

基于型面特征的热冲压模具冷却水道自动生成方法

刘迪辉^{1†}, 许逸驰¹, 焦长建¹, 叶建彬¹, 钱斌², 徐龙²

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 青岛应运汽车零部件有限公司, 山东 青岛 266200)

摘 要:针对热冲压模具冷却水道设计过程中存在的依赖人工经验、效率低、难以兼顾随形性与加工可行性的问题,提出了一种基于型面特征的冷却水道自动生成方法.该方法以模具型面有限元网格为基础,按照水道主方向依次构建等距截面,并在截面上提取特征点,生成水道中心线.为满足水道段数约束并降低中心线结构复杂度,提出了一种基于递进拟合与夹角筛选的中心线结构简化算法,实现了中心线结构的自动简化与优化调整.通过典型热冲压模具实例验证,所生成冷却水道路径在水道间距、型面距离和随形性方面均表现良好,水道间距合格率稳定在较高水平,路径结构简洁、连续,段数合理,符合实际加工要求.研究表明,该方法可在较少人工干预的情况下,有效提高冷却水道设计效率.

关键词:热冲压;模具;冷却系统;自动设计

中图分类号:TG305

文献标志码:A

Surface feature-driven automatic cooling channel generation method for hot stamping dies

LIU Dihui^{1†}, XU Yichi¹, JIAO Changjian¹, YE Jianbin¹, QIAN Bin², XU Long²

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Qingdao Yingyun Automobile Parts Co., Ltd., Qingdao 266200, China)

Abstract: To address the problems of excessive reliance on manual experience, low efficiency, and difficulty in balancing surface conformity and manufacturability in the design of cooling channels for hot stamping dies, an automatic cooling channel generation method based on surface features is proposed. The method utilizes the finite element mesh of the die surface as the geometric foundation, constructs equally spaced cross-sections along the channel main direction, and extracts feature points from these cross-sections to generate the channel centerline. To meet the constraint on segment number and reduce the complexity of the centerline, a simplification algorithm based on progressive fitting and angle threshold filtering is proposed to automatically optimize and adjust the structure of the centerline. Case studies on typical hot stamping dies demonstrate that the generated cooling channel paths exhibit good performance in terms of channel spacing, surface conformity, and distribution along the forming surface. The channel spacing qualification rate remains at a high level, and the generated paths are simple, continuous, and have a reasonable number of segments, meeting practical machining requirements. The results indicate that the proposed

* 收稿日期:2025-07-15

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

作者简介:刘迪辉(1975—),男,湖北荆州人,湖南大学副教授,博士

† 通信联系人, E-mail: dihuiliu@163.com

method can effectively improve the efficiency of cooling channel design with minimal manual intervention.

Key words: hot stamping; dies; cooling systems; computer aided design

热冲压模具冷却水道设计是模具结构设计中的关键环节,其设计质量直接影响模具冷却效率、温度场均匀性,以及成形件的尺寸精度和力学性能^[1-5].随着汽车轻量化趋势的不断发展,高强度钢热冲压技术在车身制造中的应用日益广泛,对模具冷却系统的设计提出了更高要求^[6].

目前,热冲压模具冷却水道设计主要依赖设计人员的经验,采用手工绘制与局部调整相结合的方式^[7].这种传统设计方法存在以下突出问题:首先,设计效率低下,难以满足快速迭代的开发需求,且模具开发周期有限,冷却水道设计过程占用时间过长,成为制约因素;其次,在面对复杂曲面模具时,冷却水道布局往往难以实现理想的随形效果;最后,由于缺乏系统化的评估方法,设计质量很大程度上取决于设计人员的经验水平.

为突破传统设计方法的局限,国内外学者开展了多项创新性研究.在理论方法层面,LIM等^[8]提出了基于三角形分区的水道布局优化方法,显著提升了冷却均匀性;贺斌等^[9]开发了温度场耦合仿真技术,为随形水道设计提供了新思路;YU等^[10]则提出了一种基于拓扑优化的扭曲随形水道设计方法,能够自动生成复杂通道结构,并结合增材制造实现,显著改善了冷却效果和温度分布均匀性.在工程应用方面,鲜向东^[11]和彭浩毅^[12]分别研发了参数化设计系统和模块化设计方法,有效提高了设计效率;曾纪聪等^[13]基于NX平台开发的自动设计系统进一步提升了水道的加工可行性.

然而,现有研究在复杂型面适应性、加工可行性保障等方面仍存在不足.针对这些问题,本文提出了一种基于型面特征与分段优化的冷却水道自动生成方法.该方法通过型面数据处理、特征点提取以及路径生成与优化,实现了冷却水道路径的智能化设计,在保证随形性的前提下兼顾加工要求,为热冲压模具冷却水道设计提供了新的解决方案.

