

基于等温面法的发动机活塞裙预锻模优化设计

史凯迪¹, 陈荣创^{1,2}, 张运军³, 陶鹏⁴, 张春¹

(1. 湖北汽车工业学院 材料科学与工程学院, 湖北 十堰 442002; 2. 湖北隆中实验室, 湖北 襄阳 441000;
3. 湖北三环锻造有限公司, 湖北 襄阳 441700; 4. 东风汽车股份有限公司, 湖北 襄阳 441000)

摘要: 为了改善预锻模开发设计周期长、成本高、依赖经验的问题, 根据材料流动与热量传输的相似性原则, 提出采用等温面法对预锻模进行优化设计。以柴油机活塞裙锻件为例, 介绍了基于等温面法的预锻模设计过程, 并选取了 3、5、8 和 10 ℃ 的等温面进行模具设计和有限元分析。首先在 ANSYS WORKBENCH 软件温度场分析的基础上获得等温面, 然后在 Geomagic Studio 软件中对等温面点云进行拟合, 并在 UG 软件中设计出预锻模具, 最后采用 DEFORM 软件模拟获得型腔填充率、最大锻造压力、等效应变分布和流线形状等, 评估不同预锻模具方案的优缺点。结果表明: 以 8 ℃ 等温面为基础设计预锻模具, 生产的锻件填充率高、最大锻造压力小, 且磁粉探伤未发现开裂缺陷, 锻件表面质量良好, 满足生产要求。

关键词: 等温面法; 活塞裙; 预锻模; 填充率; 锻造压力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.02.028

中图分类号: TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 02-0220-07

Optimized design on pre-forging die of engine piston skirt based on isothermal surface method

Shi Kaidi¹, Chen Rongchuang^{1,2}, Zhang Yunjun³, Tao Peng⁴, Zhang Chun¹

(1. School of Materials Science & Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China;
2. Hubei Longzhong Laboratory, Xiangyang 441000, China; 3. Hubei Tri-ring Forging Co., Ltd., Xiangyang 441700, China;
4. Dongfeng Automobile Co., Ltd., Xiangyang 441000, China)

Abstract: In order to improve the problems of long development and design cycle, high cost and reliance on experience for the pre-forging die, according to the similarity principle of material flow and heat transfer, a isothermal surface method for pre-forging die optimal design was proposed. Then, for the diesel engine piston skirt forgings, the pre-forging die design process based on the isothermal surface method was introduced, and the isothermal surfaces of 3, 5, 8 and 10 ℃ were selected for the die design and finite element analysis. Firstly, the isothermal surface was obtained based on the temperature field analysis by software ANSYS WORKBENCH. Then, the point cloud of the isothermal surface was fitted by software Geomagic Studio, and the pre-forging die was designed by software UG. Finally, the cavity filling rate, the maximum forging pressure, the distribution of equivalent strain and the streamline shape were obtained by software DEFORM simulation to evaluate the advantages and disadvantages of different pre-forging schemes. The results show that when the pre-forging die is designed according to the 8 ℃ isothermal surface, the produced forgings have a high filling rate and a low maximum forging pressure, no cracking defects are found by magnetic powder inspection, and the surface quality of forgings is good, which meets the requirement of production.

Key words: isothermal surface method; piston skirt; pre-forging die; filling rate; forging pressure

在设计预锻模时常采用经验法^[1]对终锻件的几

何特征进行简化, 然后根据锻造模拟结果调整预锻件的几何轮廓, 经过多轮优化, 得到预锻件的形状。经验法存在设计周期长、设计成本高、依赖经验的缺点。为了克服这些缺点, 国内外学者提出采用类等势场法对预锻件的形状进行快速设计, 从而缩短生产周期、提高锻件质量。

夏玉峰等^[2]指出, 金属流动规律与静电场等电位线具有相似性, 基于类电场的等电位线, Guan Y J 等^[3]设计了 40Cr 钢摆锤质量块的预锻模具, 并结合响应面法优化了预锻模具形状; 刘目娟等^[4]采用静

收稿日期: 2023-06-28; **修订日期:** 2023-09-25

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目 (2020CFB374); 材料成形与模具技术国家重点实验室开放基金 (P2021-023); 湖北隆中实验室自主创新项目 (2022ZZ-30); 储能与动力电池湖北省重点实验室开放基金 (QCCLSZK2021B03, QCCLSZK2021B06)

