

# 基于正交试验的高铁轴承内圈冷辗扩壁厚均匀性优化分析

赵哲骐<sup>1,2</sup>, 孙宝寿<sup>1,2\*</sup>, 束学道<sup>1,2</sup>, 彭文飞<sup>1,2</sup>

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 为提高高铁轴承内圈冷辗扩成形壁厚均匀性, 应用 ABAQUS 软件建立高铁轴承内圈非对称冷辗扩有限元模型, 并进行了相关模拟。基于正交试验方法, 以冷辗扩成形后轴承内圈的壁厚均匀性为试验指标, 获得了芯辊初始进给速度(A)、锥辊转速(B)和驱动辊转速(C)对壁厚均匀性的影响规律, 并利用极差分析法和方差分析法对轴承内圈冷辗扩工艺参数进行优化。研究结果表明, 工艺参数对内圈壁厚均匀性影响的主次顺序为  $C > A \times C > B \times C > A > B > A \times B$ , 并得到了最佳工艺参数组合。

**关键词:** 非对称; 壁厚均匀性; 正交试验; 工艺参数

**中图分类号:** TG335.12

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5132 (2017) 04-0006-05

环件冷辗扩成形技术经过几十年的发展, 已在各型轴承套圈的加工中得到了应用<sup>[1]</sup>。冷辗扩加工具有成形表面质量好、成形表面硬度高等特点, 显著提高了轴承套圈的耐磨损能力和使用寿命<sup>[2-3]</sup>。华林等<sup>[4-5]</sup>对冷辗扩过程进行了深入的分析研究, 得出了冷辗扩深沟球轴承、单列圆锥滚子轴承外圈的加工方法及成形机理。杨合等<sup>[6]</sup>探究了台阶形截面环件冷辗扩过程中环件半径增大与压下量的关系, 得出环件内外径与压下量之间呈单调递增的凹函数关系。靳妍妍等<sup>[7]</sup>对轿车变速箱轴承 L 形截面套圈开展了冷辗工艺模拟和试验研究, 得到了合理的冷辗扩优化方案。赵玉民等<sup>[8]</sup>利用动力有限元法对阶梯形轴承内圈的冷辗扩成形进行了模拟分析, 为毛坯和部分工艺参数的优化设计提供了依据。

现有研究多数着重于形状规则、对称的轴承套圈冷辗扩成形研究, 缺乏对异形、非对称轴承套圈的关注<sup>[9-10]</sup>。本文以高铁轴承内圈为研究对象, 基于 ABAQUS 软件建立非对称冷辗扩有限元模型。同时, 以成形后轴承内圈小端面的壁厚均匀性为试验指标, 基于正交试验方法, 探究冷辗扩工艺参

数对高铁轴承内圈质量的影响规律, 并进行了优化, 以获得最佳工艺参数组合。

## 1 有限元模型建立

基于 ABAQUS 软件建立了高铁轴承内圈非对称冷辗扩有限元模型, 选用弹塑性变形原理进行冷辗扩数值模拟分析, 确定的相关冷辗扩参数见表 1。高铁轴承内圈毛坯所使用材料为 GCr15, 其密度为  $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 弹性模量为 209 GPa, 泊松比为 0.3。

表 1 冷辗扩模拟参数

| 冷辗扩参数      | 数值  |
|------------|-----|
| 驱动辊工作半径/mm | 187 |
| 芯辊工作半径/mm  | 30  |
| 驱动辊工作高度/mm | 100 |
| 芯辊工作高度/mm  | 82  |
| 轧制比        | 1.2 |

由于轴承内圈为非对称环件, 在辗扩过程中会产生一个不平衡的轴向分力, 容易发生偏移, 致使成形质量较差, 因此采用增加锥辊的方式来对其进行约束。冷辗扩毛坯设置为可变形体, 轧辊设

收稿日期: 2016-10-30.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51475247); 宁波市重点学科基金项目(XKL14D2048); 宁波市自然科学基金(2015B11045)。

第一作者: 赵哲骐(1990—), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 塑性成形工艺与装备; E-mail: zhaozheqii@163.com

\*通信作者: 孙宝寿(1960—), 男, 江苏泰兴人, 副教授, 主要研究方向: 塑性成形工艺与装备; E-mail: sunbaoshou@nbu.edu.cn

置为解析刚体, 网格划分采用 ALE 自适应网格划分, 三维八节点线性缩减单元。轧辊与套圈间接接触采用库仑摩擦力, 摩擦因数为 0.3, 基于 ABAQUS 软件建立的有限元模型如图 1 所示。高铁轴承内圈成品的尺寸参数如图 2 所示。

