

车轮成形中预锻工艺及模具结构对终锻过程的影响

黄孝卿^{1,2}, 沈晓辉³, 刘智², 肖峰², 陈刚², 赵慧²

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室摩擦学研究所, 四川成都 610031; 2. 宝武集团马钢轨交材料科技有限公司, 安徽马鞍山 243010; 3. 安徽工业大学冶金工程学院, 安徽马鞍山 243032)

摘要:以铁路货车用HDSA车轮为研究对象,采用MSC Marc软件建立车轮模锻有限元模型,模拟分析原预锻工艺及模具条件下车轮模锻成形过程中金属的流动及变形力,研究预锻闭模间隙对终锻轮辋充满度及锻压力的影响,进而考察预锻模具结构尺寸对终锻的影响,优化闭模间隙及预锻模腔结构。结果表明:在原预锻工艺及模具结构尺寸下,终锻结束轮辋完全充满,轮辋型腔上下角部充满度较差;减小预锻闭模间隙可使预锻压力显著增大并使终锻时轮辋金属更多流向轮缘,轮辋上部的圆角充满度降低,限于预锻压力机的能力,原预锻模具结构下预锻闭模间隙的可调整空间小,通过调整闭模间隙改善终锻轮辋内圆角部位填充效果有限;减小预锻模具的轮辋型腔内径可显著减小预锻压力,利于提高终锻后轮辋上部圆角的充满度,且对终锻压力没有明显影响;增加预锻轮辋型腔的高度也能一定程度降低预锻压力,提高终锻后轮辋上部圆角的充满度,但会显著增大终锻压力。综合考虑,减小预锻模具轮辋型腔内径是优选方案,但还需考虑终锻模具轮辋型腔尺寸,两者不能差异过大。

关键词: 车轮; 模锻工艺; 预锻; 终锻; 模具设计

中图分类号: TG 316 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.23157



Effect of Pre-forging Process and Its Mold Structure on Final-forging Process in Railway Wheel Forming

HUANG Xiaoqing^{1,2}, SHEN Xiaohui³, LIU Zhi², XIAO Feng², CHEN Gang², ZHAO Hui²

(1. Tribology Research Institute, State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031; 2. Masteel Rail Transit Materials Technology Co., Ltd, Baowu Group, Maanshan 243010, China; 3. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: Taking HDSA wheels for railway freight cars as the research object, MSC Marc software was employed to establish a finite element model of wheel forging, and the metal flow and deformation force during the wheel forging process under the original pre-forging process and mold design were simulated and analyzed. The influence of pre-forging die gap on the filling condition and forging pressure of the final-forged wheel rim was studied, and the influence of pre-forging die structure size on the final-forging was furtherly investigated, and the pre-forging die gap and its die cavity structure were optimized. The results show that under the original pre-forging process and mold structure size, the wheel hub is completely filled after final-forging, and the filling degree of the upper and lower corners of the wheel rim cavity is poor. The reduction of pre-forging die gap can significantly increase the pre-forging load and make the metal of the wheel rim flow from more towards the rim during final-forging, resulting in a

收稿日期: 2023-10-19

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3202405); 马鞍山市项目(2021a120008)

作者简介: 黄孝卿(1992—), 男, 安徽宣城人, 工程师, 主要研究方向为铁路车制造。

通信作者: 沈晓辉(1974—), 男, 安徽巢湖人, 博士, 教授, 主要研究方向为金属材料成形。

引文格式: 黄孝卿, 沈晓辉, 刘智, 等. 车轮成形中预锻工艺及模具结构对终锻过程的影响[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(2): 151-157.

decrease in the filling degree of the upper corner of the wheel rim, which is limited by the capacity of the pre-forging press, The adjustable space for the pre-forging die gap is small under the original pre-forging die structure. By adjusting the die gap, the effect of improving the filling of the inner corner of the final-forging wheel rim is limited. Reducing the inner diameter of the rim cavity of the pre-forging die can significantly reduce the pre-forging load, which is beneficial for improving the filling degree of the upper corner of the rim after final-forging, and has no significant effect on the final-forging load. Increasing the height of the pre-forged rim cavity can also reduce the pre-forging load to a certain extent and improve the filling degree of the upper corner of the rim after final forging, but it will significantly increase the final-forging load. Taking all factors into consideration, reducing the inner diameter of the pre-forging die rim cavity is the preferred solution, but it is also necessary to consider the size of the final-forging die rim cavity, and the difference between the two should not be too large.

