20

腔制品,先借助有限元软件模拟出注塑成型周期等参数,并发现随形冷却不仅可以提高冷却效率,还可以改善制品的表面质量。同年,美国 D-M-E Company 的 G. S. Fred 提出了基于煤矿模型的 Coal Mine 随形冷却结构^[6],发现多孔的煤矿模型增大了热交换的比表面积,提高了传热效率。

2007 年瑞典大学的 L. E. Rannar 等^[7]采用电子束熔炼 (EBM) 金属技术打印出模具,成型出尺寸精度更高的制品。

2009 年韩国的 H. S. Park 等^[8]从热平衡的角度出发,得出了冷却时间与冷却水道半径和位置的函数关系,并从定性分析到达定量分析,以汽车零件为制品模型制造了带随形冷却水道的模具。

2010 年韩国蔚山大学的 D.G. Ahn 等^[9]以风扇为制品模型,制造出了相应的带随形冷却水道的模具,冷却效率提高了 35%。同年,该大学的 H. S. Park 等^[10]则利用传统的钻孔和铣槽的方法,将阵列带有隔水板的 U 型槽的结构贴近制品轮廓,形成随形冷却水道。该方法的优点在于加工方法简单,但是容易出现漏水问题,此外,虽然成本相对于 3D 打印低,但是相对于传统冷却方式较高。U 型槽随形冷却水道示意图如图 1 所示。

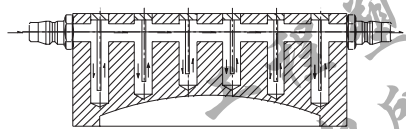


图 1 U 型槽随形冷却水道示意图

2013 年法国南特大学的 A. Alban 等^[11]在前人的共轭梯度算法基础上,根据型腔的温度分布来设计随形冷却水道。

1.2 国内随形冷却技术的研究现状

2001 年香港城市大学的 C. L. Li 等^[12]提出了一种基于特征算法的冷却水道排布方法,即将制品进行几何特征拓扑分类,先对每一个特征划分冷却单元,并为每个冷却单元设计相应的冷却水道,然后将不同特征的冷却单元进行组合,就是随形冷却水道的排布设计。其基于特征算法的冷却水道排布示意图如图 2 所示。

2005 年为了解决加工可行性的问题, C. L. Li 等^[13]又提出了路径搜索算法,该生成方法是对之前特征算法的一个新的改进,其示意图如图 3 所示。

2005 年华中科技大学鲁中良等^[14-16]对基于 3D 打印 (主要是 SLS) 的随形冷却水道进行了深入研究,并用有限元软件 ANSYS 和 Moldflow 对比分析了随形冷却水道与直线型冷却水道,发现带随形冷却水道系统的制品质量相比传统水道的制品,其熔接痕、气孔等缺陷显著减少,由冷却不均导致的翘曲变形现象也得到改善。

