

考虑板料厚度的多腔热冲压模具 冷却水流量分配方法

刘迪辉[†], 唐雪, 杨三思

(湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:针对多腔热冲压模具冷却水流量分配问题,提出一种冷却水流量分配方法.设计一个可变水道参数的U形件热冲压工艺仿真模型,基于FLUENT和LS-DYNA联合仿真对成形件温度随板料厚度、保压时间及型面流速的变化规律进行研究,建立流量分配数学模型.当零件目标温度确定后,根据所构建的流量分配数学模型可快速确定薄板件冷却所需具体流量,实现冷却水在各腔中的合理分配.以一模三腔的热冲压模具为研究对象,根据建立的流量分配数学模型对其外接水路的阀门开度进行调整,并将调整前后的结果进行对比,调整后厚板件门槛件的温度由160.4℃下降到150.1℃,下降了6.42%.研究表明,冷却水流量的调整对成形件最后温度有显著影响,采用多腔热冲压模具冷却水流量分配的方法,可以缩短整体的保压时间.

关键词:热冲压;多腔模具;冷却系统;流量分配

中图分类号:TG305

文献标志码:A

Method of Cooling Water Flow Distribution for Considering Sheet Thickness

LIU Dihui[†], TANG Xue, YANG Sansi

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Aiming at the problem of cooling water flow distribution for multi-cavity hot stamping molds, a cooling water flow distribution method is proposed. A simulation model of the hot stamping process of U-shaped parts with variable channel parameters is designed. Based on the joint simulation of FLUENT and LS-DYNA, the variation law of the temperature of the formed parts with the thickness of the sheet, the holding time, and the velocity of the profile is studied, respectively. And the flow distribution of the mathematical model is established. When the target temperature of the part is determined, the specific flow rate required for cooling the thin plate can be quickly determined according to the constructed flow distribution mathematical model, and the reasonable distribution of cooling water in each cavity can be realized. Taking a one-mold three-cavity hot stamping mold as the research object, the valve opening of its external waterway is adjusted according to the established flow distribution mathematical model, and the results before and after the adjustment are compared. After the adjustment, the temperature of the thick plate

* 收稿日期:2021-07-07

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(201631390158), Natural Science Foundation of Hunnan Province(201631390158)

作者简介:刘迪辉(1975—),男,湖北石首人,湖南大学副教授,博士

[†] 通信联系人, E-mail: dihui@163.com

threshold drops from 160.4 °C to 150.1 °C with a drop of 6.42%. The research results show that the adjustment of the cooling water flow has a significant effect on the final temperature of the formed part. The method of cooling water flow distribution of the multi-cavity hot stamping mold can shorten the overall pressure holding time.

Key words: hot forming technology; multi-cavity mold; cooling systems; flow distribution

热冲压成形中冷却水流量分配的问题多存在于多腔热冲压模具的各腔之间,一模多腔的结构极大地提高了生产效率,但多腔模具内部成形件存在不同形状、不同尺寸,这导致该结构的冷却水道排布的差异性及复杂性.同时,各腔中成形件的厚度不一致,导致理论上所需的保压时间也存在差异.在实际生产中,薄板件模具腔与厚板件模具腔中的冷却水为均匀流速,由于各腔中成形件的板料厚度存在差异,在保压结束后容易出现薄板件表面温度偏低而厚板件表面温度偏高的情况.

近年来,许多学者在热冲压成形冷却系统研究中,主要以冷却水道位置参数为优化对象,探究热冲压模具的冷却效果,结果表明:在一定范围内,模具型面流速越高、冷却水管到模面的间距越小、冷却水管管道间距越小、冷却水管直径越小,冷却效果越好,最终优化后的参数能够使冷却效率与温度均匀性都得到明显改善^[1-6].一些学者将启发式方法与有限元热分析和静态分析相结合优化冷却水道,证明混合直冷与随形冷却的水道具有更好的冷却效果与冷却均匀性;从形状上看,圆形管道具有最佳的冷却速度与经济适用性^[7-10].文献[11-14]分析了模具表面温度对热成形零件的温度、内部组织及硬度的影响,结果表明,改变温差可对成形件的力学性能进行梯度控制,冷却后的成形件表面各区均能得到板条状马氏体组织;模具初始温度的升高会导致成形件冷却速率下降.板料与模具在合模状态下进行的热量传递能力对板料的淬火效果有显著的影响.文献[15]定性分析了多因素对热冲压模具冷却效果的影响,结果表明,冷却水温度对成形后的板料上各点温度影响趋势相同;模具与板料之间的换热系数存在临界点,超过该临界点时,换热系数对成形件的冷却效果无太大影响.

