

支承辊钢接触疲劳过程中的表层组织变化^{*}

王玉辉^a, 刘利刚^a, 蔡大勇^b, 肖福仁^b, 杨庆祥^b, 廖 波^b

(燕山大学 a. 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心 b. 材料科学与工程学院 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 利用光学显微镜(OM)、透射电子显微镜(TEM)、X 射线衍射(XRD)等手段,对滚动接触疲劳前后 Cr5 型支承辊用钢的表层组织演变进行了研究。结果表明:经 940 ℃ 保温 2 h 淬火+450 ℃ 保温 4 h 回火处理后,Cr5 型支承辊用钢的热处理组织由回火马氏体+残余奥氏体+球型碳化物组成。接触疲劳过程中片状马氏体组织发生细化,碳化物由球型转变成杆状,在接触疲劳循环应力作用下发生应变诱发马氏体相变,接触前后试样表层的残余奥氏体含量由 6.4% 下降到 0.8%。

关键词: 接触疲劳; 支承辊; 显微组织; 杆状碳化物

中图分类号: TG115.57 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2012)06-0085-05

Investigation of Surface Microstructure of Back-up Rolls Steel Under Contact Fatigue

WANG Yu-hui^a, LIU Li-gang^a, CAI Da-yong^b, XIAO Fu-ren^b, YANG Qing-xiang^b, LIAO Bo^b

(a. National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, b. National Key Laboratory of Metastable Materials Science & Technology, College of Material Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei)

Abstract: The microstructure evolution of Cr5-type back-up roll steel used for back-up roller has been investigated before and after the fatigue test by using optical microscopy (OM), transmission electron microscopy (TEM) and X-ray diffraction (XRD). Results show that the microstructure is composed of tempered martensitic, retained austenite and carbides after the heat treatment process of quenched after solution at 940 ℃ for 2 h, then tempered at 450 ℃ for 4 h. The contact fatigue process leads to finer martensitic microstructure and the shape of carbides from spherical transform to bacilliform. The behavior of strain induced martensite occurs and the content of retained austenite decreases from 6.4% to 0.8% after the fatigue test.

Key words: contact fatigue; back-up roller; microstructure; bacilliform carbide

0 引 言

支承辊是轧机的重要组成部件,其作用是支承工作辊,减小工作辊的弯曲变形从而在轧制过程中保证板厚精度和板形质量。支承辊一旦失效会因换辊而影响作业效率,增加支承辊备品所占用的资金,造成产品质量不稳定,从而导致产品的成本上升,减弱产品的市场竞争力,所以开

展对支承辊材料的研究具有重要的工程意义。通过选用不同的基体材料(如含铬钢、高速钢等),不同的处理方法(如激光处理、表面镀层等^[1-2])等对改善支承辊用钢的疲劳极限等问题进行了大量的研究,积累了丰富的经验^[3-7],但对其接触疲劳过程中材料的表层组织演变以及由此产生的对材料性能影响这一问题关注仍不够,相

收稿日期: 2012-10-04; **修回日期:** 2012-11-23; **基金项目:** * 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心开放课题(NECSR-201207); 河北省科技支撑计划项目(07212109D)

作者简介: 王玉辉(1978—),男(汉),河北石家庄人,博士生; **研究方向:** 疲劳,材料物理模拟技术

网络出版日期: 2012-11-28 16:18; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20121128.1618.008.html>

引文格式: 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.

关的研究报道少见。Cr5 型钢(类似于日本的 MC3 钢)有着优良的综合性能,是当前用做轧辊的主要材料之一^[7-10]。通过对 Cr5 型钢组织中的马氏体、碳化物和残余奥氏体深入地研究,可以了解并揭示材料的微观组织与性能的关系,为轧辊材料性能质量不断改进提供新的思路。

文中对 Cr5 型支承辊用钢接触疲劳试验样品的表层组织及其性能的变化进行了较为系统的研究,旨在了解材料表面在不同接触应力作用下经过多次应力循环导致支承辊失效的现象,为延长支承辊的工作寿命提供科学依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验用 Cr5 钢是由碱性真空炉冶炼,在精炼炉内精炼,进行真空除气后在真空室内进行浇铸,其化学成分见表 1。经锻造成棒材后进行热处理,其工艺为:在 940 ℃保温 2 h 奥氏体化后油冷,再经 450 ℃保温 4 h 回火处理。

表 1 试验用 Cr5 钢主要合金成分 (ω/%)

Table 1 Chemical composition of the experimental steel (ω/%)