1 冷却水道排布约束

冷却水道直径 R 是冷却系统设计中的基础参

数,直接影响冷却效率和模具结构强度^[14],如图1所示.常规热冲压模具冷却水道直径为8~12 mm.在确定冷却水道直径后,科学的水道排布方案同样至关重要.合理的布局不仅能实现冷却介质在模具型面上的均匀覆盖,满足热压工艺对冷却速率的要求,还能确保水道结构具备良好的加工可行性^[15-16].

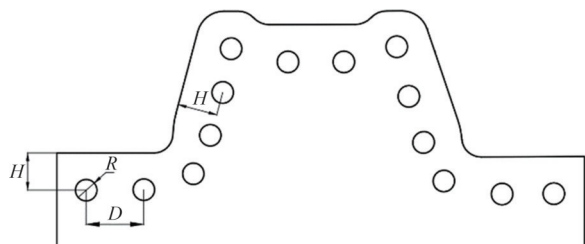


图1 冷却水道截面示意图

Fig.1 Schematic of cooling channel cross-section

冷却水道排布的核心在于,在满足实际制造与使用要求的前提下,尽可能使水道均匀、合理地分布于模具内部,以实现最佳的冷却均匀性和热交换效率^[17-18].根据模具加工经验及热冲压工艺需求,冷却水道排布的主要约束条件如下.

1.1 水道间距约束

水道间距 D 是指相邻水道中心线之间的距离.工程实践表明,合理间距应控制在水道直径的2~3倍范围内.以常见的8 mm水道直径为例,合理的水道间距范围为16~24 mm,实际设计中通常取18~20 mm,以兼顾冷却效果与模具强度.

若水道间距过小,可能导致端部密封空间不足而发生干涉,模具实体壁厚减薄,在高温工况下易出现变形或开裂,同时加工难度和钻孔精度难以保证;若间距过大,则冷却覆盖不足,温度分布不均,影响产品质量并缩短模具寿命.

1.2 型面距离约束

型面距离 H 是指水道中心线到模具型面的最短垂直距离.工程实践表明,合理的型面距离应控制在水道直径的1.5~2倍范围内.以常见的8 mm水道直径为例,推荐距离为12~16 mm,且最小型面距离不宜小于10 mm.

若型面距离过小,会降低模具局部强度、限制加

工空间并引发应力集中,增加开裂、变形风险,影响钻孔精度和密封件安装;若距离过大,会导致冷却不足,局部温度偏高,从而影响产品质量。

1.3 随形性约束

冷却水道的随形性是指冷却水道路径与模具型面的几何贴合程度。良好的随形性意味着水道路径紧密跟随模具型面的几何形状,冷却系统能够覆盖关键区域,提升冷却效率,降低模具内部温度梯度,保障结构稳定性与模具使用寿命。而随形性不足会导致冷却盲区,引发局部过热、模具变形等问题,同时降低空间利用率并增加加工难度^[19]。

1.4 水道段数约束

水道段数通常是指单个镶块内部水道的分段数量。在工程实践中,水道段数设计应严格遵循“最少化”原则,优先采用单段或双段直线结构,仅在特殊情况下允许增至三段,并严格限制超过三段的设计方案。这种简化设计不仅能显著降低加工难度、提高钻孔精度,还能增强连接可靠性、改善密封性能并提升结构安全性。

2 冷却水道的自动生成

冷却水道自动生成方法通过多层次几何处理与智能优化,实现了冷却水道布局的适应性与加工可行性,其核心包括型面数据处理、特征点提取以及路径生成与优化。

2.1 型面数据处理

模具行业广泛采用 Siemens NX(简称 NX)软件进行三维建模与结构设计,本文方法的前处理工作亦基于 NX 软件完成。热冲压模具通常采用多镶块组合结构设计,各镶块对应独立型面区域,以适应复杂曲面加工与模具装配需求。在 NX 软件中提取模具型面并对其进行二维三角形网格划分,可获得按照镶块区域分类的型面网格数据,如图 2 所示。

