

制动系统不锈钢管端部精密成形工艺研究

李春洋, 刘华, 刘光辉, 汪金保, 王涛, 曹民业

(郑州机械研究所, 郑州 450001)

摘要: **目的** 改善铁路货车制动系统管系现有的连接方式, 对不锈钢管端部进行精密成形, 以得到力学性能较好的锻造接头。**方法** 根据原有管系的连接方式及钢管塑性成形特点, 提出对不锈钢管端部进行多工步镦挤的工艺方法。采用 Deform-3D 三维有限元模拟软件对工艺过程进行数值模拟, 分析成形过程中锻件成形情况, 以及锻件和模具的受力、温度、金属流动情况等。**结果** 在高温条件下采用的多工步镦挤工艺可以使钢管端部达到成形要求。**结论** 提出的钢管端部塑性成形工艺是可行的, 对铁路货车制动系统管系连接方式的改善有重要的参考意义。

关键词: 不锈钢管; 精密成形; 多工步镦挤; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.01.006

中图分类号: TG316 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)01-0036-05

Precision Forming Process of Stainless Steel Tube Ends in Braking System

LI Chun-yang, LIU Hua, LIU Guang-hui, WANG Jin-bao, WANG Tao, CAO Min-ye

(Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: The paper aims to improve the existing pipe connection mode of the railway truck brake system, and forge the stainless steel pipe end to obtain forged joint with good mechanical properties. According to the connection mode of the original pipe system and the plastic forming characteristics of the steel pipe, a multi-step extrusion process was proposed for the stainless steel pipe end. The process-3D finite element simulation software was used to simulate the process, and the forging condition of the forming process, as well as the force, temperature and metal flow of the forging and die were analyzed. The multi-step extrusion process used under high temperature and high speed conditions could make the end of the steel pipe end meet the forming requirements. The plastic forming process proposed for steel pipe end is feasible. It has important reference significance for the improvement of the connection mode of the railway truck brake system.

KEY WORDS: stainless steel tube; precision forming; multi-step extrusion; numerical simulation

在铁路货车制动系统管系的现有连接方式中, 法兰连接是目前广泛采用的方案^[1], 也是此次改进的方向。法兰连接由法兰体、接头体和密封圈组成, 其中法兰体又分为整体式法兰和分体式法兰。法兰连接结构中的接头体为机加工, 浪费材料和能源, 其管系和接头体以焊接的方式连接, 焊接过程会产生有害气

体, 对环境造成污染, 而且焊接接头强度不易提高, 容易产生裂纹并泄露, 在车辆行驶过程中可能会发生断裂^[2]。法兰连接采用的管系材质为 WC1Cr18Ni9Ti (SUS321), 此奥氏体不锈钢管为冷拔钢, 可以通过热锻的方式对其进行锻压加工。目前, 国内对此类钢管精密成形的研究较少, 为改善法兰连接时出现的问

收稿日期: 2018-12-03

作者简介: 李春洋 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密塑性成形及控制。

通讯作者: 刘华 (1962—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为精密塑性成形及控制、多方位数控联动成形技术及成套装备、复合材料装备等。

题,必须改变管系连接方式,现提出对不锈钢管端部接头处进行精密锻压,将其端部锻压为阶梯型,使其在一体化的基础上直接进行连接,以提高接头处的力学性能,防止其产生断裂的风险^[3]。文中选定某种型号不锈钢管进行工艺设计,然后采用有限元模拟软件对设定的工艺进行模拟验证,以得到符合要求的锻压零件。

经过前期的调研、讨论和分析,初步形成以下 3 个方案。方案 1:在制动管端部直接锻压成凸头和平头端,其优点为结构简单,已经模拟证实锻压可行,但受力强度偏弱,和法兰组装时,现有法兰因需直接套在制动管外径,所以需将现有法兰结构一处直径变小,因此方案 1 不易推广。方案 2:根据法兰接头体尺寸,将端部锻压成直径变化的阶梯型^[4],可以节省材料。不锈钢管内径增大,有受力强度增大、和现有法兰匹配的优点,但其锻压工艺难度增加,端部内径增加,灰尘、水等杂质存在在该处堆积的可能。方案 3 是在方案 2 的基础上,不改变不锈钢管内径,采用端部锻压成形,其优点为受力强度增大,和现有法兰匹配但是锻压工艺难度增加^[5]。以上 3 个方案中,从结构和组装工艺考虑,方案 3 最可行,现对方案 3 进行锻压工艺设计。

