

热冲压模具随形冷却水道优化设计

贺斌,李显达,盈亮,胡平,张向奎

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室,辽宁 大连 116024)

摘要:为了提高热冲压模具冷却均匀性,提出对热冲压模具水道进行随形设计优化。利用Abaqus对保压淬火过程中模面温度场进行有限元分析,总结水道设计缺陷对模面温度分布的不良影响。利用I-sight,以水道中心在偏置线上的比率、水道半径和水道中心与模面的距离为优化变量,以模面最高温度、平均温度和温度均匀性为优化目标,优化后模面最高温度下降52.6%,平均温度下降36.8%,温度均匀性提高86.6%,冷却效率显著提高。同时热流加载和板料温度加载模拟优化前后的结果对比一致,证明热流加载代替板料温度加载进行优化分析可行。

关键词:材料合成与加工工艺;热冲压模具;随形水道;温度均匀性;单目标优化

中图分类号:TB31 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2016)06-1974-07

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb201606029

Optimal design of hot stamping tools with conformal cooling channels

HE Bin, LI Xian-da, YING Liang, HU Ping, ZHANG Xiang-kui

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The temperature uniformity of hot-stamping tool with conformal cooling channel was optimized integrally based on single-objective optimization. An optimal design of hot-stamping tool with conformal cooling channel was presented on the basis of heat flux boundary. The ratio of channel center point on the offset contour lines, the radius and the distance between channel center and tool surface are set as the optimal variables. The temperature uniformity of the tool surface is given as optimization objective. Combing with the pointer optimizer, the optimization of the shape and position parameters of the hot-stamping tool with conformal channels was carried out. The maximum temperature, the average temperature and the temperature uniformity were improved by the optimization. Moreover, the cooling performances of the tool before and after optimization by applying heat flux boundary or temperature boundary present the same trend. It is proved that the simulation approach with direct heat flux boundary is reliable and effective.

收稿日期:2015-06-09.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(11272075);中国博士后科学基金项目(2014M561223);中央高校基本科研业务费专项资金项目(DUT14ZD224).

作者简介:贺斌(1989-),男,博士研究生,研究方向:热冲压水冷模具优化设计及制造.

E-mail: hebin_amt@foxmail.com

通信作者:胡平(1956-),男,教授,博士生导师,研究方向:汽车车身模具优化及成形性分析.

E-mail: pinghu@dlut.edu.cn

Key words: materials synthesis and processing technology; hot stamping tool; conformal cooling channel; temperature uniformity; single object optimization

0 引言

在热冲压生产过程中,模具冷却效率直接影响零件的成形性能和成形后零件的力学性能^[1,2]。模具冷却水道的设计决定了模具冷却效率,与传统热冲压模具直型冷却水道相比,随形冷却水道具有冷却效率高、模面温度均匀性好等特点。

国际上关于模具水道优化设计的研究经历了长时间发展,Hoffmann 等^[3]基于遗传算法,对简单热冲压模具冷却水道进行了优化设计。Sachs 等^[4]提出了注塑模具随形水道设计的新方法并进行了相关研究,得到了随形水道冷却性能远优于传统直型水道的结论。热冲压模具研究发展过程中针对复杂模具进行随形水道优化设计的研究还比较少。近几年,随着 3D 打印技术的发展,复杂模具随形水道的加工技术日趋完善^[5-9],在此基础上,对复杂模具随形水道冷却性能进行研究则很有必要。

优化设计在工业中的应用日趋广泛,在模具冷却水道设计方面,传统直钻加工工艺与新结构相结合实现水道随形布置的优化设计^[10]、基于二维模型和 CHTC (Convective heat transfer coefficient) 对水道基本结构参数进行优化设计^[11,12]等都体现了优化设计的实用性。

本文首先对模具随形水道进行参数化设计,通过对热冲压保压淬火过程进行数值模拟,同时结合目标优化实现了随形水道形状和位置参数的优化设计。优化后模具表面的温度均匀性、平均温度和温度最大值均得到显著改善。最后,本文对仿真结果进行了相关分析,证明了该方法的有效性。