作者简介: 史凯迪 (2000-), 男, 学士

E-mail: 1823037595@qq.com

通信作者: 陈荣创 (1987-), 男, 博士, 副教授

E-mail: crc@huat.edu.cn

电场法建立了 40Cr 钢发动机连杆的预锻件和辗锻毛坯, 结果表明, 静电场法获得的预锻件的材料分布较合理。刘岳峰等^[5]研究了预成形结构拓扑优化, 提出了多目标增删准则, 并应用于 H 形锻件的预成形件设计。陈邦华^[6]根据电场分布与预锻件形状的相似性设计了齿轮和飞机中 7050 铝合金锻件的预锻模具。这些研究结果表明, 采用类等势面法可以设计出更符合材料流动规律的预锻模具。

为了改善类等势面法设计出的预锻模具, 国内外学者进一步对应变的均匀性、最大成形压力^[7]和材料温度^[8]等指标进行了探讨, 并结合智能优化算法^[9]设计了多种锻件的预锻模具。这些研究总体上实现了常见锻件(杆类零件、齿轮、薄壁高筋零件、回转件等)的预锻模的优化设计。这些研究也表明, 类等势面法在预锻模设计方面具有较广阔的应用前景。

等温面是等势面的一种, 电场等势面公式与等温面公式具有相似性, 但是温度场分析的操作更简单、技术门槛更低, 常见软件如 DEFORM、Abaqus、ANSYS WORKBENCH 等均能较容易地进行温度场模拟, 但是公开报道中基于等温面法的预锻模优化设计方法的研究并不多^[10], 且多数需要编制程序对点云和等温面进行复杂处理^[11-13], 这无疑会阻碍该技术的实际应用。本研究提出借助常规通用软件(ANSYS WORKBENCH、Geomagic Studio、UG)对预锻模进行优化设计, 降低对工程师的理论和编程能力的要求, 快速设计出满足要求的预锻模具。本研究以某发动机活塞裙零件为例, 介绍了预锻模设计的全过程, 展示了等温面法应用于预锻模优化设计的巨大潜力。

1 理论基础和设计方法

1.1 等温面与预锻件形状相似性分析

温度场分析的导热微分方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v \quad (1)$$

式中: T 为温度, K; t 为时间, s; λ 为导热系数, $(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$; ρ 为密度, $(kg \cdot m^{-3})$; c 为比热, $(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$; x 、 y 、 z 为坐标分量, m; q_v 为生热速率, $(K \cdot s^{-1})$ 。

对于无内热源的稳态导热问题, $\partial T / \partial t$ 和 q_v 均为 0, 所以式(1)方程可以进一步简化为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

式(2)与静电场等势面方程具有类似形式:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

式中: ϕ 为电势, V。

对比式(2)和式(3)可知, 静电场法的公式与等温面法的公式在形式上相同, 所以, 理论上采用等温面法获得的预锻件的形状与静电场法获得的完全一致。

锻造成形过程中, 材料流动符合最小阻力和能量最小原则, 即材料总是向最容易发生变形的方向流动。根据等温面的性质, 等温面之间温度降低的方向是等温面法面的切线方向, 热量只会沿该方向进行传递。由此, 根据相似性原则, 可以将热量的传递过程类比为材料的流动过程, 进而采用等温面方程和等温面的形状预测材料的流动情况。通过等温面法设计的预锻件形状也符合应变分布最均匀、材料流动最合理的原则。

1.2 设计方法

预锻模设计的目标是寻找一个形状介于锻造毛坯(通常为圆柱形)和终锻件形状之间的过渡形状, 通过两步或多步成形锻件, 使锻件整个成形过程中材料流动更合理、变形更均匀, 从而避免产生折叠、开裂和充不满等锻造缺陷。通常, 预锻的主要任务是成形大致形状和尺寸, 便于终锻时金属更容易充满型腔, 而终锻是将锻件精确成形至最终形状, 一般预锻时变形量较大、材料容易折叠。本文设计思路是将变形量在预锻和终锻之间进行合理分配, 使变形更加协调。为了设计出合理的预锻件形状, 需要先进行温度场分析, 获得形状介于锻造毛坯和终锻件形状之间的过渡形状。这部分工作可以借助 ANSYS WORKBENCH 的稳态温度场分析功能完成, 该软件的 2021 版本具备等温面导出功能, 可将等温面导出为 stl 格式的三角网格文件。stl 网格文件随后被导入到 Geomagic Studio 中进行逆向造型设计, 获得 stp 格式的实体, 然后在得到实体的基础上增加飞边槽和分模即可得到预锻模具, 从而在 DEFORM 中进行预锻和终锻模拟。