冷却系统在热冲压模具中至关重要,在热冲压成形过程中,超高强度钢板会发生奥氏体向马氏体

组织的转变,这个过程对模具冷却效率及冷却均匀性的要求较高.本文提出一种用于调整多腔热冲压模具各腔之间流量分配的方法来改善其冷却均匀性及冷却效率,进而减少多腔模具整体的保压时间,提高生产效率.

1 流量分配模型的建立方法

基于 FLUENT 和 LS-DYNA 的联合仿真提出了流量分配模型,考虑实际流场的热冲压模具模温分析方法^[16],以简单模型为研究对象,探究冷却水流量的改变对成形件冷却速率的影响.主要研究型面流速、保压时间和板料厚度的变化对成形件表面温度的影响,并通过对数据点的拟合得到温度和保压时间之间的函数关系.在已知板料厚度、保压时间及成形件温度等生产目标的条件下,求出所需型面流速的数学模型,为多腔模具流量分配提供指导.

1.1 有限元仿真建模

根据某公司近年设计的热冲压模具建模特征,在交互式 CAD 系统 UG(Unigraphics NX)软件中建立 U 形件的上下模模具以及冷却系统. U 形件热冲压模具的水道直径为 8 mm,型面水管圆心到型面距离为 12 mm,两水管间距为 15 mm,凸模底部圆角半径为 9 mm,凸缘圆角半径为 11 mm,凹模型面基于凸模型面特征偏置,如图 1 所示.对 U 形件模具进行离散处理后的网格模型如图 2 所示.其中,冷却水管及型面网格大小为 3 mm;模具上、下底面网格大小为 12 mm;侧壁网格尺寸的大小为 6 mm.

1.2 型面流速对成形件温度的影响

热冲压成形件表面的热量在冲压后由模具内的冷却水带走,当冷却水流经模具内管道时,由于热对流的存在,增加模具腔内冷却水的流量则增加了型面水管的流速,进而增大了对流换热系数.当板料厚度与保压时间均为定值时,研究成形件的型面流速

分别为 1、2、3、4、5 m/s 时的温度变化趋势. 设置该成形件的板料厚度为 1.8 mm, 保压时间为 10 s. 图 3 为成形件在不同型面流速下的温度趋势图.

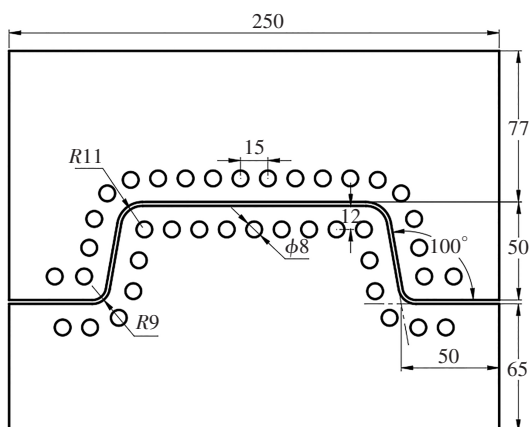


图 1 U 形件模具初始尺寸图(单位:mm)
Fig.1 U-shaped mold initial size drawing(unit:mm)

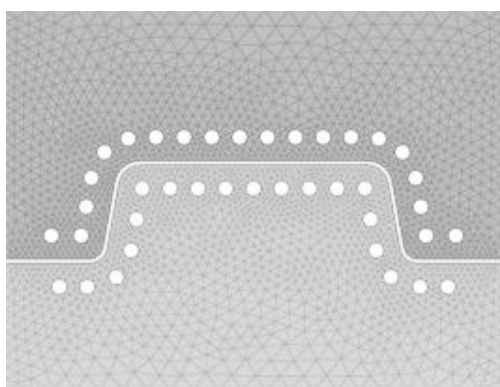


图 2 U 形件模具有限元网格模型图
Fig.2 The finite element mesh of the die of U-shape part

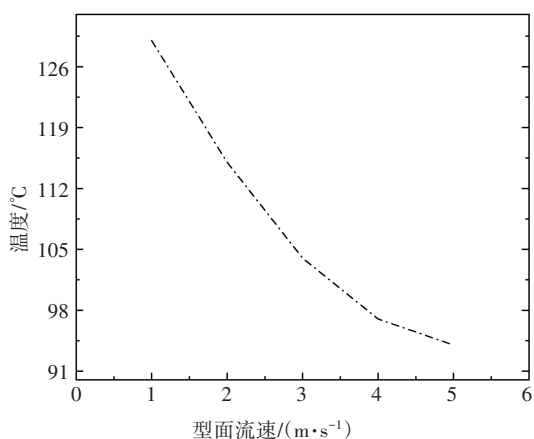


图 3 成形件在不同型面流速下的温度趋势图
Fig.3 The temperature trend chart of the formed part under different surface flow rates