1 随形水道

1.1 模具的冷却

热成形过程中,模具承担高温板料冷却淬火的任务,在模具内部设置冷却水道是实现该功能的一种有效手段。

热冲压模具的设计通常采用镶块结构,镶块内布置有水道,镶块按结构顺序固定在分水板上,由分水板向各个镶块分别供水,各镶块形成独立

的冷却循环系统。镶块内部水道通常采用直型水道设计方案,这种设计方案对模面曲率过渡较大位置的冷却效果不佳,同时模面的整体温度均匀性也会受到影响,而随形水道的设计方案可以有效解决该问题。

1.2 随形水道的设计

热冲压随形冷却水道 (Conformal cooling channels, CCC) 指曲率随着模具型腔面变化而变化的水道。水道的设计方案分为纵向设计、横向设计、Z 形横向串、并联设计和回字形设计等 (见图 1)^[13]。

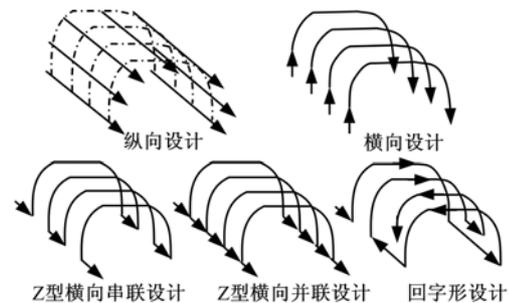


图 1 不同的随形水道设计方案

Fig. 1 Various designs of CCC

1.3 可批处理的参数化模型

研究发现^[14],针对不同的模具形状,纵向随形水道的冷却效果优于其他设计方案。因此本文以纵向随形水道的设计为例说明其设计流程 (见图 2)。首先根据模具成形面形状建立合理的分割平面,提取分割平面与模具型面的交线。然后,将各交线沿垂向向下等距偏置,在偏置线内按比率选取将作为水道中心的点。接着,通过高阶样条线将各偏置线上对应位置的比率点连接成线。最后,通过固定直径的水道截面沿随形线扫掠分割而获得随形水道。

以某典型车身 B 柱凸模镶块三维模型为基础,根据模具自身结构特点设计纵向随形冷却水道^[11],包括以下参数:水道数量 n ;水道半径 R ;水道中心距模面的距离 d ;水道中心在偏置线上的比率 r (水道中心沿偏置线到偏置线端点的长度与偏置线总长度之比)。在 CATIA 中创建完成参数化模型,设置好参数,利用宏录制修改参数的操作,并完成批处理文件的创建,实现宏文件与批处理文件的后台运行,为后面进行自动优化时不

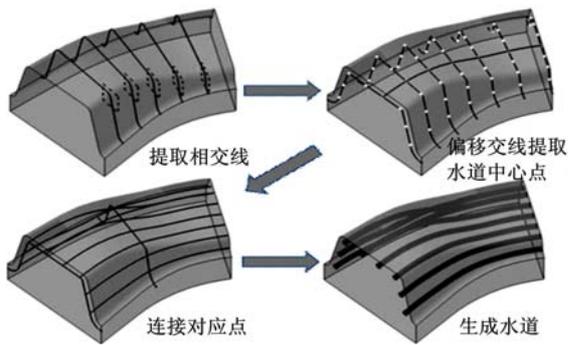


图 2 纵向随形水道参数化设计

Fig. 2 Parametric design of longitudinal CCC

同软件后台之间的数据交换做准备。

2 有限元模拟

2.1 有限元模型的建立

采用参数化建模,通过修改参数可直接实现对几何模型的修改,调整优化变量的取值。

模具材料选用 H13,密度为 7900 kg/m³;比热容为 480 J/(kg · K);热导率为 32 W/(m · K)。定义热冲压模具和冷却水的初始温度为 20 °C。

