

大型热轧辊四列圆柱轴承滚子失效分析

武广富

瓦房店轴承集团有限责任公司, 辽宁 瓦房店

收稿日期: 2026年3月30日; 录用日期: 2026年4月23日; 发布日期: 2026年4月30日

摘要

热轧辊轴承是热轧机关键零部件, 其运行状态直接影响到轧制精度、生产效率和设备安全。某钢厂2250热连轧线F5机架工作辊轴承滚子频繁出现失效导致轴承整体损坏, 影响设备正常运行。本文开展失效机理分析, 进而提出优化方案, 其空心滚动体设计预留间隙, 并考虑孔内粗糙度、润滑条件及探伤等方案, 经过试验验证, 验证了失效分析与改进措施有效性。

关键词

热轧辊, 四列圆柱轴承, 滚子, 接触疲劳, 失效分析, 微观组织

Failure Analysis of Rollers in Four-Row Cylindrical Bearings of Large Hot-Rolling Rolls

Guangfu Wu

Wafangdian Bearing Group Co., LTD., Wafangdian Liaoning

Received: March 30, 2026; accepted: April 23, 2026; published: April 30, 2026

Abstract

Hot rolling mill bearings are key components of hot rolling mills, and their operational status directly affects rolling accuracy, production efficiency, and equipment safety. In the F5 stand of a 2250 hot strip mill line at a steel plant, the rollers of the work roll bearings frequently failed, leading to overall bearing damage and affecting normal equipment operation. This paper conducts an analysis of the failure mechanism and proposes an optimized solution, which includes designing hollow rolling elements with reserved clearance, while considering factors such as the internal surface roughness of the bore, lubrication conditions, and inspection methods. Experimental verification

demonstrates the effectiveness of the failure analysis and improvement measures.

Keywords

Hot-Rolled Rolls, Four-Row Cylindrical Bearings, Rollers, Contact Fatigue, Failure Analysis, Microstructure

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

大型四列圆柱滚子轴承因其高径向承载能力、允许轴向相对位移等特点，被广泛应用于热连轧机支撑辊。其工作环境极其恶劣，需承受高达数千吨的周期性轧制力、高温轧件的热辐射、冷却水和氧化铁皮的侵入等。在此复杂工况下，轴承滚子长期处于重载、高冲击、边界润滑状态，极易发生各种形式的失效[1]。滚子的失效不仅造成轴承报废，更可能导致轧辊轴颈损坏、生产线非计划停机，造成巨大的经济损失。因此，对失效滚子进行深入分析，查明其失效机理，对于提高轴承使用寿命、保障生产稳定具有重要意义。目前该类轴承主要出现滚动体碎裂或者套圈断裂。本文以某钢厂 2250 热连轧线 F5 机架工作辊轴承(型号: FCDP152206750)为例，该轴承在运行约 200 小时后出现异常振动与主机抱死，拆解后发现图 1 右侧有 6 粒滚子出现碎裂，多粒滚子碎裂。本文旨在通过对该失效滚子的多维度分析，揭示其失效根源。轴承结构简图见图 1。

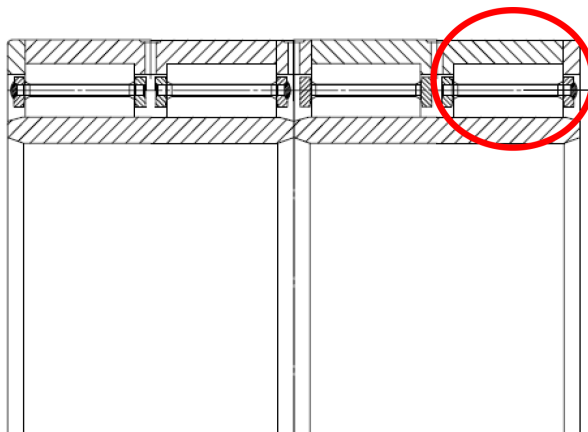


Figure 1. Simplified structural diagram of four-row cylindrical roller bearing

图 1. 四列圆柱滚子轴承结构简图

碎裂滚子主要集中在图 1 画圈侧。套圈滚道表面严重擦伤温升变色，滚子断口有的起源于内孔，内孔表面有擦伤。对碎裂滚动体进行切样腐蚀检测，发现滚子表面严重擦伤温升变色，滚子断口有的起源于内孔，内孔表面有擦伤，滚子损坏都是整体碎裂，而不是剥落失效。滚子孔内有擦伤痕迹，初步判断滚子内孔润滑不良和使用擦伤引起内孔裂纹，继续使用裂纹扩展滚子碎裂，滚子表面有擦伤及疲劳损伤。选取 2 粒碎裂滚动体试样和 1 粒完好滚子试样进行检测分析，分别标记 1#、2#、3#。滚子碎裂情况详见图 2~4。