由图 3 可知,在板料厚度和保压时间一定的条件下,随着模具初始设定型面流速的增加,成形件表面的温度呈下降的趋势.但随着初始设定型面流速的增加,成形件的温度变化幅值并不一致.初始设定型面流速从 1 m/s 变为 2 m/s,经过相同保压时间后的成形件温度降幅较大;当初始设定型面流速变为 3 m/s 后,随着初始设定型面流速数值的继续增加,成形件表面温度的降幅减小.这是由于初始状态下,较低的型面流速使得冷却水与模具间的对流不充分,导致壁面温度较高.尽管型面流速的增加会强化模具与冷却水之间的对流换热能力,但冷却水与管壁之间的温差处于持续性减小的状态,致使型面流速的改变对成形件温度影响变弱.根据上述结论,考虑到热冲压模具冷却水道的加工难度及成本,且保证成形件表面温度尽可能低,无须一味选择较大型面流速.

1.3 保压时间对成形件的影响

热冲压成形件的热量在保压阶段通过接触传热到模具中,再由模具与冷却水的对流传热被带走.保压时间的增长会使热冲压成形件的冷却效果更好,能保证成形件形状与尺寸精度,但会增加热冲压工艺时间,从而提高其成本;保压时间过短会导致成形件不能充分得到冷却,进而引起成形件精度与硬度的不合格.为研究保压时间对成形件的影响,设定成形件的板料厚度与型面流速,以保压时间为 1~10 s 时进行分析.设该成形件的板料厚度为 1.8 mm,型面流速为 3 m/s.图 4 为成形件在不同保压时间下的温度趋势图.

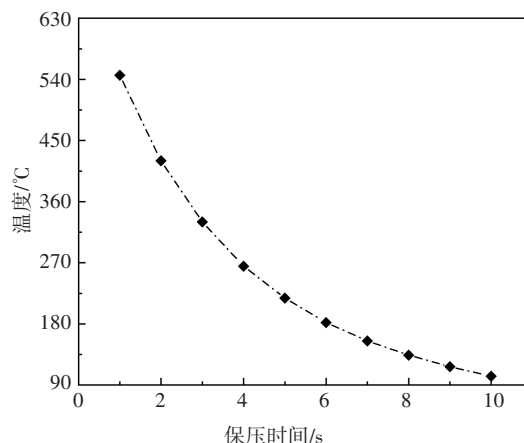


图 4 成形件在不同保压时间下的温度趋势图
Fig.4 The temperature trend chart of the formed part under different holding time

由图 4 可知,在板料厚度和型面流速一定的条

件下,成形件表面温度随着保压时间的增加而显著降低.明显地,当保压时间从1 s开始增加到7 s时,成形件表面温度的降幅较大,保压时间增加到8 s之后,成形件表面的温度仍保持下降的趋势,但整体降幅较小.

1.4 不同板料厚度对成形件温度的影响

热成形件在同一模具中经历同样的保压阶段后,模具内冷却水能够带走的热量基本不再变化.在多腔热冲压模具中,同一工况下实现多个板料的冲压成形,各板料的成形与保压时间一致,但各腔板料厚度的不同导致成形后的板料存在薄板件温度偏低而厚板件温度偏高的情况.为研究不同板料厚度对成形件温度的影响,设置板料厚度分别为1.8、2.0、2.2、2.5、2.8、3.0 mm,型面流速为3 m/s,保压时间为10 s.

图5为成形件在不同板料厚度下的温度趋势图.由图5可知,在模具型面流速与保压时间一定的条件下,随着板料厚度的增加,成形件表面温度呈上升趋势.板料厚度增加,会使得其携带的热量增加,在保压时间与型面流速一定时,模具的冷却能力固定,无法由冷却水带走的热量被保留,使得成形件表面的温度升高.