采用四面体网格,单元类型为 DC3D4,综合考虑计算精度和效率,设置网格的最大尺寸为 10 mm,对水道附近网格进行细化,提高仿真结果的可靠性(见图 3)。

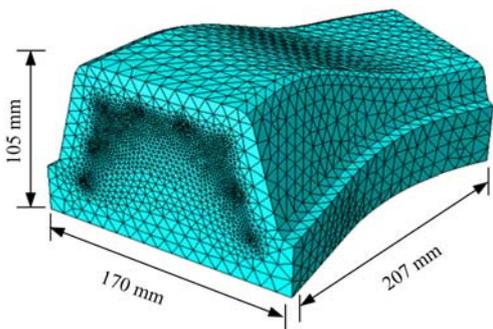


图 3 典型热冲压水冷该模具 FEA 模型及尺寸

Fig. 3 FEA model and size of typical hot stamping tool

2.2 边界条件的设定

结合实际工业生产,假定一个冲压周期为 15 s,其中,保压时间为 12 s,板料转运时间为 3 s。考虑到热冲压仿真耗时较长,且本次仿真只针对温度场进行模拟,而将热冲压仿真过程简化成直接用热流加载作为边界条件的温度场仿真可提高运算速度,据此假设板料的温度绝大部分被模具吸收,根据热力学第一定律,在保压时间内模面时

均热流密度设为 200 000 W/m²,板料离开模面后,模具热流密度取 0 W/m²。

板料成形淬火时,板料的温度大部分由模具吸收,而模具的温度则由循环的冷却水带走。冷却水与模具之间为对流换热,产生的热流量为 Q,其计算公式为:

$$Q = hA(T_w - T_x) \quad (1)$$

式中: A 为水道壁表面积; T_w 为模具水道表面的温度; T_x 为冷却水的温度; h 为对流换热系数,

$$h = \frac{Nu\lambda}{d} \quad (2)$$

$$Nu = 0.023 \left(\frac{ud}{\nu} \right)^{0.8} Pr^{0.4} \quad (3)$$

式中: λ 为冷却水热导率,本文取 0.599 W/(m · K); d 为水道直径,本文取 4 mm; u 为管道内水的流速,本文取 1 m/s; ν 为水的运动黏度,本文取 1.006 × 10⁻⁶ m²/s; Pr 为普朗特常数,本文取 7.02。因此本文计算所得到的 h 值为 5460 W/(m² · K)。

2.3 计算过程的加载

分析类型为瞬态分析。以 15 s 为一个热冲压成型周期,模拟 10 个周期(T₁ ~ T₁₀),时间为 150 s。8 根均匀排布的冷却水道,初始设计为水道中心距模面距离为 20 mm,水道直径为 4 mm (见图 4)。

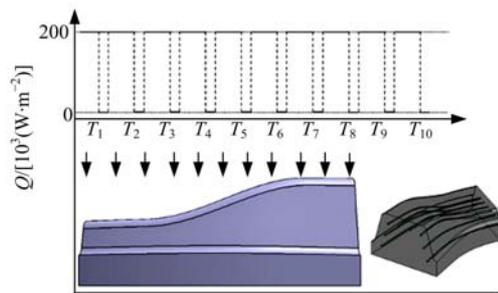


图 4 模具型面热流加载

Fig. 4 Flux load on tool surface

2.4 模拟结果

经过 10 个周期的模拟计算,得到模具表面温度分布图,如图 5 所示。从图 5 中可以看出,模具表面的最高温度为 331.6 °C,集中于圆角过渡位置,最低温度为 139.0 °C,最高温度与最低温度相差 192.6 °C,模具表面温度分布很不均匀。

导致这种结果的原因是冷却水道的尺寸和位置不合理,为了解决这种问题,需要对冷却水道的相关参数进行合理优化。

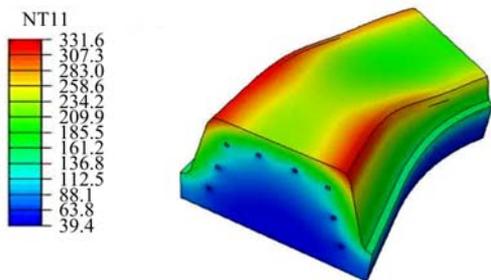


图 5 模具温度分布图

Fig. 5 Temperature distribution of tool

3 随形水道的优化设计

商业优化软件 I-sight 中关于优化算法的选择灵活性很大,本文针对随形水道优化参数及优化目标的特点,选用 Pointer 优化器进行优化。

Pointer 是 I-sight 提供的智能自动优化算法,能自动捕捉设计空间的信息,自动组合 4 种优化算法形成一个最优的优化策略。

本次优化的模型为三维模型,针对水道的半径 R 、水道中心距模面距离 d 、水道中心在偏置线上的比率 r 进行参数化建模。在 CATIA 中提取相应的特征参数,以上述三大变量设计参数化模型。在优化时根据目标变量的要求,更改参数值,实现三维几何模型的优化。