Figure 2. Damage image of 1# rolling element
图 2. 1#滚动体损坏图



Figure 3. Damage image of 2# rolling element
图 3. 2#滚动体损坏图



Figure 4. Damage to rolling elements
图 4. 滚动体损坏

2. 轴承检验

2.1. 滚动体切样检测

对失效滚子进行切样检测分析，滚动体内部孔内磨损严重，见图 5。采用腐蚀方法检测，发现滚子孔内有烧伤现象。见图 6。

2.2. 硬度检验

滚动体的硬度直接影响其质量和使用效果，因此对滚子的硬度进行检测。采用 HR-150A 洛氏硬度计 (检测范围：20~67 HRC)、KB 30SR-SA 型维氏硬度计 (检测范围：8~1000 HV) 对滚动体试样进行硬度检测，检测标准执行 JB/T8881-2011 标准，滚子表面硬度 59-62 HRC，渗碳层深度 3.0~4.5 (52.5 HRC 以上为渗碳层深)。



Figure 5. Fracture surface of roller sample
图 5. 滚子切样断口图



Figure 6. Roller corrosion inspection diagram
图 6. 滚子腐蚀检验图

1#滚子(损坏)表面硬度 47.5.0 HRC。滚动体表面出现擦伤温升硬度降低；芯部硬度 37.5. HRC，满足要求。淬硬层深度 0 mm (标准 52.5 HRC 处深度 ≥ 3.0 mm)。

2#滚子(损坏)表面硬度 61.8 HRC (标准 58~63 HRC)。

心部硬度 23.0 HRC(标准 32~48 HRC)，孔内出现擦伤温升硬度降低。淬硬层深度 0.95 mm (标准 52.5 HRC 处深度 ≥ 3.0 mm)。

3#滚子(未损坏)端面表面硬度 61.0 HRC (标准 58~63 HRC)。芯部硬度 34.0 HRC(标准 32~48 HRC)。淬硬层深度 4.55 mm (标准 52.5 HRC 处深度 ≥ 3.0 mm)。

58 HRC 深度 3.35 mm (标准 58 HRC 处深度 ≥ 1.2 mm)。具体检测结果见表 1。

Table 1. Hardness (HRC) of failed rolling elements at different depths from the surface
表 1. 失效滚动体距表面不同深度的硬度(HRC)

试样	0.3	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
1#	47.5	50.6	43.5	46.4	47.1	47.5	48.1	47.4	46.4	45.3	44
2#	61.8	58.8	51.7	42.2	31.7	31.1	30.4	28.6	28.9	28.9	27.7
3#	62.7	62.3	61.4	60.7	59.9	58.9	57.4	54.6	52.6	50.3	46.8

2.3. 金相检验

采用 LEICA DMRXE 金相显微镜检验，试样表面有使用擦伤局部组织发生变化，未严重滚子组织符合 JB/T8881-2011 标准要求，擦伤零件表面有擦伤变质层组织，内孔表面局部有裂纹，对 3 个试样进行检测。不同滚动体的组织放大 500 倍检测分析，检测结果见表 2，组织见图 7~13。

Table 2. Metallographic structure examination of failed rolling elements

表 2. 失效滚动体金相组织检测

试样	表层组织(标准 1~3 级)	心部组织(标准 1~3 级)	网状碳化物(≤3 级)
1#	擦伤回火	2 级	<1 级
2#	擦伤回火	回火	<1 级
3#	1 级	2 级	<1 级

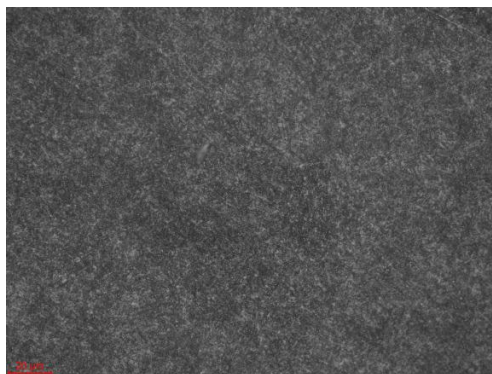


Figure 7. Microstructure of the surface layer of roller No. 1 magnified 500 times

