

重型卡车前轴成形全过程的有限元仿真及工艺优化

左 磊¹, 张 伟²

(1. 重庆市工业学校 机电工程系, 重庆 400043; 2. 重庆市轻工业学校 电子与信息系, 重庆 400709)

摘要: 为解决某重型卡车前轴锻件的折叠和填充不满等缺陷问题, 对某重型卡车前轴成形全过程进行有限元数值仿真及工艺优化研究。基于经验数据和锻模设计理论, 设计了各道次的模具并构建了相应的有限元模型。结果表明: 预锻工序中, 坯料两端区域首先与模具接触从而使材料向中心区域流动, 中心区域工字梁区域的坯料被挤长发生失稳, 进而材料向上或者向下流动而发生弯曲, 使得材料发生偏移, 流动至飞边区域, 导致中间工字梁区域缺失材料, 进而造成工字梁区域发生填充不满缺陷。通过减小坯料工字梁区域的长度, 使得中间工字梁区域在与模具接触前不发生明显的弯曲变形, 可避免填充不满缺陷。由于坯料与辊锻模之间存在相对滑移, 使得坯料辊锻后不关于中心区域对称, 在第 2 道次辊锻时出现薄边现象, 进而使得后续模锻工序中出现折叠缺陷。通过控制坯料端面与辊中心的距离来抵消辊锻过程中辊与坯料之间滑移导致的辊锻位置误差, 可以避免薄边现象出现, 进而避免折叠缺陷。使用优化后的工艺参数进行实际生产, 前轴锻件的表面质量良好, 无折叠和填充不满等缺陷。

关键词: 重型卡车前轴; 模锻; 辊锻; 折叠; 填充不满

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.11.008

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 11-0055-07

Finite element simulation of whole process and process optimization on front axle forming for heavy truck

Zuo Lei¹, Zhang Wei²

(1. Mechanical and Electrical Engineering Department, Chongqing Industrial School, Chongqing 400043, China;

2. Electronic and Information Department, Chongqing Light Industry School, Chongqing 400709, China)

Abstract: In order to solve the defects such as folding and insufficient filling of front axle forgings for heavy truck, the whole forming process of front axle for heavy truck was studied by finite element numerical simulation and process optimization. Then, based on the empirical data and forging die design theory, the mold of each pass was designed, and the corresponding finite element model was constructed. The results show that in the pre-forging step, the regions at both ends of billet first contact with the mold so that the material flows to the central region, and the billet of I-beam in the central region is extruded and unstable. Furthermore, the material flows upward or downward and bends, causing the material offsets and flows to the flash region, resulting in the lack of material in the middle I-beam region, which in turn causes the insufficient filling defect of I-beam region. However, by reducing the length of the billet I-beam region, there is no obvious bending deformation in the middle I-beam region before contacting with the mold, and the insufficient filling defect is avoided. Due to the relative slip between billet and roll forging mold, the billet is not symmetrical at the central region after roll forging, and the thin edge phenomenon occurs during the second pass of roll forging, resulting in folding defects in the subsequent die forging step. By controlling the distance between the end face of billet and the roll center to offset the roll forging position error caused by the slip between roll and billet in the roll forging process, the thin edge phenomenon and the folding defect are avoided. Thus, using the optimized process parameters for actual production, the surface quality of the front axle forgings is good, and there is no defects such as folding and insufficient filling.

Key words: front axle of heavy truck; die forging; roll forging; folding; insufficient filling

随着中国制造的崛起, 国产重型卡车产量日益

增加。前轴作为重型卡车的关键承载零部件之一, 其服役条件较为苛刻, 因而对其质量要求十分严格^[1]。前轴的腹板薄筋条窄而高, 是一种典型的长轴类难成形复杂零件^[2-3]。国外对于前轴的锻造成形研究起步较早, 在 20 世纪初, 日本、德国已经使

收稿日期: 2021-11-05; 修订日期: 2022-02-08

基金项目: 2019 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN201904001)