3.1 优化变量

本文根据能量守恒原理结合模型尺寸将水道数量定为 8 根;优化变量具体优化初始值和优化范围如表 1 所示。

表 1 变量初始值和优化范围

Table 1 Initial value and optimal range of variables

变量	初始值/mm	优化范围/mm	数值类型
R	2	2~6	整数
d	20	12~20	整数
r_1	0.11	0.09~0.13	实数
r_2	0.22	0.20~0.24	实数
r_3	0.33	0.31~0.35	实数
r_4	0.44	0.42~0.46	实数
r_5	0.55	0.53~0.57	实数
r_6	0.66	0.64~0.68	实数
r_7	0.77	0.75~0.79	实数
r_8	0.88	0.86~0.90	实数

3.2 优化目标函数

优化过程中优化目标的确立决定着优化结果的可靠性,也决定了优化效率的高低。本文根据

实际工业应用中对模具服役性能的要求以及影响板料成形性的因素将模具表面的最高温度 T_{max} 、模具表面的平均温度 T_{ave} 和模具表面温度的均匀性 T_{var} 作为优化目标。表面温度均匀性由表面温度标准差 T_s 作为衡量标准:

$$T_s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2} \quad (4)$$

式中: \bar{T} 为模具表面平均温度; T_i 为某单元温度。

3.3 优化流程的建立

根据优化所需要的 CAD、CAE 软件,结合优化设计方案,进行优化流程的建立(见图 6)。

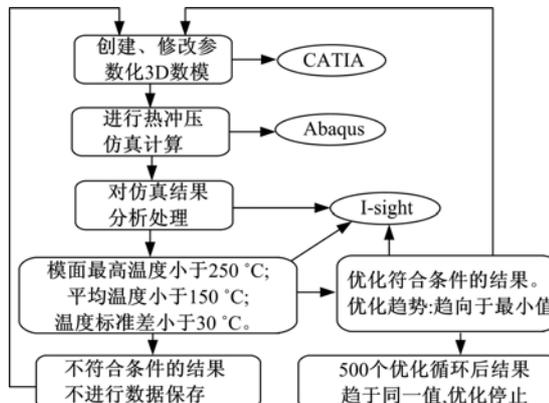


图 6 集成优化方法

Fig. 6 Integrated optimization method

(1)编写在优化过程中需要的 bat 命令流文件,本次优化应用 CATIA 的宏文件与 Abaqus 的批处理文件,将这两类编辑好的文件与相对应的命令流文件置于同一路径下,并补充相关的 CAD 文件等。

(2)进入 I-sight 软件,新建优化模块,设定优化算法内容、优化参数及其变化区间,同时确定优化目标的具体要求。应用 CATIA、Abaqus 辅助优化,串联相应的命令和相应的输入、输出文件。针对输出文件的内容和优化目标的要求引入数据处理模块,整理提取重要的数据作为优化目标,并检验相关结果的可靠性。根据优化流程的优化效率和优化结果的期待值设定优化时间。

(3)优化流程迭代结束后,提取所有与优化有关的数据,筛选并整理与优化结果关联较大的变量,分析优化变量与优化目标之间的关系,结合目标函数和实际应用情况判定优化结果的可靠性。

4 优化结果及分析

图 7 为优化前、后得到的模具表面温度分布

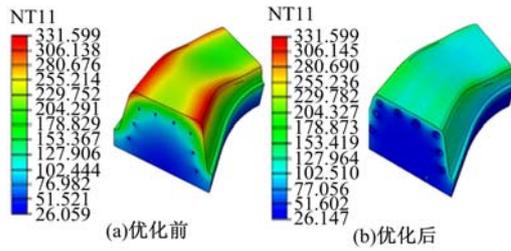


图 7 优化前、后模具的表面温度

Fig. 7 Temperature distribution before and after optimization

图。与优化前相比较,优化后各项优化目标都有明显提高。

表 2 为优化设计后得出的各个变量值。表 3 为优化前、后优化目标值的对比,从表 3 中可以看出:优化后的模具表面最高温度下降了 52.6%,模具表面平均温度下降了 36.8%,模具表面温度均匀性提高了 86.6%。其中模具表面均匀性的提高尤为明显。