从以上的设计过程可以看出, 选取不同的等温面形状, 材料的变形过程和最终锻件的成形质量会有差异。本研究对比模拟了不同等温面下(3、5、8 和 10 °C), 预锻与终锻模腔填充率、预锻与终锻最大锻造压力和等效应变等指标的差异, 以确定模

拟成形效果较好的等温面, 且该等温面也可为设计其他类似形状锻件的预锻模提供参考。

2 发动机活塞裙预锻模设计

2.1 锻件模型与温度场模拟

某重型柴油机活塞裙锻件材料为非调质钢 38MnVS, 圆柱形坯料经过高温预锻和终锻后得到的终锻件模型如图 1 所示。锻件形状为对称件, 中间部位为深度 64 mm 的凹槽, 而侧壁部分的平均厚度仅为 7 mm。锻件最大外形轮廓的直径为 $\Phi 139$ mm, 高度为 88 mm, 拔模角为 3° 。锻件分模面选在截

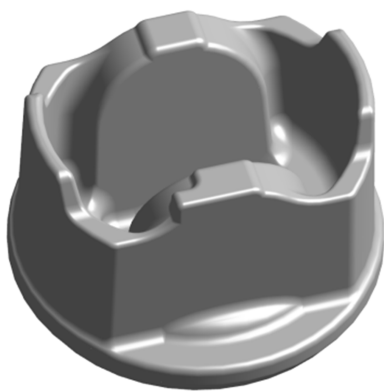
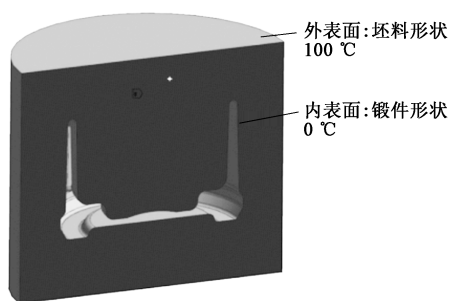
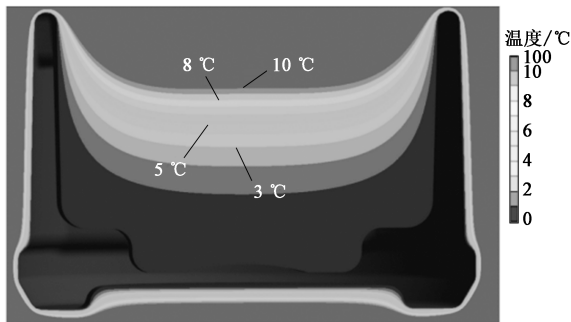


图 1 某柴油机活塞裙终锻件模型

Fig. 1 Final forgings model of a diesel engine piston skirt



(a)



(b)

图 2 活塞裙锻件的温度场分析模型 (a) 及模拟结果 (b)

Fig. 2 Analysis model (a) and simulation result (b) for temperature field of piston skirt forgings

2.2 预锻模设计

等温面的 stl 网格不包含飞边槽, 需要先将其处理为实体模型, 然后添加飞边槽, 这部分工作基于成熟的逆向建模技术^[15], 在 Geomagic Studio 中完成。选取 8°C 等温面, 简要介绍建模过程。首先, 去除点云中的噪声点, 并统一点云间距, 将点云转换为三角网格; 然后, 修补网格模型中的孔洞和缝

面最大的锻件底部, 经初步模拟发现, 不设置预锻工序时, 活塞裙侧壁顶部的成形阻力较大, 无法完整填充, 所以需要设计预锻工序。

预锻件形状是介于圆柱形毛坯与终锻件形状之间的过渡形状, 所以, 将图 1 所示的终锻件用直径为 $\Phi 200$ mm、高度为 170 mm 的圆柱包围, 即获得外表面是坯料形状、内表面是锻件形状模型 (图 2a), 依据此模型计算等温面。使用 ANSYS WORKBENCH 的稳态温度场分析功能模拟该等温面^[14]。从式 (2) 可以看出, 等温面的形状与锻件的导热系数、密度和比热等均无关, 所以, 可采用默认材料模拟温度场。为了获得较理想的等温面点云, 设置较小的网格尺寸, 模型最小单元尺寸为 3 mm, 共划分 1520000 个四面体网格。在本研究中, 设置模型内表面温度为 0°C 、外表面温度为 100°C , 经过 10 s 的计算获得温度场模拟结果, 如图 2b 所示。从图 2b 可以看出, 随着温度的增加, 等温面形状逐渐从锻件形状过渡到圆柱形坯料的形状。因为预锻工序的主要任务是成形出锻件的大致形状, 其变形量较大, 所以, 预锻件形状通常更接近终锻件形状。在本研究中, 选取 3°C 、 5°C 、 8°C 和 10°C 的等温面进行预锻件设计, 并基于模拟结果选取最佳的预锻件形状。将所选择的等温面导出为 stl 网格文件, 用于后续逆向建模。