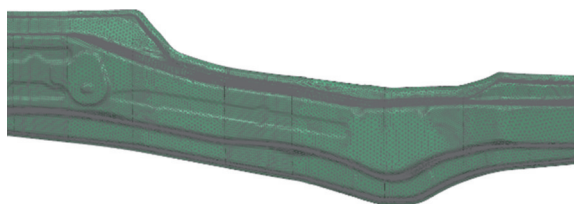


图2 型面二维网格

Fig.2 2D mesh of die surface

通过识别与提取镶块分界线,划分型面网格并独立存储各子区域边界节点,实现镶块分区。完成分区后,遍历三角形面片,计算各面片法向量与面积,基于面积加权平均法确定节点的综合法向量,确保法向量信息的连续性与整体性。设三角形面片的三个顶点坐标为 P_1, P_2, P_3 , 其边向量为:

$$V_1 = P_2 - P_1, V_2 = P_3 - P_1 \quad (1)$$

面片法向量 m 为两边向量的叉积:

$$m = V_1 \times V_2 \quad (2)$$

面片面积 A 为法向量模长的一半:

$$A = \frac{1}{2} \|m\| \quad (3)$$

面片单位法向量 n 为:

$$n = \frac{m}{\|m\|} \quad (4)$$

节点 i 的法向量 n_i 为其相邻所有面片单位法向量的面积加权平均,计算公式为:

$$n_i = \frac{\sum_{j=1}^k A_j n_j}{\left\| \sum_{j=1}^k A_j n_j \right\|} \quad (5)$$

式中: k 表示与节点 i 相邻的面片数量; n_j 与 A_j 分别为第 j 个面片的单位法向量和面积。通过归一化操作,确保节点法向量为单位向量,并考虑各面片对法向量的贡献,准确反映节点的局部几何特征,为后续偏置操作提供依据。

2.2 特征点提取

为生成结构合理且随形性良好的冷却水道路径,提出基于截面特征点提取的方法,依次完成截面交点提取、截面交点偏置、拐点识别与提取及特征点采样,从而构建用于水道中心线生成的特征点集合。

2.2.1 截面交点提取

在型面数据预处理后,根据设定的水道主方向与间距参数,在空间中等距生成一系列与水道主方向垂直的平面截面。本文水道主方向取 y 方向,因此各截面均平行于 $x-z$ 平面,截面内各点的 y 坐标保持不变。各截面覆盖整个模具型面区域,以确保截面交点提取的完整性。其平面方程为:

$$n_s \cdot (P - P_s) = 0 \quad (6)$$

式中: n_s 为截面的法向量(与水道主方向一致); P_s 为截面上一点的空间坐标; P 为任意空间点坐标。遍历型面网格中的所有三角面片,计算其与各截面的相交情况。若存在交线,则进一步求取交线上与面片的

交点. 经逐一遍历, 最终获得每个截面与型面的交点集合, 如图 3 所示.

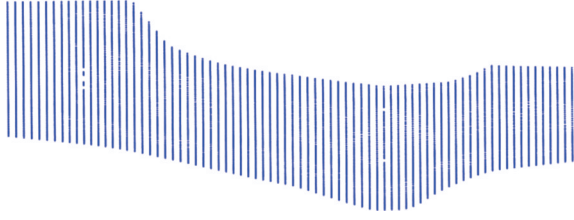


图 3 所有截面点集合

Fig.3 Aggregated cross-section points

2.2.2 截面交点偏置

为确保水道中心线满足型面距离约束, 逐个截面进行偏置操作. 根据交点位置, 搜索最近的网格节点, 获取法向量信息并沿法向量方向偏移设定交点. 图 4 展示了某截面的偏置效果, 经过偏置处理, 点集整体沿法向量方向适当调整, 满足型面距离约束.

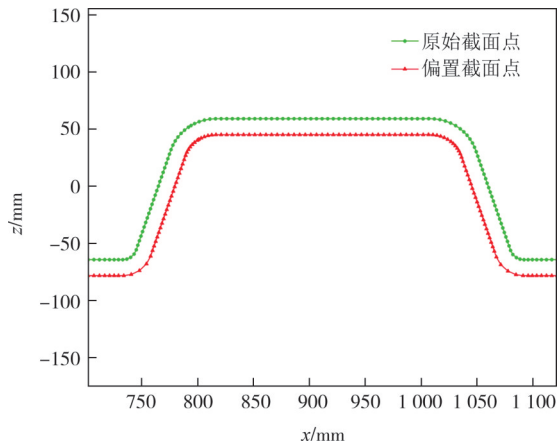


图 4 截面偏置结果

Fig.4 Result of cross-section offset

2.2.3 拐点识别与提取

在截面点偏置处理后, 需要识别关键拐点, 这些拐点位于几何变化显著区域, 对水道路径形态控制至关重要. 采用三点数值差分法计算截面点序列的局部曲率. 设二维截面点序列为 $\{P_i(x_i, y_i)\}$, 点间距近似为常数 h . 三点差分法用于估算点 P_i 处的一阶导数和二阶导数, 计算公式如下:

$$x'_i = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2h}$$

$$y'_i = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h}$$

$$x''_i = \frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{h^2}$$

$$y''_i = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{h^2}$$

可计算曲率 κ_i :

$$\kappa_i = \frac{|x'_i y''_i - y'_i x''_i|}{\left[(x'_i)^2 + (y'_i)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

计算各点曲率, 将曲率大于设定阈值的点设为拐点, 如图 5 所示. 由于拐点处几何变化剧烈, 精确提取拐点能够确保水道路径在关键位置紧贴模具型面, 提升随形性和设计合理性.