表 2 优化后各个变量的值

Table 2 Variables after optimization

变量	初始值/mm	最优值/mm
R	2	6
d	20	12
r_1	0.11	0.114
r_2	0.22	0.222
r_3	0.33	0.325
r_4	0.44	0.444
r_5	0.55	0.553
r_6	0.66	0.671
r_7	0.77	0.753
r_8	0.88	0.875

表 3 优化前、后优化目标值

Table 3 Objective value before and after optimization

优化目标	优化前/℃	优化后/℃
T_{max}	331.86	157.39
T_{ave}	139.16	87.912
T_{var}	50.238	15.799

图 8 为 3 个优化目标与优化变量的关联性图,图中列出了与 3 个优化目标关联性最强的优化变量的关联性指数,从图中可以看出,模具表面最高温度 T_{max} 与模具圆角处的水道半径 R_3 、 R_6 、 R_7 关联性较强;模具表面平均温度 T_{ave} 与水道半径 R_3 、 R_4 、 R_8 关联性较强;模具表面温度均匀性 T_{var} 与靠近模具上平面处的水道半径 R_3 、 R_5 、 R_7

关联性较强。这表明,模具表面的最高温度主要出现在模具的圆角处,控制最高温度主要依靠圆角处的水道,而模具靠近上表面的水道控制的区域比较大,且对模具表面冷却效率的影响较高,对模具表面温度均匀性十分重要。

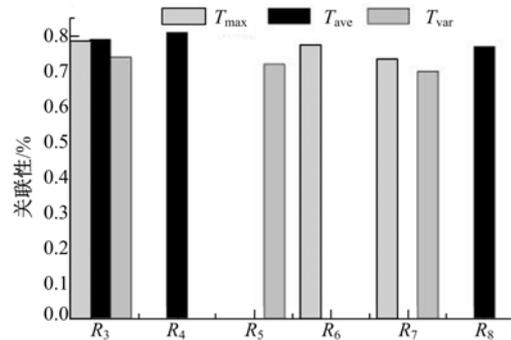


图 8 优化目标与优化变量的关联性图

Fig. 8 Correlation between target values and optimization variables

5 板料冷却淬火模拟

上述优化过程未考虑板料问题,边界条件为直接在模具表面加载热流密度。为进一步验证优化结果的可靠性,进行考虑板料的冷却淬火模拟。板料冲压初始温度设为 800 ℃^[15], R 、 d 、 r 值分别采用经过热流密度加载法获得的初始值和最优值数据,如表 2 所示。

板料厚 2 mm,与模面形状一致,材料为热成形高强度钢板 22MnB5,板料与模具之间的换热系数为 2000 W/(m² · K),热冲压周期为 15 s,连续进行 6 个周期的模拟。优化前、后的板料和模具温度的结果对比如图 9 所示,具体数值如表 4 所示。从图 9 和表 4 可以看出,优化后模具和板料温度显著下降,模具和板料的温度均匀性明显提高。其中模具最高温度下降 46.5%,平均温度下降 47%,温度均匀性提高 62.6%,板料的最高温度下降 39.5%,平均温度下降 38.1%,温度均匀性提高 61.3%。

图 10 为 6 个周期优化前、后板料和模具表面最高温度变化对比图。图 11 为 6 个周期优化前、后板料降温速率对比图。从图 10 和图 11 中可以看出,随着冲压次数的增多,优化前板料和模具表面温度不断升高,板料降温速率明显减慢,模具水道冷却效率低;优化后板料和模具表面温度均小于 220 ℃,板料降温速率保持在 40 ℃/s,模具水道冷却效率高。