隙等, 得到光滑的模型; 最后, 使用网格模型构造曲面片并对曲面片进行调整、松弛, 生成栅格, 得到 B 样条曲面, 如图 3 所示。

锻造过程遵循金属体积不变原则, 需要考虑锻件体积的热胀冷缩, 而且坯料的体积、预锻件加预锻飞边的体积、终锻件加终锻飞边的体积, 三者应该保持相等^[16]。在锻造过程中, 锻件的高度逐渐降

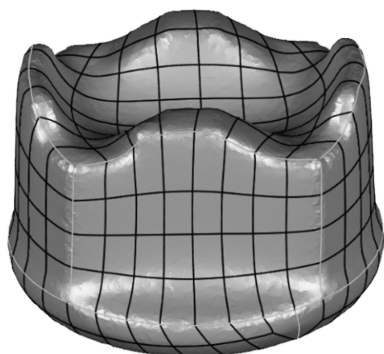


图3 逆向建模过程

Fig. 3 Reverse modeling process

低, 应在锻造方向上对预锻件的高度做出额外的补偿。本研究中, 逆向设计得到的预锻件在高度方向上放大 1.15 倍, 便于材料更好地填充型腔。图 4 所示上模和下模是在 8 ℃ 等温面对应的预锻件基础上增加飞边槽后设计得到的。

2.3 预锻和终锻模拟

通过 DEFORM 锻造有限元模拟结果评估不同等温面方案的成形效果。锻件坯料为直径为 $\Phi 100$ mm、

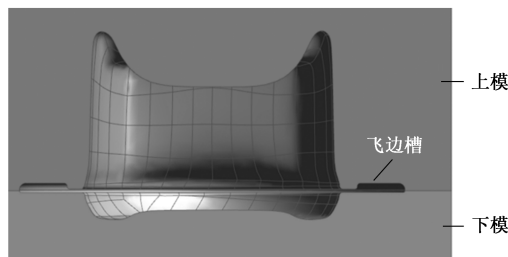


图4 上、下模模型

Fig. 4 Model of upper and bottom dies

高度为 80 mm 的圆柱。锻件材料设置为 38MnVS 钢, 始锻温度为 1000 ℃, 上、下模的初始温度均为 300 ℃。锻件生产时采用二硫化钼水性润滑剂润滑模具, 所以, 模拟时设置锻件与上、下模之间的摩擦因数均为 0.3。坯料划分了 31000 万个四面体网格。建立的有限元模型如图 5 所示。锻造工艺过程为: 预锻时, 下模保持不动, 上模以 $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度下行, 直至与下模接触; 在预锻的基础上继续做终锻模拟, 下模保持不动, 上模以 $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度下行至模具闭合。