Element	C	Si	Mn	P	S
ω/ %	0.48~0.58	0.40~0.70	0.40~0.70	<0.02	<0.02
Element	Cr	Ni	Mo	V	
ω/ %	4.50~5.50	0.40~0.50	0.45~0.60	0.10~0.20	

1.2 试验方法

接触疲劳试验按国标 GB10622-89 规定的金属材料滚动接触疲劳试验方法进行。主试样采用线接触的 JP-3 型尺寸形状进行加工(陪试样按照 PS-1 号试样进行加工)。试验在 JPM-1 型接触疲劳磨损试验机上进行,转速为 2 000 r/min,滑差率为 4.53%,采用 N32 型号机油冷却,回油温度≤52 ℃。陪试样为模拟工作辊,材料为 Cr12MoV,硬度为 HRC 61。

对疲劳试验前后的试样进行微观组织分析,利用蔡司金相显微镜观察试验用钢的金相组织,腐蚀剂为 4% 的硝酸酒精。利用 X 射线衍射仪(XRD)对实验钢的组织 and 相结构进行分析,利用 X 射线应力仪测量试样表层残余奥氏体含量。用 H-800 型透射电镜(TEM)对试样表层的精细组织

结构进行观察。用接触疲劳应力公式计算^[11-13],确定了疲劳试验选定的应力水平,见表 2。其疲劳寿命的 P-N 曲线和 P-S-N 曲线如图 1 所示。

表 2 试验采用的应力水平/(MPa)

Table 2 The stress used in the test/(MPa)

The first step stress	The second step stress	The third step stress	The fourth step stress
1374.9	1587.5	1774.9	1944.3

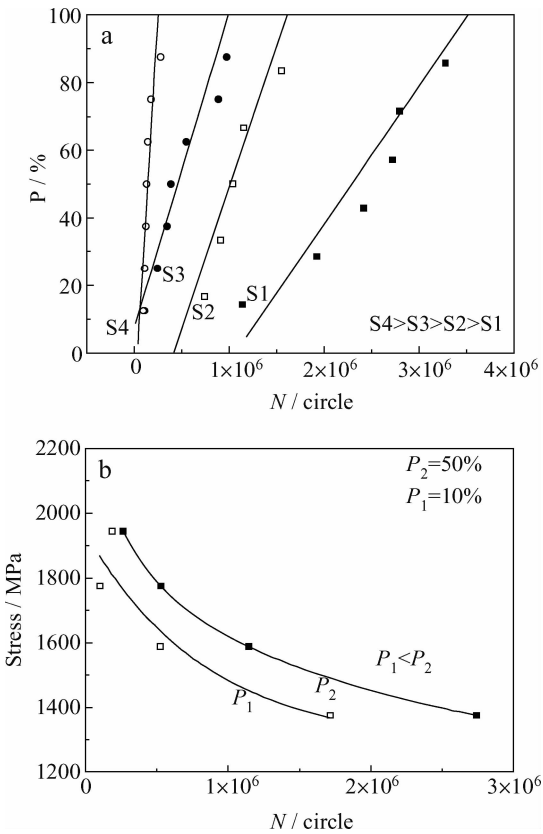


图 1 Cr5 试样的 P-N 曲线(a)和 P-S-N 曲线(b)
Fig. 1 The P-N (a) and P-S-N (b) curves of Cr5 steels

2 结果与讨论

试验用 Cr5 钢热处理后的金相组织为回火马氏体+少量碳化物+少量残余奥氏体,如图 2 所示。图 3 为疲劳试验前表层组织的 XRD 分析。

2.1 试样表层组织的变化

图 4 和图 5 分别给出了试样的不同部位在疲劳应力条件下失效后金相组织照片。试样在 1944.3 MPa 接触应力作用下,试样的疲劳寿命在 2.76×10^5 N 周次后出现剥落,接触疲劳后的

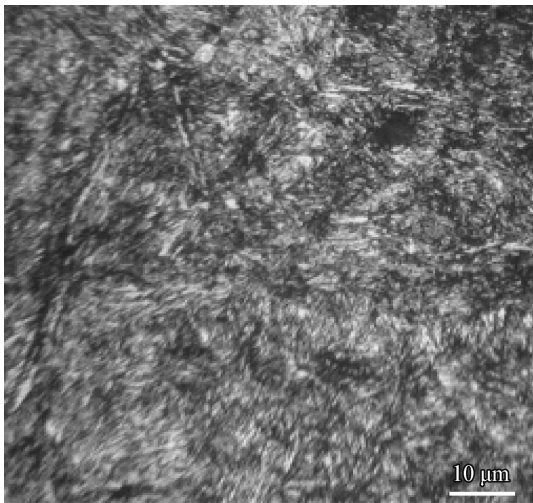


图 2 Cr5 钢热处理后试样的金相组织
Fig. 2 Microstructure of Cr5 steel after heat treatment

变形区和过渡区很薄,甚至几乎没有过渡区(如图 4 所示)。试样在 1374.9 MPa 接触应力作用下,疲劳寿命达到 2.796×10^6 N 周次,接触疲劳

后的变形区增宽,过渡区明显,并且变形区和过渡区组织在不同程度上被细化(如图 5 所示)。光学显微组织分析表明,对应较低应力条件的试样,经较长时间滚动接触后,表层组织被细化,存在明显的细化区和过渡区。