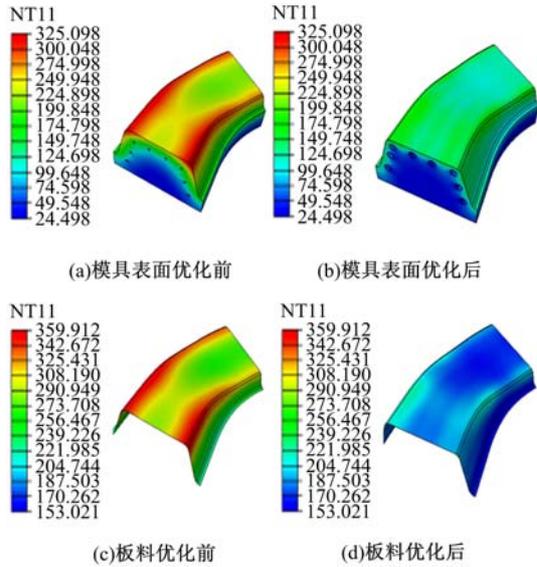


图 9 优化前、后的模具温度和板料温度分布

Fig. 9 Temperature distribution of tool and blank before and after optimization

表 4 优化前、后的模具温度和板料温度

Table 4 Temperature values of tool and blank before and after optimization

		优化前	优化后
模具温度	$T_{max}/^{\circ}\text{C}$	325.10	173.90
	$T_{ave}/^{\circ}\text{C}$	242.79	128.69
	$T_{var}/^{\circ}\text{C}$	43.33	16.20
板料温度	$T'_{max}/^{\circ}\text{C}$	359.91	217.643
	$T'_{ave}/^{\circ}\text{C}$	292.88	181.18
	$T'_{var}/^{\circ}\text{C}$	36.13	13.98

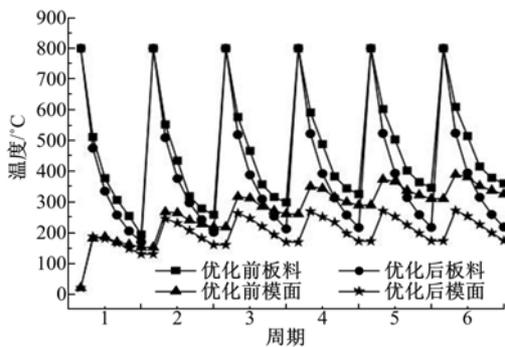


图 10 六个周期优化前、后板料和模具表面最高温度变化

Fig. 10 Maximum Temperature of blank and tool under six periods before and after optimization

对比两种不同边界条件的模型,模具表面温度有一定的差异,但两种不同边界条件下,优化变量最优值计算结果比初始值计算结果的冷却效果均显著提高,总体来说,两种不同边界条件的模型所得结论一致,证明了优化方法的正确性。

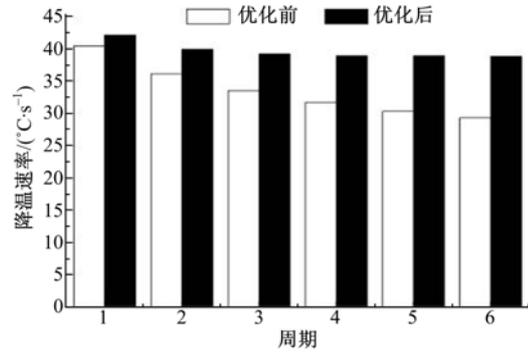


图 11 六个周期优化前、后板料降温速率变化

Fig. 11 Cooling rate of blank under six periods before and after optimization

6 结 论

(1)基于热冲压水冷模具随形水道的设计冷却方案,结合 Pointer 优化器,以模具冷却水道半径、水道中心距模面的距离和水道中心在偏置线上的比率为优化设计变量,以模具表面最高温度、模具表面平均温度和模具表面温度均匀性为优化目标,建立了热冲压模具中冷却水道分布优化设计方法。

(2)应用该方法进行了某典型车身 B 柱凸模镶块热冲压模具冷却水道分布的优化设计,优化后模具表面温度各个指标均有明显的改善,其中模具表面最高温度降低 52.6%,平均温度下降 36.8%,温度均匀性提高 86.6%。该方法优化速度快、优化计算效率高,是实现随形水道在设计阶段的理想方案。

(3)热流加载和板料温度加载对比结果显示,两种不同边界条件下,优化变量的初始值和最优值计算得到的结果一致,证明了以热流加载代替板料温度加载进行优化分析的方法的正确性。

参考文献:

[1] Karbasian H, Tekkaya A E. A review on hot stamping[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(15): 2103-2118.