图 7. 放大 500 倍 1 号滚子表层组织

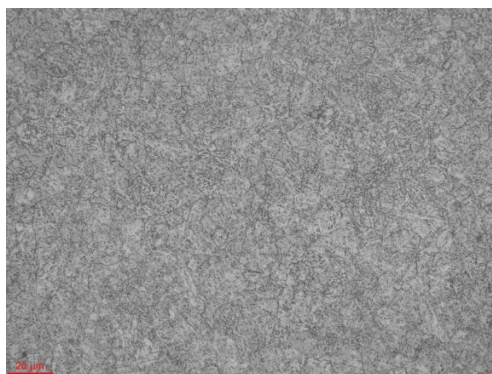


Figure 8. Microstructure of the core of roller No. 1 magnified 500 times

图 8. 放大 500 倍 1 号滚子芯部组织

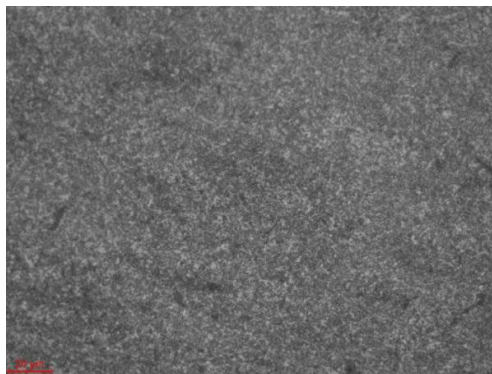


Figure 9. Microstructure of the surface layer of No. 2 roller magnified by 500 times

图 9. 大 500 倍 2 号滚子表层组织

2.4. 非金属夹杂检测

采用 LEICA DMRXE 金相显微镜检验, 对滚子非金属夹杂物进行检测, 执行 GB/T3203-2016 标准要求。检测结果显示, 3 个滚子试样非金属夹杂均符合设计标准要求。且检测结果最大值为 0.5, 好于标准要求。结果详见表 3。

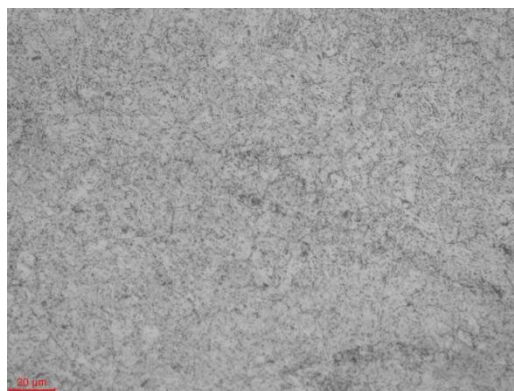


Figure 10. Microstructure of the core of roller No. 2 magnified 500 times
图 10.放大 500 倍 2 号滚子芯部组织

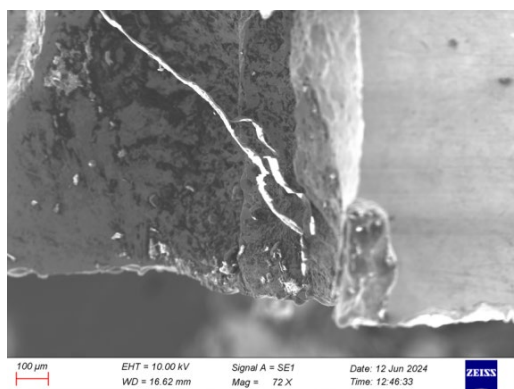


Figure 11. Analysis of cracks in the inner hole of roller No. 2 using an electron microscope
图 11.电子显微镜对 2 号滚子内孔裂纹分析



Figure 12. Microstructure of the surface layer of roller No. 3 magnified 500 times
图 12.放大 500 倍 3 号滚子表层组织

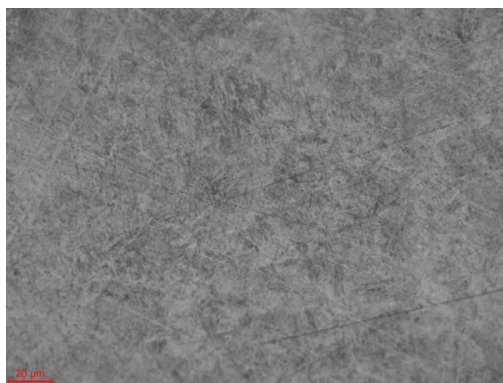


Figure 13. Microstructure of the core of roller No. 3 magnified 500 times
图 13. 放大 500 倍 3 号滚子芯部组织

Table 3. Detection of non-metallic inclusions in failed rolling elements
表 3. 失效滚动体非金属夹杂检测