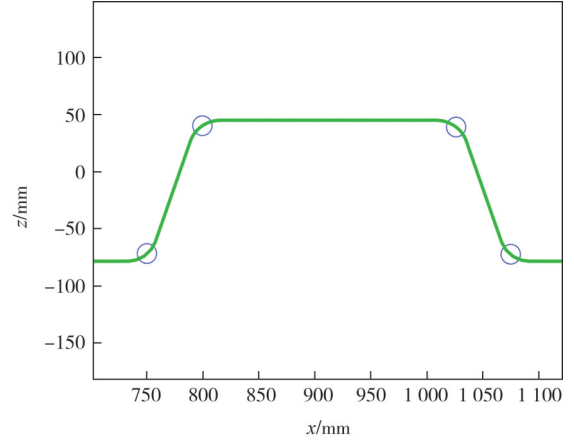


图 5 截面拐点提取结果

Fig.5 Corner point extraction result of cross-section

2.2.4 特征点采样

为确保水道中心线满足水道间距约束, 采用基于距离阈值的采样方法, 结合第 2.2.3 节中提取出的拐点, 在区段中采样特征点. 每个区段的起止点由拐点确定, 确保几何突变区域具备必要控制点. 沿各区段路径方向选取分布均匀的代表性点, 作为最终水道特征点, 如图 6 所示.

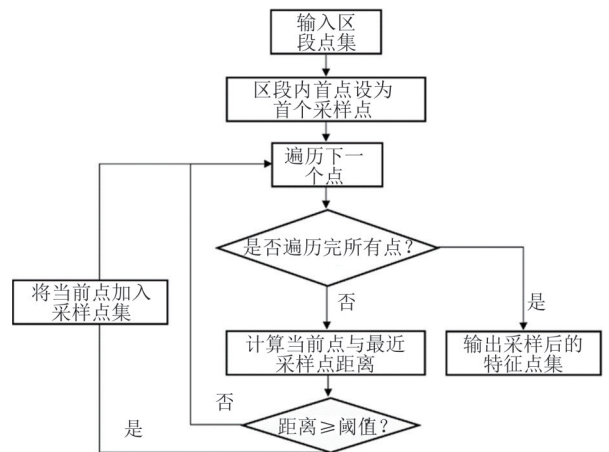


图 6 水道特征点采样流程图

Fig.6 Flowchart of channel feature point sampling

融合拐点和采样后的截面点数据, 最终生成水道特征点集合. 图 7 展示了某截面的水道特征点提取结果. 从分布情况来看, 各区段的特征点均满足预

设的水道间距要求. 由于区段长度通常无法被设定的水道间距整除, 最后一个特征点与区段终点之间的距离可能不满足设定间距. 对此, 可通过后续人工微调优化设计精度.

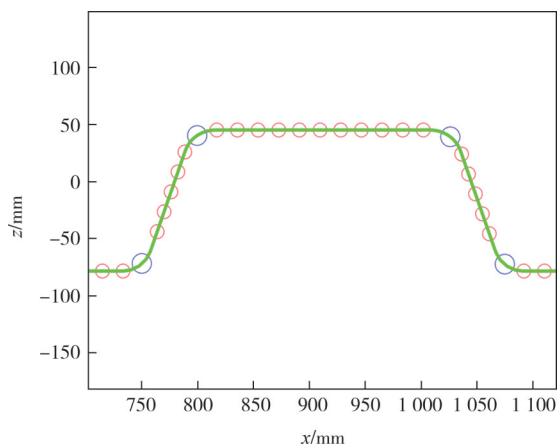


图 7 水道特征点提取结果

Fig.7 Extracted feature points of channel

将各截面的水道特征点按截面顺序依次存储, 便可获得完整的水道特征点集合, 如图 8 所示.

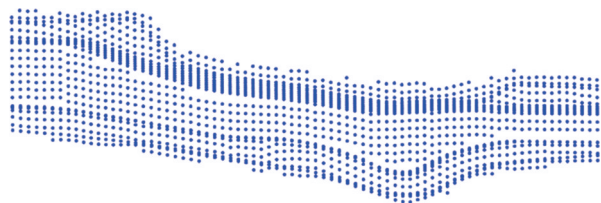


图 8 所有截面特征点集合

Fig.8 Aggregated cross-section feature points

2.3 路径生成与优化

为确保水道路径随形性, 依照第 2.2.4 节的区段划分结果连接特征点. 截面拐点仅与相邻截面的对应拐点连接, 普通特征点仅在相同区段内依次连接, 最终形成连贯的初步冷却水道路径, 如图 9 所示. 通过分区段逐步连接, 避免了整体连接带来的路径偏离, 保证冷却水道路径紧贴模具型面.

