

◇ 本期专题 ◇

DOI:10.20137/j.cnki.45-1359/t.2024.09.020

汽车制造连续高速冲压模具高效散热数值模拟研究*

姚远¹, 宾峰^{1,2}, 韦旺华³

(1. 中国科学院 力学研究所 空天飞行高温气动全国重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 东风柳州汽车有限公司, 广西 柳州 545026)

摘要: 针对汽车钣金冲压制造工艺中金属件与模具连续累积热效应影响产品性能和冲压质量的关键问题, 文章进行了连续高速冲压模具高效散热数值模拟研究, 建立了流-热耦合三维矩形通道流动传热数值模型, 并分析了无量纲压差/压损、无量纲端动能及表面传热系数等动态参数随无量纲长度变化的规律。结果显示, 最高温度点出现在模具与板料界面且靠近中轴线处, 最高热点温度达到 309 K; 局部表面传热系数沿流向先升后降, 在无量纲长度为 3 左右时达到峰值 2 700 W/(m²K), 并且端动能扰动越剧烈, 换热强度越大。研究证实了主动冷却的高效性。

关键词: 高效散热; 主动冷却; 高速冲压模具; 流动传热; 数值模拟

中图分类号: B60

文献标识码: A

文章编号: 1674-0688(2024)09-0108-05

0 引言

先进高强度钢具有较高的强度级别, 在冷成形过程中, 模具和板料接触界面会产生较大的接触应力及温升, 并且随周期性高速生产累积, 易导致模具磨损或板料表面损伤, 成为高强度钢在冷冲压工艺应用中的关键技术难点。国内外对此进行了深入研究, 包括冷冲压工艺、热-力学有限元模型、摩擦和变形行为、环境温度控制及冷却散热等方面。国外研究如 Nielsen 等^[1]揭示了不锈钢工业薄板成形中界面温度可高达 220 °C, 远超润滑剂临界温度; Kim 等^[2]通过有限元分析和摩擦试验, 研究了特定模具材料和涂层组合对镀锌汽车结构件冲压中润滑剂失效和擦伤的临界界面压力和温度; Pereira 等^[3]的实验研究表明, 毛坯和模具材料温度可分别达 108 °C 和 181 °C, 摩擦和变形共同导致温度峰值; Choi 等^[4-5]实测了冲压过程温度分布, 验证了热-力学有限元模型, 并分析了摩擦系数和环境温度等对热变形的影响。在国内, Jiang 等^[6]提出了稳态温度场下“U”形冲压件回弹行为的有限元预测模型, 研究了温度与应力分布的作用关系; Hou 等^[7]和顾新建等^[8]采用有限元模拟了

DP590 钢板冷冲压过程, 分析了材料性能、拉伸速度和摩擦系数等工艺参数对冷冲压界面温度的影响; 李贵等^[9-10]分析了冲压摩擦的形成机理, 总结了摩擦副特性、冲压工艺参数、界面接触状态等方面的影响因素和模型; Wang 等^[11]研究了上模温度对 AZ31B 镁合金板材冲压成形性能的影响, 结果表明上模温度与成形性正相关。此外, 还有学者开展了热力耦合冲压研究, 考虑了变形热和摩擦热效应^[12-13]。本文针对冷冲压工艺, 提出冲压模具高效冷却方法, 明确了主动冷却的散热性能, 对克服汽车关键零部件高速连续冲压工艺中的热力效应具有重要意义。

1 冲压工艺基础

1.1 冷冲压工艺

冷冲压工艺是航空航天、电子、汽车、农业机械及轻工等国防及民用工业中的重要加工技术。该工艺在常温下, 利用冲压设备和冲模, 通过施加外部压力, 使不同规格的板料或坯料在模具之间进行非线性滑动接触, 从而实现塑性永久变形和材料流动分离, 最终制得所需形状、尺寸和性能的零件。冷冲压工艺具有产品质量稳定、生产率高、操作简便、易于机