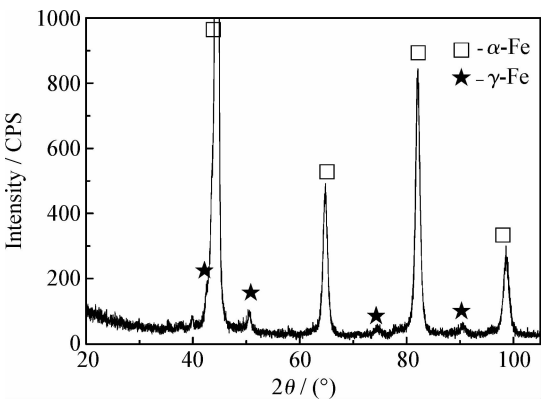
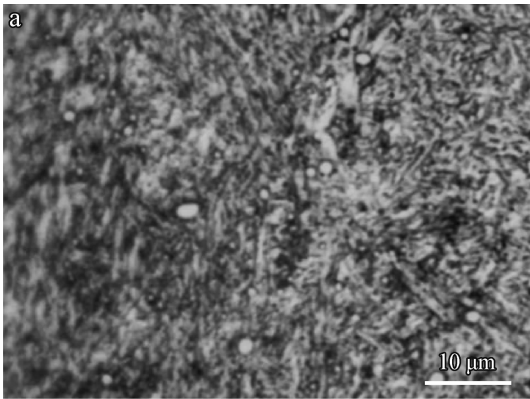
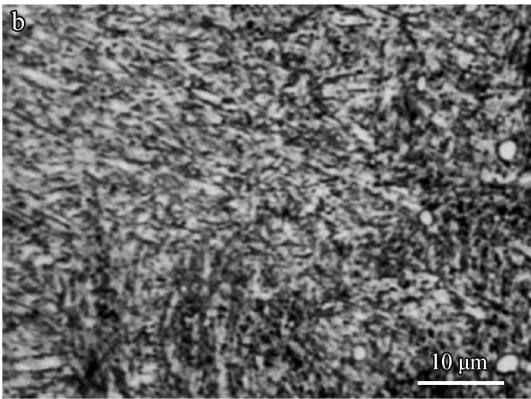


图 3 Cr5 钢疲劳试验前表层组织 XRD 分析
Fig. 3 XRD analysis of Cr5 steel before fatigue test

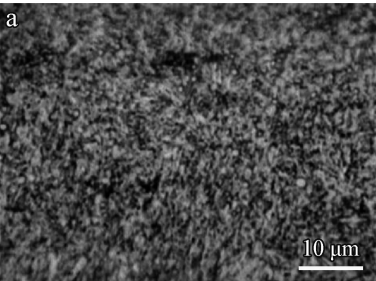


(a) Surface layer

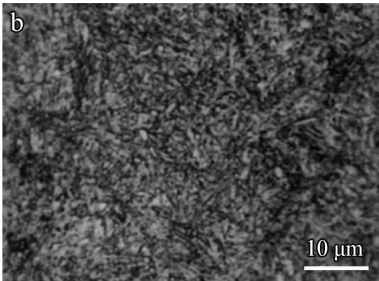


(b) Substrate

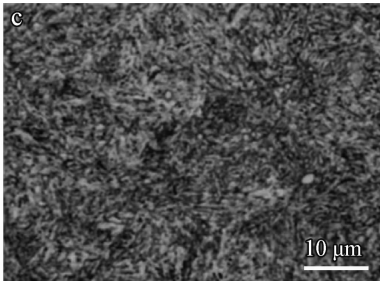
图 4 试样在疲劳失效后的金相组织
Fig. 4 Optical micrograph of the sample after the fatigue test