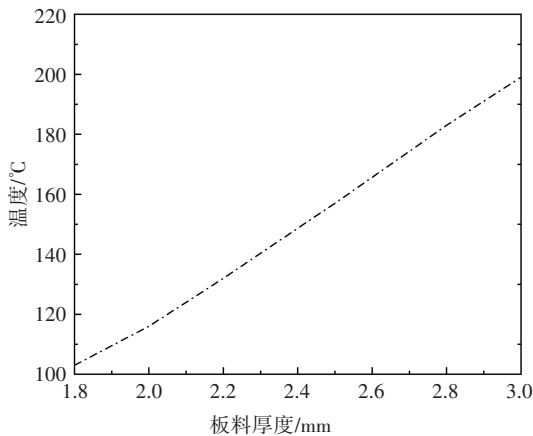
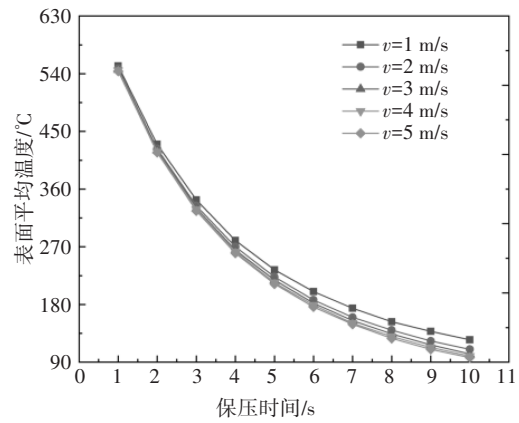


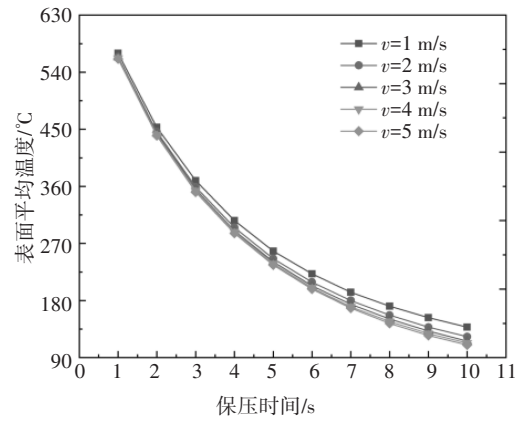
图5 成形件在不同板料厚度下的温度趋势图
Fig.5 The temperature trend chart of formed parts under different thicknesses

1.5 成形件温度的变化趋势

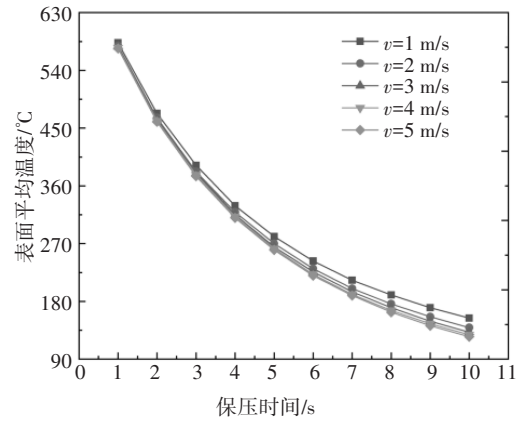
根据前文分析可知,针对单一控制变量的分析,能够较为明显地看出各个变量对成形件温度的影响程度.针对多个控制变量对成形件温度的变化进行分析,研究在不同型面流速条件下,不同板料厚度的成形件在不同保压时间下的表面平均温度的变化.在同一板料厚度、不同型面流速与不同保压时间下,成形件表面平均温度的变化曲线如图6所示.