*广西重点研发计划项目“基于热力耦合效应的连续高速冲压模具高效散热设计及其工业示范”(AB22035044); 国家青年科学基金项目“火箭发动机再生冷却的甲烷跨临界流动传热机理研究”(52406118)。

【作者简介】姚远, 女, 湖南沅江人, 硕士, 工程师, 研究方向: 飞行器热防护、多相流动及传热传质; 宾峰, 男, 广西来宾人, 博士, 副研究员, 研究方向: 催化燃烧与污染物控制; 韦旺华 (通信作者), 男, 广西来宾人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 冲压技术及模具开发。

【引用本文】姚远, 宾峰, 韦旺华. 汽车制造连续高速冲压模具高效散热数值模拟研究[J]. 企业科技与发展, 2024(9): 108-112.

械化与自动化、成本低且节省能耗等优势。

1.2 冲压基本工序

冲压基本工序分为分离和成形两类。分离工序是在冲压过程中,按特定轮廓线将冲压件与板料分离,包括落料、冲孔、切断、切边及剖切等;成形工序则在不破坏材料完整性的前提下,通过塑性变形将其转化为所需形状,包括弯曲、拉伸、翻边、翻孔、涨形、扩孔、缩孔及压印等。本文以某冷冲压生产线为研究对象,其工艺流程见图1,流程依据加工要求设计为5个处理工序(P1~P5),涉及落料、拉延、修边、翻边、冲孔、剖切等工艺环节。

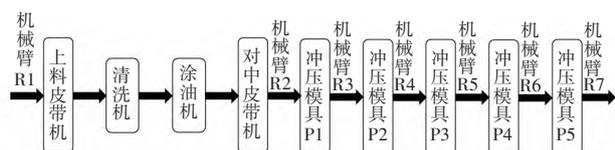


图1 工艺流程图

冷冲模是冷冲压加工的重要工艺设备,其使用寿命决定了产品加工的经济性和效益。模具长期处于高温、高速、高摩擦及腐蚀性的工作环境中,冲压生产工艺及模具设计、模具材料(如冷热疲劳抗力)均会受到影响。因此,合理设计冷冲压模具结构、妥善使用与维护模具、确保良好的润滑条件,是延长模具使用寿命的必要条件。此外,在连续快速的冷冲压过程中,零件与板料之间因摩擦产生热累计效应,这也是影响产品加工的重要因素。

2 数学物理模型

采用 Ansys AIM 19.1 有限元分析软件进行模拟计算,针对冷却介质水为连续相湍流的情况,选用能量方程、湍流标准 $k-\epsilon$ 模型及辐射 DO 模型作为数学模型。当质量、动量、能量等相关量的残差量级降至 10^{-6} 时,判定计算达到收敛标准。冲压模具高效散热冷却通道物理结构示意图和参数表分别见图2和表1。

设计工况条件见表2。热侧热载荷设定为冷却通道上界面的恒定热流密度边界,值为 1476 W/m^2 ,采用 coupled 换热模式;冷却侧入口条件包括恒定速度 ($0.5 \sim 4 \text{ m/s}$) 和温度范围 ($274.15 \sim 308.15 \text{ K}$);冷却侧出口设定为定压出口,压力为1个大气压。所有壁面均设置为无滑移、恒定粗糙度,其中左右侧面和底面为绝热壁面。重力加速度为 $9.8 \text{ kg/(m}\cdot\text{s}^2)$,方向沿y轴负向竖直向下。

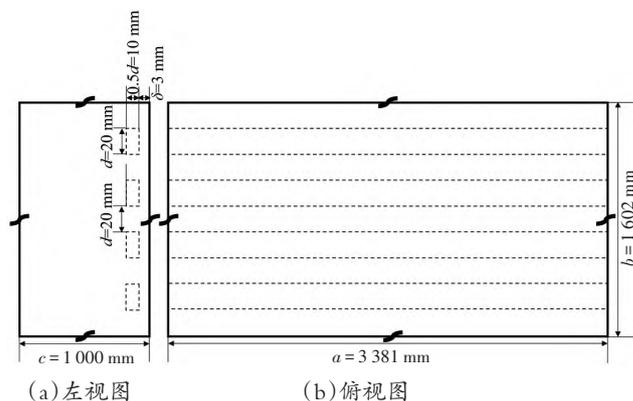


图2 冲压模具高效散热冷却通道物理结构示意图

表1 冲压模具高效散热冷却通道物理结构参数表

模具				
长 a/mm	宽 b/mm	高 c/mm	材质	
3 381	1 602	1 000	纯铜	
冷却通道				
长 a/mm	宽 d/mm	间距 d/mm	数量/条	上表面距模具上表面的距离 δ /mm
3 381	20	20	40	3