作者简介: 左 磊 (1972-), 男, 本科, 高级讲师

E-mail: 406666051@qq.com

用 120 MN 压力机进行锻造成形。为了降低成形设备吨位,目前国内外主流的前轴制造一般采用辊锻制坯、压弯、模锻的生产工艺,这种工艺效率高、质量稳定,适合大批量生产^[3-4]。20 世纪末,国内自主研发出了汽车前轴辊锻、模锻复合成形生产工艺^[5-6],但与国外相比成形精度上仍有一定差距。为了提高成形精度、降低成形载荷,近年来国内许多学者对前轴塑性成形工艺进行了研究。例如,李如雄等^[7]利用数值仿真分析了前轴辊锻成形过程,为深入研究前轴成形工艺打下了基础。李朝亮等^[8]对某前轴成形工艺进行了改进,降低了成形载荷、提升了材料利用率。魏科等^[9-10]利用数值仿真和正交实验对工艺参数进行优化,提高了成形精度、降低了成形载荷。文琨等^[11]对前轴辊锻 3 道次进行了仿真,分析了坯料变化规律,提高了模具设计水平。这些学者的研究成果大多仅能适用某一型号的前轴成形,较少分析折叠和填充不满缺陷形成的原因。因此,尽管国内外对前轴成形工艺进行了大量的研究,然而在前轴实际生产中仍然可能出现折叠、填充不满等缺陷。

本文为了分析某重型卡车前轴辊锻、预锻、终锻成形工艺可能存在的问题,运用有限元软件分析了某重型卡车前轴成形的全过程。此外,还分析了这些缺陷可能产生的原因及解决方法。将数值仿真结果用于指导实践,提高了前轴成形精度、避免了锻造缺陷的产生。

1 前轴成形工艺设计

1.1 前轴零件结构

图 1 为某重型卡车前轴零件图。前轴零件从左至中心轴可大致分为拳头、前臂、弹簧板、工字梁 4 部分,这 4 个部分具有不同的截面特征。首先确定成形工序为:下料→加热→辊锻→弯曲→预锻→终锻。坯料材质为 42CrMo 钢,加热温度为 1180 ℃。

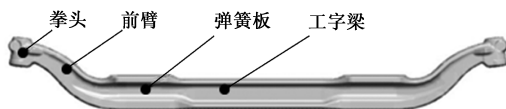


图 1 某重型卡车前轴零件图

Fig. 1 Front axle part diagram of a heavy truck

锻件质量约为 120 kg,锻件最大的投影面积约为 550000 mm²,根据传统计算方法初步计算成形载荷为 98000~137200 kN。

1.2 成形方案设计

重型卡车前轴成形工序为:下料→加热→第 1 道次辊锻→第 2 道次辊锻→弯曲→预锻→终锻,其模型如图 2 所示,其中 d 为预锻坯料中间部分的长度。在辊锻成形过程中,坯料主要受到辊径方向的压缩载荷,坯料受到压缩而在长度方向上延长,使横截面面积减小。根据经验,延长系数大约为 1.2~1.5。根据锻件最大截面处的面积进行计算,可初步确认坯料的尺寸为 $\Phi 113.68 \text{ mm} \times 1555 \text{ mm}$ (质量约为 124 kg)。常用辊锻道次 n 的计算公式如式 (1) 所示^[1]。

$$n = \ln \mu_{\max} / \ln \mu_{\text{mean}} \quad (1)$$

式中: μ_{\max} 为辊锻截面最大延伸系数; μ_{mean} 为辊锻平均延伸系数。

经过计算并取整可得辊锻道次为 2,即需要经过两道次辊锻。根据截面积相等的设计原则,设计相应的坯料和模具如图 2 和图 3 所示。

第 1 道次和第 2 道次的辊锻模均为对称模具,辊锻中心距为 960 mm,起辊点(坯料端面距开始变形处的距离)为 90 mm,两次辊锻之间旋转 90°。旋转角度开口为 110°,半径为 430 mm,从接触到垂直轮转过长度为 69 mm,因此,需要将坯料移动约 21 mm。此外,第 2 道次辊锻开始半径为 425 mm,移动距离为 68 mm。第 1 道次辊锻后,坯料在轴向旋转 90°后转入第 2 道次进行辊锻,如此辊锻后的坯料形状能够呈现出如图 3b 所示的形状。由于该锻件形状比较复杂,且存在高筋薄壁结构,因此,选用上、下模均凹陷的飞边槽结构。