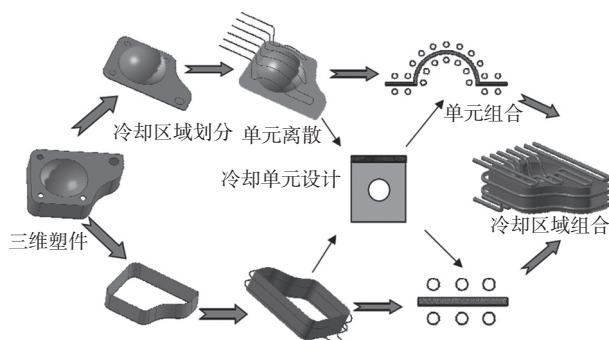


图 2 基于特征算法的随形冷却水道排布示意图

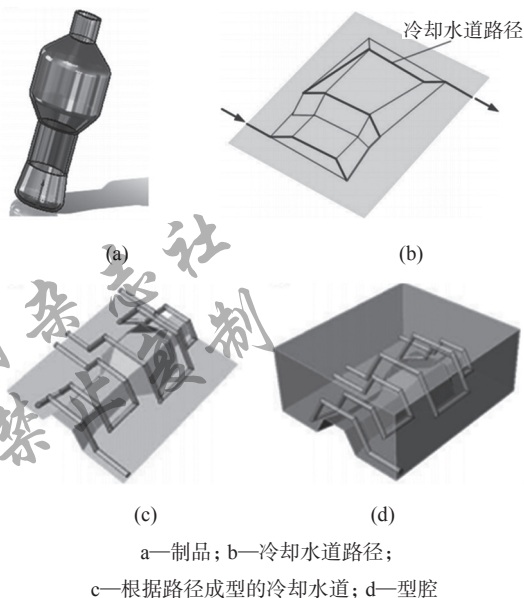


图 3 基于路径搜索算法的随形冷却水道排布示意图

2007 年香港理工大学的 K. M. Au 等^[17]利用有限元软件 ANSYS 和计算流体动力学 (CFD) 软件,用空间枚举法把模具分为一个个彼此连接但却互不交叉的立方体单元,得到被细化的多孔模具,构建脚手架形状的冷却单元结构,提出了一种新型支架随形冷却水道的设计,如图 4 所示。同样,其传热效率较传统冷却水道要好。

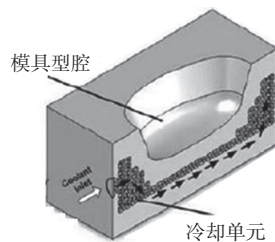


图 4 基于脚手架结构思想的冷却水道布置示意图

2009 年深圳大学的程蓉等^[18]和伍晓宇等^[19]针对无痕注射成型,提出了全区域联通型随形冷却槽结构,利用金属激光粉末烧结快速成型技术,生产出无熔接痕的高光 DVD 塑胶面板。随形槽是型腔向外的延伸,外侧还需有隔热层。全区域联通型随形冷却不需冷热介质的对冲转换,提高了传

热效率,降低了设备成本和加热成本,生产能耗降低,是一种节能型无痕注塑工艺。

2011年香港理工大学的Wang Yu等^[20-21]基于制品的几何拓扑建立偏移面,然后将此偏移面划分为六边形的网格,形成质心范诺图(CVD),将网格线作为随形冷却水道的中心线,形成网状的随形冷却水道。该方法能够有效快速地进行均匀冷却,但是其水道结构复杂,有些局部冷却水道因为太窄,甚至会出现堵塞情况,并且压降过大。离散CVD网状模型生成示意图如图5所示。



图5 离散CVD网状模型生成示意图

近年来,湖北工业大学的何寅^[22]、王勇^[23]以优化制品的冷却均匀度与成型周期为优化目标,基于有限元软件,采用响应面法和粒子群优化算法,对随形冷却水道进行了优化设计,同时对随形冷却水道制造的工艺流程进行了分析,制造出了两套模具,使随形冷却效率提高30%。

2013年上海交通大学的王玮^[24]通过遗传算法,设计并优化模具冷却水道的交互实验,并进行自动排布。

2014年南昌大学的朱宏峰^[25]利用3D打印出带有随形冷却系统的模具,结合传热学和翘曲变形机理,用ANSYS, Moldflow等有限元软件,模拟模具型腔的温度场分布,预测其注塑制品质量,并成型得到薄壁花盆和汽车车灯的实物。车灯型腔、型芯三维模型分别如图6、图7所示。

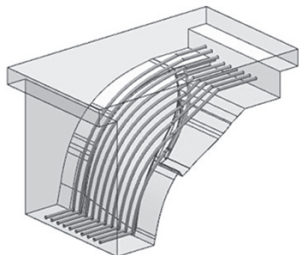


图6 车灯型腔三维模型

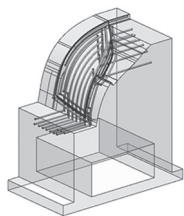


图7 车灯型芯三维模型

薄壁花盆成型模具采用的是双螺旋的随形冷却水道;汽车车灯成型模具采用的是贴近车灯形状的弯管随形水道,花盆的成型周期缩短了44%,车灯的成型期缩短了37.7%。除了可以缩短冷却周期,随形冷却系统还可以减少到达稳定