表2 设计工况条件表

工况	冷却介质	入口温度/K	入口速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	雷诺数/Re	出口压力 (大气压)	热载荷/MJ
1	水	308.15	0.5	9 218	1	18.79

鉴于冲压模具高效散热冷却通道内部管道的结构布局及其对称特性,将其物理结构简化为单一热源均匀加热的矩形管道,并构建热力耦合数值仿真一体化三维模型。采用 ICEM CFD 19.1 软件创建结构化网格(见图3),并对壁面区域进行边界层局部加密处理。为确保计算精度,进行网格的独立性实验验证(见图4),结果显示,当体积单元网格数量达到16 929个时,满足独立性要求,并且温度偏差小于0.01%。

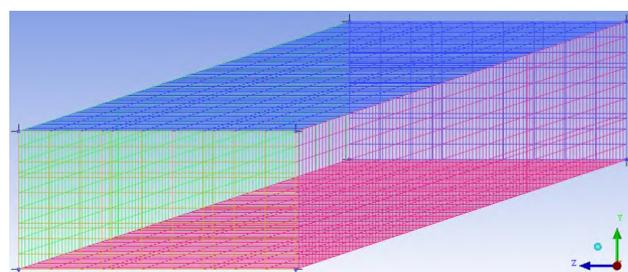


图3 热力耦合数值仿真一体化三维模型网格

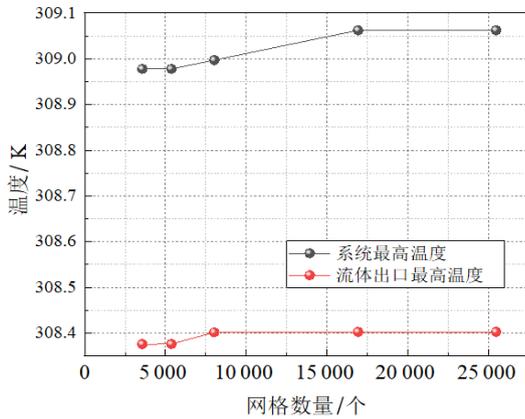


图4 网格独立性实验验证

3 结果及分析

基于所构建的流-热耦合数值仿真一体化三维模型,进行了包含附加冷却及模具冷却通道的优化仿真分析,获得了温度场、压力场及速度场的定量数据,并揭示了无量纲压差/压损、无量纲湍动能、表面传热系数等动态参数随无量纲长度变化的规律。

3.1 多维物理场定量描述

3.1.1 温度场定量描述

图5为考虑摩擦热效应的汽车制造连续高速冲压模具高效散热冷却通道内冷却介质的温度场分布云图。最高温度点出现在模具与板料界面且接近中轴线处,与试验结果相符。模具最高温度为309 K,冷却介质最高温度为308.4 K,确保了模具温度相对稳定,防止零件产生不稳定现象。

3.1.2 压力场定量描述

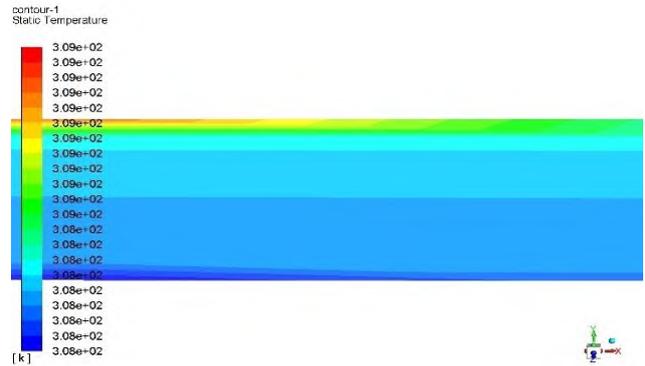
压力场云图见图6,流道内流体压力沿流动方向逐渐降低,整体压差为1 021.6 Pa,这是由于沿程阻力损失导致;在同一截面,流场压力基本保持一致。

