

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.06.010

# Cr5 支承辊接触疲劳损伤及其次表层组织变化

李彦龙<sup>1,2</sup>, 吴 琮<sup>3</sup>, 秦晓峰<sup>4</sup>, 刘常升<sup>1</sup>

(1. 东北大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁增材制造产业技术研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110200;  
3. 宝武钢铁集团有限公司, 上海 201900; 4. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024)

**摘 要:** 针对支承辊使用过程中的疲劳失效现象, 利用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、显微压痕仪和 X 射线应力仪等对滚动接触疲劳前后 Cr5 支承辊钢次表层组织进行了研究. 结果表明, 支承辊在交变接触应力作用下发生接触疲劳损伤, 疲劳损伤最大值位于距表面约 400 μm 的支承辊次表层. 疲劳损伤引起支承辊次表层硬度升高, 残余应力减小, 耐腐蚀性增强. 疲劳硬化层微观组织发生破碎, 位错密度升高. 在接触应力不变的情况下, 支承辊滚动接触疲劳损伤程度随着寿命比例的增加而增大.

**关 键 词:** 支承辊; 滚动接触疲劳; 显微组织; 疲劳硬化; 残余应力

中图分类号: TB 31      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2020)06-0818-06

## Contact Fatigue Damage and Subsurface Microstruture of Cr5 Backup Roll

LI Yan-long<sup>1,2</sup>, WU Qiong<sup>3</sup>, QIN Xiao-feng<sup>4</sup>, LIU Chang-sheng<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Liaoning Additive Manufacturing Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110200, China; 3. Baowu Group Corporation Limited, Shanghai 201900, China; 4. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China. Corresponding author: LI Yan-long, E-mail: liyanlong0827@126.com)

**Abstract:** Optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM), micro-indentation tester and X-ray stress meter were employed to investigate the microstructure of backup rolls' subsurface after rolling contact fatigue. The maximum value of fatigue damage was located on the subsurface of the backup roll which was about 400 μm away from the surface. The increased hardness, reduced residual stress and elevated corrosion resistance of the subsurface resulted from rolling contact fatigue. Microstructure of the subsurface was broken into small pieces and dislocation density was increased. Under one constant contact stress, fatigue damage of backup roll increased with the increasing percentage of fatigue life.

**Key words:** backup roll; roll contact fatigue; microstructure; fatigue hardening; residual stress

支承辊是现代轧机中的重要部件,其性能和使用状态直接决定着带钢的产品质量,因而得到越来越多生产企业的重视<sup>[1]</sup>. 支承辊与中间辊或工作辊配对使用,用于传递轧制力,提高工作辊的弯曲刚度<sup>[2]</sup>. 支承辊的使用特点对其设计和制造提出了较高的要求,目前大型板带轧机广泛采用 5% Cr 系列锻钢支承辊<sup>[3]</sup>. 国内外学者对 Cr5 支承辊接触疲劳进行了大量研究. Liddle 等<sup>[4]</sup>对接触疲劳损伤而引起的支承辊失效行为进行了研究,并在此基础上提出了支承辊维护方案. 磨损、点蚀和剥落是支承辊的主要失效形式,通过定期预防性修磨可以有效减少支承辊失效行为的发生. Schrama<sup>[5]</sup>对支承辊滚动接触疲劳次表层裂纹萌生与扩展行为进行了研究. Ohkomori 等<sup>[6]</sup>采用有限元仿真技术对支承辊接触疲劳损伤引起的 II 型裂纹扩展行为进行了研究. 支承辊在工作中承