Keywords: railway wheel; die-forging process; pre-forging; final-forging; die design

车轮是铁路列车走行装置中的重要部件,热成形过程包括模锻成形、轮辋轧制和辐板压弯3个工序。模锻成形是铁路车轮成形的关键步骤,包括预锻和终锻2个工步。其中预锻决定轮辋和轮毂的金属分配,预锻件轮辋充满度对终锻件的形状、尺寸及终锻压力有重要影响,进而对后续轧制变形产生影响^[1-4]。预锻件的形状、尺寸能否达到设计要求与压力机的能力密切相关,在压力机能力一定的条件下,如何优化预锻模具结构和工艺参数是工程实践中需要解决的重要问题。因此,开展车轮成形过程中预锻工艺及模具结构对终锻过程的影响对于提升车轮质量具有重要意义。

研究车轮模锻成形的的方法主要有工业试验和数值仿真,车轮造型复杂,热成形环节变形控制难度大,模具技术要求高,数值仿真由于具有便捷性和低成本的特点,在车轮锻造成形研究中得到广泛应用。车轮模锻成形属于三维变形问题,除在研究模锻偏心问题时需进行三维建模外^[5],一般情况下车轮模锻成形过程可视为满足轴对称变形条件,采用轴对称模型可大大提升计算速度。学者们常基于轴对称建模研究车轮模锻成形过程的金属流动、变形分布及其影响因素^[6-11],但多是在压力机能力较为充分的条件下,从金属流动和模腔填充角度优化车轮模锻成形工艺参数,对压力机能力受限情况下车轮模锻成形过程的关注较少。齿轮坯的多工步成形工艺与车轮模锻工艺有一定的相似性,其预锻方案及模具设计得到业界重视^[12-15]。储文平等^[13]针对机车齿轮坯的轮毂轮辋填充不满、成形力较大等问题,模拟分析齿轮锻件的成形过程,结果表明优化毛坯形状可在保证锻件成形饱满的前提下将成形力降低31.76%,有利于提高模具寿命;李永亮等^[16]结合数值仿真和多参数化的评价机制,分析闭式热模锻成

形工艺对热锻成形质量的影响,综合考虑锻件成形质量和模具使用寿命来优化工艺方案。

与齿轮坯的锻造工艺相比,车轮锻件还需进一步轧制扩径,车轮锻件的形状和充满度与齿轮坯差异较大,车轮预锻对终锻成形的影响较大。HDSA车轮为国内用量最大的1种铁路货运车轮,文中以HDSA车轮为研究对象,借鉴齿轮坯锻件成形质量的研究思路,综合考虑预锻工艺与模具结构参数,使用有限元法分析HDSA车轮模锻过程的金属变形规律及预锻模腔结构尺寸对终锻过程的影响,优化HDSA车轮预锻模具与工艺,以期在实际工程生产中进一步提高HDSA车轮成形质量提供理论参考。

1 有限元模型的建立

选用HDSA车轮为研究对象,模锻成形生产线由2台31 500 kN压力机、1台63 000 kN压力机和1台轧机组成,相较于马钢交材2号线90 000 kN压力机及太原重工钢轮生产线的60 000 kN+10 000 kN压力机^[17],该生产线压力机的能力偏小。HDSA车轮成形过程为:将直径380 mm的圆坯坯料加热至1 200 ℃后,经1#31 500 kN压力机进行预锻,实现轮毂和轮辋金属的预分配;再经63 000 kN压力机终锻,完成轮毂、辐板、轮辋的基本成形,得到预成形坯;成形坯经车轮立式轧机轧制,实现辐板的延展和轮辋、踏面及轮缘的成形,得到轧制轮;轧制轮经2#31 500 kN压力机完成压弯冲孔得到粗制毛轮。预锻和终锻模具型腔轮廓形状如图1。原预锻模具尺寸:上模轮辋型腔内径 $D_1=634.0$ mm,下模第二凸台直径 $D_2=610.0$ mm,上模轮辋型腔宽度 $B=68.0$ mm,下模第一凸台高度 $H_1=15.0$ mm,下模第二凸台高度 $H_2=30.0$ mm,上模型腔辐板距 $H_3=30.3$ mm,预锻闭模间隙 $S_1=12.0$ mm,终锻闭模间隙 $S_2=8.0$ mm,终锻