3.1.3 速度场定量描述

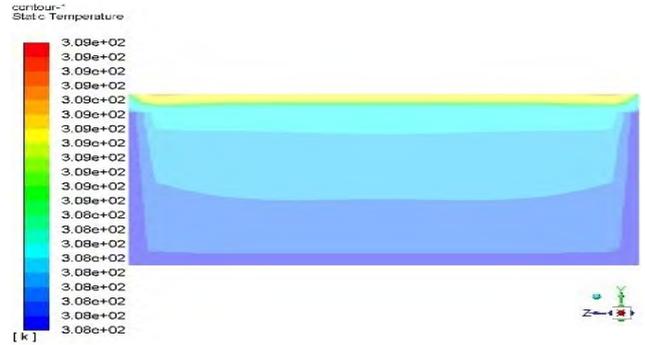
图7为速度场云图,速度场呈轴对称或中心对称,流道中轴线附近流速较快,中心区域等速线呈椭圆形,并逐渐向流道边界转变为矩形。在均匀来流条件下,受黏性力影响,出口流速为0.28~0.63 m/s,速度变化幅度达到45%。

3.2 流动及传热特性

为了得到普适性规律(变化趋势),定义了以下4个无量纲参数:①无量纲压差,即压差与一个大气压力的比值($\Delta P/P_0$)。②无量纲长度,即管长与水力直径的比值(L/d)。③无量纲湍动能,即湍动能与冷却介质入口流速平方的比值(k/u^2)。④无量纲壁面温度,



(a)x轴中轴线平面



(b)中截面

图5 温度场分布云图



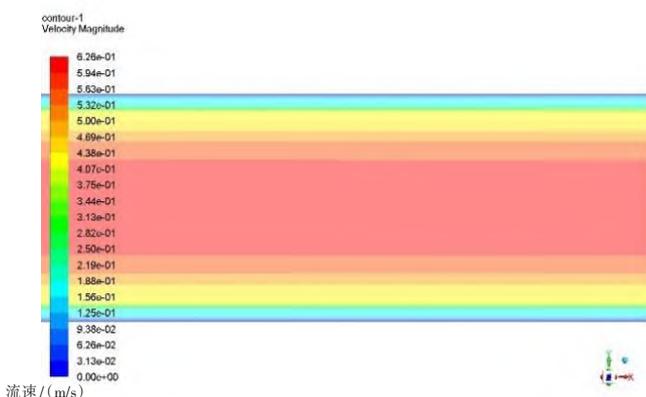
(a)x轴中轴线平面



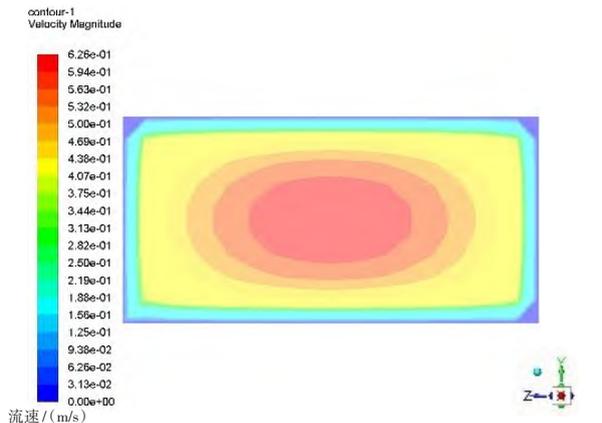
(b)中截面

图6 压力场分布云图

即壁面温度与环境温度的比值(T/T_0)。



(a) x轴中轴线平面



(b) 中截面

图7 速度场云图

3.2.1 流动特性

图8为冷却介质侧无量纲压差/压损沿流向的分布情况。总体上,无量纲压差沿流向呈现近似的线性降低趋势(或反比例函数变化趋势),主要受沿程阻力损失影响;入口处压差最大,无量纲压差值为0.01。