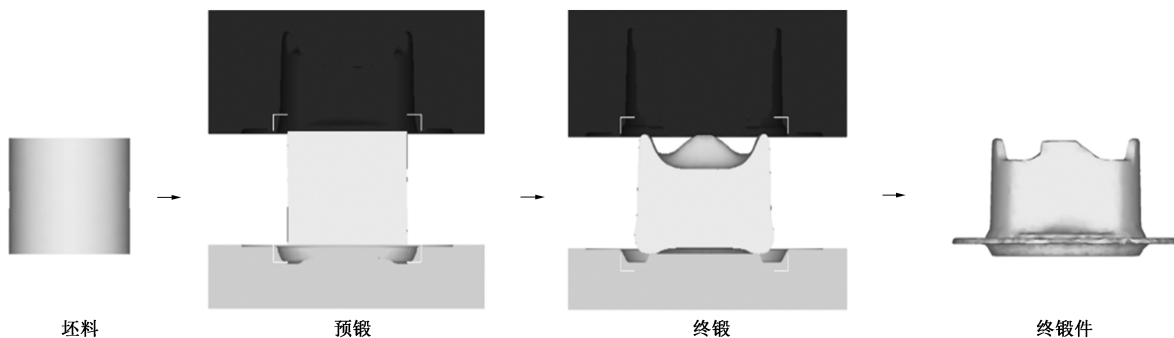


图5 预锻和终锻的有限元分析模型

Fig. 5 Finite elemental analysis models for pre-forging and final forging

选取填充率、最大锻造压力、等效应变作为成形方案的评价指标, 同时查看模拟中金属流线有无折叠。其中, 填充率定义为填充体积与型腔体积之比。模拟得到的预锻和终锻的填充率变化曲线如图 6a 所示。从图 6a 可以看出, 随着等温面温度的逐渐增加, 预锻和终锻的填充率总体上呈上升趋势, 且使用 8 ℃ 等温面对应的模具成形时, 终锻填充率最高, 达到 98.3%。预锻的最大锻造压力在 5700 ~ 5900 kN 之间, 远小于终锻最大锻造压力, 所以, 本文主要分析终锻时的最大锻造压力, 如图 6b 所示。随着等温面温度从 3 ℃ 升至 5 ℃, 终锻最大锻造压力从约 15 MN 上升至约 20 MN, 表明随着终锻变形量的增加, 锻造压力变大。但是, 随着等温面

温度进一步增加, 终锻最大锻造压力在 20 MN 左右波动。4 种等温面温度下预锻所需的最大锻造压力均在 5800 kN 左右, 且均未发生材料折叠。对比 4 种等温面温度的模拟结果可知, 使用 8 ℃ 等温面对应的模具成形锻件时, 填充率和最大锻造压力最佳。

图 7 为预锻件剖面上的等效应变分布图。从图 7 可以看出, 随着等温面温度逐渐增加, 预锻件内侧凹槽处的应变逐渐减小, 这是因为较高温度的等温面的形状更接近原始圆柱坯料, 变形量更小。图 8 为终锻件剖面上的等效应变分布图。从图 8 可以看出, 随着等温面温度逐渐增加, 大应变区的面积逐渐增加, 而中心小应变区的面积逐渐减小。这是因为等温面温度较高时, 预锻变形量较小, 因此终

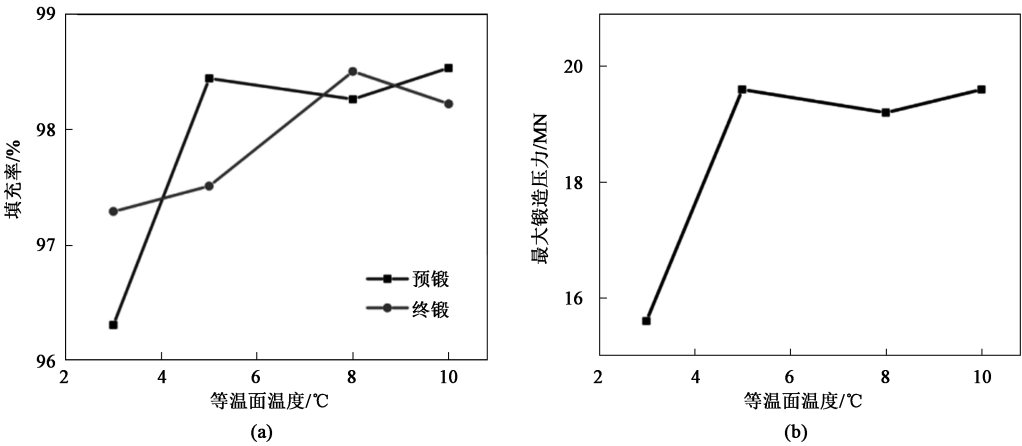


图 6 不同等温面温度下填充率和最大锻造压力的模拟结果
(a) 预锻和终锻填充率 (b) 终锻最大锻造压力

Fig. 6 Simulation results of filling rate and maximum forging pressure under different isothermal surface temperatures
(a) Filling rate in pre-forging and final forging (b) Maximum forging pressure in final forging