1 成形工艺分析

原来制动系统管系的连接方式是由法兰连接,接头体焊接在不锈钢管系两端,法兰套在接头体上,法兰连接示意图见图 1。现在提出对不锈钢管进行一体锻压成形工艺^[6],将不锈钢管端部锻压为直径变化的阶梯型,成形孔内径直径为固定数值,见图 2。为满足成形要求,结合实际生产可能性,采用端部热锻的方式进行加工^[7],其中成形的难点主要有:① 由于钢管长径比较高,管材要加工多个道次才能达到所需尺寸;② 为保证锻件管内孔尺寸,芯棒要求低温以保证其模具性能,而模具要保证高温以满足锻造性能,因此管材的加热和保温问题不易解决;③ 由于模具质量大,预热后温度高,模具的安装及后续的保温难度较大^[8]。

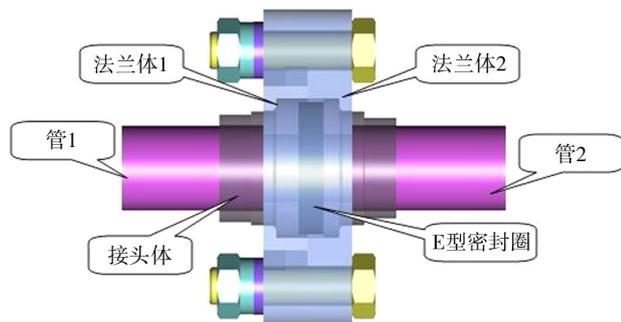


图 1 法兰连接示意图

Fig.1 Diagram of flange connection

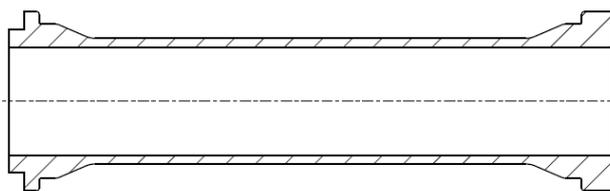


图 2 钢管端部预成形截面

Fig.2 Cross-section for pre-forming of steel pipe end

2 成形工艺方案制定

通过对不锈钢管接头形状及其连接方式的分析,对制动管系中常用的 $\Phi 17 \text{ mm} \times 2.2 \text{ mm}$ (外壁 \times 直径) 不锈钢管进行锻压工艺设计^[9]。由于管材墩粗其管壁增厚比不能超过一定数值,所以要想成形到图 2 预成形截面两端的管壁厚度,经过计算,要经过 4 次的墩粗才能成形^[10]。成形工艺过程见图 3。为保证管材的加热和保温问题,将管材和芯棒同时加热,加热后快速放入模具中,减小热量损失。同时采用在模具中插入高温芯棒的方法,以补充模具的热散失^[11]。

3 工艺方案数值模拟

3.1 设定模拟条件

在三维建模软件中建模,将模具几何模型及坯料几何模型进行装配,将装配体文件另存为 STL 格式^[12],然后导入到 Deform-3D 模拟软件中。在 Deform-3D 中,首先设定坯料材质为 WC1Cr18Ni9Ti,将坯料温度设为 $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[13],然后对坯料划分网格,在可行范围内,网格划分得要尽可能细,以提高模拟准确性。将模具设定为刚性材料,其温度为 $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温状态,仅考虑坯料本身的温度变化。将管材与模具的摩擦因数设为 0.3 ^[14-15],上模速度设为 10 m/s 。在模拟过程中,采用塑性成形与热传导过程复合仿真。

3.2 模拟工艺过程

成形过程共有 4 个阶段,模拟过程见图 4。前 3 个阶段为墩粗聚料阶段,上冲头下压,管材在下模具中墩粗,同时插入芯棒,以保持管材内径不变。第 4 个道次管材继续在下模具中墩粗,同时将上冲头内加工出法兰外形,管材在墩粗过程中,也在上冲头和下模具中成形出法兰形状。成形的 4 个阶段见图 4。