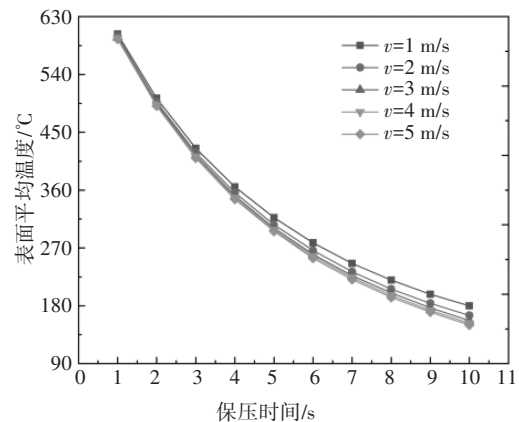
(a)板料厚度为1.8 mm



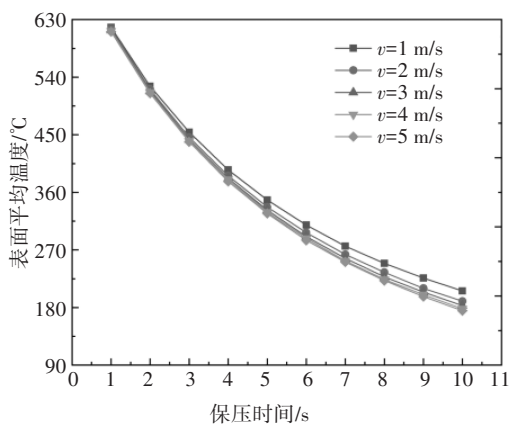
(b)板料厚度为2.0 mm



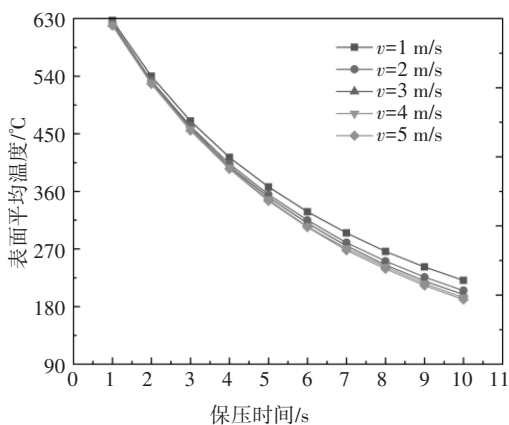
(c)板料厚度为2.2 mm



(d)板料厚度为2.5 mm



(e)板料厚度为2.8 mm



(f)板料厚度为3.0 mm

图 6 成形件表面平均温度的变化曲线

Fig.6 The change curve of the surface temperature of the formed part

由图 6 可得,在任一型面流速下,不同板料厚度与不同保压时间的成形件表面平均温度的变化;亦可得在任一保压时间下,不同板料厚度与不同保压时间的成形件表面平均温度的变化.型面流速、板料厚度及保压时间的改变均会影响成形件表面温度,其中保压时间和板料厚度的改变对成形件表面温度变化的影响显著大于型面流速.

1.6 流量分配模型的建立

根据图 6 中的数据进行拟合,建立通用流量分配数学模型,可得式(1)所示的多项式.在流经热冲压模具内部的冷却水流量已知的条件下,由式(1)可直接计算出成形件目标温度所对应的型面流速值.

$$T = \alpha \ln(v) + \beta, R^2 = 1 \quad (1)$$

$$Q_s = nvs \quad (2)$$

式中: α 、 β 均为常数; T 为热成形件上的目标温度; v 为模具内单根管道的型面流速; Q_s 为冷却系统总流量; n 为模具内管道数目; s 为单根管道的截面积; R^2 为相关指数,取值为0~1,用来衡量模型的拟合效果,

当 $R^2 = 1$ 时,拟合可靠性最高.若已知板料厚度、保压时间及目标温度,可通过流量分配模型计算单根管道的型面流速,再根据整体流量与型面流速的关系计算满足生产所需调整的流量值.在已知流经热冲压模具内的冷却水流量时,能够为多腔热冲压模具流量分配提供指导.

2 流量分配模型的应用

2.1 一模三腔的热冲压模具

为探究以 U 形件为研究对象的热冲压模具冷却水流量分配的准确性,本文以某一模三腔热冲压模型为参考进行仿真验证.在设计一模三腔热冲压模具时,采用左右对称结构,两侧成形件为门槛,厚度为 2.6 mm;中间件为横梁,厚度为 2.0 mm.一模三腔热冲压模具的几何图档模型如图 7 所示,外接水路如图 8 所示.

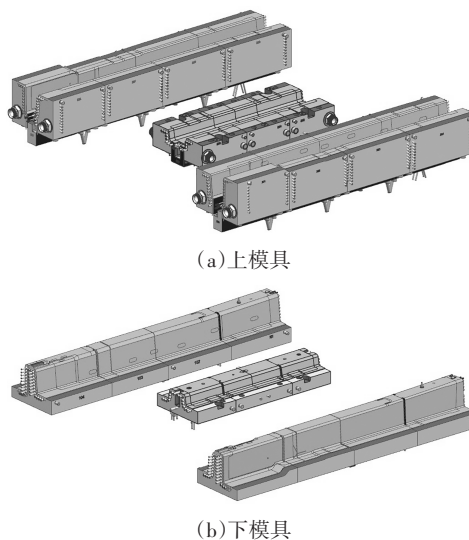
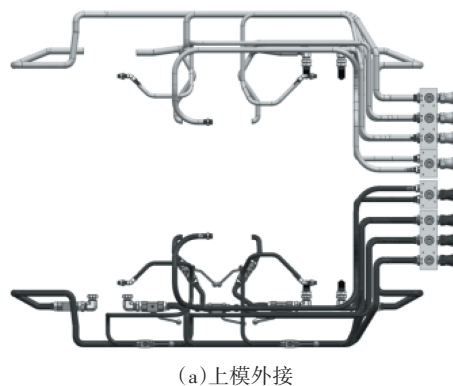
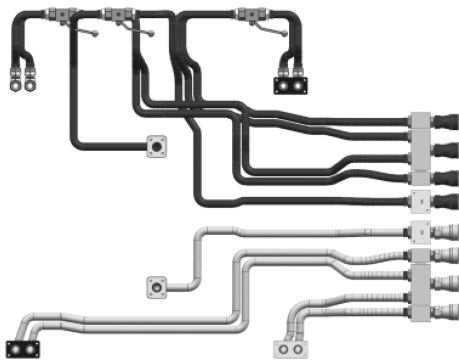