2 有限元模型建立

根据第 1 章节的工序和模具设计,在有限元软件中构建相应的有限元模型如图 4 所示。其中,较为重要的 2 个参数为第 1 和第 2 道次坯料右端面至辊锻模中心的水平距离,分别为 21 和 68 mm。该距离若取值不合适,可能会导致坯料辊锻后不对称。42CrMo 钢在有限元软件 Forge NxT 1.1 中对应的材料为 42CrMo4 钢,其本构方程如式 (2) 所示。

$$\sigma = A \exp(m_1 T) \varepsilon^{m_2} \exp\left(\frac{m_4}{\dot{\varepsilon}}\right) \dot{\varepsilon}^{m_3} \quad (2)$$

式中: σ 为真实应力; ε 为真实应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; T 为材料变形温度, K; A 、 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 为材料参数。

本文中, $A = 1872.0667$, $m_1 = -0.00289$, $m_2 =$

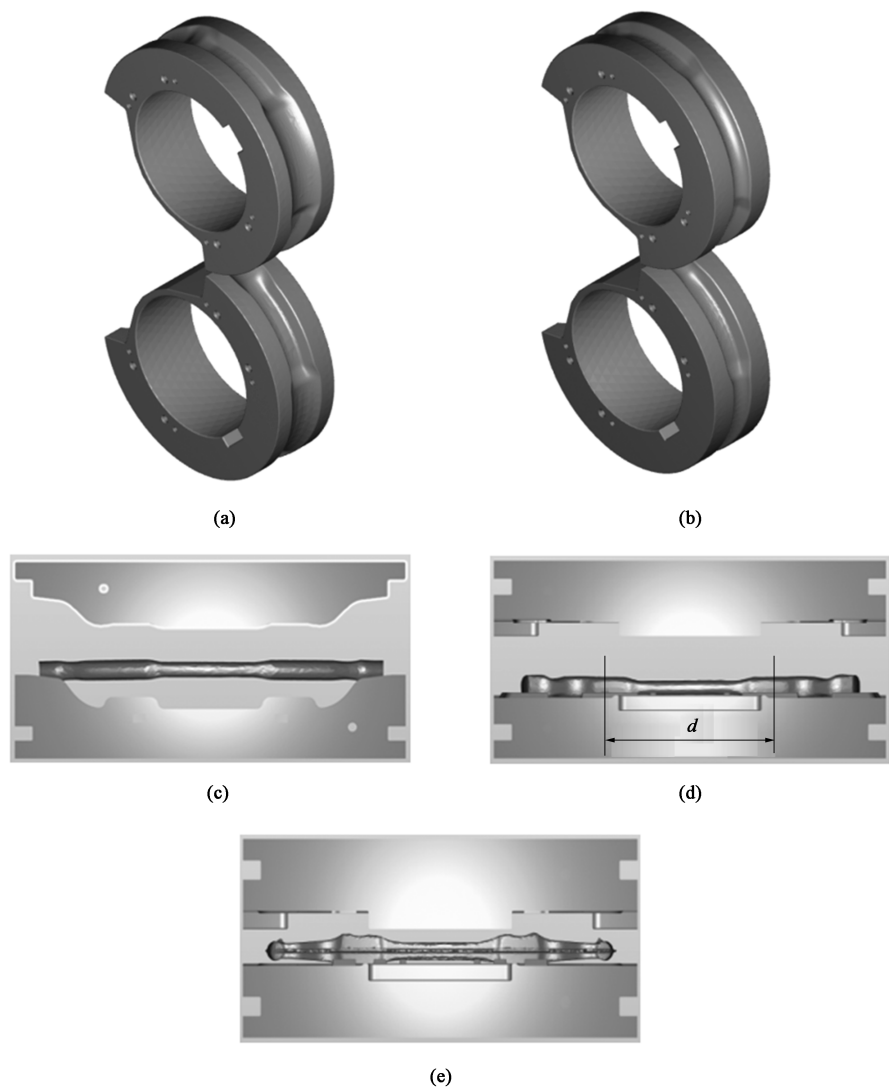


图 2 重型卡车前轴各成形工序
(a) 第 1 道次辊锻 (b) 第 2 道次辊锻 (c) 弯曲 (d) 预锻 (e) 终锻

Fig. 2 Each forming process for front axle of heavy truck
(a) The first pass of roll forging (b) The second pass of roll forging (c) Bending (d) Pre-forging (e) Final forging