4 数值模拟结果分析

4.1 模拟结果分析

模拟结果见图 5,图 5a 和图 5b 分别为成形完成后坯料与模具接触情况和坯料最终成形情况。坯料与模具的接触见图 5a,可以看出,坯料与模具接触良

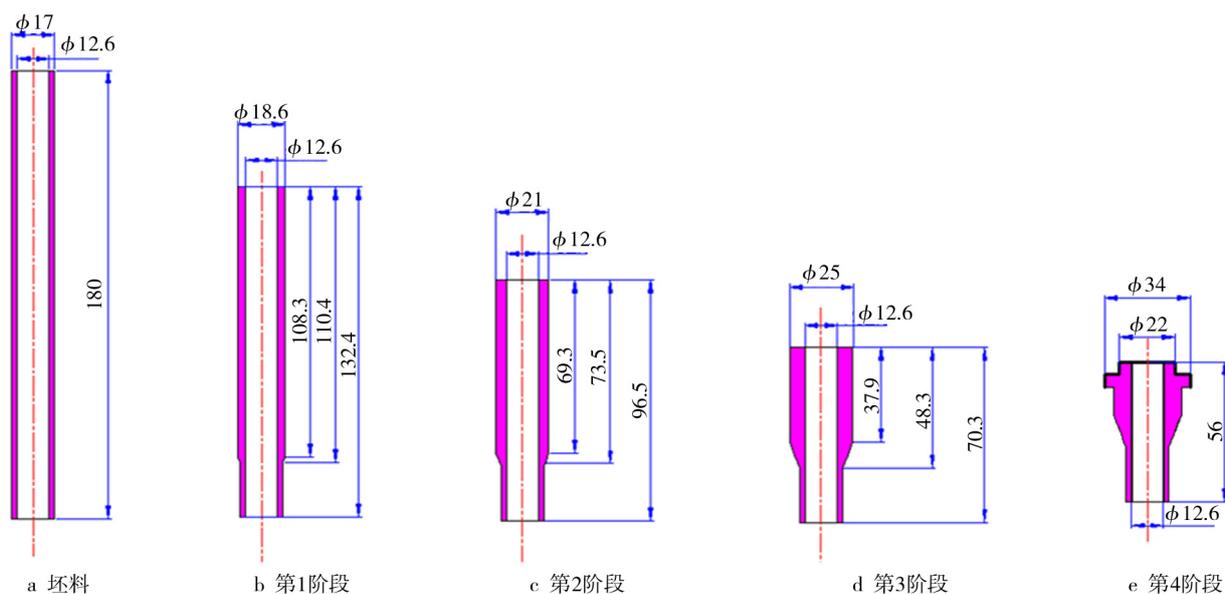


图3 成形工艺过程

Fig.3 Diagram of forming process

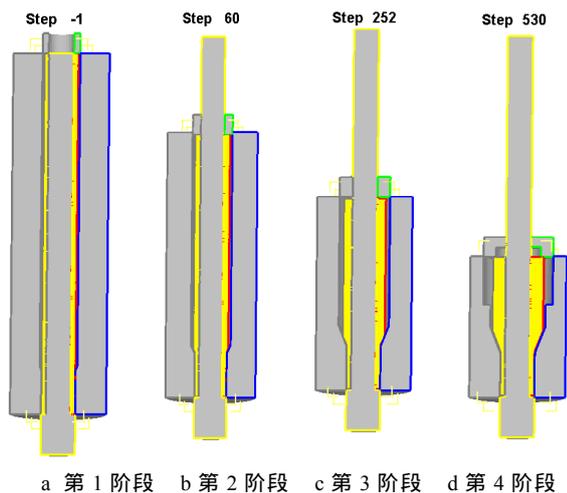


图4 模拟过程示意图

Fig.4 Schematic diagram of simulation process

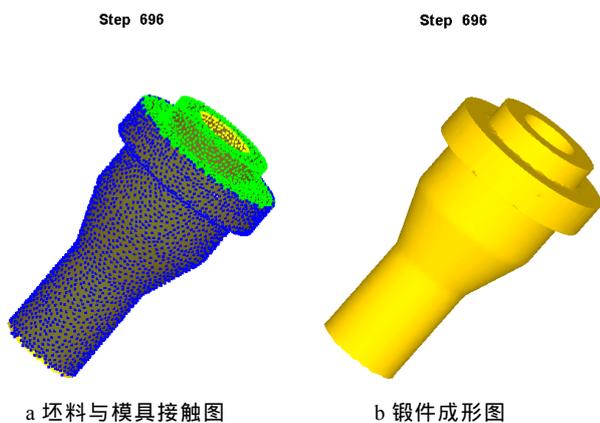


图5 锻件成形结果

Fig.5 Results of forging forming

好,基本上完全接触。坯料最终成形结果完善,无任何折叠、飞边或其他缺陷。经过测量,成形形状和尺寸达到设计要求。

4.2 金属流动规律分析

在塑性成形过程中,对金属流动规律的研究有重要意义。根据金属流动情况可以得知塑性成形过程中产生的问题,然后通过改变工艺参数来避免同类缺陷的产生。在 Deform-3D 有限元数值模拟中,金属流动情况通过速度矢量场来表示,金属流动方向与速度场中的箭头流向一致。在三维数值模拟软件中截取其中第2阶段和第4阶段末期的速度场分布(见图6)来分析锻粗成形过程中的金属流动情况。