受的循环交变接触应力会引起支承辊次表层接触疲劳,从而引发裂纹萌生和扩展,最终导致支承辊剥落失效. Qin 等<sup>[7-9]</sup>对支承辊滚动接触疲劳损伤分布进行了研究. 支承辊疲劳损伤最大值位于其次表层,随着损伤累积有向表面移动的趋势,通过制定合理的修磨计划可使疲劳损伤最大值逐步趋于某一恒定值. 接触疲劳损伤引起支承辊材料硬化升高,X 射线衍射半高宽降低,同时出现明显的白色腐蚀区. 刘学伟等<sup>[10]</sup>对剥落失效的 Cr5 支承辊进行了分析. 裂纹在疲劳硬化层萌生,在淬硬层内沿着圆周方向扩展,最终到达表面引起大面积剥落. 王玉辉等<sup>[11]</sup>对支承辊滚动接触疲劳过程中的表层组织演变进行了研究. 支承辊表层材料在接触应力作用下发生马氏体相变,残余奥氏体含量降低.

本文在前人工作的基础上,针对支承辊使用过程中的疲劳失效现象,选用 Cr 质量分数为 5% 的支承辊用钢为研究材料,采用现代理化方法对接触疲劳损伤过程及其所引起的次表层微观组织变化进行分析,旨在为支承辊研发、制造和使用提供指导.

1 研究材料及方法

1.1 研究材料

研究用钢由碱性真空炉冶炼,在精炼炉内精炼,进行真空除气后在真空炉内进行浇铸. 表 1 为接触疲劳试样的化学成分. 根据 GB10622—89 规定的金属材料接触疲劳试验方法制备接触疲劳试样. 图 1 为接触疲劳环试样尺寸,其中上环为主试样,模拟支承辊,下环为陪试样,模拟工作辊. 使用 RX4-48-11 型箱式电阻炉对试样进行热处理,800 ℃ 淬火 1 h,150 ℃ 恒温回火 2 h,试样初始硬度约为 50 HRC(510 HV).

1.2 研究方法

按照 GB10622—89 的规定,在 JPM-30 型滚动接触疲劳试验机上进行试验. 表 2 为接触疲劳试验条件,接触应力分 4 级取值. 试验结果采用双参数威布尔分布函数统计分析并绘制  $P-S-N$  曲线. 以额定失效概率  $P=10\%$ ,循环次数  $N=3\times10^7$  时的接触应力  $S$  值作为试验材料的疲劳强度. 在  $P-S-N$  曲线的基础上进行接触疲劳中断试验,疲劳寿命分 4 级取值.

表 1 支承辊滚动接触疲劳试样化学成分 (质量分数)

Table 1 Chemical composition of backup rolls for rolling contact fatigue ( mass fraction )									%
试样	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
主试样	0.4~0.7	0.3~0.7	0.3~0.7	<0.010	<0.001	4.8~5.2	0.3~0.5	0.3~0.5	0.1~0.2
陪试样	0.7~0.9	0.3~0.7	0.3~0.7	<0.010	<0.001	4.8~5.2	0.3~0.5	0.3~0.5	0.1~0.2

表 2 滚动接触疲劳试验条件

Table 2 Experiment conditions of rolling contact fatigue test					
接触应力/MPa	滑动比	摩擦系数	实验温度/℃	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	润滑条件
1 700~2 000	5	0.073±0.004	60±5	2 000	20#机油

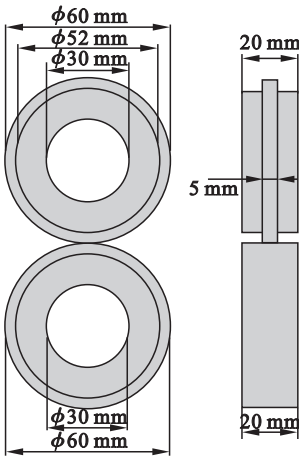


图 1 滚动接触疲劳试样尺寸

Fig. 1 Size of the piece for rolling contact fatigue test

对接触疲劳试验后的主试样环进行剖切. 采用 CSM 型显微压痕测试仪测量接触疲劳层的显微硬度,采用 Rigaku 型 X 射线衍射应力仪测量接触疲劳试样的残余应力,以初步分析接触疲劳可能引起的支承辊材料结构变化. 在此基础上,以 4% (体积分数) 硝酸酒精溶液为腐蚀剂,采用 LSM5 型金相显微镜 (OM)、S-4200 型扫描电子显微镜 (SEM) 和 JEM-200CX 型透射电子显微镜 (TEM) 对试样次表层组织进行精细表征.