后辐板厚度 35.2 mm。

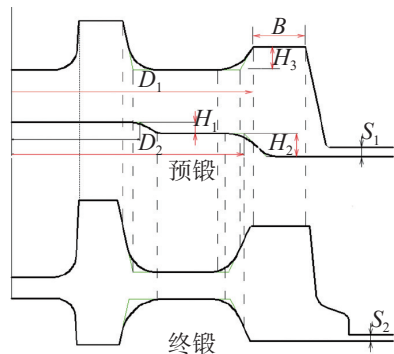


图1 HDSA 车轮预锻和终锻模腔形状

Fig. 1 Pre-forging and final-forging die cavities of HDSA wheel

针对 HDSA 车轮预成形和成形模锻过程, 使用 MSC.Marc 有限元分析软件建立轴对称模型, 结果如图 2。

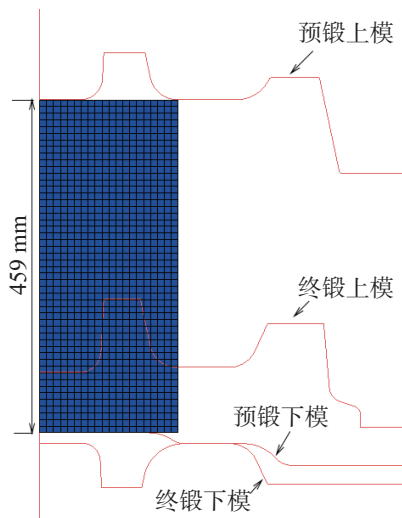


图2 HDSA 车轮模锻有限元模型

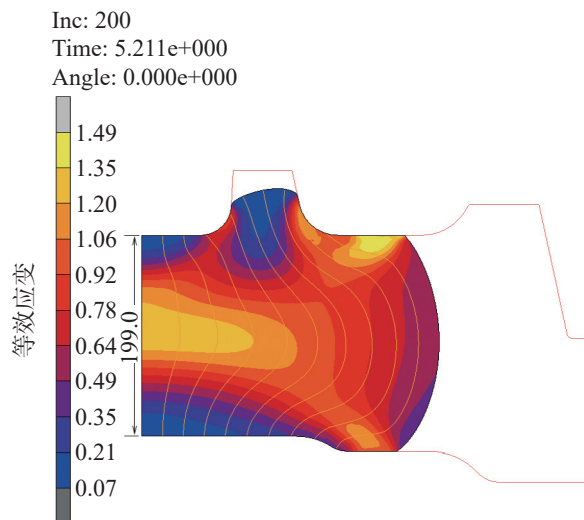
Fig. 2 FE model of HDSA wheel forging

坯料直径 380 mm、高度 459 mm。对于模具型腔使用刚性面描述, 对于模具接触的摩擦类型采用剪切摩擦模型, 摩擦因子 0.7。设坯料初始温度 1 200 °C, 模腔表面温度为 400 °C, 模腔表面换热系数为 $10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$ [3], 压力机压下速度 50 mm/s。车轮材质为 CL60 钢, 变形抗力模型参照文献 [18], 热物性参数选择 Marc 材料库中 C60 的数据。

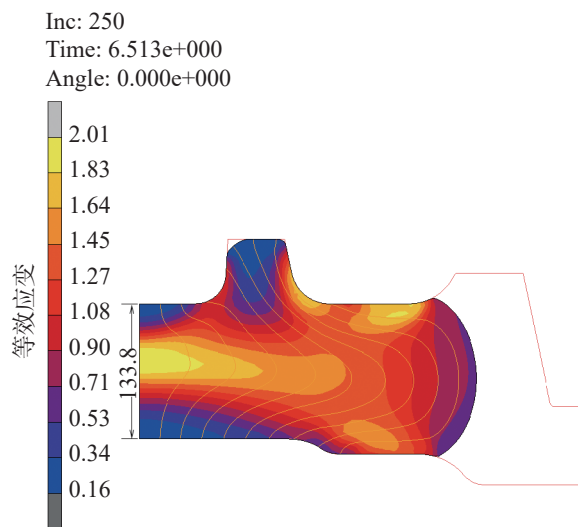
2 模拟结果与分析

2.1 原工艺过程金属变形分析

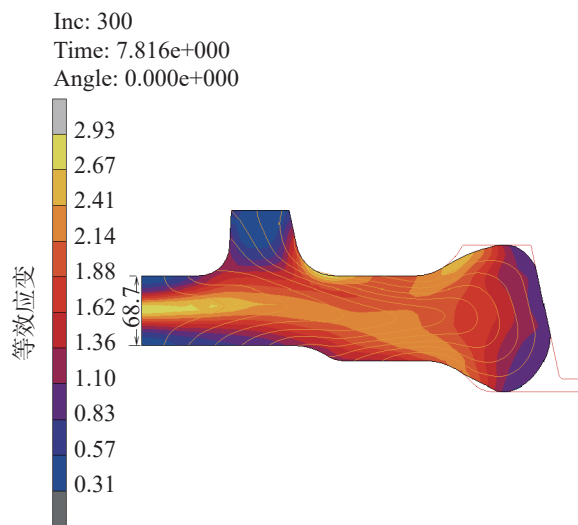
利用前述的模具结构尺寸和工艺参数对车轮模锻成形过程进行仿真, 分析金属的流动及变形力。预锻过程中金属在模腔中的填充情况及等效塑性应变分布如图 3。