图 7 一模三腔热冲压模具几何图档

Fig.7 Geometric drawing file of one-mold three-cavity hot stamping die



(a)上模外接



(b)下模外接

图8 一模三腔热冲压模具外接水路

Fig.8 One-mold three-cavity hot stamping die with external waterway

由图8(a)可知,每条水路的流出端安装了可调阀门,通过调整阀门的开度可控制流经对应模具腔内的流量.本文所用的一模三腔热冲压模具中,门槛上模内布置30根水管,横梁上模内布置20根水管;横梁由单独进水口供流,两侧门槛由3个进水口供流,门槛为对称件.在保持水阀全开的前提下,采用上述一模三腔的设计结构可保证整体型面流速的均匀性.

2.2 流量分配调整分析

根据实际生产经验,为保证在后续生产中,成形件有合格的内部组织和硬度,成形件在保压后的表面温度应低于150℃.单位时间内水泵能够提供的冷却水总流量一定,若减小薄板件腔内的冷却水流量,则会增加厚板件腔内的型面流速,使模具与冷却水之间的对流换热能力增强,最终达到厚板件冷却的目的.多腔热冲压模具流量分配的原则是在冷却水额定流量不变的前提下,减小流经薄板件模具腔内冷却水的流量,使成形件的温度上升但低于150℃,所以,应增加厚板件腔内的冷却水流量.

针对本文采用的一模三腔热冲压模具,以厚度为2.0 mm的横梁作为流量调整对象,由图6(b)可知,当保压时间为10 s,板料厚度为2.0 mm时,拟合所得流量分配模型为:

$$T = -17.4\ln(v) + 136.66, R^2 = 0.9949 \quad (3)$$

当型面流速为1 m/s时,成形件温度最接近150℃.已知1 m/s的型面流速和各腔内的水管数量,可计算出流经各腔内的冷却水流量.根据主水路流量上的流量监测数据对水阀开度进行调整,以获得对应的冷却水需求流量.一模三腔热冲压模具调整前后各腔冷却水流量分配表如表1所示.

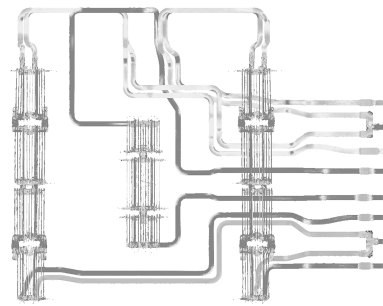
表1 调整前后各腔冷却水流量分配表
Tab.1 Flow distribution table before and after adjustment of cooling water in each die cavity

部件名称	上模 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$		下模 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	
	调整前	调整后	调整前	调整后
横梁(对称件)	29.99	38.95	29.99	38.91
门槛	9.99	3.62	9.99	3.67
总流量	39.98	42.57	39.98	42.58

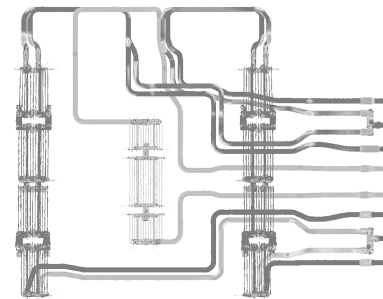
2.3 仿真结果分析

利用FLUENT计算本文一模三腔的上下模具冷却水道的流速,选择k-epsilon湍流模型,冷却水道进口设置流速为边界条件,出口设置压力为边界条件.根据FLUENT仿真得到模具与冷却水道在壁面处的对流换热系数,在LS-DYNA中实现板料的冲压与保压冷却过程的仿真模拟.在LS-DYNA关键字文件的编写中,考虑到热冲压成形过程的仿真模拟涉及温度变量,故材料参数选用黏弹性材料,接触类型设置为自动类型下的面面接触,且激活Thermal选项对合模状态下的模具与板料之间的接触传热进行定义.增加热求解器及热求解时间步控制参数.