项目	A 类细系	A 类粗系	B 类细系	B 类粗系	C 类细系	C 类粗系	D 类细系	D 类粗系	Ds
标准	≤2.5	≤1.5	≤2.0	≤1.0	≤0.5	≤0.5	≤1.0	≤1.0	≤2.0
1#	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0.5	0.5	0
2#	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0.5	0.5	0
3#	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0.5	0.5	0

2.5. 化学成分检验

采用 ARL4460 直读光谱分析仪检测，滚子材料符合 SAE3311 标准要求。分析检测结果显示滚子化学元素符合 SAE3311 标准规定，未发现不符合项。具体检测结果见表 4。

Table 4. Chemical composition testing of failed rolling elements
表 4. 失效滚动体化学成分检测

元素	C	S	Si	P	Mn	Cr	Cu	Ni	Mo	Al	Ti	Ca
标准	0.10~0.16	≤0.010	0.15~0.35	≤0.020	0.30~0.50	1.30~1.60	≤0.25	3.25~3.75	≤0.15	0.015~0.050	≤30	≤10
1#	0.16	0.005	0.27	0.009	0.4	1.55	0.12	3.36	0.09	0.03	15	3
2#	0.15	0.006	0.29	0.009	0.4	1.45	0.12	3.33	0.09	0.029	14	6
3#	0.14	0.006	0.28	0.01	0.4	1.42	0.13	3.25	0.09	0.027	13	3

3. 失效分析

3.1. 工况信息

轴承的载荷和转速，轴承工作的载荷如下表 5：

Table 5. Bearing working load
表 5. 轴承工作载荷

径向载荷 F_r (kN)	转速 n_i (r/min)
5145	244

润滑参数

轴承润滑油参数见表 6。工作状态下的轴承润滑油采用 EP 添加剂，颗粒度-17/14。

Table 6. Bearing lubricating oil parameters

表 6. 轴承润滑油参数

润滑方式	40℃时粘度值(mm^2/s)	100℃时粘度值(mm^2/s)
循环油润滑	320	32

3.2. 模型建立

采用 Romax 软件建立冷轧机轴承 - 转轴模型，在转轴上设置一个径向载荷加载点，设置输入功率和输出功率加载点。轴承 Romax 建模见图 14。

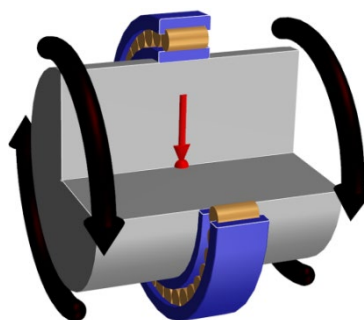


Figure 14. Bearing modeling

图 14. 轴承建模

3.3. 轴承强度校核

按照 Hertz 理论[2]，各类滚子轴承一般均为线接触，表面压力可以认为近似呈半椭圆分布。基于凸度滚子在滚道中受载的实验结果，Palmgren 提出线接触变形公式。滚道接触应力安全系数同最大滚道接触应力、许用接触应力、轴承表面硬度相关。故此，滚子轴承的最大滚道接触应力和滚道接触应力静安全系数可计算。计算结果见表 7。最大滚动体接触应力均小于许用接触应力，最大滚道接触应力点位于内滚道上。

Table 7. Statistics of rolling element strength calculation results

表 7. 滚动体强度计算结果统计

最大滚道接触应力(MPa)	孔内最大应力	许用接触应力(MPa)
1928.7	642.92	4000

结合损坏情况，对轴承进行以下几方面分析：

(1) 对滚子进行仿真分析，分析滚动体受最大载荷时的应力情况。根据图 15 可以看出滚动体表面最大应力 1928.7 Mpa，孔内最大应力 642.92 Mpa，许用应力 4000 Mpa [3] (根据 ISO76 标准规定)，设计满足使用需求，见图 15。

(2) 根据滚动体损坏图片(图 11)，滚动体是受到外力后由滚子内孔出现裂纹碎裂。滚子端面表面异常擦伤及外径表面有擦伤损坏，滚动体内孔表面有擦伤，疑似润滑不良导致干磨，擦伤易引起滚子裂纹碎