采用基于递进拟合与夹角筛选的路径分段算法, 对每条水道路径进行结构简化与优化, 确保满足 1.4 节提出的水道段数约束.

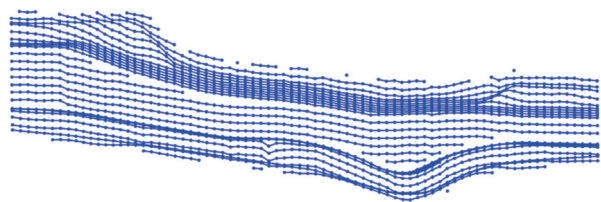


图 9 冷却水道中心线生成结果

Fig.9 Generated cooling channel centerlines

设水道特征点序列为 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$. 其中, $P_i = (x_i, y_i, z_i)$ 表示第 i 个特征点的空间坐标. 直接连接路径首尾两点 P_1 与 P_n , 将整体路径拟合为一段直线. 计算所有中间点到该直线的平均距离, 作为整体拟合误差 E_1 :

$$E_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=2}^{n-1} \frac{\|(P_i - P_1) \times (P_n - P_1)\|}{\|P_n - P_1\|} \quad (9)$$

若整体拟合误差 E_1 小于设定误差阈值 ϵ , 则认为该路径形态良好, 直接保留为一段直线.

若 E_1 超出误差阈值, 则需要计算两段和三段的情况. 首先, 考虑将路径划分为两段, 遍历路径中间的各个候选点 P_k 作为分段点, 将路径拆分为两段: 第一段 $P_1 \rightarrow P_k$, 第二段 $P_k \rightarrow P_n$. 计算两段路径拟合误差之和:

$$E_2 = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=2}^{k-1} \frac{\|(P_i - P_1) \times (P_k - P_1)\|}{\|P_k - P_1\|} + \sum_{i=k+1}^{n-1} \frac{\|(P_i - P_k) \times (P_n - P_k)\|}{\|P_n - P_k\|} \right) \quad (10)$$

选取总拟合误差 E_2 最小的分段点 P_k 作为最优两段方案, 同时计算该方案下两段直线之间的夹角余弦:

$$\cos \theta_2 = \frac{(P_k - P_1) \cdot (P_n - P_k)}{\|P_k - P_1\| \cdot \|P_n - P_k\|} \quad (11)$$

在此基础上, 考虑三段路径划分. 遍历路径中两个分段点 $P_k, P_m (k < m)$, 将路径拆分为三段: $P_1 \rightarrow P_k \rightarrow P_m \rightarrow P_n$. 同理, 计算总拟合误差 E_3 , 选取总拟合误差 E_3 最小的两个分段点作为最优三段方案, 同时计算该方案下两个分段点处的夹角余弦 $\cos \theta_{31}$ 和 $\cos \theta_{32}$.

最后, 基于路径夹角进行筛选. 若三段方案中任意相邻两段夹角小于 10° , 则简化为两段结构; 若两段方案的夹角仍小于 10° , 则优化为单段结构. 该递进式优化策略在满足段数约束的前提下, 确保获得结构简洁且几何合理的最终方案. 图 10 展示了基于优化中心线和水道半径参数构建的完整冷却水道模型, 验证了该方法的工程实用性.