2 结果与讨论

2.1 疲劳强度

图 2 为支承辊材料的  $P-S-N$  曲线,图中箭

头所指点为循环次数到达  $6 \times 10^6$  次尚未失效的点. 在  $P = 10\%$ ,  $N = 3 \times 10^7$  条件下, 支承辊钢的疲劳强度为 1 070 MPa. 表 3 为接触应力为 2 000 MPa 时支承辊环试样的滚动接触疲劳中断试验结果.

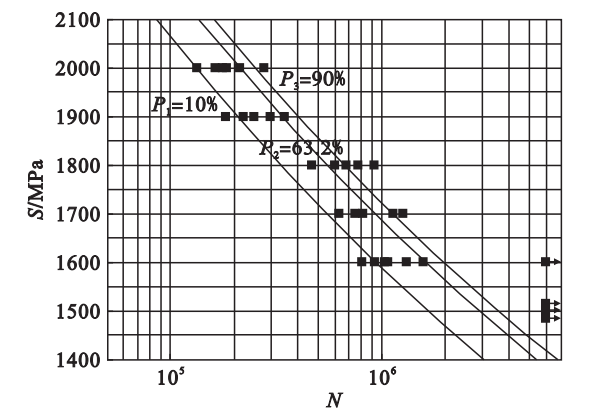


图 2 支承辊钢  $P-S-N$  曲线  
Fig. 2  $P-S-N$  curves of backup roll

表 3 支承辊滚动接触疲劳中断试验结果 Table 3 Test results of backup roll rings after rolling contact fatigue		
寿命比例/%	平均载荷/N	循环次数
20	8 143. 75	214 712
50	7 965. 50	171 770
80	7 879. 25	107 356
100	8 042. 75	42 924

2.2 表面剥落分析

图 3 为不同寿命比例下滚动接触疲劳环试样的表面形貌. 由图可知, 滚动接触疲劳环试样表面存在不同形态不同数量的剥落坑. 当寿命比例较低时, 剥落坑呈片状, 数量较少, 大多孤立存在; 随着寿命比例的增加, 剥落坑的数量明显增多, 并且出现连接成片的麻点状剥落坑.

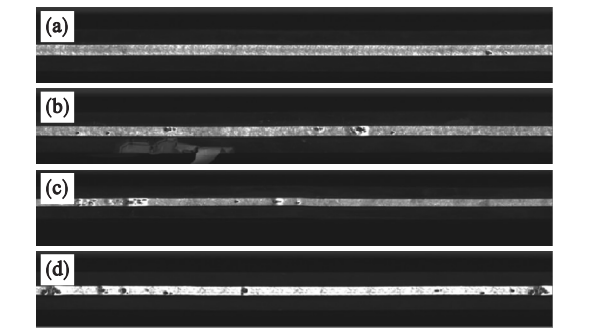


图 3 不同寿命比例的滚动接触疲劳环试样表面形貌  
Fig. 3 Photo of backup rolls' surface after rolling contact fatigue at different percentage of fatigue life

(a)—20% ; (b)—50% ; (c)—80% ; (d)—100% .

图 4 为不同寿命比例下接触疲劳环试样的平均剥落质量. 由图 4 可知, 接触疲劳环试样的平均剥落质量在 0.2 ~ 8.5 g 之间, 平均剥落质量随着寿命比例的增加而逐渐增大.