(a) Surface layer



(b) Transition layer



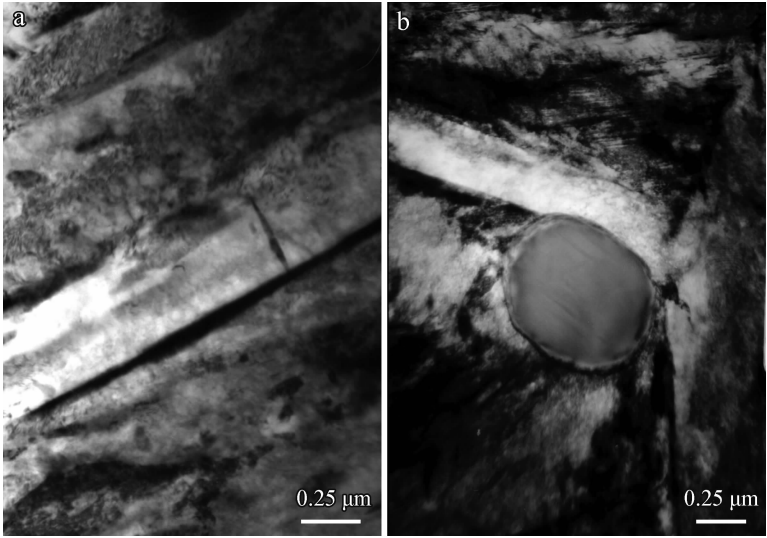
(c) Substrate

图 5 试样在疲劳失效后的金相组织
Fig. 5 Optical micrograph of the sample after the fatigue test

图 6 为试样在疲劳失效前试样表层组织的透射电镜照片。试样的基体组织为回火马氏体(图 6(a)),存在有少量未溶的球形碳化物(图 6(b))。试样经过较长时间滚动接触失效后,在距表面 0.13 mm 处取样观察其显微组织,以位错马氏体为主(图 7(a)),且马氏体板条宽度较疲劳试验前变窄。钢中的奥氏体组织在受力变形时,内部会产生大量位错,在向马氏体转变时,这些位错会遗传给马氏体。在滚动接触疲劳过程中,变形层

中碳化物的形态发生明显变化,由球形碳化物转变为杆状碳化物(图 7(b))。滚动接触疲劳试验过程在高的接触应力条件下产生塑性变形及瞬时高温,使球状碳化物向奥氏体溶解;在接触压应力作用和一定冷却速度作用下,有杆状碳化物析出。

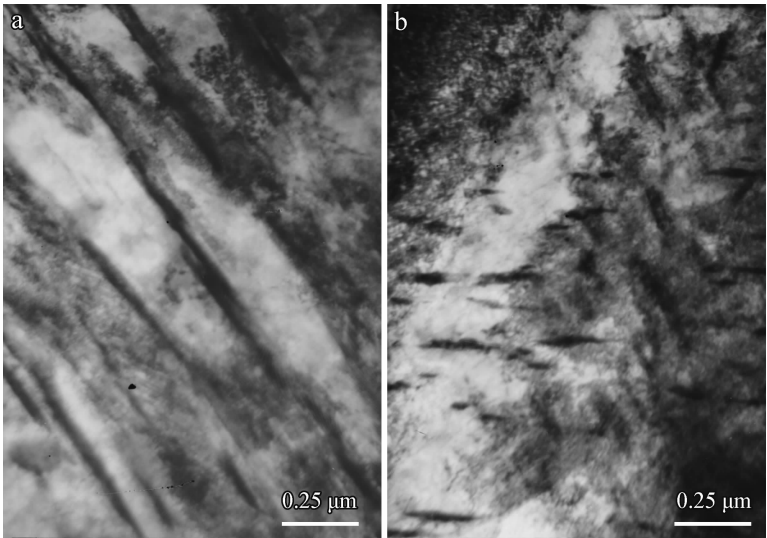
诸多研究表明,减小碳化物尺寸和畸变,可以提高钢的接触疲劳强度和塑性变形能力。Ev. A. Shui^[14]研究表明,具有铁素体-渗碳体片



(a) Tempered martensite (b) Undissolved carbide

图 6 原始试样 TEM 形貌

Fig. 6 TEM results of original sample



(a) Lath martensite (b) Bacilliform carbide

图 7 疲劳失效后试样表面 TEM 形貌(1374.9 MPa, 2.796×10^6 N)

Fig. 7 TEM results of the sample after the test with the stress of 1374.9 MPa and 2.796×10^6 N

层结构的钢,一方面,接触应力条件下可以增加冷作硬化范围向深度方向发展;另一方面,可降低接触区域附近材料的冷作硬化的梯度效应,其抗接触疲劳强度要远高于具有球状碳化物的钢。