仿真结果显示,调整冷却水流量前,一模三腔热冲压模具冷却水流速在各腔内较为均匀,整体流速能够达到3 m/s.其中,热冲压下改进前后下模水道流速结果对比如图9所示.



(a)改进前



(b)改进后

图9 改进前后下模水道流速结果对比图

Fig.9 Comparison of the results before and after the improvement of the flow velocity of the lower mold channel

由图9可知,改进前各腔下模水道流速较为均匀,意味着各腔的模具与冷却水之间的对流换热能力基本相同.改进后的下模水道流速明显,中间横梁件的型面流速降低,两侧门槛件的型面流速升高.

图10是基于FLUENT的流速分析结果,利用LS-DYNA成形仿真的温度云图对比.由改进前的横梁和门槛温度云图可看出,除4个顶块位置的温度较高外,2个热成形零件的其他区域温度均匀性较好.调整冷却水流量前后经保压10 s后,零件表面温度云图一致,区别在于横梁件上温度由117.3 °C升高到136.5 °C,而门槛件上温度由160.4 °C下降到150.1 °C,下降了6.42%.

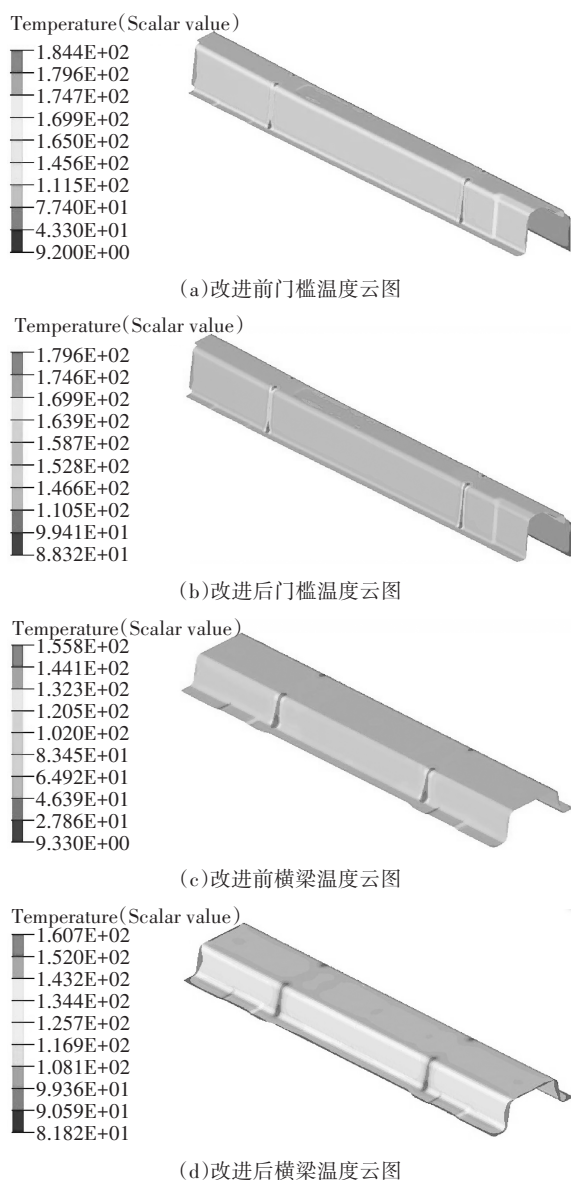


图10 成形件改进前后温度云图

Fig.10 Comparison of temperature cloud diagrams before and after the improvement of the formed parts

3 结论

1)针对保压后多腔热冲压模具中,薄板件温度偏低、厚板件温度偏高的问题,探究了不同厚度的板料在不同型面的冷却水道流速下成形件温度随保压时间的变化关系,并建立了数学模型.根据数学模型,在已知板料厚度和保压时间的条件下,计算所需调整的冷却水流量.

2)将建立的数学模型应用于一套一模三腔的热冲压模具中,进行冷却水流速和成形件模温的仿真分析,并对横梁件所在腔进行流量调整.调整后的横梁件温度由117.3 °C升高到136.5 °C,门槛件温度由160.4 °C下降到150.1 °C,下降了6.42%.在保压时间及水泵总流量不变的条件下,提高了一模三腔热冲压模具的综合冷却效率.