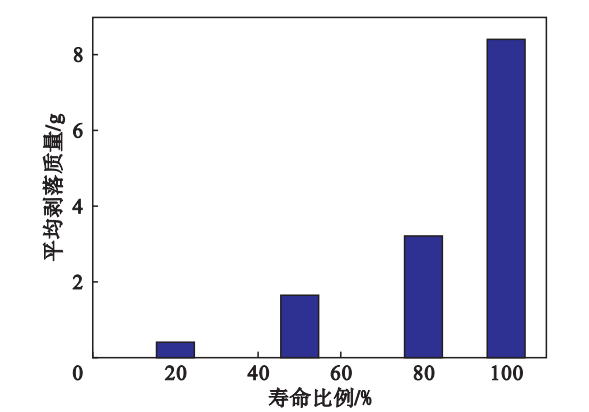


图 4 支承辊滚动接触疲劳环试样平均剥落质量  
Fig. 4 Average spalling mass of backup rolls after rolling contact fatigue

2.3 显微硬度

图 5a 为不同寿命比例下滚动接触疲劳环试样沿径向的硬度分布结果. 显微硬度测量范围为距表面 100 ~ 2 000  $\mu\text{m}$ , 测量间距为 100  $\mu\text{m}$ . 由图 5a 可知, 滚动接触疲劳试验后不同寿命比例的环试样硬度均有所升高, 其硬度最大值位于环试样次表层, 距表面约 400  $\mu\text{m}$ . 当深度小于 400  $\mu\text{m}$  时, 显微硬度随着深度的增加而增大; 当深度在 400 ~ 1 200  $\mu\text{m}$  范围内时, 显微硬度随着深度的增加而逐渐减小; 当深度大于 1 200  $\mu\text{m}$  时, 显微硬度基本保持不变. 图 5b 为不同寿命比例的支承辊滚动接触疲劳环试样次表层最大硬化量分布情况. 由图 5b 可知, 在不同寿命比例下支承辊滚动接触疲劳环试样次表层最大硬化量在 0.45 ~ 1.02 GPa 以内, 最大硬化量随着寿命比例的增加而增大. 支承辊滚动接触疲劳环试样受交变接触应力作用, 在试样的次表层会产生疲劳损伤. 其宏观表现之一为显微硬度升高<sup>[12-13]</sup>. 因此可以使用显微硬度的变化来衡量支承辊材料次表层疲劳损伤程度.

综合图 5a 和图 5b 可知, 支承辊滚动接触疲劳环试样疲劳损伤主要位于其次表层, 在距表面约 400  $\mu\text{m}$  处达到最大值, 深度范围约 1 200  $\mu\text{m}$ . 支承辊滚动接触疲劳环试样不同寿命比例的疲劳损伤程度与其寿命密切相关, 并且随着寿命比例的增加而增大.

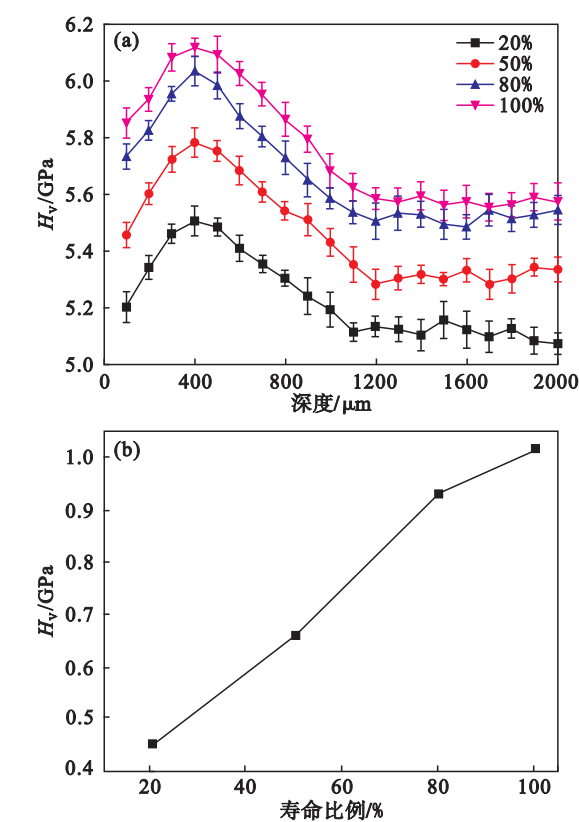


图 5 支承辊滚动接触疲劳环试样硬度分布  
Fig.5 Hardness distribution of backup roll rings after rolling contact fatigue  
(a)—不同寿命比例硬度分布；(b)—最大硬化量。