状态的成型周期数。

2015年华南理工大学的吴成龙^[26]将强化传热的方法与选择性激光熔化(SLM)技术相结合,设计出基于特征的随形冷却水道的注塑模具,并成功成型了塑料叶轮制品。同年,南昌大学的张美丽等^[27]针对大直径的深腔医用针筒注塑模具,设计了双螺旋随形冷却水路,使得热量被包络在相邻水路间,冷却更加均匀。

2 冷却水道的设计原则

2000年美国麻省理工学院的Xu Xiaorong等^[3]对注塑模具随形冷却水道的设计原则进行了探讨,总结出了6个原则:(1)随形冷却的条件;(2)冷却剂的压降;(3)冷却剂温度均匀性;(4)注塑制品充分冷却;(5)冷却均匀性;(6)注塑模具强度和变形。根据这6个原则来进行随形冷却水道的设计,并且划分冷却单元,建立相应的三维模型。

2009年安晓玉^[28]在耿静^[29]和Xu Xiaorong的基础上更加完善了冷却水道的设计原则。具体分为:

(1) 先进行随形冷却水道的布局,再进行脱模机构的布局设计,避免水道与脱模机构形成干涉,得到合理的模具零件的布局;

(2) 在满足强度的条件下,应尽可能地增加冷却水管的数量和截面面积,排布更密集、均匀,使其冷却效率提高,降低制品翘曲变形的可能性,使制品的表面质量及精度得到改善;

(3) 保证冷却水道与型腔表面的距离相等,体现出水道的随形性;

(4) 为了加强对浇口的冷却,需要将冷却入口设在浇口处,防止浇口熔体温度过高,出现过烧现象;

(5) 为了方便操作,最好将冷却水进出的水嘴与模具设在同一侧;

(6) 注意镶块与模板之间的密封性;

(7) 过长的冷却水管道会使进出水的温差变大,影响传热,降低冷却效率,冷却水管的一般长度不能超过1200~1500 mm;

(8) 冷却水道路径要避免熔接痕部位,因为熔接痕部位的熔体温度较低,如果冷却水道经过此处,会进一步带走热量,使熔接痕更明显,使制品出现缺陷;

(9) 模具型芯、型腔的表面温度不能相差过大,且两者要各自形成冷却回路;

(10) 对于某些局部热量过高的地方,可以加强冷却,改变冷却水道的形状及直径;

(11) 冷却周期与制品的壁厚有直接关联。可以优化塑件制品的设计,均匀壁厚,减少冷却时间;

(12) 考虑到冷却效果和成本,冷却介质一般为水,其次,

是空气和油等介质;

(13) 设计的冷却水道还需要清理方便,防止被堵塞。

3 冷却水道的截面形状

3.1 规则截面的冷却水道

冷却水道比较常见的规则截面形状为圆形、半圆形、矩形、U形等。由传热原理可知,当其它条件(冷却介质、冷却管长度等)一定时,截面积相同时,截面周长越长,冷却效率越高,冷却速率越快。湖北大学的王勇^[23]利用 Moldflow 对不同冷却水道截面进行了模拟,模拟结果发现,U形截面冷却效率更高,半圆形最差。

3.2 异型水道

华南理工大学的吴成龙为了使水道中的冷却介质易处于紊流状态,增强传热,设计了形状为螺旋槽纹管状、缩放管状、波纹管状、横纹管状和螺旋扁管状等的异形冷却水道^[26],如图8所示。

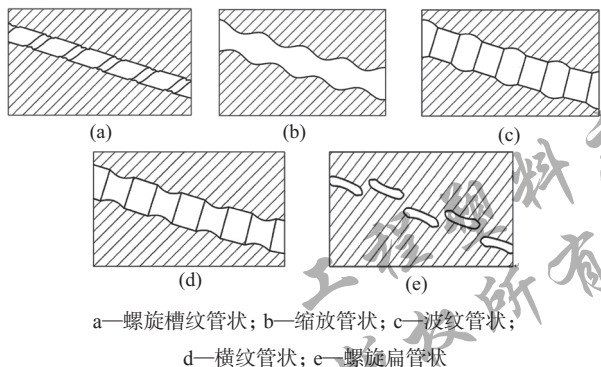


图8 不同形状的冷却水道示意图

3.3 全区域冷却槽

(1) 整体式。

整体式模芯是利用深孔钻加工近似随形的冷却水道,优点是加工简单,无需装配,缺点是冷却水道精度低,不能很好地贴近制品轮廓,造成熔接痕等缺陷,制品的合格率低。

(2) 组合式。

将定模模芯和动模模芯剖分,在其高光面和支撑面之间加工随形冷却水道。组合式随形冷却槽一改传统的冷、热介质的温度对冲,并且加工成本低,增加了隔热层,减少了能耗,能更好地进行温控,提高了高光制品的成型质量。图9和图10分别为定模芯面壳、定模芯组件。