参考文献

- [1] 贺斌,李显达,盈亮,等.热冲压模具随形冷却水道优化设计[J].吉林大学学报(工学版),2016,46(6):1974-1980.
HE B, LI X D, YING L, *et al.* Optimal design of hot stamping tools with conformal cooling channels[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(6): 1974-1980. (In Chinese)
- [2] 谢树运.基于模内淬火工艺过程分析的热成形U形件模具设计研究[D].镇江:江苏大学,2018:28-43.
XUE S Y. Die design of hot-forming U-shaped parts based on in-die quenching process analysis[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018: 28-43.
- [3] 邹伟,张立强.基于Deform的热成形冷却系统优化[J].锻压技术,2017,42(9):30-34.
ZOU W, ZHANG L Q. Optimization on cooling system in the hot stamping based on Deform[J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(9): 30-34. (In Chinese)
- [4] 张磊,刘晋.某汽车B柱热冲压成形模具冷却水道仿真分析[C]//中国汽车工程学会年会论文集(4).上海:中国汽车工程学会,2020:781-783.
ZHANG L, LIU J. Cooling analysis of a B-pillar hot stamping tools [C]//Proceedings of Annual Meeting of China Society of Automotive Engineering(4). Shanghai: China Society of Automotive Engineering, 2020: 781-783. (In Chinese)
- [5] MUVUNZI R, DIMITROV D M, MATOPE S, *et al.* Evaluation of models for cooling system design in hot stamping tools[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 7: 701-707.

- [6] 佟莹,张乐,王玄,等. 高强度钢板热冲模冷却水道工艺参数多目标优化[J]. 模具工业,2017,43(10):6-12.
TONG Y, ZHANG L, WANG X, *et al.* Multi-objective optimization of cooling channels process parameters for hot stamping die of high strength steel plate [J]. Die & Mould Industry, 2017, 43(10):6-12. (In Chinese)
- [7] 郭芳芳. 热冲压模具冷系统研究现状[J]. 河南科技, 2019(29):60-62.
GUO F F. Analysis of research status of research on cooling system of hot stamping tools [J]. Henan Science and Technology, 2019(29):60-62. (In Chinese)
- [8] ZAMRI M F, YUSOFF A R. Heuristic design of U-shaped die cooling channel for producing ultra-high strength steel using hot press forming [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(9/10/11/12):4101-4114.
- [9] YUN S, KWON J, CHO W, *et al.* Performance improvement of hot stamping die for patchwork blank using mixed cooling channel designs with straight and conformal channels [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 165:114562.
- [10] NG C H, MD YAHAYA S N, LAI C F, *et al.* Investigation on cooling channel in hot press forming through numerical simulation [J]. CFD Letters, 2020, 12(5):1-12.
- [11] 周威佳,刘洪伟,叶知春,等. 高强钢分区热冲压U形件梯度性能[J]. 精密成形工程,2016,8(6):44-48.
ZHOU W J, LIU H W, YE Z C, *et al.* Gradient properties of high strength steel U shape parts with partition hot stamping [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(6):44-48. (In Chinese)
- [12] 薛克敏,孙大智,李萍,等. 22MnB5超高强钢热冲压成形工艺及试验[J]. 中国机械工程,2017,28(12):1498-1503.
XUE K M, SUN D Z, LI P, *et al.* Hot stamping forming processes and experiments of 22MnB5 ultra-high strength steels [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(12):1498-1503. (In Chinese)
- [13] 刘晓龙,王子健. 高强钢变强度热冲压成形模具及实验研究[J]. 模具制造,2017,17(8):20-23.
LIU X L, WANG Z J. Experimental study on tailored properties hot stamping die for high strength steel [J]. Die & Mould Manufacture, 2017, 17(8):20-23. (In Chinese)
- [14] 刘雪飞,贾卓翰,张谦,等. 超高强度钢板热冲压成形同步淬火相变不均匀性影响因素分析[J]. 塑性工程学报,2019,26(2):245-252.
LIU X F, JIA Z H, ZHANG Q, *et al.* Analysis on influencing factors of phase transformation inhomogeneity of synchronous quenching in hot stamping for ultra-high-strength steel plates [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(2):245-252. (In Chinese)
- [15] 盖炳君. 热冲压模具冷却过程仿真[D]. 武汉:华中科技大学, 2019:22-45.
GAI B J. Simulation of cooling process of hot stamping die [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019:22-45. (In Chinese)
- [16] 刘迪辉,杨三思,高鹤萱,等. 考虑实际流场的热冲压模具模温分析方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2020,47(6):7-13.
LIU D H, YANG S S, GAO H X, *et al.* Mold temperature analysis method of hot stamping die based on actual flow field [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(6):7-13. (In Chinese)