(a) 高度199.0 mm时



(b) 高度133.8 mm时



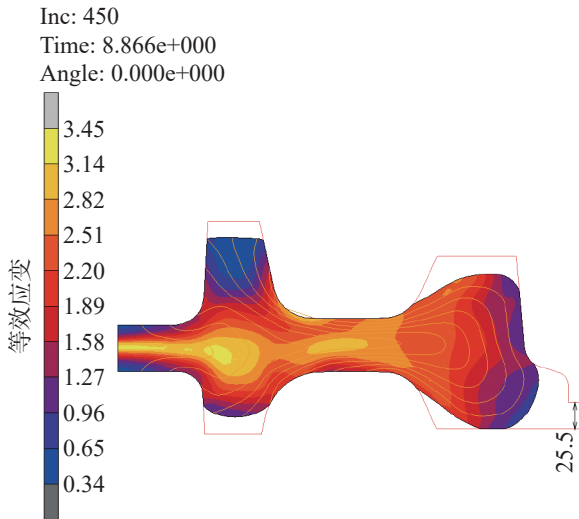
(c) 预锻结束时

图3 预锻过程金属流动及塑性等效应变分布

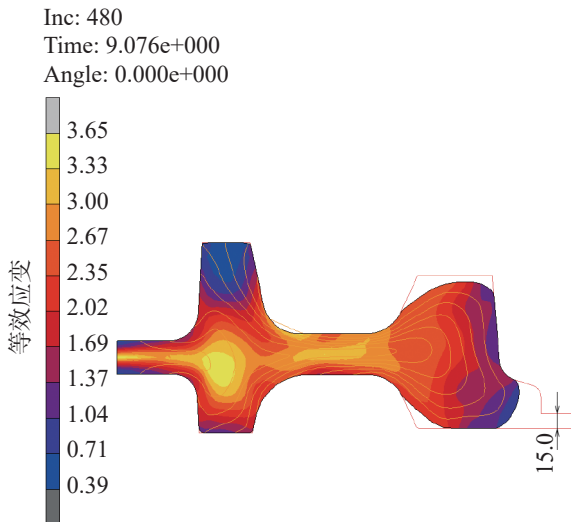
Fig. 3 Metal flow and effective plastic strain distribution during pre-forging

由图 3 可看出: 预锻过程中, 随着上模压下, 坯料逐渐墩粗, 在填充上模轮毂型腔的同时, 金属逐渐流向轮辋部位; 坯料高度墩粗到 133.8 mm 时, 上模轮毂型腔基本充满; 预锻结束时轮辋型腔接近充满, 最大等效应变位于轮毂孔连接处心部, 达 2.93; 辐板和轮辋部位的金属变形比较充分, 等效应变在 2.00 左右; 轮辋部位金属上模型腔底部及模腔外侧壁与轮辋金属接触充分。

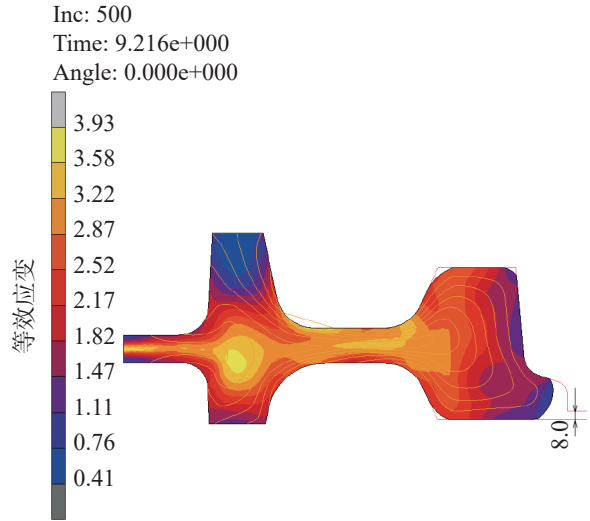
终锻过程金属在模腔中的填充情况及累积等效应变分布如图 4。由图 4 可看出: 模具间隙 25.5 mm 时, 轮毂下部型腔填充 1/2 以上, 轮辋外径面与模壁充分接触; 模具间隙 15.0 mm 时, 轮毂型腔完全充满, 轮辋上部模腔顶面尚未接触, 上模继续下压, 轮毂部位金属被挤向轮辋; 闭模间隙 8.0 mm 时, 轮辋接近充满。