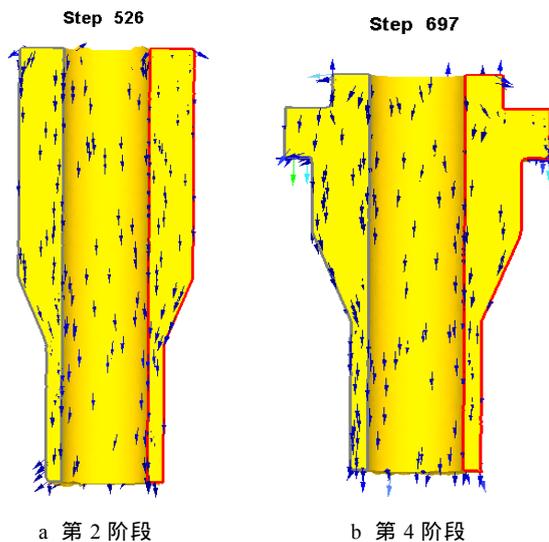


图6 第2和第4速度矢量图

Fig.6 Second and fourth speed vector

第 2 阶段墩粗过程中, 坯料在上冲头的压力下向下流动, 此时未与下模具内侧接触, 由于坯料向下模具内侧流动属于完全自由流动, 根据最小阻力定律, 坯料同时向外侧流动。与下模具内侧接触后, 坯料持续墩粗, 直到此阶段完成。

在第 4 阶段, 上冲头外形为法兰形状, 在上冲头的压力下, 金属继续向下流动, 坯料持续墩粗。同时金属沿着上冲头的法兰外形流动, 随着上冲头的持续下压, 坯料完成墩粗形成阶梯型结构, 并最终成形为法兰形状。

4.3 载荷-时间曲线

上冲头载荷-时间曲线见图 7, 随着变形的进行, 在墩粗的每个阶段, 上冲头载荷都是逐渐增大的。在每个阶段成形中期, 载荷增加速度较快, 此时为坯料与下模具内侧相接触, 金属不能向外侧流动, 进入持续墩粗过程。整个工艺过程中, 上冲头的最大受力满足模具的最大受力要求。每次墩粗的长度越短, 每个工步的模具受力越小, 并且整个工艺中模具的最大受力也略有减小。而整个工艺过程中, 每个阶段成形过程中每步的最大受力都在增大的趋势没有改变。在成形最后一个阶段, 上冲头载荷增大较多, 这是因为最后锻件成形为法兰外形, 金属聚料较多, 所需的力也比较大, 导致在成形最后阶段上冲头受力迅速增大。

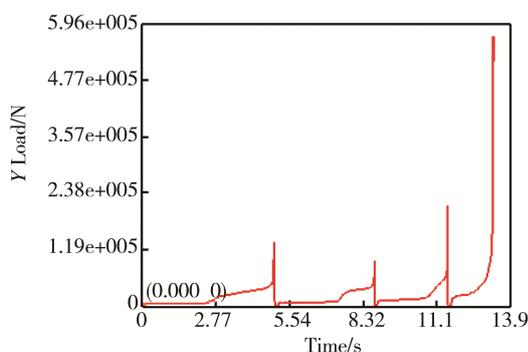


图 7 上冲头载荷-时间曲线
Fig.7 Load-stroke curve of upper punch

5 结论

1) 根据法兰外形设计方案, 选定可行的工艺方案进行锻压工艺设计, 得到了符合要求的锻压工艺方案。

2) 通过对设定的工艺进行有限元数值模拟, 了解了钢管成形过程中坯料成形结果及模具载荷变化规律和金属流动情况。

3) 提出的铁路货车制动系统管系中不锈钢管端部精密成形工艺对现有的法兰连接方式的改善有重要意义。

参考文献:

- [1] 蔡暖姝, 蔡仁良, 应道宴. 螺栓法兰接头安全密封技术(五)-安装[J]. 化工设备与管道, 2013, 50(5): 1—7.
CAI Nuan-shu, CAI Ren-liang, YING Dao-yan. Safety Seal Technology for Bolted Flange Joints (V)-Installation[J]. Chemical Equipment and Pipeline, 2013, 50(5): 1—7.
- [2] 王堃, 陈振士, 朱宝剑, 等. 基于故障树的螺栓法兰接头泄漏分析方法研究[J]. 山东化工, 2016, 45(13): 143—145.
WANG Kun, CHEN Zhen-shi, ZHU Bao-jian, et al. Research on Leakage Analysis Method of Bolt Flange Joint Based on Fault Tree[J]. Shandong Chemical Industry, 2016, 45(13): 143—145.
- [3] 刘百宣, 刘华. 多台阶轴头短流程冷精锻成形工艺[J]. 锻压技术, 2017, 42(6): 21—26.
LIU Bai-xuan, LIU Hua. Short-flow Cold Precision Forging Forming Process of Multi-step Shaft Head[J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(6): 21—26.
- [4] 汪金保, 刘华, 孙红星, 等. 大直径带毂直齿轮冷精密成形数值模拟及工艺分析[J]. 精密成形工程, 2014, 6(6): 104—110.
WANG Jin-bao, LIU Hua, SUN Hong-xing, et al. Numerical Simulation and Process Analysis of Cold Precision Forming of Large Diameter Hub Straight Gear[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(6): 104—110.
- [5] 杜培德, 刘纪炎. 螺栓法兰连接系统的载荷变形关系分析[J]. 青岛化工学院学报, 1995(1): 70—76.
DU Pei-de, LIU Ji-yan. Analysis of Load-Deformation Relationship of Bolt Flange Connection System[J]. Journal of Qingdao Institute of Chemical Technology, 1995(1): 70—76.
- [6] 刘兵, 周志明, 黄伟九, 等. 机体座多向模锻精密成形的数值模拟[J]. 锻压技术, 2015, 40(11): 19—22.
LIU Bing, ZHOU Zhi-ming, HUANG Wei-jiu, et al. Numerical Simulation of Multi-directional Die Forging Precision Forming of Body Block[J]. Forging & Stamping Technology, 2015, 40(11): 19—22.
- [7] 中国机械工程学会锻压学会. 锻压手册: 冲压[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
China Society of Mechanical Engineering Forging Society. Forging Manual: Stamping[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005.
- [8] 李振红, 黄英娜, 孔凡新. 轮毂轴承外圈亚热闭式精锻成形技术[J]. 轴承, 2014(4): 23—26.
LI Zhen-hong, HUANG Ying-na, KONG Fan-xin. Semi-hot Closed Type Precision Forging Process for Outer Rings of Hub Bearings[J]. Bearings, 2014(4): 23—26.
- [9] 邓洪洲, 高英赫, 张亮亮, 等. 钢管杆方形法兰受弯性能试验研究与有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(7): 44—52.
DENG Hong-zhou, GAO Ying-he, ZHANG Liang-liang, et al. Experimental Study and Finite Element Analysis of

- Bending Behavior of Steel Pipe Square Flange[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 44—52.
- [10] 王元清, 宗亮, 石永久. 钢管结构法兰连接节点抗弯承载性能的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(7): 13—19.
WANG Yuan-qing, ZONG Liang, SHI Yong-jiu. Experimental Study on Flexural Bearing Capacity of Steel Pipe Structure Flange Connection Joints[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2011, 38(7): 13—19.
- [11] 牛勇, 权晓惠, 张营杰, 等. 现代自由锻造装备技术研究现状与发展趋势[J]. 精密成形工程, 2015, 7(6): 17—24.
NIU Yong, QUAN Xiao-hui, ZHANG Ying-jie, et al. Research Status and Development Trend of Modern Free Forging Equipment Technology[J]. Precision Forming Engineering, 2015, 7(6): 17—24.
- [12] 肖爱武. 铝合金活塞模锻件的锻压工艺优化[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(1): 35—39.
XIAO Ai-wu. Optimization of Forging Process for Aluminum Alloy Piston Forgings[J]. Light Alloy Machining Technology, 2017, 45(1): 35—39.
- [13] 石玉萍. 1Cr13 马氏体不锈钢热加工基础研究及锻造工艺模拟[D]. 山西: 太原科技大学, 2013.
SHI Yu-ping. Basic Research and Forging Process Simulation of 1Cr13 Martensitic Stainless Steel Hot Working[D]. Shanxi: Taiyuan University of Science and Technology, 2013.
- [14] 胡建军, 李小平. Deform-3D 塑性成形 CAE 教程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
HU Jian-jun, LI Xiao-ping. Deform-3D Plastic Forming CAE Tutorial[M]. Beijing: Peking University Press, 2011.
- [15] 冯文杰, 段红尊, 陈莹莹, 等. 基于数值模拟的螺旋伞齿精密成形工艺参数分析[J]. 锻压技术, 2014, 39(12): 147—150.
FENG Wen-jie, DUAN Hong-zun, CHEN Ying-ying, et al. Analysis of Process Parameters of Spiral Bevel Precision Forming Based on Numerical Simulation[J]. Forging & Stamping Technology, 2014, 39(12): 147—150.