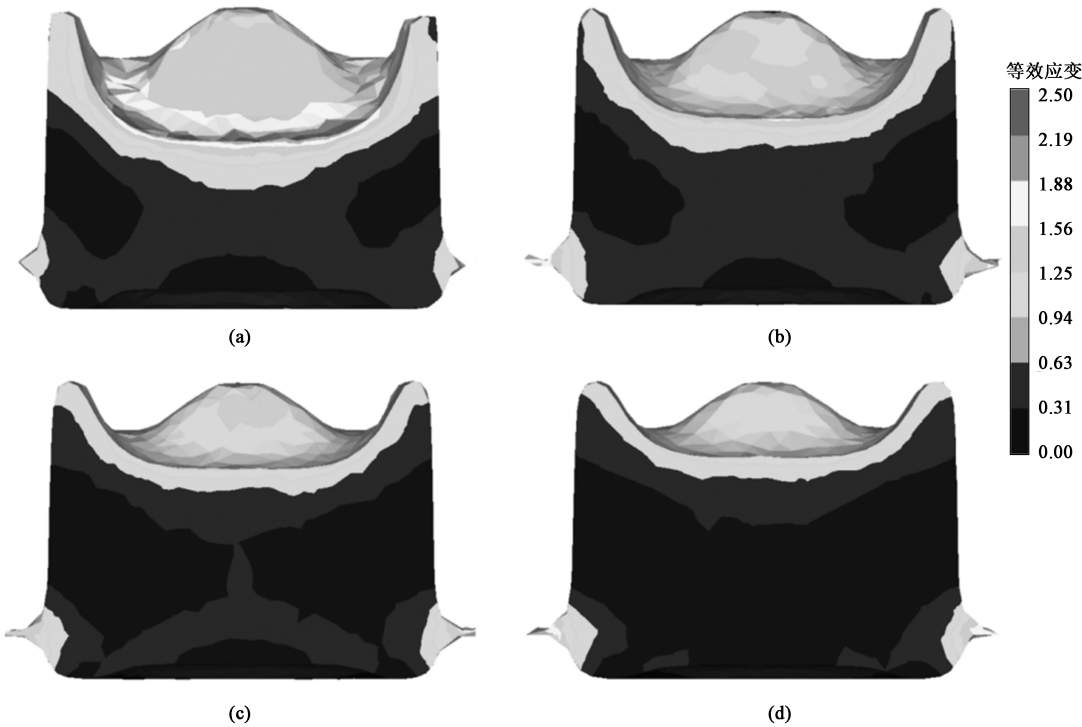


图 7 不同等温面温度下预锻等效应变云图
(a) 3 °C (b) 5 °C (c) 8 °C (d) 10 °C

Fig. 7 Equivalent strain nephograms in pre-forging under different isothermal surface temperatures

锻变形量就会更大，应变也相应更大。从图 7 和图 8 中预锻和终锻等效应变分布可以看出，4 种温度的等温面无明显优劣，随着等温面温度的增加，预锻应变单调下降，而终锻应变单调上升。另外，通过选取不同温度的等温面，可实现锻件在预锻和终锻工序中变形量的分配。

图 9 为采用 8 °C 等温面设计的模具成形时，模拟得到的预锻件和终锻件的流线图。从图 9a 可以看出，预锻件流线非常规则，虽然内侧凹坑处流线较密，但是该处发生拉伸变形，在变形时不会发生折叠。从图 9b 可以看出，飞边处流线较密集，是可能发生流线折叠的区域，但是飞边会在锻件成形后切