(a) 模具间隙25.5 mm时



(b) 模具间隙15.0 mm时



(c) 闭模间隙8.0 mm时

图 4 终锻过程金属流动及塑性等效应变分布

Fig. 4 Metal flow and effective plastic strain distribution during final-forging

图 5 为预锻和终锻过程的压力曲线。

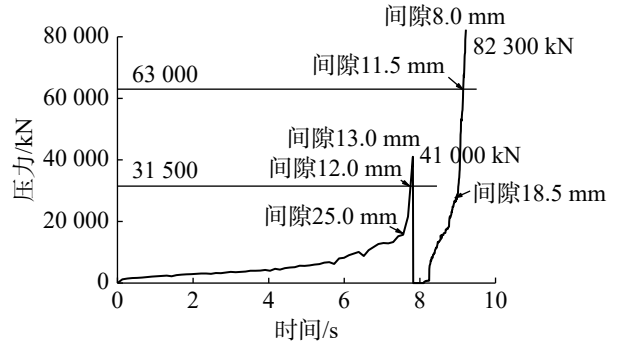


图 5 预锻和终锻过程的压力变化曲线

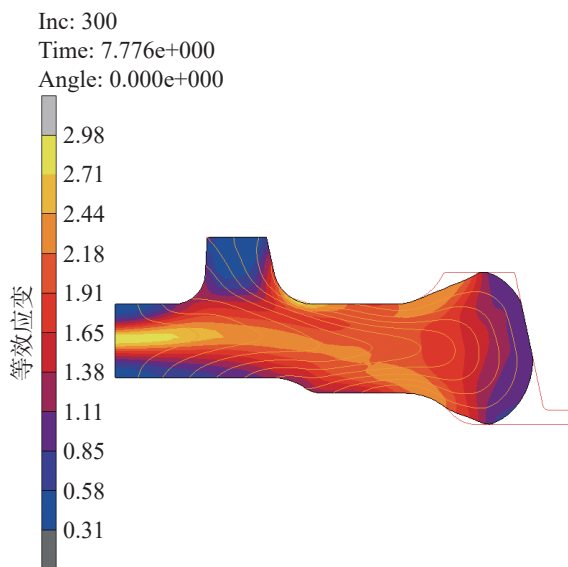
Fig. 5 Force variation curves during pre-forging and final-forging processes

由图 5 可看出: 预锻过程中, 闭模间隙达 25.0 mm 时压力达 15 700 kN, 随后压力快速增加; 闭模间隙达到设定值 12.0 mm 时, 压力增大至 41 000 kN, 超过 1#压力机 31 500 kN 的能力; 闭模间隙 13.0 mm 时, 压力达到 31 500 kN。可以预见, 按照原有工艺设计, 预锻最小闭模间隙为 13.0 mm, 达不到设定值 12.0 mm。终锻过程中, 闭模间隙达 18.5 mm 时, 压力达 27 600 kN, 随后压力快速上升, 按照设定的闭模间隙 8.0 mm, 压力达 82 300 kN, 超过压力机 63 000 kN 的能力极限; 终锻闭模间隙达 11.5 mm 时, 压力达 63 000 kN。按照原有模具设计, 终锻闭模的最小间隙在 11.0 mm 左右。

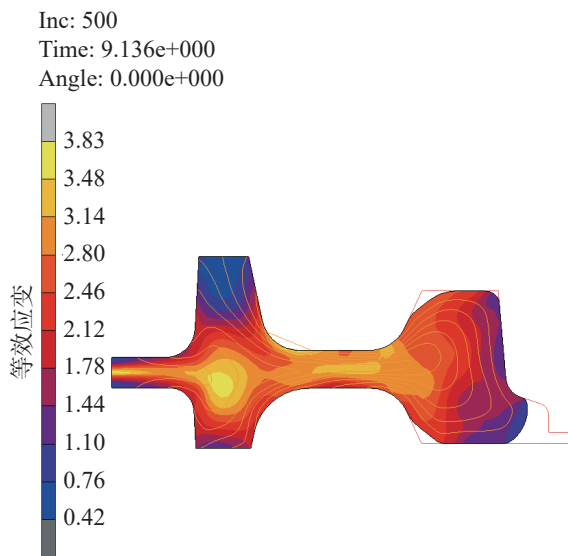
综上分析, 限于压力机的能力, 按照前述预锻模具结构尺寸及工艺, 实际生产中预锻和终锻后坯料厚度稍大于设计厚度。

按照前述模具结构参数及工艺进行生产试验,

对预锻和终锻闭模间隙进行实测,发现在压力机达到能力极限时,预锻闭模间隙为 13.0 mm、终锻闭模间隙为 11.0 mm。按照实测闭模间隙进行数值仿真,结果如图 6。由图 6 可看出:终锻结束,轮毂完全充满,轮辋型腔上、下角部充满度较差,此时辐板厚度为 38.2 mm,较设计厚度偏大约 2.0 mm,原工艺需改进,为此对预锻闭模间隙及模具结构尺寸对终锻的影响进行进一步分析。