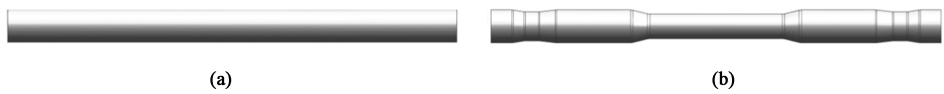


图 3 初始坯料 (a) 和第 2 道次辊锻结束后坯料 (b) 的形状
Fig. 3 Shapes of initial billet (a) and billet after the second pass of roll forging (b)

-0.1123 , $m_3 = 0.14368$, $m_4 = -0.04879$ 。该本构方程称为 Hansel-Spittel 本构方程, 被广泛应用于粘塑性材料^[12]。

在有限元模型中, 软件能够自动对模具型腔曲率变化较大的区域进行网格加密, 这可以提高计算精度。

为了精确仿真成形过程, 结合经验在塑性成

形仿真软件 Forge 中设置了如表 1 所示的仿真参数。如表 1 所示, 不同成形工步的仿真参数略有不同, 在软件中自动根据实际工况推荐出比较符合实际的摩擦因数、传热系数等, 摩擦模型考虑使用混合摩擦模型, 即低应力区域为库伦摩擦模型、高应力区域为剪切摩擦模型。此外, 坯料和模具与空气传热的传热系数均为 $10 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 。

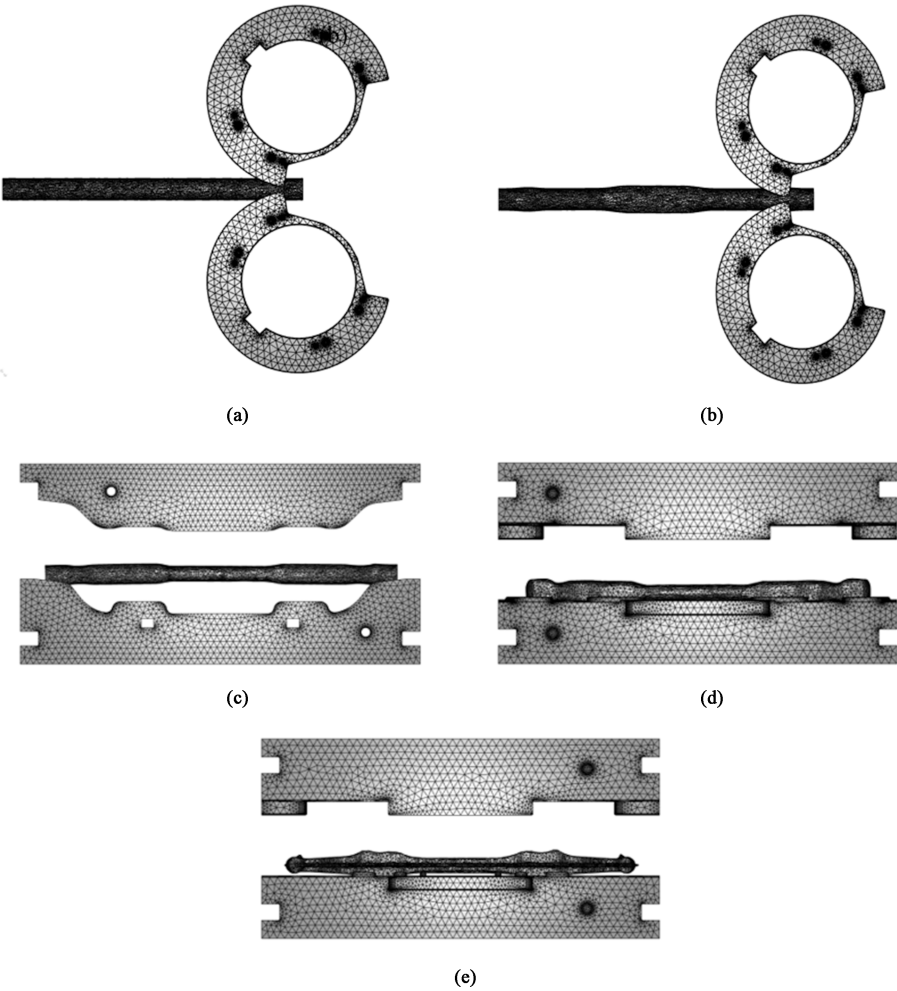


图 4 各工序的有限元模型
(a) 第 1 道次辊锻 (b) 第 2 道次辊锻 (c) 弯曲 (d) 预锻 (e) 终锻

Fig. 4 Finite element models of each process
(a) The first pass of roll forging (b) The second pass of roll forging (c) Bending (d) Pre-forging (e) Final forging