## 2.4 残余应力

图 6 为不同寿命比例的滚动接触疲劳环试样沿径向的残余应力分布结果。残余应力测量范围为距表面 100 ~ 1 500  $\mu\text{m}$ ，测量间距为 100  $\mu\text{m}$ 。由图 6 可知，滚动接触疲劳试验后不同寿命比例的环试样残余应力均有所降低，其残余应力最小值位于环试样次表层距表面约 400  $\mu\text{m}$  处。当深度小于 400  $\mu\text{m}$  时，残余应力随着深度的增加而减小；当深度在 400 ~ 1 200  $\mu\text{m}$  范围内时，残余应力随着深度的增加而逐渐增大；当深度大于 1 200  $\mu\text{m}$  时，残余应力基本保持不变。在相同深度下，支承辊滚动接触疲劳环试样的残余应力随着寿命比例的增加而减小。这表明支承辊滚动接触疲劳环试样疲劳损伤主要位于其次表层 400  $\mu\text{m}$  处，其疲劳损伤程度随着寿命比例的增加而增大。

## 2.5 微观组织

图 7 为支承辊滚动接触疲劳环试样的金相组织。由图 7 可知，支承辊滚动接触疲劳环试样材料在 4% 体积分数的硝酸酒精溶液腐蚀后出现了明显的白色腐蚀区。白色腐蚀区从表面向心部扩展，深度约为 730  $\mu\text{m}$ 。这表明在接触疲劳试验后支承辊滚动接触疲劳环试样次表层材料的耐腐蚀性有

所增加<sup>[14-16]</sup>，其微观组织发生了变化。

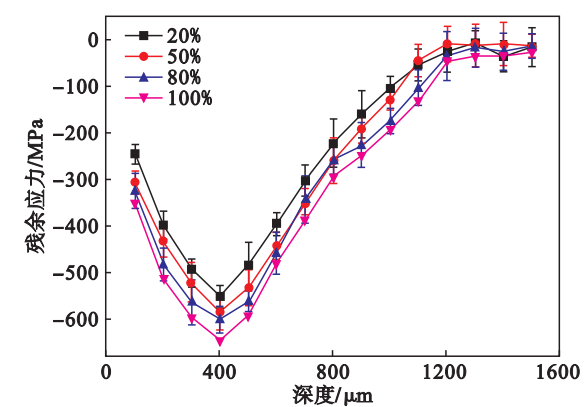


图 6 支承辊滚动接触疲劳环试样的残余应力  
Fig.6 Residual stress of backup roll rings after rolling contact fatigue

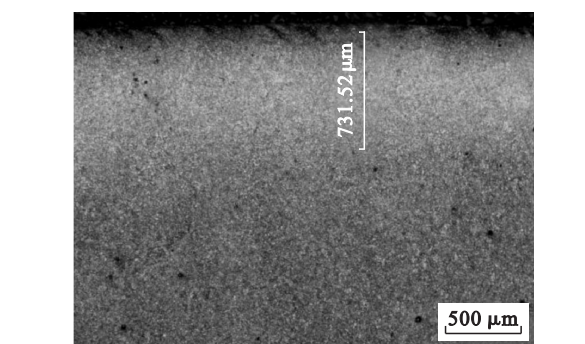


图 7 支承辊滚动接触疲劳环试样 OM 组织形貌  
Fig.7 OM photos of backup roll rings after rolling contact fatigue

图 8 为初始环试样的微观组织形貌。由图 8 可知，滚动接触疲劳环试样原始组织主要为下贝氏体，并含有少量的回火马氏体，以下贝氏体为主。下贝氏体边界和内部均分布有大量的颗粒状碳化物。贝氏体组织边界清晰，且边界相互平行。