(a) 预锻



(b) 终锻

图6 实测闭模间隙时的模腔填充及等效应变分布

Fig. 6 Die filling and effective strain distribution by measured closed die gaps

2.2 预锻闭模间隙对终锻过程的影响

在预锻模具结构尺寸不变的前提下,为调整预锻压力和模腔填充效果,通常做法是通过调整预锻闭模间隙来控制预锻金属在轮毂和轮辋部位的分配

比例。预锻闭模间隙减小,更多的金属被挤向轮辋,分配到轮辋的金属增多;反之,分配到轮辋的金属减少。在原预锻模具基础上,设置预锻闭模间隙为 9.0~14.0 mm,终锻闭模间隙为 11.0 mm,仿真分析预锻闭模间隙对终锻的影响,模锻过程的压力变化如图 7。由图 7 可看出:预锻闭模间隙由 14.0 mm 减至 9.0 mm,压力由 26 900 kN 增至 49 100 kN,随闭模间隙的减小,预锻压力急剧增大,模具间隙小于 13.0 mm 后,预锻压力即超过预锻压力机的能力极限;终锻闭模间隙相同,最大压力变化不大。

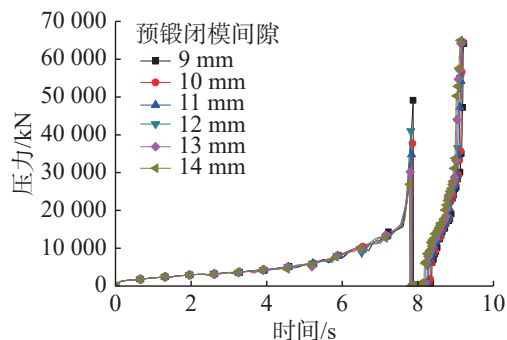


图7 预锻闭模间隙对模锻压力的影响

Fig. 7 Effect of pre-forging closed die gap on force

图 8 为不同闭模间隙预锻后的工件形状,图中数字表示闭模间隙,单位 mm。图 9 同。由图 8 可看出:预锻闭模间隙在 9~14 mm 变化范围内,预锻轮毂型腔均填充较好,上模轮辋型腔外侧壁贴合;随预锻闭模间隙减小,更多金属被挤向轮辋,轮辋部位的金属量增加,预锻后轮辋形状总体更饱满,但轮辋不同部位的金属增量不同,轮缘部位的最大。

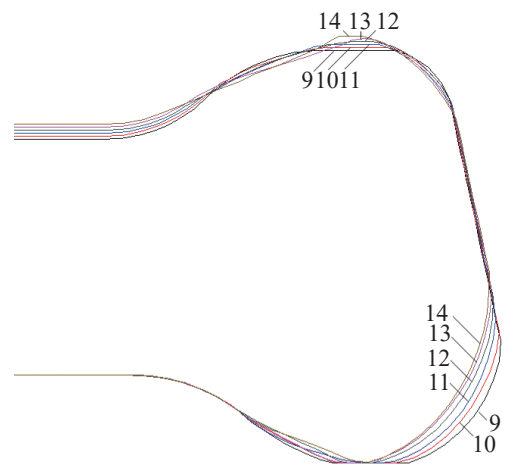


图8 预锻闭模间隙对预锻后工件形状的影响

Fig. 8 Effect of closed die gap on workpiece shape after pre-forging

图 9 为预锻时闭模间隙对终锻工件形状的影响。由图 9 可看出:随着预锻闭模间隙的减小,终锻结束后轮缘长度明显增加,但轮辋上端内圆角和外圆角

充满度有所减小, 轮辋下端内圆角充满度稍有减小。也就是说, 在现有预锻模具结构尺寸下, 减小预锻闭模间隙, 尽管分配至轮辋的金属量增加, 但轮辋上部增加的金属占比减小, 即轮辋部位增加的金属在终锻过程中更易向轮缘方向流动, 轮辋上部内圆角和外圆角充满度反而有所降低。预锻闭模间隙的变化对终锻后轮辋内圆角填充效果的改善有限, 且预锻模具间隙的实际调整范围受预锻压力机的能力限制较大, 需对预锻模具结构进行优化。

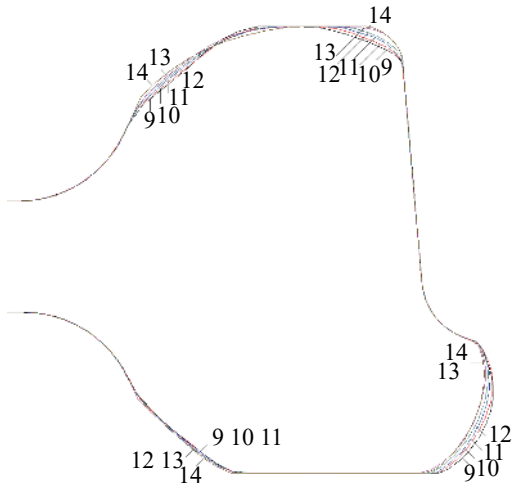


图9 预锻闭模间隙对终锻后工件形状的影响

Fig. 9 Effect of pre-forging closed die gap on workpiece shape after final-forging