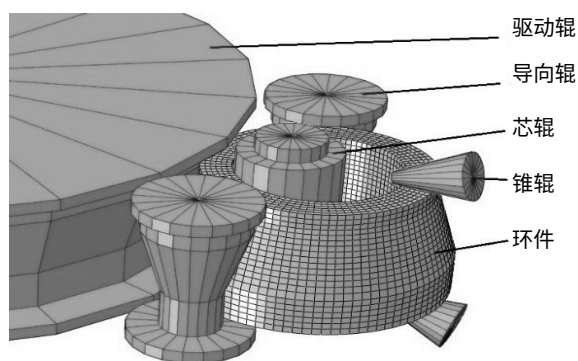


图1 有限元模型

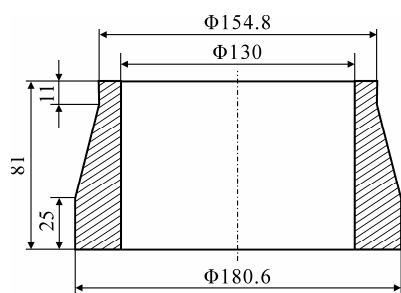


图2 高铁轴承内圈成品尺寸参数(单位: mm)

## 2 正交试验设计

### 2.1 试验指标的选取

高铁轴承套圈属于大型高速重载轴承套圈, 其内圈的壁厚均匀性是决定冷辗扩产品质量的关键, 为此选取高铁轴承内圈小端面的壁厚均匀性为试验指标。文中定义壁厚均匀性为  $e$ ,  $e$  值越小, 表示壁厚越均匀, 其计算公式为:

$$e = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\delta_i - \bar{\delta})^2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中,  $N$  为内圈小端面上所选节点的对数;  $\delta_i$  为第  $i$  对节点处的壁厚;  $\bar{\delta}$  为  $N$  对节点处的平均壁厚;

### 2.2 试验方案设计

根据生产实践经验, 环件冷辗扩过程中, 影响轴承内圈质量的主要工艺参数有芯辊进给速度、锥辊转速和与驱动辊转速。

本文采用 3 因素 3 水平正交试验, 试验和因素水平见表 2, 选定 3 个主要因素为芯辊初始进给速

度( $A$ )、锥辊转速( $B$ )、驱动辊转速( $C$ )。同时考虑各因素之间的交互作用, 选用的正交表为  $L_{27}(3^{13})$ , 并结合正交表的设计原则对各个因素进行安排。

表2 试验因素和因素水平表

| 因素   | $A/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$ | $B/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$ | $C/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$ |
|------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 水平 1 | 0.8                                 | 23                                   | 13                                   |
| 水平 2 | 1.0                                 | 26                                   | 16                                   |
| 水平 3 | 1.2                                 | 29                                   | 19                                   |

## 3 正交试验结果分析

### 3.1 有限元模拟结果

为更加精确得到高铁轴承内圈非对称冷辗扩成形后小端面的壁厚, 本文沿环件小端面均匀选取 12 对节点, 节点位置如图 3 所示。在 ABAQUS 中选取“History Output Request”选项, 定义所需节点信息, 用来获取轴承内圈有限元模拟成形后节点上的坐标等数据信息, 通过整理统计得到各节点处的壁厚  $\delta_i$ , 通过(1)式计算可得壁厚均匀性  $e$ , 其试验结果见表 3。

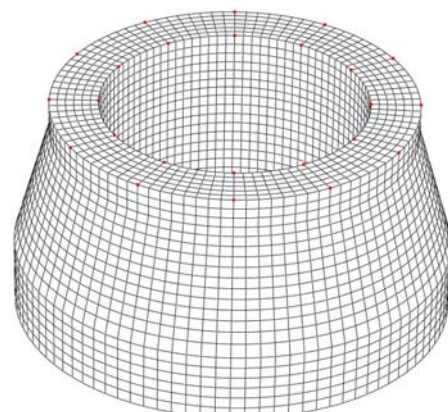


图3 环件节点位置图

### 3.2 极差分析

对  $L_{27}(3^{13})$  正交表试验结果进行正交试验极差分析, 其结果见表 4。通过确定  $T_i$  的大小判断因素的优水平。文中壁厚均匀性  $e$  值越小, 则成形后环件小端面的壁厚越均匀, 成品质量越好。故选取指标小的水平, 即各列中  $T_i$  最小值所对应的那个水平。因此确定因素  $ABC$  最优水平为 232, 即最优工艺参数如下: 芯辊初始进给速度为  $1.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 锥辊转速为  $29 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ , 驱动辊转为  $16 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