表 1 有限元模型仿真参数
Table 1 Simulation parameters of finite element model

工序	参数	数值
第 1 和第 2 道次辊锻	轧辊转速/($r \cdot \min^{-1}$)	15
	夹持长度/mm	90
	摩擦因数 (无润滑金属模具)	库伦 0.4 剪切 0.8
	传热系数 (金属模强传热)/ ($W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$)	20000
	下压速度/($mm \cdot \min^{-1}$)	250
弯曲、预锻、终锻	闭合距离/mm	700
	摩擦因数 (水石墨润滑)	库伦 0.15 剪切 0.30
	传热系数 (金属模强传热)/ ($W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$)	20000

3 缺陷分析及优化

3.1 填充不满缺陷发生原因及改进措施

图 5 为改进前填充不满和改进后填充良好的成形效果图。如图 5a 所示，终锻后中心工字梁区域 B 出现填充不满问题，这是由于工字梁部位形状窄而高，成形比较困难。可以看到，在工字梁区域上、下飞边的材料体积差别较大，B 区域的飞边中几乎没有材料，而下边飞边的材料较多。

图 6 展示了预锻工序材料的流动方向及填充不满缺陷可能出现的位置。图 6a 为预锻开始期间模具与坯料最先接触的位置，图 6b 为坯料中部向下弯曲失稳，图 6c 为坯料中部向下弯曲失稳后导致的中间筋条上部缺料，图 6d 为坯料中部向上弯曲失稳，图 6e 为坯料中部向上弯曲失稳后导致的中间筋条下部

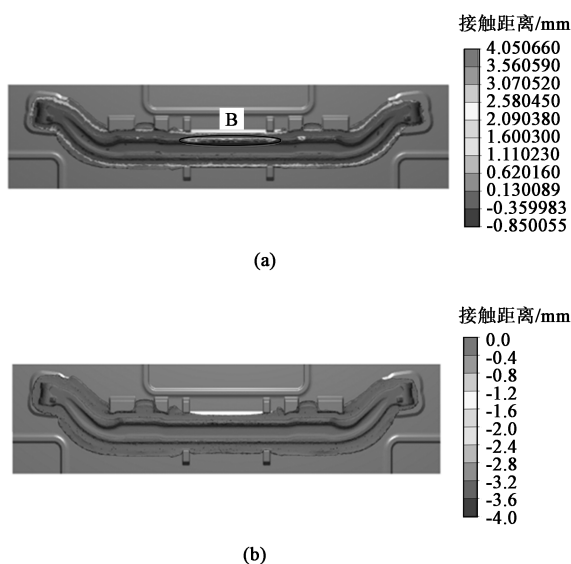


图 5 改进前填充不满 (a) 和改进后填充良好 (b) 的成形效果图

Fig. 5 Forming effect diagrams of insufficient filling before improvement (a) and good filling after improvement (b)

缺料。如图 6c 和图 6e 所示，中间工字梁上部或下部未能填充良好。如图 6a、图 6b 和图 6d 所示，造成这一现象的原因为：预锻工序中，C、D 区域比较高，首先与模具接触，从而材料向中心区域流动，中心区域工字梁区域的坯料被挤长发生失稳，进而材料向上或者向下流动而发生弯曲，直到工字梁区域与模具接触后弯曲被阻碍。因此，预锻结束后的锻件向上或向下弯曲，使得材料发生偏移，流动至飞边区域，导致中间工字梁区域缺失材料，进而造成工字梁区域发生填充不满缺陷。