4 冷却水道的布局

4.1 单腔模冷却水道的基本形式

(1) 平板类。

平板类制品的特点是高度较小而成型面积大,结构相对简单,冷却水道一般采用传统的直通式、外接直通式和平回路式等。

(2) 柱类。

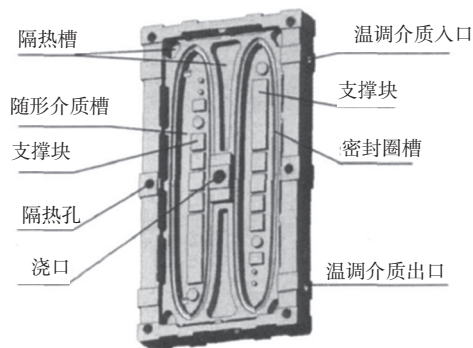


图9 定模芯面壳

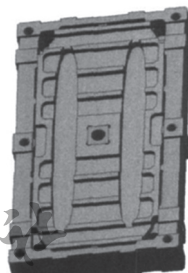


图10 定模芯组件

柱类包括圆柱、方柱、圆台、圆锥等。对于结构简单或者表面质量要求不高的制品成型模具,其冷却水道一般采用喷泉式、隔板式、导热针/杆式等;而对于结构复杂或者表面质量要求较高的制品的成型模具,其冷却水道则采用螺旋式、循环式、圆环式、多层回路冷却水道等。

螺旋式和循环式。当冷却回路只有一个水道,即一个出入口就是所谓的螺旋式。当多条冷却回路并联,形成多层平面螺旋线时,即所谓的循环式。螺旋式排列的冷却水道更加适用于圆柱形或者球形的制品,循环式则更适用于不太高的圆台或圆柱、壳体制品。螺旋式和循环式冷却水道示意图分别如图11和图12所示。

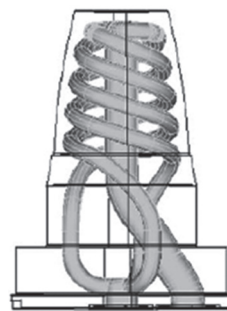


图11 螺旋式冷却水道设计示意图

圆环式。圆环式同螺旋式、循环式类似,适用于柱体。华中科技大学的史玉升等^[30]将螺旋式和圆环式进行模拟对比,发现圆环式上下水道连接处部位没有被冷却水道完全包裹,冷却效果不如螺旋式理想。圆环式冷却水道如图13所示。

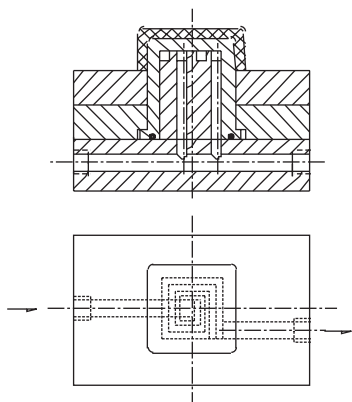


图 12 循环式冷却水道设计示意图



图 13 圆环式冷却水道

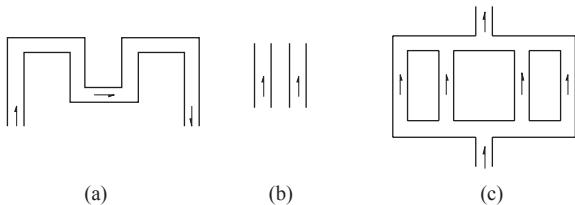
多层回路冷却水道。多层回路相比单层回路,其区别是水路数目的不同,多层回路多用于深腔内的制品,有利于制品的冷却。