从前面的分析可知，支承辊滚动接触疲劳环试样疲劳损伤程度最大值位于距表面约 400  $\mu\text{m}$  的次表层。因此选取寿命比例分别为 20% 和 100% 环试样，对其距表面 400  $\mu\text{m}$  附近的微观组织进行分析，以研究寿命比例对滚动接触疲劳过程中支承辊次表层微观组织的影响。图 9 为不同寿命比例的支承辊环试样次表层微观组织。图 9a 和 9c 分别为寿命比例为 20% 的支承辊环试样的 SEM 与 TEM 形貌。由图可知，寿命比例为 20% 的环试样次表层组织以下贝氏体为主，同时含有少量的回火马氏体。贝氏体与马氏体边界不清晰，贝氏体束条呈现破碎趋势。图 9b 和 9d 分别为寿命比例 100% 的支承辊环试样的 SEM 与 TEM 形貌。由图可知，寿命比例为 100% 的环试样次表层组织仍以下贝氏体为主，贝氏体边界模糊程度加剧，贝氏体束条出现较大程度破碎，分化成较小尺



度的二次板条. 由图 8 和 9 对比可知,滚动接触疲劳试验后的环试样其次表层组织与初始试样相比发生了明显的变化. 其组织仍以下贝氏体为主,贝氏体组织尺寸有所减小,贝氏体与马氏体边界变得不清晰,贝氏体束条呈现破碎趋势,束条内位错

密度有所增加,局部束条内存在少量碳化物. 上述现象说明,疲劳损伤将导致支承辊次表层中板条马氏体和下贝氏体组织的破碎,同时生成较小尺度的二次板条. 组织破碎程度随着寿命比例的增加而逐渐增大.

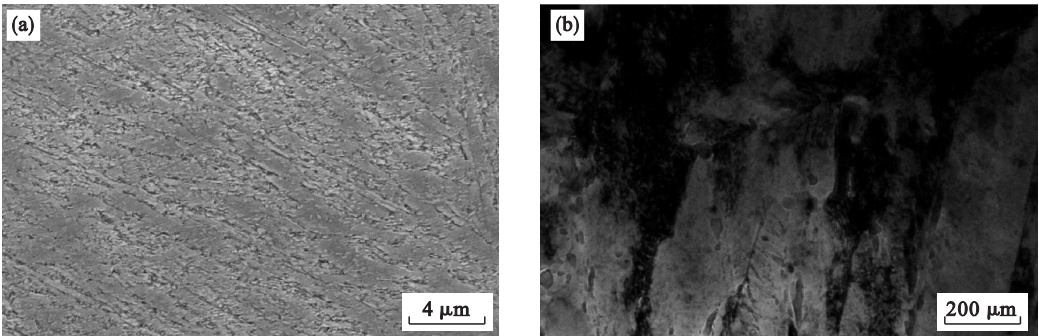


图 8 支承辊滚动接触疲劳初始环试样微观形貌  
Fig. 8 Original microstructure of backup roll rings for rolling contact fatigue  
(a)—SEM 形貌; (b)—TEM 形貌.

