

重载接触试验与机理分析

卞永明, 梁 敖, 张泽宇, 陈 哲

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 为研究重载接触工作状况下机械零部件的耐磨性, 提高零部件的使用寿命, 以某重载装备伸缩臂的托辊系统为研究对象, 进行托辊系统与支撑板重载接触试验, 研究摩擦试件的磨损机理。使用光学显微镜、扫描电子显微镜和能谱分析仪对试件磨损后的表面宏/微观形貌、化学成分和塑性变形情况进行分析。结果表明, 在重载工作状况下, 随着磨损次数的增加, 支撑板的磨损机理呈现为综合的磨粒磨损和黏着磨损; 而由于托辊的硬度比支撑板硬度高, 所以托辊的磨损机理主要是磨粒磨损, 伴随着轻微的黏着磨损。通过对磨损后托辊截断面的显微组织观察, 发现表层片状珠光体局部区域有位错、组织破坏等现象, 这表明重载接触下托辊已经发生塑性变形。

关键词: 重载接触; 托辊系统; 磨损机理; 表面形貌

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

Mechanism Analysis of Overloading Contact Test

BIAN Yongming, LIANG Ao, ZHANG Zeyu, CHEN Zhe

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Taking the roller system of the heavy equipment telescopic boom as the research object, the overloading contact tests of the roller system and the supporting plate was conducted to investigate the wear mechanism of friction specimens, in order to improve the wear resistance and the life span of the mechanical parts. By using scanning metallography, SEM and EDS techniques, the surface morphologies, chemical composition and plastic deformation of the worn test specimens were analyzed. The results show that under heavy-duty conditions and with the increase of wear times, the wear mechanism of the supporting plate is both abrasive and adhesive. However, the wear of the roller is less serious than that of the supporting plate because of its higher hardness. The wear mechanism of the roller is both abrasive

and mild adhesive. A study of the worn roller layer microstructure indicates that lamellar pearlite has dislocation movement and microstructure damage in the local area, which shows that the plastic deformation of the roller has happened under overloading contact.

Key words: overloading contact; roller system; worn mechanism; surface morphology

低速重载接触运动作为一种特殊工作状况广泛存在于实际工程应用中。与普通摩擦副运动相比, 其运行条件恶劣, 更易出现磨损等失效现象, 进而导致机械系统零部件工作效率低、工作不稳定, 甚至丧失工作能力^[1-2]。因此, 研究重载接触摩擦副的磨损机理和规律, 寻求防止和减少磨损的措施, 对提高机械系统的使用寿命具有重要意义。

多年来, 众多研究学者就摩擦副接触问题进行了大量的试验和理论研究。钟雯等^[3-4]通过改变车速和轴重来模拟铁轨的接触试验, 发现高速铁轨的主要损伤形式是疲劳裂纹扩展, 而重载铁轨由于塑性变形明显, 损伤形式以磨损为主。张铁等^[5]通过研究实际应用中典型轮轨接触型面发现在相同的载荷工况下, 随着轮缘的磨耗, 轮轨接触斑面积呈现出先增加后减小的变化趋势, 初期车轮轮缘根部局部剧烈磨耗, 逐渐扩大到整个轮缘剧烈磨耗, 但最终轮缘和踏面磨耗均匀, 轮缘磨耗进入相对稳定的磨耗阶段直至磨耗到限。Wang等^[6]通过观察接触后的轨道表面和近表面区域的显微结构并测定残余应力状态, 发现强载荷直接影响轨道材料显微组织变化。Garnham等^[7-8]发现使用中的钢轨表面经过多次碾压, 晶粒破碎细化, 硬度升高, 产生塑性变形层, 并且微观组织结构变化会影响滚动接触疲劳下裂纹扩展情况。Li等^[9]通过模拟高速下轮轨接触试验发现, 经

收稿日期: 2016-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(51575398); 上海市自然科学基金(15ZR1442400); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 卞永明(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为机电液一体化技术、实时网络控制理论、大型工程装备及新工艺等。E-mail: ymbianmail@163.com