2.2 表层组织结构分析

用X射线应力仪对试验后(1374.9 MPa, 2.796×10^6 N)试样中的残余奥氏体进行定量分析(见图8所示)。从图8可以看出试样中残余奥氏体分布规律:经较长时间的滚动接触后,试样表面处的残余奥氏体含量为0.8%,而心部的基体残余奥氏体含量为6.4%,试样表面的残余奥氏体含量明显少于心部,说明在滚动接触疲劳过程中残余奥氏体发生应变诱发马氏体转变。保留一部分残余奥氏体对于提高材料的抗疲劳性能有着积极的意义,一方面,在接触应力条件下,残余奥氏体发生形变,削弱应力在亚表层的强度分布;另一方面,在接触应力条件下,应变诱发马氏体相变,使亚表层组织强化,可以有效抑制疲劳剥落。

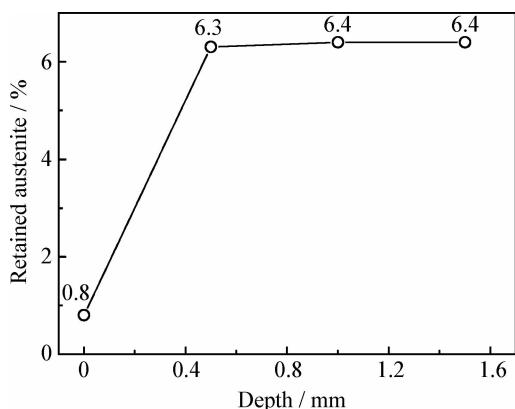


图8 残余奥氏体沿表层的分布

Fig. 8 The relationship between the content of the retained austenite and the depth from the surface to the core after tested

3 结 论

(1) Cr5 钢热处理组织为回火马氏体+残余奥氏体+球型碳化物,接触疲劳过程中,片状马氏体组织发生细化,球形碳化物转变成杆状。

(2) 接触疲劳过程中,Cr5 钢中表层残余奥氏体含量从6.4%下降到0.8%。

(3) 保留一定含量的残余奥氏体有利于提高Cr5 支承辊用钢的滚动接触疲劳寿命。

参考文献

- [1] 周磊,汪诚,周留成,等. 激光冲击表面强化对焊接接头力学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2010, 23(5): 41-44, 48.
- [2] 王仁智. 工程金属材料/零件的表面完整性及其断裂抗力[J]. 中国表面工程, 2011, 24(5): 55-57.
- [3] 王玉辉,廖波,肖福仁,等. 支承辊用Cr5 钢线接触滚动疲劳性能[J]. 金属热处理, 2006, 31(9): 25-29.
- [4] Jae-Hwa Ryu, Han-Bin Ryu. Effect of thermal fatigue property of hot strip mill work roll materials on the rolled-in defects in the ultra-low carbon steel strips[J]. ISIJ International Journal, 2003, 43(7): 1036-9.
- [5] 蒋志强,冯锡兰,符寒光,等. 高速钢轧辊热处理裂纹的形成与控制[J]. 金属热处理, 2006, 31(Z1): 160-162.
- [6] 王贵,王建国,周新初,等. 轧辊钢激光熔凝处理组织及性能研究[J]. 金属热处理, 2001, (3): 35-37.
- [7] 李慧,郭铁波. 稀土对9Cr2Mo 钢组织和性能的影响[J]. 钢铁, 2001, 36(4): 54-56, 61.
- [8] 王桂兰,刘志琴,申飞平. 高性能冷轧辊的研究和选用[J]. 大型铸锻件, 2002, (1): 30-33, 46.
- [9] 张乐欣,胡怡,赵席春,等. 新型支承辊材料及其热处理工艺研究[J]. 金属热处理, 1999, (9): 34-36.
- [10] 胡春宝,张海. 新型冷轧辊热处理工艺的优化选择[J]. 物理测试, 2004, (4): 40-43.
- [11] Ringsberg J W. Life predictions of rolling contact fatigue crack initiation[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23: 575-586.
- [12] Kimura Yoshitsugu, Sekizawa Masami, Nitani Akio. Wear and fatigue in rolling contact[J]. Wear, 2002, 253: 9-16.
- [13] Šraml M, Flašker J, Potrc I. Numerical procedure for predicting the rolling contact fatigue crack initiation[J]. International Journal of Fatigue, 2003, (25): 585-595.
- [14] Shur Ev A, Bychkova N Ya, Trushevsky S M. Physical metallurgy aspects of rolling contact fatigue of rail steels[J]. Wear, 2005, (258): 1165-71.

作者地址: 河北省秦皇岛市河北大街西段438号 066004
燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心
Tel: (0335) 8387 652
E-mail: yhwang@ysu.edu.cn