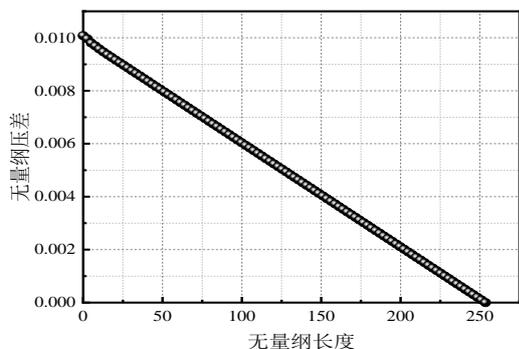


图8 冷却介质侧无量纲压差/压损沿流向的分布情况

3.2.2 湍动能分析

管内冷却介质的扰动程度可以用湍动能(k)表示,其计算公式如下:

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2, \quad (1)$$

其中: U 表示平均速度, m/s; I 表示湍流强度, %。

图9为冷却介质侧无量纲湍动能沿流向的分布情况。总体上,无量纲湍动能沿流向先降低后升高,并最终趋于稳定值。入口处曲线变化幅度较大,受入口效应影响明显,该效应在无量纲长度约60时基本消失。入口处无量纲湍动能最大值为0.00375,随后降至0.0013,降幅达65.33%。谷底出现在无量纲长度约10处。当无量纲长度达到67左右时,冷却介质进入充分发展阶段,流体扰动加剧,无量纲湍动能接近稳定状态,表明管内湍动能分布较均匀。

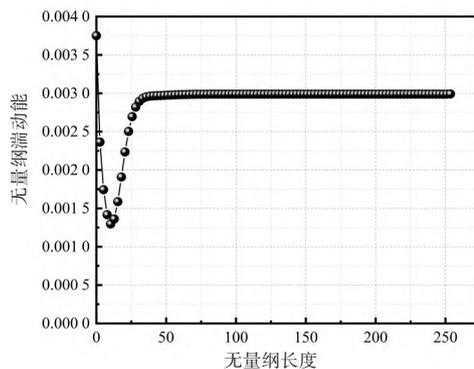


图9 冷却介质侧无量纲湍动能沿流向的分布情况

3.2.3 传热特性

图10为冷却介质侧无量纲壁面温度沿流向的分布情况。总体上,无量纲壁面温度沿流向呈上升趋势。在无量纲长度约为25时,无量纲壁面温度呈现近似线性增长(或正比例函数增长)。在无量纲长度约

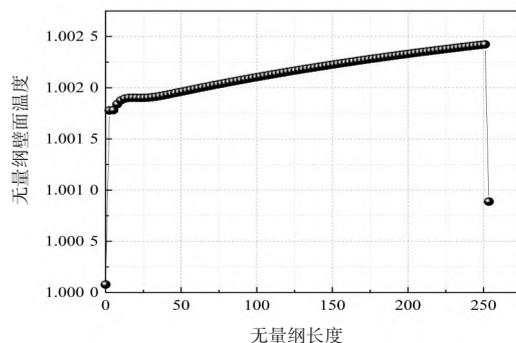


图10 冷却介质侧无量纲壁面温度沿流向的分布情况

为18处,因入口效应出现短暂的凸起。曲线谷底位于入口附近,此处壁面温度骤升,略高于环境温度。当无量纲长度达到251左右时,壁面温度达到峰值,与环境温差最大,换热过程较为剧烈,为热流集中且易发生传热恶化的区域。管道出口上壁面温度骤降,与管道内部的回流现象相关。