3 生成实例与结果分析

为验证所提出冷却水道自动生成方法的有效性, 基于典型热冲压模具的型面数据, 进行了冷却水道路径生成的实例验证. 图 11 展示了四个不同应

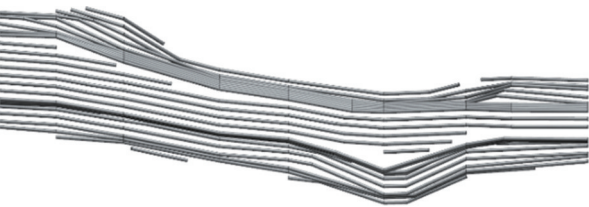


图10 优化后的冷却水道结果
Fig.10 Optimized cooling channel results

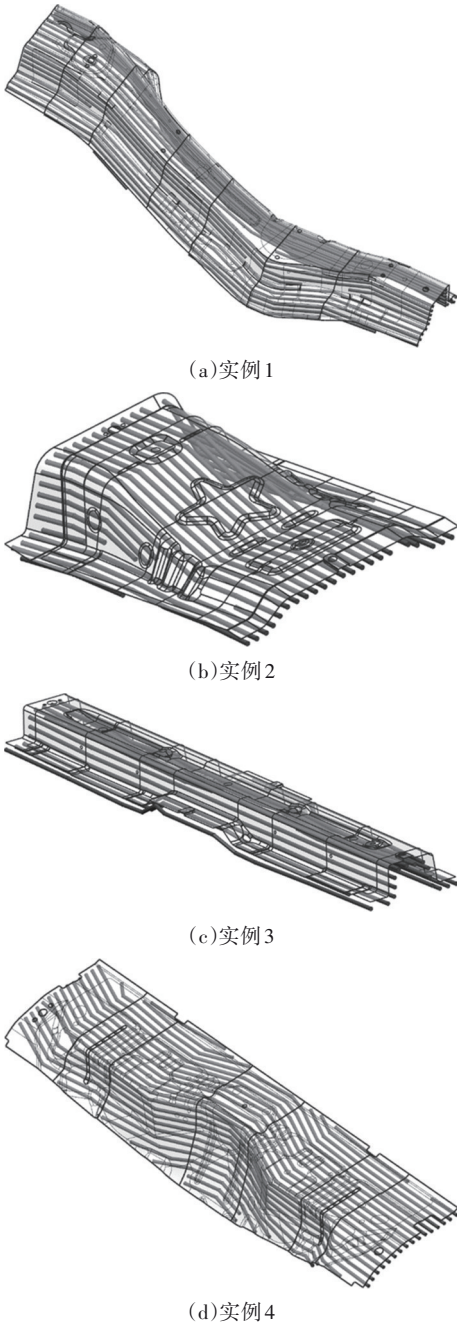


图11 冷却水道自动生成实例

Fig.11 Automatic cooling channel generation examples

用实例的冷却水道设计结果,均给出了模具镶块对应的完整水道布局,直观反映了所提出方法在不同结构条件下的适应性与实用性.

表1展示了图11中四个应用实例的冷却水道间距控制效果,所有案例均采用18 mm的设计间距标准.评估过程中,通过精确计算每条水道与相邻水道的最小间距,将偏差控制在 ± 2 mm范围内的水道判定为合格.测试数据显示,各实例的合格水道比例均保持较高水平,这一结果充分验证了所提出方法在间距控制方面的稳定性和可靠性.

表1 冷却水道间距统计分析

Tab.1 Statistical analysis of cooling channel spacing

序号	合格水道数/条	水道总数/条	合格率/%
实例1	190	228	83.33
实例2	132	142	92.96
实例3	122	133	91.73
实例4	201	219	91.78

与水道间距约束不同,型面距离与随形性约束的评价存在显著的量化困难.受模具型面复杂几何特征的影响,这两项指标难以实现标准化评估,通常需结合工程经验与辅助可视化分析进行综合判断.从图11展示四个典型实例中可观察到,所提出方法生成的冷却水道路径在各类型面上均表现出良好的几何适应性:一方面保持与型面合理的安全距离,避免结构干涉;另一方面紧密跟随型面曲率变化,确保冷却均匀性.

为进一步验证所生成冷却水道路径在实际冷却性能方面的有效性,对某模具下模冷却水道进行了流体仿真比较,包括自动生成冷却水道与手动设计冷却水道两种方案.需要说明的是,自动生成冷却水道仅包含型面水道,需在仿真前手动补充连通水道以保证流体连通性.仿真软件采用Ansys Fluent,网格大小均设为3 mm,入口压力均设为0.3 MPa.

表2和图12展示了自动生成冷却水道与手动设计冷却水道在流场与传热性能方面的对比结果.可以

表2 冷却水道仿真结果统计分析

Tab.2 Statistical analysis of cooling channel simulation results

评价指标	自动生成冷却水道	手动设计冷却水道
流速均值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	3.47	3.43
流速标准差/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	2.04	2.05
壁面换热系数均值/($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	20 301.52	17 763.16
壁面换热系数标准差/($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	10 271.76	10 038.78
设计所需时间/d	0.50~1.00	2.00~3.00