解决这一缺陷最有效的措施为：减小 C、D 区域的间距，即 d 值，使得中间工字梁区域在与模具接触前未发生明显的弯曲变形，进而使得中心区域的材料在模具型腔中心线两侧尽可能对称。减小 d 值的最有效方法为将辊锻模具对应的中心区域长度减小，图 5b 为经过反复仿真测试，将中心区域 d 值减小为 940 mm 后的填充效果图，可以看到，将 d 值取为 940 mm 后，填充不满缺陷被消除。

3.2 折叠缺陷发生原因及改进措施

如图 7a 所示，在辊锻阶段由于两道次之间辊锻位置出现一定的错位，可能导致坯料在两道次辊锻重合边缘出现薄边现象。如图 7b 所示，辊锻出现的薄边现象在后续的模锻过程中可能出现折叠缺陷。尽管按照理论计算值放置第 1 和第 2 道次坯料可以得到关于中心对称的坯料，然而由于辊锻模与坯料之间存在一定的滑移，经过两个道次辊锻后坯料可

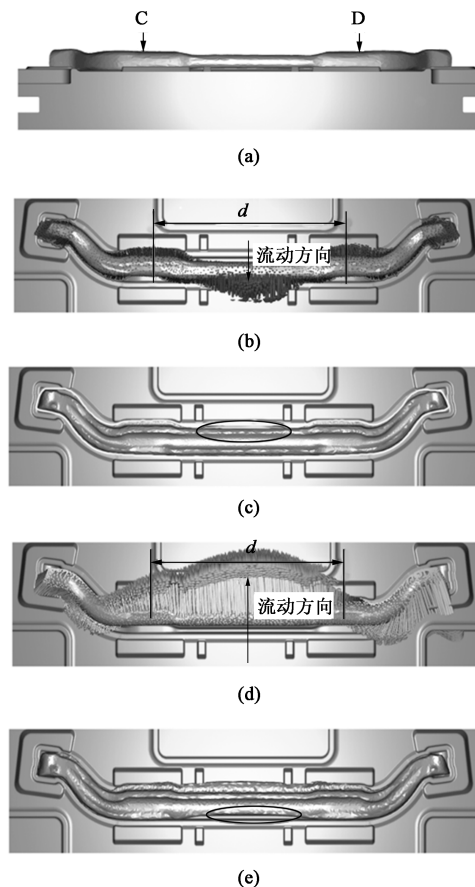


图 6 预锻工序材料流动方向的模拟结果

(a) 首先接触位置 (b) 向下失稳流动
(c) 向下失稳流动导致上部缺料 (d) 向上失稳流动
(e) 向上失稳流动导致下部缺料

Fig. 6 Simulation results of material flow direction in pre-forging process

(a) The first contact position (b) Downward unstable flow
(c) Upper material shortage caused by downward unstable flow
(d) Upward unstable flow (e) Lower material shortage caused by upward unstable flow

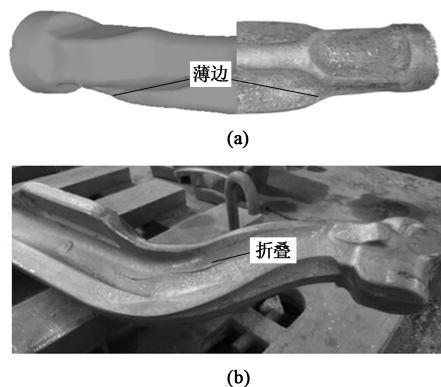


图 7 薄边 (a) 及折叠 (b) 缺陷

Fig. 7 Defects of thin edge (a) and folding (b)

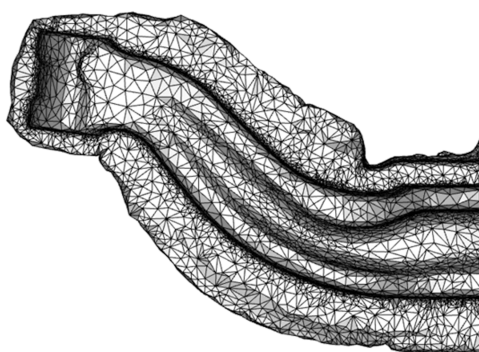
能向一个方向滑动，进而导致坯料未能关于中心对称，尤其是在第 2 道次辊锻时，坯料的对称中心与