2.3 预锻模具结构尺寸对终锻的影响

预锻模具结构的关键尺寸(图1)主要有上模轮辋型腔内径 D_1 、上模轮辋型腔底部宽度 B 、上模轮辋型腔深度 H_3 ; 下模第二凸台直径 D_2 、下模第一凸台高度 H_1 、第二凸台高度 H_2 。增大预锻轮辋型腔部位的体积, 减小预锻过程中的金属流动阻力, 可减小预锻压力。表1为4种预锻模具结构尺寸方案。

表1 预锻模具结构参数

Tab. 1 Die structure parameters of pre-forging

方案	D_1 / mm	D_2 / mm	B / mm	H_1 / mm	H_2 / mm	H_3 / mm	备注
A	634	610	68	15	30	30.3	基准方案
B	604	580	83	15	30	30.3	增加轮辋型腔宽度
C	634	610	68	20	25	30.3	增加辐板厚度
D	634	610	68	15	30	40.3	增加轮辋型腔高度

表1中: A为原设计方案, 作为基准方案; 方案B, 预锻模具轮辋型腔内径减小30 mm, 外径不变, 增大轮辋型腔宽度; 方案C, 辐板处厚度增加5 mm; 方案D, 轮辋型腔的高度增加10 mm。对4种方案

下预锻工件形状、终锻轮辋形状及成形力进行仿真分析, 结果如图10~11。模型中预锻闭模间隙11.0 mm, 终锻模具相同且闭模间隙为11.0 mm。

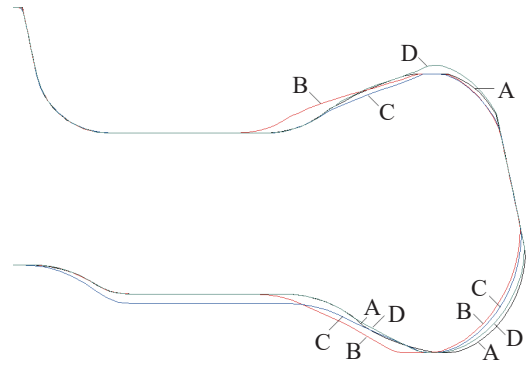


图10 4种方案预锻后的工件形状

Fig. 10 Workpiece shape after pre-forging of 4 schemes

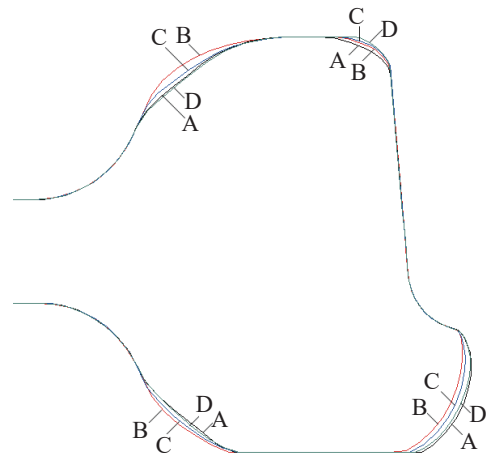


图11 预锻模具结构尺寸对终锻后轮辋形状的影响

Fig. 11 Effect of die structure parameters of pre-forging on the rim shape after final-forging

由图10可看出: 4种方案预锻后轮辋轮廓差异明显, C方案增加辐板厚度, 相当于减小轮辋金属分配; B方案由于增加轮辋型腔的宽度, 轮缘部位挤出的金属最少; D方案由于增加轮辋型腔的深度, 轮缘处挤出的金属稍有减少。由此表明: B, D方案没有改变轮辋金属的分配量, 但均增大了预锻轮辋型腔的体积, 降低了预锻末期模腔侧壁对金属径向流动的抑制作用。

由图11可见: 预锻件的轮辋形状尺寸变化对终锻过程轮辋角部填充的影响明显, B, C, D 3种方案不同程度增加轮辋角部位的充满度; B方案对轮辋内径面上、下圆角充满度改善效果最大、C方案次之、D方案仅增加轮辋上部外圆角的充满度。随着轮辋圆角充满度的提高, 轮缘长度相应减小。

预锻和终锻工步的最大压力如表2。由表2可见: 基准方案A的预锻最大压力为34 800 kN, 大于

预锻压力机 31 500 kN 的能力; 方案 B, C, D 不同程度减小了预锻压力。与方案 A 相比, 方案 B 作用最明显, 预锻压力降低 7 800 kN; 方案 D 次之, 降低 3 100 kN; 方案 C 降低 1 200 kN。在预锻压力机能力一定的条件下, 适当减小预锻轮辋型腔内径可显著减小预锻压力, 为预锻的闭模间隙调整提供空间。但预锻模具修改之后, 在相同闭模间隙条件下, 终锻过程中轮辋型腔的充满度不同程度增加, 相应增加终锻压力, 3 种方案中 B 方案对终锻压力的影响最小。由此表明, 减小预锻模具轮辋型腔内径是优选方案, 但还需考虑终锻模具轮辋型腔尺寸, 两者差异不能过大。