[2] 徐伟力,管曙荣,艾健,等. 钢板热冲压新技术介绍[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(4): 39-43.
Xu Wei-li, Guan Shu-rong, Ai Jian, et al. Introduction of sheet metal hot-forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(4): 39-43.

[3] Hoffmann H, So H, Steinbeiss H. Design of hot stamping tools with cooling system[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56(1): 269-

- 272.
- [4] Sachs E, Wylonis E, Allen S, et al. Production of injection molding tooling with conformal cooling channels using the three dimensional printing process[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2000, 40(5):1232-1247.
- [5] 姚山,叶昌科,叶嘉楠,等. 基于覆膜砂激光快速成型的无模快速铸造方法研究[J]. *铸造技术*, 2006, 27(5): 458-460.
- Yao Shan, Ye Chang-ke, Ye Jia-nan, et al. Research on pattern-less quick casting based on laser rapid prototyping for coated sand [J]. *Foundry Technology*, 2006, 27(5):458-460.
- [6] 史玉升,伍志刚,魏青松,等. 随形冷却对注塑成型和生产效率的影响[J]. *华中科技大学学报:自然科学版*, 2007, 35(3):60-62.
- Shi Yu-sheng, Wu Zhi-gang, Wei Qing-song, et al. Effects of conformal cooling channel on injection molding and production efficiency[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 35(3):60-62.
- [7] 程蓉,伍晓宇,郑建平. 基于SLS的随形冷却通道注射模间接快速制造技术[J]. *模具工业*, 2011, 37(4):70-75.
- Cheng Rong, Wu Xiao-yu, Zheng Jian-ping, et al. Indirect rapid manufacture of injection mould with conformal cooling channels based on SLS[J]. *Die & Mould Industry*, 2011, 37(4):70-75.
- [8] 鲁中良,史玉升,刘锦辉,等. 注塑模随形冷却水道设计与制造技术概述[J]. *中国机械工程*, 2006, 17(增刊1):165-170.
- Lu Zhong-liang, Shi Yu-sheng, Liu Jin-hui, et al. A global review of the design and manufacturing of conformal cooling channels in injection mould[J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17(Sup. 1): 165-170.
- [9] 姚山,陈宝庆,曾锋,等. 覆膜砂选择性激光烧蚀过程的建模研究[J]. *铸造*, 2005, 54(6): 545-548.
- Yao Shan, Chen Bao-qing, Zeng Feng, et al. Modeling in the course of selective laser sintering for coated sand[J]. *Foundry*, 2005, 54(6):545-548.
- [10] Park H, Dang X. Optimization of conformal cooling channels with array of baffles for plastic injection mold[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2010, 11(6):879-890.
- [11] 李焯. 热成形模具冷却系统优化设计[D]. 大连:大连理工大学汽车工程学院, 2013.
- Li Ye. The optimization design of cooling system in hot stamping dies[D]. Dalian: School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, 2013.
- [12] 蔡玉俊,陈树来,王玉广. 高强度板热冲压模具冷却水道优化设计[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(1): 253-257.
- Cai Yu-jun, Chen Shu-lai, Wang Yu-guang. Optimization design on cooling water channel of hot stamping mold of high strength steel[J]. *Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(1):253-257.
- [13] Park H S, Pham N H. Design of conformal cooling channels for an automotive part[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2009, 10(1): 87-93.
- [14] Liu H, Lei C, Xing Z. Cooling system of hot stamping of quenchable steel BR1500HS: optimization and manufacturing methods[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(1-4):211-223.
- [15] 邢忠文,包军,杨玉英,等. 可淬火硼钢板热冲压成形实验研究[J]. *材料科学与工艺*, 2008, 16(2): 172-175.
- Xing Zhong-wen, Bao Jun, Yang Yu-ying, et al. Hot stamping processing experiments of quenchable boron steel[J]. *Metallic Science and Technology*, 2008, 16(2):172-175.