第 1 道次结束后坯料的对称中心不重合时, 坯料会在工字梁和端头过渡区域出现如图 7a 所示的薄边现象。由于过渡区域上部分的金属与下部分的金属流动方向相反, 发生汇流, 在过渡区域形成了凹坑, 随着继续变形, 该区域将悬空多出一块料, 形成一种失稳状态, 在后续变形中形成折叠缺陷。

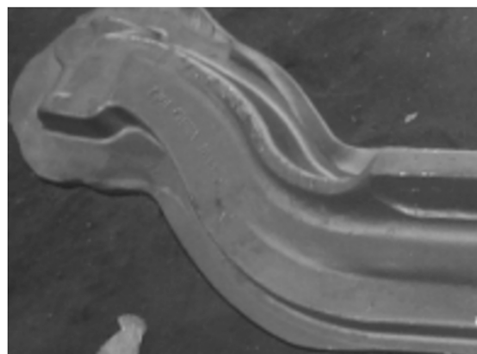
为了解决这一问题, 充分考虑坯料与模具之间的滑移效应, 即放置第 2 道次辊锻坯料时设置一定的补偿距离, 进而即使有滑移产生, 辊锻后得到的

坯料形状也关于坯料的中心对称。通过二分法分别对两道次的滑移量进行仿真计算, 并最终确定第 1 道次和第 2 道次坯料右端面与轧辊中心距离分别为 21 和 67 mm 时 (考虑的滑移距离), 未出现薄边现象。

如图 8a 所示, 经过优化后, 锻件折叠缺陷消除, 表面成形质量较好。对比图 7b 和图 8b 的实际锻件成形效果可知, 通过提前补偿一定的滑移量可以消除前轴弯曲处的折叠缺陷。



(a)



(b)

图 8 优化后无折叠的仿真锻件 (a) 和实际锻件 (b)

Fig. 8 Simulated forgings (a) and actual forgings (b) without folding after optimization

3.3 仿真优化结果及生产试制

通常重型卡车前轴成形最容易出现的缺陷即填充不满和折叠, 通过上述分析, 可以有效地避免锻造缺陷的出现。如图 9 所示, 仿真得到的最大成形载荷为 122500 kN, 设备的额定载荷为 135240 kN, 实际锻造时的载荷大约为 127400 kN。模拟和实际的载荷差别较小, 可以认为模拟结果比较接近于实际。

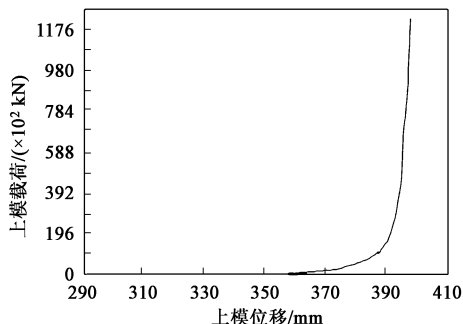


图 9 仿真得到的成形载荷曲线

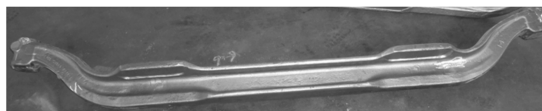
Fig. 9 Forming load curve obtained by simulation

由图 10 可知, 仿真锻件和试制锻件的形状一致, 从成形形状来说, 模拟结果准确, 此外, 数值仿真能够反应出实际成形工艺存在的锻造缺陷。通

过模拟确定的最佳工艺参数能够得到表面质量好、



(a)



(b)

图 10 仿真锻件 (a) 和试制锻件 (b)

Fig. 10 Simulated forgings (a) and trial forgings (b)

无填充不满和折叠缺陷的锻件。仿真计算结果表明, 飞边体积较小, 材料利用率为 89% 左右。

4 结论

(1) 在预锻时由于坯料端头首先与模具接触, 使得材料向中心区域流动, 中心区域工字梁区域的坯料被挤长发生失稳, 进而材料向上或者向下流动而发生弯曲, 直到工字梁区域与模具接触为止。因

此, 预锻结束后的锻件向上或向下弯曲, 使得材料流动至飞边区域, 导致中间工字梁区域缺少材料, 进而造成工字梁区域出现填充不满缺陷。减小坯料工字梁区域的间距, 使得中间工字梁区域在与模具接触前未发生明显的弯曲变形, 进而使得中心区域的材料在模具型腔中心线两侧尽可能对称, 可以解决填充不满问题。