表 2 4 种方案预锻及终锻的最大压力

Tab. 2 Maximum forces of pre-forging and final-forging for 4 schemes

方案	预锻压力/kN	终锻压力/kN
A	34 800	64 300
B	27 000	65 100
C	33 600	67 600
D	31 700	69 100

3 结论

采用 MSC.Marc 有限元分析软件建立 HDSA 车轮的预锻和终锻仿真模型, 对原工艺车轮成形过程中的金属流动及变形力进行分析, 探讨预锻闭模间隙及预锻模具结构对终锻的影响, 在预锻压力机能力受限的情况下优化预锻模具结构和工艺参数。

1) 预锻闭模间隙减小, 轮辋部位金属分配量增加, 但流向轮缘部位金属量增加, 终锻时轮辋金属更多流向轮缘, 轮辋上部的圆角充满度降低。在原预锻模具基础上, 通过调整预锻闭模改善间隙终锻轮辋内圆角部位填充效果有限。另外由于预锻压力机的能力限制, 原预锻模具条件下预锻闭模间隙的可调整空间很小。

2) 减小预锻模具的轮辋型腔内径, 可显著减小预锻压力, 有利于终锻后轮辋上部圆角的充满度的提高, 且对终锻压力没有明显影响。在原设计基础上, 预锻模具轮辋型腔内径减小 30 mm, 可满足 HDSA 车轮的模锻成形要求。增加预锻轮辋型腔的高度也能在一定程度上降低预锻压力和提高终锻后轮辋上部圆角的充满度, 但会增大终锻压力。

参考文献:

[1] SHEN X H, YAN J, AN T, et al. Analysis of railway wheel

rolling process based on three-dimensional simulation[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2014, 72:179-191.

[2] 丁彬花, 沈晓辉, 张磊, 等. 车轮立式轧制过程中辐板拉薄现象分析[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(1):10-14.

[3] SHEN X H, CHEN W, YAN J, et al. Experiment and simulation of metal flow in multi-stage forming process of railway wheel [J]. *J Iron Steel Res Int*, 2015, 22:21-29.

[4] 肖峰, 沈晓辉, 赵慧, 等. HDSA 车轮立式轧制变形分析[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(4):314-319.

[5] KUSHNAREV A V, BOGATOV A A, KIRICHKOV A A, et al. Production of high-quality railroad wheels[J]. *Steel in Translation*, 2010, 40(3):268-272.

[6] WARD M J, MILLER B C, DAVEY K. Simulation of a multi-stage railway wheel and tyre forming process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, 80/81(3):206-212.

[7] 郭晓霞. 火车车轮成形工艺研究及有限元模拟[J]. *锻压技术*, 2003, 28(5):1-4.

[8] 陈慧琴, 郭晓霞, 刘建生, 等. 快速车轮成形过程的刚塑性有限元数值模拟[J]. *太原重型机械学院学报*, 2003, 24(4):312-315.

[9] 沈晓辉, 安涛, 闫军. 840 车轮预成形过程的有限元分析[J]. *钢铁研究学报*, 2005, 17(1):30-33.

[10] 李翔, 许章泽, 安涛, 等. 薄轮辋、深盆形车轮的热成形工艺[J]. *钢铁研究学报*, 2007, 19(11):40-42.

[11] 许章泽, 李翔, 张磊, 等. 火车车轮热成形金属流动规律数值模拟[J]. *锻压技术*, 2008, 33(3):141-143.

[12] 林雅杰, 仲太生, 丁武学. 车用齿轮毛坯多工位精密热模锻工艺分析及模具设计[J]. *锻压装备与制造*, 2019, 54(3):82-87.

[13] 储文平, 张琳, 王雷刚. 基于有限元模拟的机车齿轮零件的毛坯形状优化[J]. *锻压技术*, 2014, 39(5):13-18.

[14] 赵兴波, 丁武学, 孙宇, 等. 齿轮坯预锻最佳工艺参数研究[J]. *机械设计与制造*, 2019(S1):61-63,68.

[15] NYTRA M, KUBIK P, PETRUSKA J, et al. A fully coupled thermomechanical damage analysis of hot closed die forging using finite element modeling[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, 29:8236-8246.

[16] 李永亮, 梁强, 贾艳艳. 基于 TOPSIS 和 CRITIC 的齿轮坯闭式热模锻工艺方案评估[J/OL]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, [2023-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1155.N.20230510.1037.002.html>.

[17] 刘吉远, 陈雷. 铁路货车轮轴技术概论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.

[18] 张星联, 王广科, 江波, 等. CL60 车轮钢流变应力模型[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2009, 26(4):357-359.

责任编辑: 何莉