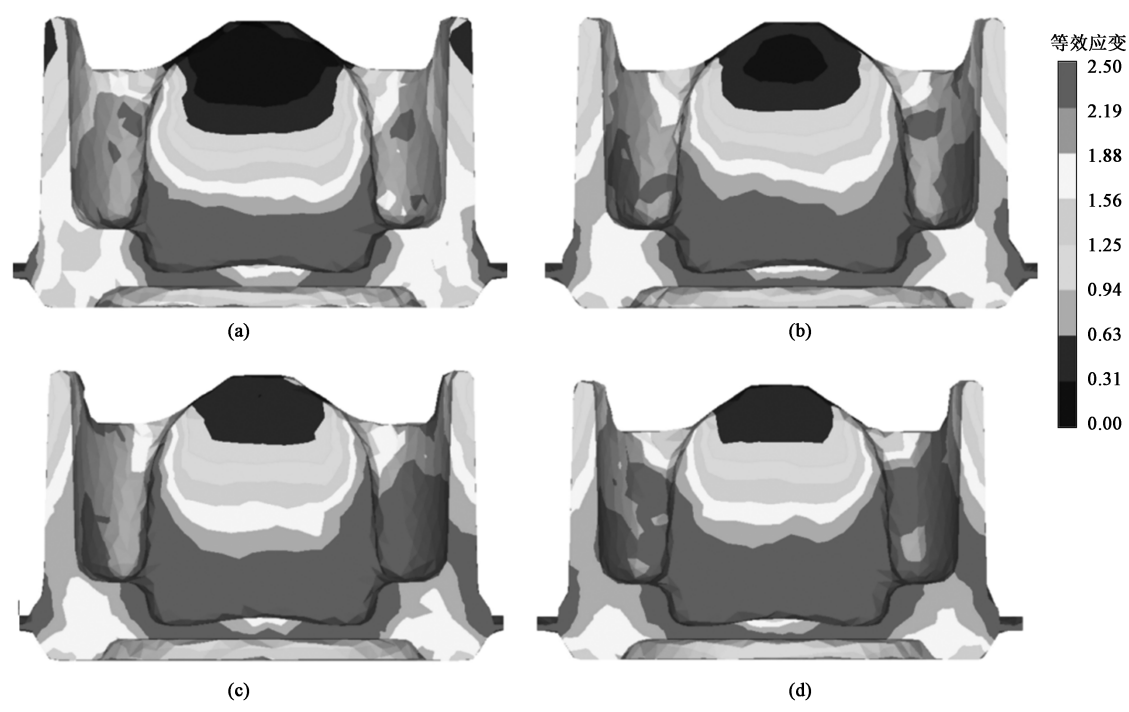


图 8 不同等温面温度下终锻等效应变云图
(a) 3 °C (b) 5 °C (c) 8 °C (d) 10 °C
Fig. 8 Equivalent strain nephograms in final forging under different isothermal surface temperatures

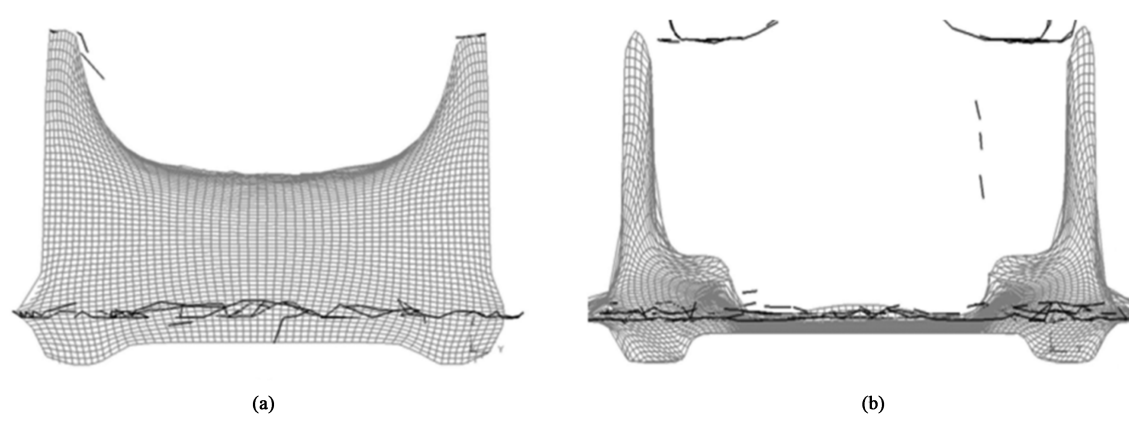


图 9 采用 8 °C 等温面时模拟得到的锻件流线图
(a) 预锻件 (b) 终锻件
Fig. 9 Simulated flow line diagrams of forgings using isothermal surface of 8 °C
(a) Pre-forgings (b) Final forgings

除，不影响锻件性能。采用其他等温面模拟时，流线分布情况与图 9 相似。

综合以上模拟结果，8 °C 等温面对应的模具成形锻件时，填充率和最大锻造压力最佳，而金属流线和应变分布无明显优劣，所以，以 8 °C 等温面为基础设计预锻模具。模具材料选用 H13 钢，在 3000 t 模锻压力机上成形该锻件，得到的锻件如图 10 所示。测量活塞裙锻件外形尺寸并与标准数模对比可