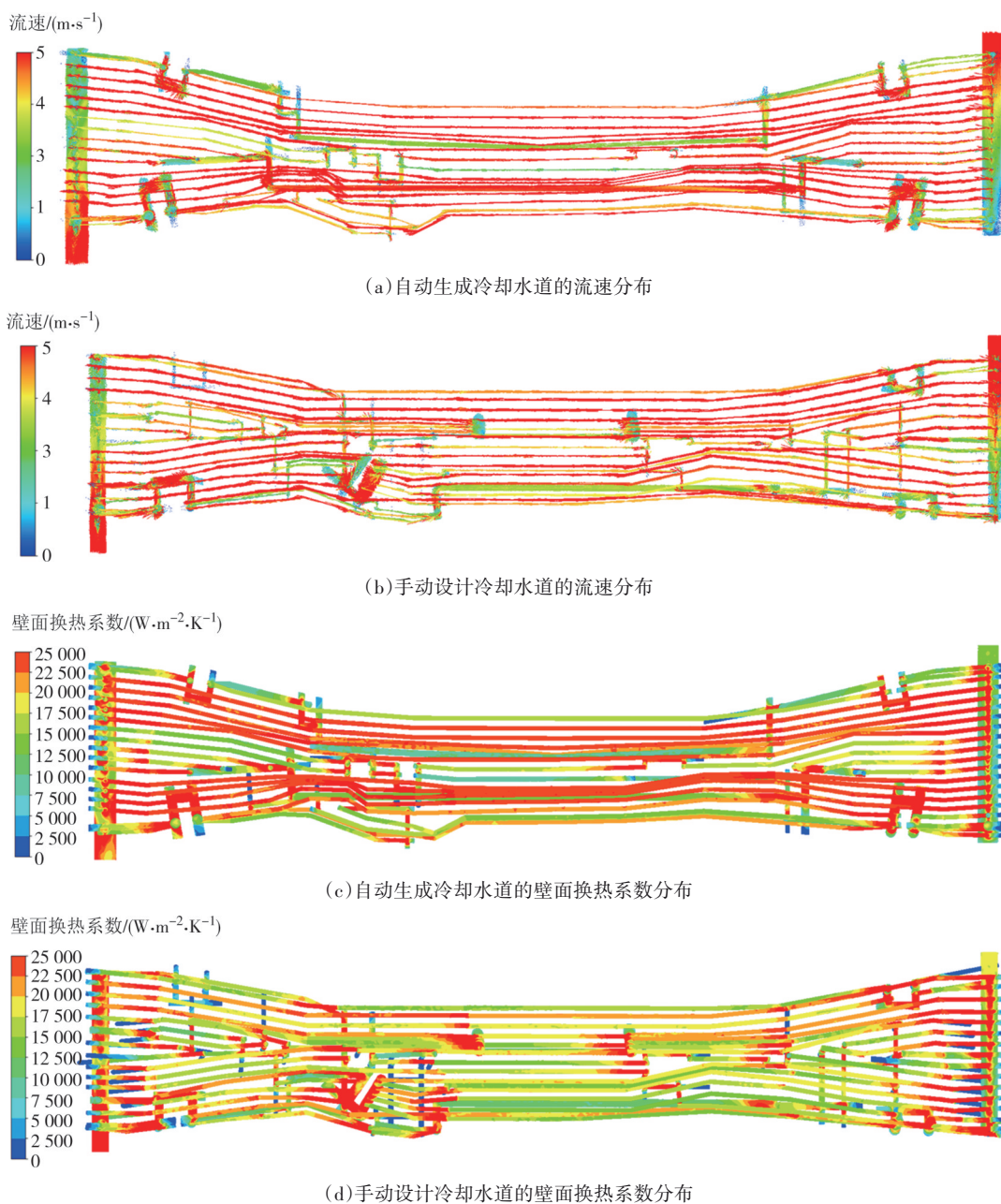


图 12 自动生成与手动设计冷却水道的仿真结果对比

Fig.12 Comparison of simulation results between automatically generated and manually designed cooling channels

观察到,自动生成冷却水道的流速均值略高于手动设计,且标准差略低,表明其流速分布更加均匀.壁面换热系数的均值显著提高,标准差基本相当,说明自动生成冷却水道整体冷却效率更高,有助于模具表面温度的平稳控制和零件成形质量的提升.此外,在设计效率方面,自动生成冷却水道的计算过程可在 1 min 内完成,后续仅需少量人工调整与水道连通设计,整体耗时约 0.50~1.00 d;而传统手动设计则需 2.00~3.00 d. 相比之下,自动生成方法在保证质量的同时大幅缩短了设计周期.

4 结论

针对热冲压模具冷却水道设计中效率低、对经验依赖强的问题,提出了一种基于型面特征的自动化冷却水道生成方法.该方法通过型面数据处理、特征点提取及路径优化,构建了完整的冷却水道自动设计流程.核心技术包括多阶段特征点提取(截面交点提取、截面交点偏置、拐点识别与提取及特征点采样)、基于最小拟合误差和夹角判定的路径优化,实现了复杂模具冷却水道的精准、高效生成.

典型应用验证表明,生成的冷却水道在间距、型面距离及随形性方面表现良好,路径结构简洁、连续、段数合理,水道间距合格率高,具备良好工程应用价值.与传统手动设计需2~3 d相比,该方法可在1 d内完成完整水道设计,效率提升50%以上,为复杂模具冷却水道的智能辅助设计提供有效技术支撑.未来可通过开发交互式设计模块和加强与主流CAD软件的数据互通,进一步提升方法的灵活性和实用性,推动模具设计向数字化、自动化发展.