$R$  为极差, 反映了各列因素水平变动时, 试验

表3 试验方案及结果

| 因素 | A | B | A×B | C | A×C | B×C | 空列 |   |   |   | 壁厚均匀性/% |   |   |       |
|----|---|---|-----|---|-----|-----|----|---|---|---|---------|---|---|-------|
| 1  | 1 | 1 | 1   | 1 | 1   | 1   | 1  | 1 | 1 | 1 | 1       | 1 | 1 | 33.61 |
| 2  | 1 | 1 | 1   | 1 | 2   | 2   | 2  | 2 | 2 | 2 | 2       | 2 | 2 | 31.50 |
| 3  | 1 | 1 | 1   | 1 | 3   | 3   | 3  | 3 | 3 | 3 | 3       | 3 | 3 | 34.49 |
| 4  | 1 | 2 | 2   | 2 | 1   | 1   | 1  | 2 | 2 | 2 | 3       | 3 | 3 | 32.65 |
| 5  | 1 | 2 | 2   | 2 | 2   | 2   | 2  | 3 | 3 | 3 | 1       | 1 | 1 | 28.29 |
| 6  | 1 | 2 | 2   | 2 | 3   | 3   | 3  | 1 | 1 | 1 | 2       | 2 | 2 | 29.72 |
| 7  | 1 | 3 | 3   | 3 | 1   | 1   | 1  | 3 | 3 | 3 | 2       | 2 | 2 | 31.58 |
| 8  | 1 | 3 | 3   | 3 | 2   | 2   | 2  | 1 | 1 | 1 | 3       | 3 | 3 | 25.87 |
| 9  | 1 | 3 | 3   | 3 | 3   | 3   | 3  | 2 | 2 | 2 | 1       | 1 | 1 | 26.93 |
| 10 | 2 | 1 | 2   | 3 | 1   | 2   | 3  | 1 | 2 | 3 | 1       | 2 | 3 | 27.90 |
| 11 | 2 | 1 | 2   | 3 | 2   | 3   | 1  | 2 | 3 | 1 | 2       | 3 | 1 | 31.59 |
| 12 | 2 | 1 | 2   | 3 | 3   | 1   | 2  | 3 | 1 | 2 | 3       | 1 | 2 | 24.14 |
| 13 | 2 | 2 | 3   | 1 | 1   | 2   | 3  | 2 | 3 | 1 | 3       | 1 | 2 | 24.20 |
| 14 | 2 | 2 | 3   | 1 | 2   | 3   | 1  | 3 | 1 | 2 | 1       | 2 | 3 | 29.90 |
| 15 | 2 | 2 | 3   | 1 | 3   | 1   | 2  | 1 | 2 | 3 | 2       | 3 | 1 | 25.51 |
| 16 | 2 | 3 | 1   | 2 | 1   | 2   | 3  | 3 | 1 | 2 | 2       | 3 | 1 | 29.93 |
| 17 | 2 | 3 | 1   | 2 | 2   | 3   | 1  | 1 | 2 | 3 | 3       | 1 | 2 | 23.67 |
| 18 | 2 | 3 | 1   | 2 | 3   | 1   | 2  | 2 | 3 | 1 | 1       | 2 | 3 | 31.39 |
| 19 | 3 | 1 | 3   | 2 | 1   | 3   | 2  | 1 | 3 | 2 | 1       | 3 | 2 | 27.12 |
| 20 | 3 | 1 | 3   | 2 | 2   | 1   | 3  | 2 | 1 | 3 | 2       | 1 | 3 | 26.59 |
| 21 | 3 | 1 | 3   | 2 | 3   | 2   | 1  | 3 | 2 | 1 | 3       | 2 | 1 | 34.22 |
| 22 | 3 | 2 | 1   | 3 | 1   | 3   | 2  | 2 | 1 | 3 | 3       | 2 | 1 | 25.77 |
| 23 | 3 | 2 | 1   | 3 | 2   | 1   | 3  | 3 | 2 | 1 | 1       | 3 | 2 | 27.71 |
| 24 | 3 | 2 | 1   | 3 | 3   | 2   | 1  | 1 | 3 | 2 | 2       | 1 | 3 | 28.87 |
| 25 | 3 | 3 | 2   | 1 | 1   | 3   | 2  | 3 | 2 | 1 | 2       | 1 | 3 | 32.97 |
| 26 | 3 | 3 | 2   | 1 | 2   | 1   | 3  | 1 | 3 | 2 | 3       | 2 | 1 | 24.22 |
| 27 | 3 | 3 | 2   | 1 | 3   | 2   | 1  | 2 | 1 | 3 | 1       | 3 | 2 | 25.34 |