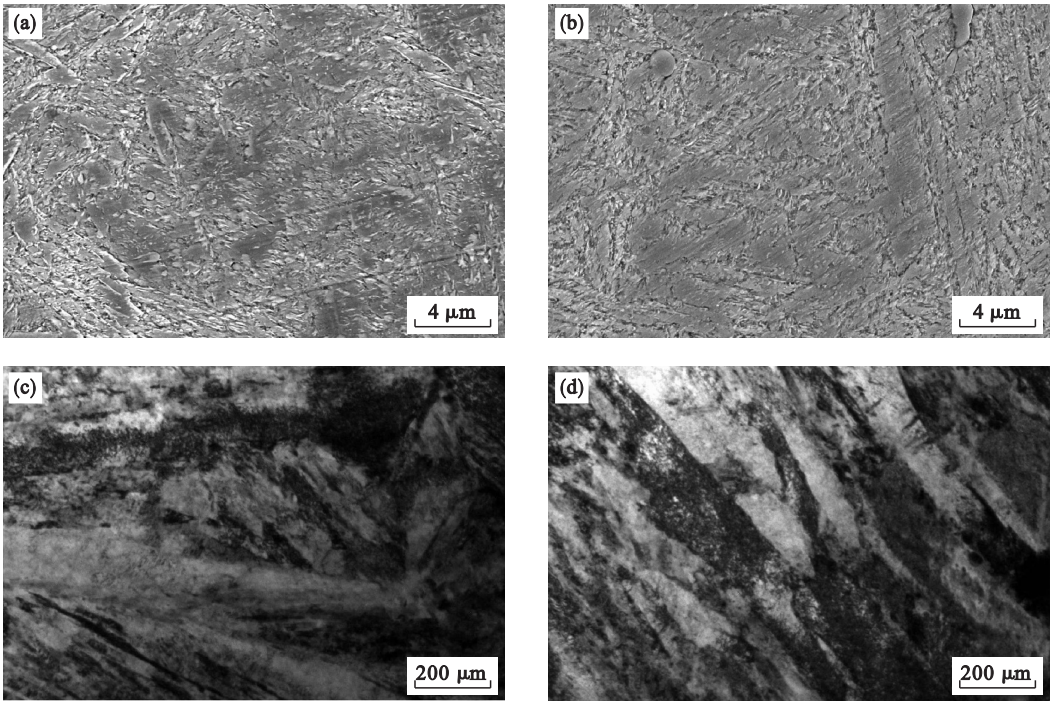


图 9 不同寿命比例的支承辊滚动接触疲劳环试样微观组织形貌  
Fig. 9 Microstructure of backup roll rings after rolling contact fatigue at different percentage of fatigue life  
(a)—寿命比例 20% 的 SEM 形貌; (b)—寿命比例 100% 的 SEM 形貌;  
(c)—寿命比例 20% 的 TEM 形貌; (d)—寿命比例 100% 的 TEM 形貌.

综上所述,支承辊在使用过程中受到交变接触应力作用会在其次表层发生疲劳损伤,在接触应力不变的情况下其疲劳损伤程度随着寿命比例的增加而增大. 疲劳损伤将引起支承辊材料组织发生破碎,位错密度升高. 支承辊次表层组织发生破碎,生成较小尺寸的二次板条等亚结构. 这些亚

结构会增加晶粒的比表面积从而导致支承辊次表层硬度增加<sup>[17]</sup>、残余应力降低<sup>[18-19]</sup>、耐腐蚀性增强. 支承辊材料硬度增加将导致其韧性降低,裂纹易于在疲劳硬化层萌生<sup>[20]</sup>,在接触应力的作用下扩展,最终引发支承辊剥落.

### 3 结 论

1) 支承辊钢疲劳强度为 1 070 MPa, 其工作层组织为下贝氏体和回火马氏体。

2) 在交变接触应力作用下, 支承辊发生接触疲劳损伤的最大值位于距表面约 400  $\mu\text{m}$  的支承辊次表层。疲劳损伤将引起支承辊材料组织发生破碎, 位错密度升高。同时表现为支承辊显微硬度升高, 残余应力降低, 耐腐蚀性增强。在接触应力不变的情况下, 支承辊滚动接触疲劳损伤程度随着寿命比例的增加而增大。

3) 接触疲劳损伤将导致支承辊材料韧性降低, 从而易于萌生裂纹, 裂纹在接触应力的作用下扩展, 最终引发支承辊剥落。支承辊的剥落风险随着疲劳寿命比例的增加而增大。