参考文献

- [1] HOFFMANN H, SO H, STEINBEISS H. Design of hot stamping tools with cooling system [J]. *CIRP Annals*, 2007, 56 (1): 269-272.
- [2] SCHIECK F, HOCHMUTH C, POLSTER S, et al. Modern tool design for component grading incorporating simulation models, efficient tool cooling concepts and tool coating systems [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2011, 4 (2): 189-199.
- [3] 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.
- [4] 佟莹,张乐,王玄,等. 高强度钢板热冲压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)
- [5] 刘迪辉,唐雪,杨三思. 考虑板料厚度的多腔热冲压模具冷却水流量分配方法[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(8): 93-100.
LIU D H, TANG X, YANG S S. Method of cooling water flow distribution for considering sheet thickness [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2022, 49(8): 93-100. (in Chinese)
- [6] MORI K, BARIANI P F, BEHRENS B A, et al. Hot stamping of ultra-high strength steel parts [J]. *CIRP Annals*, 2017, 66 (2): 755-777.
- [7] 唐雪. 热冲压模具冷却系统及仿真研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
TANG X. Research on cooling system and simulation of hot stamping die[D]. Changsha: Hunan University, 2023. (in Chinese)
- [8] LIM W S, CHOI H S, AHN S Y, et al. Cooling channel design of hot stamping tools for uniform high-strength components in hot stamping process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(5): 1189-1203.
- [9] 贺斌,李显达,胡平,等. 基于数值模拟和3D打印的热冲压模具随形水道设计制造研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(19): 180-188.
HE B, LI X D, HU P, et al. Investigation of design and manufacture in hot stamping tools with conformal cooling channels based on simulation and 3D-printing technology [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(19): 180-188. (in Chinese)
- [10] YU D M, RACHIK M, BLAISE A, et al. Topology optimization designed twisted conformal cooling channel for additive-manufactured hot-stamping tool [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 259: 124784.
- [11] 鲜向东. 高强度热冲压模具冷却系统快速设计方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
XIAN X D. Fast design method of cooling system of hot stamping die for high strength steel [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [12] 彭浩毅. 基于NX的热冲压模具镶块冷却水道的快速设计系统研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
PENG H Y. Research on rapid design system of cooling water channel for hot stamping die insert based on NX [D]. Changsha: Hunan University, 2022. (in Chinese)
- [13] 曾纪聪,周驰,郑靖强. 热冲压模具冷却水道随形分布算法及实现[J]. *机电工程技术*, 2023, 52(6): 109-112.
ZENG J C, ZHOU C, ZHENG J Q. Algorithm and implementation of conformal distribution of cooling water channels for hot-stamping dies [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2023, 52(6): 109-112. (in Chinese)
- [14] 何育军,谢延敏,田银,等. 热冲压成形数值仿真及模具冷却系统参数研究[J]. *锻压技术*, 2015, 40(11): 148-154.
HE Y J, XIE Y M, TIAN Y, et al. Numerical simulation of hot stamping and parameter study of die cooling system [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2015, 40(11): 148-154. (in Chinese)
- [15] 袁俞哲,杨睿,杨海波,等. 基于RSM与NSGA-II的热冲压模冷却水道优化设计[J]. *模具工业*, 2022, 48(6): 7-17.
YUAN Y Z, YANG R, YANG H B, et al. Optimization design of cooling water channel for hot stamping die based on RSM and NSGA-II [J]. *Die & Mould Industry*, 2022, 48(6): 7-17. (in Chinese)
- [16] 张永亮,李雪刚,张鑫. 高强度钢板热冲压成形研究与进展[J]. *汽车工艺与材料*, 2015(2): 41-46.
ZHANG Y L, LI X G, ZHANG X. Research and progress on hot stamping forming of high-strength steel sheets [J]. *Automobile Technology & Material*, 2015(2): 41-46. (in Chinese)
- [17] HUNG T H, WANG S W, CHIUHUANG C K, et al. Performance of die cooling system design in hot stamping process [J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2019, 42(6): 479-487.
- [18] 裴孜艺,王冰滨,王子健. 热冲压模冷却水路设计及仿真研究[J]. *模具工业*, 2023, 49(2): 1-8.
PEI Z Y, WANG B B, WANG Z J. Design and simulation of cooling waterway for hot stamping forming die [J]. *Die & Mould Industry*, 2023, 49(2): 1-8. (in Chinese)
- [19] 贺斌. 热冲压工艺改进及模具随形冷却水道优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
HE B. Research on improvement of hot stamping process and optimization design of conformal cooling channel in hot stamping die [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)