(2) 由于坯料与辊锻模之间存在相对滑移, 使得坯料辊锻后未关于中心对称, 在第 2 道次辊锻时出现薄边现象, 进而使得后续模锻工序出现折叠缺陷。通过提前补偿滑移量的办法可以避免这一问题出现, 进而避免折叠缺陷产生。

(3) 有限元仿真结果与实际锻造结果吻合, 能够反应成形缺陷。经过数值仿真优化可以得到表面质量良好、无折叠和填充不满缺陷的锻件。

参考文献:

- [1] 朱帅, 奚建胜. 基于 DEFORM 的重型汽车前轴成形工艺及模具设计 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 194-200.
Zhu S, Xi J S. Forming process and die design for heavy duty truck front axle bas on DEFORM [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 194-200.
- [2] 罗欢, 罗琪, 王奕博, 等. 基于各道次载荷近平均分配下的前轴辊锻模具型槽设计 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (1): 22-28.
Luo H, Luo Q, Wang Y B, et al. Groove design of front axle roll forging die based on near equal load distribution of each pass [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (1): 22-28.
- [3] 蒋鹏, 罗守靖, 胡福荣, 等. 前轴锻件的几种典型生产工艺 [J]. 汽车工艺与材料, 2003, (3): 23-25.
Jiang P, Luo S J, Hu F R, et al. Several typical production processes for front axle forging [J]. Automobile Technology & Material, 2003, (3): 23-25.
- [4] 蒋鹏, 方刚, 胡福荣, 等. 汽车前轴精密辊锻成形过程的数值模拟 [J]. 机械工程学报, 2005, (6): 123-127.
Jiang P, Fang G, Hu F R, et al. Numerical simulation for precision roll forging of automobile front axle [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, (6): 123-127.
- [5] 柳豪, 周杰. 重卡车前轴成形辊锻工艺有限元模拟 [J]. 锻造

与冲压, 2010, (11): 72-74.

- Liu H, Zhou J. Finite element simulation of forming roll forging process of heavy truck front axle [J]. Forging & Metalforming, 2010, (11): 72-74.
- [6] 李环宇. 汽车前轴热模锻工艺的研究与应用 [J]. 金属加工: 热加工, 2008, (21): 21-23.
Li H Y. Research and application of hot die forging process for automobile front axle [J]. MW Metal Forming, 2008, (21): 21-23.
- [7] 李如雄, 王金铝. 汽车前轴制坯辊锻工艺分析与三维数值模拟 [J]. 机械设计与制造, 2010, (8): 112-114.
Li R X, Wang J L. Blank-making roll forging process and numerical simulation of 3-D deformation for automotive front axle [J]. Machinery Design & Manufacture, 2010, (8): 112-114.
- [8] 李朝亮, 陈文琳, 曹谦, 等. 基于负公差设计的卡车前轴成形工艺改进 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (6): 30-35.
Li C L, Chen W L, Cao Q, et al. Improvement of forming process of truck front axle based on negative tolerance design [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (6): 30-35.
- [9] 魏科, 王高潮, 李宁, 等. 基于 DEFORM 和正交试验法的前轴辊锻工艺优化 [J]. 塑性工程学报, 2012, 19 (1): 6-10.
Wei K, Wang G C, Li N, et al. Research on optimization of front-axle roll forging technique based on DEFORM-3D and orthogonal experimental method [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19 (1): 6-10.
- [10] 魏科. 辊锻模具参数化设计及锻造工艺优化研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
Wei K. The Parametric Design of Roll Forging Die and Optimized Research for Forging Process [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2012.
- [11] 文琨, 汪崧扬. 前轴工字梁成形工艺优化研究 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (7): 161-163.
Wen L, Wang S Y. Optimization research on forming technology of front axle I-beam [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (7): 161-163.
- [12] 陈学文, 周会军, 陈天安. 基于 Hansel-Spittel 模型的 45Cr4NiMoV 合金热变形行为 [J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2015, 36 (5): 1-4, 14, 117.
Cheng X W, Zhou H J, Chen T A. Hot deformation behavior of 45Cr4NiMoV alloy steel based on Hansel-Spittel model [J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science, 2015, 36 (5): 1-4, 14, 117.