裂，受力异常可能引起擦伤损坏。

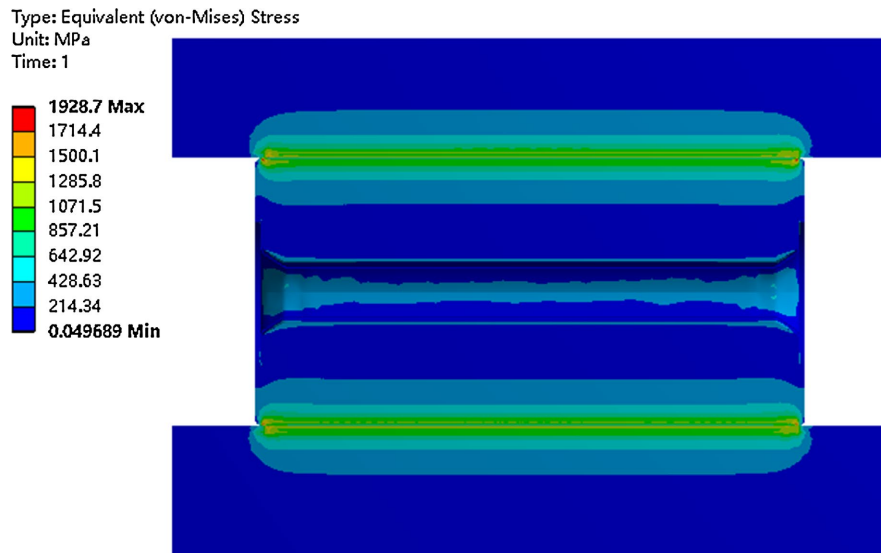


Figure 15. Equivalent stress of longitudinal section at contact center
图 15. 接触中心纵切面等效应力

(3) 滚动体的硬度检测，碎裂的两粒滚动体出现硬度低，硬度低的滚子是由于滚动体与套圈滑动产生发热，发热导致滚动体退火，最终影响硬度。

(4) 滚动体的非金属夹杂和化学成分均符合标准规定。

因此，排除滚动体制造缺陷导致提前失效。根据滚动体主要一侧出现损坏，再结合辊压机的工况。本次轴承失效主要由于滚子孔内润滑不良，出现干磨导致孔内出现微裂纹，当轴承一列滚动体突然承受较大的冲击载荷后，导致滚动体碎裂。

4. 改进措施

根据本次失效分析情况，滚动体没有疲劳剥落现象，而是直接碎裂，从碎裂现象分析是滚动体润滑不良，产生干磨导致出现微裂纹，在承受一定的冲击载荷后出现碎裂。因此，大型热轧辊机轴承在设计过程中一定要考虑滚子孔内润滑问题。解决本次滚动体碎裂问题有以下几点措施：

(1) 结构优化：增大滚子内孔与支柱间隙，及滚子内孔两侧设计引导坡，便于润滑油进入。便于润滑油进入滚子内孔，避免支柱与滚子发生干磨现象。见图 16。

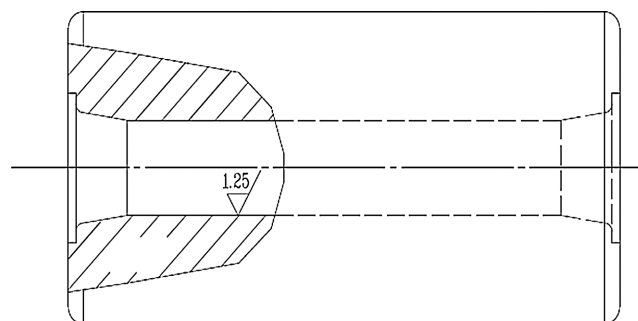


Figure 16. Schematic diagram of the optimized roller inner hole
图 16. 优化后滚子内孔示意图

(2) 降低滚子孔内粗糙度, 对孔内进行抛光处理, 避免应力集中。

(3) 优化润滑系统, 增加强制油雾润滑, 让润滑油最低油位保持在最低 2~3 格滚子浸在润滑油中。解决滚子内孔润滑不良问题。

对滚动体设计和润滑进行优化, 优化后连续使用 8000 小时无故障, 满足客户使用要求, 解决前期出现的滚动体早期失效问题。

5. 结论

本文针对大型热轧辊四列圆柱轴承出现滚子失效开展理化及失效机理分析, 并提出改进措施, 得到如下结论:

(1) 大型热轧辊四列圆柱轴承滚子早期失效主要是由孔内润滑不良, 从而引起滚子孔内产品擦伤, 最后导致滚动体失效。

(2) 针对失效原因, 提出了优化后滚子内孔结构以及加工精度的要求, 同时优化润滑系统后, 优化后使用 8000 小时无故障, 验证了失效分析以及提出举措的有效性。

参考文献

- [1] 柳枫. 热轧机立辊轴承早期失效分析[J]. 轴承, 2013(6): 49-50.
- [2] 戎昊. 冷轧机支撑辊四列圆柱滚子轴承三维接触应力分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [3] 柳枫. 热轧机立辊轴承早期失效分析[J]. 轴承, 2013(6): 49-50.