图11为冷却介质侧局部表面传热系数沿流向的分布情况。总体上,局部表面传热系数沿流向呈现先升高后降低的变化趋势,在 $1\ 970 \sim 2\ 700\ \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 区间波动。在无量纲长度约为25处,局部表面传热系数呈反比例函数变化趋势。无量纲长度在3和23处出现短暂凸起,主要受入口效应影响。曲线谷底位于出口附近。值得注意的是,在无量纲长度为3前后,壁面温度达到峰值,与湍动能存在一定的对应关系,即流体扰动越剧烈,换热强度越大。

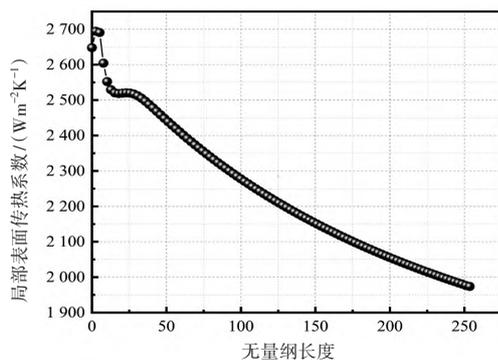


图11 冷却介质侧局部表面传热系数沿流向的分布情况

4 结论

本文针对汽车制造中的连续高速冲压模具,构建了高效散热冷却过程的流动与传热数学模型。模型中,冷却介质被视为连续相,通过对模型进行数值求解,在给定工况下获得了沿流向的稳态流动与传热特性,主要结论如下。

(1)最高温度点出现在模具与板料界面且近中轴线处,模具最高温度为309 K,冷却介质最高温度为308.4 K。在设计主动冷却结构条件下,模具温度能够保持基本不变,有效防止了零件的不稳定现象。

(2)局部表面传热系数沿流向先增后减,波动范围为 $1\ 970 \sim 2\ 700\ \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 。在无量纲长度约为3的

位置,局部表面传热系数达到峰值。当湍动能扰动增强时,换热强度增大。

5 参考文献

- [1] NIELSEN P S, FRIIS K S, BAY N. Testing and modeling of new tribo-systems for industrial sheet forming of stainless steels[J]. *Journal of Engineering Tribology*, 2011, 225: 1036-1047.
- [2] KIM H, HAN S, YAN Q, et al. Evaluation of tool materials, coatings and lubricants in forming galvanized advanced high strength steels (AHSS) [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2008, 57(1): 299-304.
- [3] PEREIRA M P, ROLFE B F. Temperature conditions during 'cold' sheet metal stamping[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214: 1749-1758.
- [4] CHOI J, CHOI B, HEO S, et al. Numerical modeling of the thermal deformation during stamping process of an automotive body part [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 128: 159-172.
- [5] CHOI B, CHOI J, HEO S, et al. Parametric investigation of the effect from controlling variables on thermal deformation during stamping process in automotive body part [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 140: 373-385.
- [6] JIANG H J, REN Y X, LIAN J W, et al. A new predicting model study on U-shaped stamping springback behavior subjected to steady-state temperature field [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 76: 21-33.
- [7] HOU Y K, YU Z Q, LI S H. Galling failure analysis in sheet metal forming process [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2010, 15(2): 245-249.
- [8] 顾新建, 于忠奇, 宋洋. 工艺参数对高强度钢冷冲压界面温度影响分析 [J]. *上海交通大学学报*, 2017, 51(4): 426-431.
- [9] LI G, LONG X Y, YANG P, et al. Advance on friction of stamping forming [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(1-4): 21-38.
- [10] 李贵, 龙小裕, 杨朋, 等. 板料冲压成形摩擦研究现状及发展趋势 [J]. *锻压技术*, 2018, 43(4): 1-8.
- [11] WANG Z M, GU R Y, CHEN S C, et al. Effect of upper die temperature on the formability of AZ31B magnesium alloy sheet in stamping [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 257: 180-190.
- [12] 聂昕, 肖兵兵, 申丹凤, 等. 考虑变形热和摩擦热效应的热力耦合冲压研究 [J]. *中国机械工程*, 2020, 31(16): 2005-2015.
- [13] 刘迪辉, 林成业. 温度对薄板抗起皱性能的影响 [J]. *中国机械工程*, 2015, 26(10): 1395-1398.