表4 正交试验极差分析

| 组合   | A                 | B      | A×B    | C      | A×C    | B×C    |
|------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T1   | 274.64            | 271.16 | 266.94 | 261.74 | 331.72 | 257.40 |
| T2   | 248.23            | 252.62 | 256.82 | 263.58 | 189.55 | 227.83 |
| T3   | 252.81            | 251.90 | 251.92 | 250.36 | 254.41 | 290.45 |
| t1   | 30.52             | 30.13  | 29.66  | 29.08  | 36.86  | 28.60  |
| t2   | 27.58             | 28.07  | 28.54  | 29.29  | 21.06  | 25.31  |
| t3   | 28.09             | 27.99  | 27.99  | 27.82  | 28.27  | 32.27  |
| 优水平  | 2                 | 3      | 3      | 3      | 2      | 2      |
| 极差 R | 26.41             | 19.26  | 14.12  | NaN    | 142.17 | 59.165 |
| 主次顺序 | C>A×C>B×C>A>B>A×B |        |        |        |        |        |

表 5 正交试验方差分析

| 方差来源                 | 平方和         | 自由度 | 均方差       | $F$ 值    | $F(\alpha=0.05)$ | $F'(\alpha=0.01)$ | 显著性  |
|----------------------|-------------|-----|-----------|----------|------------------|-------------------|------|
| 因素 $A^{1)}$          | 44.259 8    | 2   | 22.129 9  | 0.310 37 | 3.402 8          | 5.613 6           | -    |
| 因素 $B^{1)}$          | 26.488 8    | 2   | 13.244 4  | 0.185 75 | 3.402 8          | 5.613 6           | -    |
| 因素 $C$               | 1 125.777 0 | 2   | 562.888 0 | 7.894 50 | 3.402 8          | 5.613 6           | 高度显著 |
| 因素 $A \times B^{1)}$ | 24.432 7    | 4   | 6.108 2   | 0.085 57 | 2.776 3          | 4.218 4           | -    |
| 因素 $A \times C^{1)}$ | 418.100 9   | 4   | 104.525 2 | 1.466 00 | 2.776 3          | 4.218 4           | -    |
| 因素 $B \times C^{1)}$ | 169.997 0   | 4   | 42.499 2  | 0.596 05 | 2.776 3          | 4.218 4           | -    |
| 空列 $^{1)}$           | 1 027.958 0 | 8   | 128.494 7 | 1.802 10 | 2.355 1          | 3.362 9           | -    |
| 误差                   | 1 711.237 0 | 24  | 71.301 5  | -        | -                | -                 | -    |
| 总和                   | 2 837.013 0 | 26  | -         | -        | -                | -                 | -    |

注: 1)表示该因素对试验结果的影响很小, 加入到误差中作为误差处理。

指标的变动幅度.  $R$  值越大, 说明该因素对试验指标的影响越大越重要. 因此, 根据表 3 中极差  $R$  值的大小来判断可得, 各因素的主次顺序为  $C > A \times C > B \times C > A > B > A \times B$ . 为了更直观地反映因素对试验指标的影响规律及其趋势, 以因素水平为横坐标, 试验指标  $T_i$  为纵坐标, 绘制因素水平与试验指标趋势图(图 4).

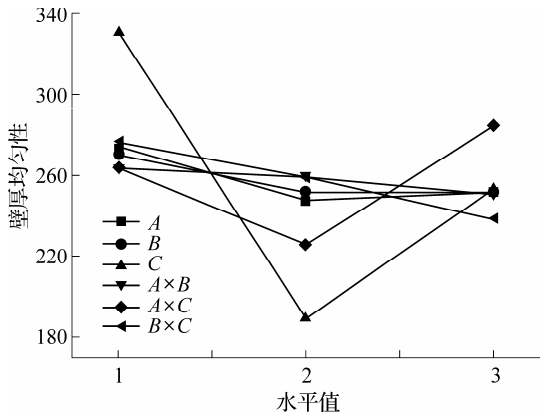


图 4 因素与指标趋势

从因素与指标趋势的图 4 中, 可观察得到各因素的优水平和因素主次顺序. 本节研究中的最优因素组合为  $A_2B_3C_2$ . 其组合试验方案也包括在试验中, 其壁厚均匀性为 23.67%, 为所有 27 组试验中最小值, 验证了极差分析法的准确性.

3.3 方差分析

为了进一步研究各因素对试验结果影响的准确程度, 同时考虑各因素间的交互作用, 因此采用方差分析法对数据做进一步的处理, 分析结果见表 5.