知，锻件各部位填充完全，且磁粉探伤未发现开裂缺陷，锻件表面质量良好。

3 结论

(1) 将热量的传递过程类比于材料的流动过程，从而采用等温面的形状设计预锻件形状，符合应变分布最均匀、材料流动最合理的原则。开发了



图 10 活塞裙锻件

Fig. 10 Piston skirt forgings

基于等温面的预锻模优化设计方法,通过常规通用软件 (ANSYS WORKBENCH、Geomagic Studio、UG) 对预锻模进行优化设计。

(2) 选取 3、5、8 和 10 °C 的等温面进行某柴油机活塞裙锻件的预锻模具设计,并对比了预锻与终锻的填充率、最大锻造压力和等效应变云图等有限元分析结果。结果表明,8 °C 等温面对应的模具成形锻件时,填充率和最大锻造压力更优。

(3) 以 8 °C 等温面为基础设计预锻模具并生产锻件,发现锻件各部位填充完全,且磁粉探伤未发现开裂缺陷,锻件表面质量良好,满足生产要求。

参考文献:

- [1] 张大伟. 复杂构件锻造预成形坯料设计综述 [J]. 精密成形工程, 2017, 9 (6): 143-156.
Zhang D W. Review on preform design of complex component in forging process [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9 (6): 143-156
- [2] 夏玉峰, 陈邦华, 杜婉婉, 等. 基于类等势场法和模型的锻件预制坯设计 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46 (3): 804-811.
Xia Y F, Chen B H, Du W W, et al. Pre-forming design in forging process based on equipotential field and model [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2015, 46 (3): 804-811.
- [3] Guan Y J, Bai X, Liu M J, et al. 3D preform design in forging process based on quasi-equipotential field and response surface methods [J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 468-473.
- [4] 刘目娟, 翟继强, 林军, 等. 基于类等势场和响应面法的复杂锻件预成形优化设计 [J]. 精密成形工程, 2017, 9 (5): 33-38.
Liu M J, Zhai J Q, Lin J, et al. Preform optimization of complex part based on quasi-equipotential field and response surface methods [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9 (5): 33-38.
- [5] 刘岳峰, 马新武, 赵昌德, 等. 基于拓扑优化的锻造预成形设计研究 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (6): 9-16.
Liu Y F, Ma X W, Zhao C D, et al. Research on forging preform design based on topology optimization [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (6): 9-16.
- [6] 陈邦华. 基于电场法的锻件预成形设计和研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
Chen B H. Study on Preform Design in Forging Process Base on Electric Field [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [7] Aghazadeh S, Gollo M H, Seyedkashi S, et al. Optimal preform design in forging of complex parts using equipotential lines method [J]. Iranian Journal of Manufacturing Engineering, 2015, 2 (2): 9-17.
- [8] Soleimanzadeh M, Fallah M M. Preform and process design of Ti-6Al-4V compressor blade using equipotential lines and 3D FE simulation [J]. International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, 2018, 11 (1): 43-50.
- [9] Chen H, Guan Y J, Liu M J, et al. Preform optimization of a brake drum part based on quasi-equipotential field and response surface methods [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 50 (2): 276-279.
- [10] Biba N, Vlasov A, Krivenko D, et al. Closed die forging preform shape design using isothermal surfaces method [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 47: 268-273.
- [11] Kumar A M, Parameshwaran R, Rajasekar R. Simulation of 1.2765 DIN steel billet and crack analysis during the forging process using DEFORM 3D software [J]. Materials Science & Engineering Technology, 2021, 52 (3): 332-338
- [12] Obiko J, Mwema F, Akinlabi E T. Strain rate-strain/stress relationship during isothermal forging: A Deform-3D FEM [J]. Engineering Solid Mechanics, 2019, 9 (3): 1-7.
- [13] Wang H, Wang D Y, Dong T J, et al. The research of aeroplane engine blade 3D point clouds processing [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 241-244: 2129-2132.
- [14] 任敏强, 吴绍峰, 段晓飞. 基于 ANSYS Workbench 齿轮稳态温度场有限元分析 [J]. 机械工程与自动化, 2020, 220 (3): 42-44.
Ren M Q, Wu S F, Duan X F. Finite element analysis of steady temperature field of gears based on ANSYS workbench [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2020, 220 (3): 42-44.
- [15] 成思源, 谢韶旺. Geomagic Studio 逆向工程技术及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
Cheng S Y, Xie S W. Geomagic Studio Reverse Engineering Technology and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [16] 管婧, 王广春, 赵国群. 飞边槽结构形式对模锻成形的影响 [J]. 热加工工艺, 2002, (5): 40-41.
Guan J, Wang G C, Zhao G Q. Influence of different type of flash on the open-die forging [J]. Hot Working Technology, 2002, (5): 40-41.