### 参考文献:

- [1] Kopp R. Some current development trends in metal-forming technology[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 60: 1–9.
- [2] Ohkomori Y, Ikujiro K, Shinozuka K, et al. Cause and prevention of spalling of backup rolls for hot strip mill[J]. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1988, 28(1): 68–74.
- [3] 赵席春. Cr5 型支承辊用钢的研究[J]. 金属热处理, 2003, 28(6): 26–28.  
(Zhao Xi-chun. Research on Cr5-type forged steel for backup roll[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2003, 28(6): 26–28.)
- [4] Liddle A J, Shinozuka K, Nagamatsu T. Backup roll maintenance for preventing spalling accidents[J]. *South East Asia Iron and Steel Institute Quarterly (Malaysia)*, 1998, 27(1): 8–64.
- [5] Schrama R C. Types of failures of backup roll assemblies[J]. *Iron and Steel Technology*, 2005(12): 39–56.
- [6] Ohkomori Y. Analysis of mode II crack growth behavior in spalling failure of backup roll[J]. *Journal of the Society of Materials Science Japan*, 2001, 50(3): 249–254.
- [7] Sun D L, Qin X F, Xie L Y, et al. Subsurface rolling contact fatigue damage distribution of backup roll after periodic dressing[J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2014, 14(4): 491–496.
- [8] Qin X F, Sun D L, Xie L Y. Analysis of critical stress for subsurface rolling contact fatigue damage assessment under roll/slide contact[J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2014, 14(1): 61–67.
- [9] Qin X F, Li F, Zhao X G. An approach for subsurface rolling contact fatigue damage assessment of backup roll material[J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2017, 17(5): 942–947.
- [10] 刘学伟, 裴新华, 周丽萍, 等. Cr5 支承辊失效分析[J]. 物理测试, 2007(4): 55–57.  
(Liu Xue-wei, Pei Xin-hua, Zhou Li-ping, et al. Cracking failure analysis of back-up roll of Cr5 [J]. *Physics Examination and Testing*, 2007(4): 55–57.)
- [11] 王玉辉, 刘利刚, 蔡大勇, 等. 支承辊钢接触疲劳过程中的表层组织变化[J]. 中国表面工程, 2012, 25(6): 85–89.  
(Wang Yu-hui, Liu Li-gang, Cai Da-yong, et al. Investigation of surface microstructure of back-up rolls steel under contact fatigue[J]. *China Surface Engineering*, 2012, 25(6): 85–89.)
- [12] Ye D, Wang Z. An approach to investigate pre-nucleation fatigue damage of cyclically loaded metals using Vickers microhardness tests[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23(1): 85–91.
- [13] Ungár T, Li L, Tichy G, et al. Work softening in nanocrystalline materials induced by dislocation annihilation[J]. *Scripta Materialia*, 2011, 64(9): 876–879.
- [14] Qin X F, Sun D L, Xie L Y, et al. Hardening mechanism of Cr5 backup roll material induced by rolling contact fatigue[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 600(10): 195–199.
- [15] Kang J H, Hosseinkhani B, Rivera-Díaz-del-Castillo P. Rolling contact fatigue in bearings: multiscale overview[J]. *Materials Science and Technology*, 2012, 28(1): 44–49.
- [16] Zhang H W, Ohsaki S, Mitao S, et al. Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 421(1): 191–199.
- [17] Peeters B, Seefeldt M, Teodosiu C, et al. Work-hardening/softening behaviour of bcc polycrystals during changing strain paths. I: an integrated model based on substructure and texture evolution, and its prediction of the stress-strain behaviour of an IF steel during two-stage strain paths[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(9): 1607–1619.
- [18] Hiroshi T, Kazuo N, Keizo F, et al. Evaluation of subsurface fatigue damage in strip mill rolls by an X-ray diffraction method[J]. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1981, 21: 92–99.
- [19] Pangborn R N, Weissmann S, Kramer I R. Measurement of cumulative fatigue damage by X-ray double-crystal and scanning diffraction methods [M]//Advances in X-Ray Analysis. New York: Springer, 1981: 203–208.
- [20] Frolich M F, Beynon J H. Design criteria for rolling contact fatigue resistance in back-up rolls[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2004(4): 300–304.