通过比较试验计算所得  $F$  值与  $F$  分布检验表

查得的  $F(\alpha = 0.05)$  与  $F'(\alpha = 0.01)$  值可知, 因素  $C$  有  $F_C > F'(\alpha = 0.01)$ , 因此, 因素  $C$  对试验指标的影响程度是高度显著的, 说明驱动辊转速对高铁轴承内圈非对称冷辗扩成形后小端面的壁厚均匀性有重要的影响. 而因素  $A$ 、 $B$ 、 $A \times B$ 、 $A \times C$  和  $B \times C$  均不体现显著性, 可认为因素之间没有交互作用, 说明这些工艺参数组合对高铁轴承内圈非对称冷辗扩成形后小端面的壁厚均匀性影响比较小.

4 结论

(1)由于高铁轴承内圈非对称冷辗扩过程中轴向力过大, 本文通过研究采取了增加锥辊的方式对其进行约束. 应用 ABAQUS 软件进行有限元模拟, 基于正交试验方法, 以成形后轴承内圈小端面的壁厚均匀性为试验指标, 对冷辗扩工艺参数进行了优化.

(2)通过极差分析法得到本研究设计的正交试验方案中最佳工艺参数组合为  $A_2B_3C_2$ , 即芯辊初始进给速度为  $1.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 锥辊转速为  $29 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ , 驱动辊转速为  $16 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ .

(3)通过方差分析法得到正交试验方案中驱动辊转速( $C$ )对壁厚均匀性影响高度显著, 因素  $A$ 、 $B$ 、 $A \times B$ 、 $A \times C$  和  $B \times C$  均不体现显著性, 且因素之间没有交互作用.

参考文献:

[1] 李春天, 黄欣. 环件轧制技术及其在国内的应用[J]. 锻压装备与制造技术, 2004, 39(5):8-13.  
[2] 华林, 韩星会. 环件冷轧技术及其在轴承行业中应用[J]. 金属加工: 热加工, 2008(7):17-19.

- [3] 王令文, 朱蔚. 套圈毛坯的冷辗扩工艺[J]. 轴承, 2002 (1):41-43.
- [4] 华林, 左治江, 兰箭, 等. 沟球断面环件冷辗扩三维有限元模拟与工艺设计[J]. 中国机械工程, 2008, 44(10): 201-205.
- [5] 华林, 左治江, 兰箭等. 环件冷辗扩芯辊进给速度规范设计[J]. 中国机械工程, 2006, 17(9):953-957.
- [6] 杨合, 李兰云, 王敏, 等. 异型环件冷辗扩中环件半径扩大变形行为研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40 (7):802-810.
- [7] 靳妍妍, 钱东升, 石磊. L 形截面轴承套圈冷辗扩数值模拟与试验[J]. 轴承, 2016(7):15-20.
- [8] 赵玉民, 彭巍, 杨金娥. 阶梯形轴承内圈冷辗扩成形与模拟研究[J]. 轴承, 2006(8):12-15.
- [9] 华林, 钱东升. 轴承环轧制成形理论和技术[J]. 机械工程学报, 2014, 50(16):71-75.
- [10] 魏文婷, 华林, 韩星会, 等. 大变形量下高碳钢环件冷轧变形过程模拟与实验研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(4):540-544.

## Optimization analysis of wall thickness uniformity of inner ring of high speed rail bearing on cold rolling based on orthogonal test

ZHAO Zhe-qi<sup>1,2</sup>, SUN Bao-shou<sup>1,2\*</sup>, SHU Xue-dao<sup>1,2</sup>, PENG Wen-fei<sup>1,2</sup>

( 1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo 315211, China )

**Abstract:** In order to improve the wall thickness uniformity of inner ring of high speed rail bearing on cold rolling, the finite element model of inner ring of high speed rail bearing under asymmetric cold ring rolling process is established through ABAQUS software. Taking the wall thickness uniformity of finished rings as test index, the influence law of the initial feed rate of mandrel ( $A$ ), cone roller speed ( $B$ ) and drive roller speed ( $C$ ) on the wall thickness uniformity is obtained using the orthogonal test method. The parameters of inner ring during cold rolling process are optimized by means of range analysis and variance analysis. The analytical results show that the order of influence of process parameters on the wall thickness uniformity of inner ring is  $C > A \times C > B \times C > A > B > A \times B$ , and the optimum combination of process parameters is obtained.

**Key words:** asymmetric; wall thickness uniformity; orthogonal test; process parameter

(责任编辑 章践立)