(3) 曲面类。

针对这种结构复杂的制品,冷却回路的外形与制品的轮廓线近似,形成冷却曲线。

4.2 多腔模冷却水道的基本形式

多腔冷却水道的基本形式如图 14 所示。



a—串联冷却回路; b—并联冷却回路; c—串联—并联冷却回路

图 14 多腔冷却水道的基本形式

(1) 串联冷却。

就是单水口入单水口出,如图 14a 所示。冷却水的阻力与水道长度成正比,与水道直径成反比。一般适合尺寸较小的多个制品的冷却。

(2) 并联冷却。

就是多个冷却水道同时经过各个型腔并行冷却,如图 14b 所示。

(3) 串联—并联冷却。

就是从一根总水道流向各个支流再汇总,且为了保证各支流的冷却效率相等,各支流水道应相同,流入各支流的

水况也要尽可能一致,总的冷却水管截面积要大于所有支管的截面积。串联—并联冷却回路如图 14c 所示。

5 冷却水道的优化技术

冷却水道的优化参数包括设计参数和工艺参数。其中,设计参数有:冷却水道的位置、直径和截面形状(截面形状可等效为直径不同的圆形水道)等;工艺参数有:模具温度、冷却介质温度、流速及熔体温度等。

(1) 冷却水道设计参数的优化。

2016 年东莞理工学院的陈胜贵等^[31]通过 Moldex 3D 模流分析软件,以深腔壳体制品成型模具为例,将传统冷却水道优化成随形冷却水道,结果显示,优化后的冷却水道模具成型的制品翘曲变形问题减少。

(2) 冷却水道工艺参数的优化。

2016 年赵树鹏^[32]将随形冷却水道和传统直线型冷却水道进行对比,采用 Taguchi 法和方差分析确定最佳注塑参数,并分析了影响薄壁制品翘曲变形的最重要因素,同时,利用 Moldflow 软件进行了仿真模拟。

(3) 对冷却水道设计参数和工艺参数的共同优化。

2016 年广东石油化工学院的李月明^[33]提出了一套随形冷却水道多目标优化设计的方法,即通过正交法和三维响应面法对影响模具温度变化的多个目标因素进行了分析,利用响应面法构建随形冷却水道的设计变量与冷却效率和模具型腔表面温度分布均匀性的函数关系,求解出最佳的冷却设计参数和工艺参数。

6 结语

在注塑模具设计中,相比于传统冷却系统,随形冷却可以缩短成型周期、改善成型制品性能、提高制品尺寸精度和表面质量。理论上,出现了基于特征算法、路径算法和热分析法等一系列随形冷却水道的设计方法。未来,随着金属 3D 打印技术的日益完善和推广应用,金属 3D 打印与注塑模具的结合会更加深入,而随形冷却水道的设计与优化也会越来越实用和成熟。

参考文献

- [1] Sachs E, et al. Progress on tooling by 3D printing conformal cooling, dimensional control, surface finish and hardness[C] // 8th Solid freeform fabrication(SFF) symposium. Austin: Emerald Group Publishing Limited, 1997.
- [2] Ferreira J C, et al. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142(5):508-516.
- [3] Xu Xiaorong, et al. Polymer Engineering and Science, 2001, 41(7):1 265-1 279.
- [4] Lam Y C, et al. International Journal of Production Research, 2004, 42(10):2 047-2 061.
- [5] Dimla D E, et al. Journal of Materials Processing Technology,

- 2005, 164(27):1 294-1 300.
- [6] Fred G S. New concepts in mold conformal cooling design[C] // ANTEC 2005-annual technical conference proceedings. Boston: Society of Plastics Engineers, 2005.
- [7] Rannar L E, et al. Rapid Prototyping Journal, 2007, 13(3):128-135.
- [8] Park H S, et al. International Journal of Automotive Technology, 2009, 10(1):87-93.
- [9] Ahn D G, et al. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2010, 11(6):915-924.
- [10] Park H S, et al. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2010, 11(6):879-890.
- [11] Alban A, et al. Applied Thermal Engineering, 2013, 52(1):170-178.
- [12] Li C L. Computer-Aided Design, 2001, 33(14):1 073-1 090.
- [13] Li C L, et al. Computer-Aided Design, 2005, 37(45):645-662.
- [14] 鲁中良, 等. 中国机械工程, 2006, 17(增刊):165-170.
Lu Zhongliang, et al. China Mechanical Engineering, 2006, 17(S):165-170.
- [15] 伍志刚. 随形冷却注塑模的设计与制造关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Wu Zhigang. Studies on the design and manufacturing of plastic injection mold with conformal cooling channels[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [16] 刘洁, 等. 基于 ANSYS 软件的注塑模随形冷却流道的热分析[C] // 第13届全国特种加工学术论文集. 南昌: 中国机械工程学会特种加工分会, 2009.
Liu Jie, et al. Thermal analysis of injection mold modular cooling runner based on ANSYS software[C] // The 13th national symposium on special processing. Nanchang: China Mechanical Engineering Institute of Special Processing Branch, 2009.
- [17] Au K M, et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 34(5-6):496-515.
- [18] 程蓉, 等. 模具工业, 2011, 37(4):70-75.
Cheng Rong, et al. Die & Mould Industry, 2011, 37(4):70-75.
- [19] 伍晓宇, 等. 深圳大学学报: 理工版, 2012, 29(2):171-177.
Wu Xiaoyu, et al. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2012, 29(2):171-177.
- [20] Wang Yu, et al. Computer-Aided Design, 2011, 43(8):1 001-1 010.
- [21] Au K M, et al. Computer-Aided Design, 2011, 43(4):356-373.
- [22] 何寅. 随形冷却水道注塑硬模快速制造方法的研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2012.
He Yin. Study on rapid manufacturing of hard injection mold with conformal cooling channels[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2012.
- [23] 王勇. 注塑模随形冷却优化设计及分型制造方法的研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2013.
Wang Yong. Study on the optimization and mold parting method of conformal cooling channels for injection mold[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2013.
- [24] 王玮. 注塑模具冷却系统关键技术研究开发与开发[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
Wang Wei. Key technology research and system development of cooling channels in injection Mold[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [25] 朱宏峰. 随形冷却对注塑成型制品翘曲变形影响研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
Zhu Hongfeng. Research on the effect of conformal cooling on injection molding part warpage[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014.
- [26] 吴成龙. 基于 3D 打印的随形冷却水道注塑模设计与制造技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
Wu Chenglong. Studies on the design and manufacturing technology of injection mold with conformal cooling channel based on 3D printing[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [27] 张美丽, 等. 塑料工业, 2015, 43(11):61-64.
Zhang Meili, et al. China Plastics Industry, 2015, 43(11):61-64.
- [28] 安晓玉. 基于模型简化的注塑模冷却系统智能化设计技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
An Xiaoyu. Research on the intelligent design technology of injection mould cooling system based on model simplification[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [29] 耿静. 注塑模具 CAD 冷却系统的研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
Geng Jing. Research on cooling system of injection mold CAD[D]. Jinan: Shandong University, 2008.
- [30] 史玉升, 等. 华中科技大学学报, 2007, 35(3): 60-62.
Shi Yusheng, et al. Huazhong University of Science & Technology, 2007, 35(3): 60-62.
- [31] 陈胜贵, 等. 机电工程技术, 2016, 45(7): 44-50.
Chen Shenggui, et al. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2016, 45(7): 44-50.
- [32] 赵树鹏. 智能制造, 2016, 12(1): 28-31.
Zhao Shupeng. Intelligent Manufacturing, 2016, 12(1): 28-31.
- [33] 李月明. 塑料工业, 2016, 44(5): 66-70.
Li Yueming. China Plastics Industry, 2016, 44(5): 66-70.

宁波伯乐塑机在印度艾哈迈达巴德开设新厂

中国伯乐品牌的注塑机制造商在印度艾哈迈达巴德开设了一家新工厂。今年6月,中国宁波双马机械工业有限公司在印度新设的独立子公司 Shuangma Machinery India Pvt. Ltd. 旗下新租用了一家工厂。

子公司总经理表示,印度工厂已经着手运营 70~900 t 不等的注塑机。伯乐塑机在未来4年内会在印度市场投资近1亿美元,最初的制造目标是每个月生产20台塑机。

子公司总经理表示,他们的目标是今后的年产能达到1000台以上。
(慧聪网)