过不同热处理工艺而形成的两种微观组织结构(球状珠光体和片状珠光体)中,片状珠光体的耐疲劳性显著超过球状珠光体. Vrbka 等^[10]通过滚轮接触试验发现,在重载运动条件下,微织构的深度、排列、大小和面积占有率都对接触疲劳磨损寿命产生影响,微凹坑表面比光滑表面更耐磨损. Cai 等^[11]采用销盘法对广泛应用于工程机械中具有高强度、抗氧化性的合金材料进行干摩擦试验,研究合金在摩擦过程中微观表面结构和组织的演变,便于提高合金的摩擦性能. 还有很多学者^[12-14]基于滑动摩擦或滚动摩擦从材料所含元素变化上对复合材料的摩擦学性能进行了研究,发现表现出的磨损机理大多为磨粒磨损和黏着磨损的综合性磨损机理. 李奇等^[15]为改善车辆发动机中活塞环与缸套摩擦副的耐磨性,对其进行试验研究,发现在动载荷下活塞环的磨损机理是综合的磨粒磨损、黏着磨损和疲劳磨损;缸套的磨损机理是综合的磨粒磨损和黏着磨损. Devlin 等^[16]对双齿轮啮合情况进行试验研究,发现由于重载下齿面相啮合金属直接接触而产生黏着磨损现象,从而导致严重的齿面破坏,甚至断裂. 以上研究大多集中在研究对象为高速接触下的摩擦磨损,且从表面宏观、微观形貌及试件材料所含元素变化上研究其磨损机理,而针对重载托辊系统在低速重载接触下的磨损机理单从上述研究角度无法进行全面分析,所以本文进一步从微观塑性变形的角度进行研究.

本文基于 Hertz 理论建立托辊与支撑板的接触力学模型,进行重载条件下托辊系统与支撑板的接触试验,观察磨损后的表面宏观、微观形貌及微观塑性变形,分析出磨损机理,为改善托辊系统的耐磨性、延长使用寿命提供依据.

1 基于 Hertz 理论的接触力学模型

1.1 托辊系统

以某型号重载装备伸缩臂的受载托辊系统为研究对象,该托辊系统主要由托辊、销轴、托板及基座等组成. 托辊系统工作时,有 5 个托辊外圆与支撑板形成直接接触. 在实际应用中,托辊系统会承受相应外载荷,因此本次试验中也对托辊系统施加一定载荷,用以研究托辊与支撑板之间在施加重载荷下的接触情况,如图 1 所示.

1.2 基于 Hertz 理论的接触模型

为了观察托辊系统与支撑板之间的重载接触磨

损情况,需要根据 Hertz 接触理论计算出托辊与支撑板之间所能承受的最大压力. Hertz 接触理论假设接触面上只作用有分布呈椭圆体的垂直压力,且相接触的物体被作为弹性半空间. 在零载荷条件下,托辊与支撑板之间可认为是线接触,即两个表面以一条宽度为零的直线接触. 外载荷施加于托辊上,接触位置发生弹性形变,接触线变成具有一定宽度的矩形面,接触面的单位压力按椭圆柱规律分布,如图 2 所示.

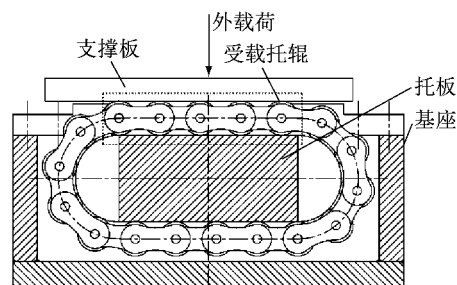


图 1 托辊系统组成

Fig. 1 Composition of roller system

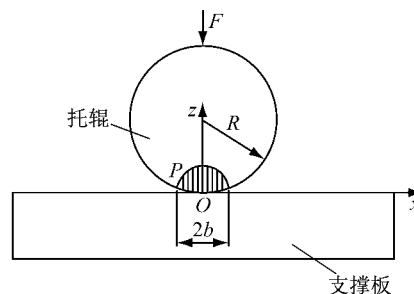


图 2 托辊与支撑板接触

Fig. 2 Contact of roller and supporting plate

假设施加的外载荷为 F , 托辊与支撑板有效接触长度为 l , 接触矩形面宽度为 $2b$. 接触面上各点的压力 p 按半椭圆规律分布, 基于 Hertz 理论计算法向压力分布 $p(x)$ 及接触半宽 b 为^[17]

$$p(x) = \frac{2P_z}{\pi b^2} \sqrt{b^2 - x^2} \quad (1)$$

$$b = \sqrt{\frac{4P_z R}{\pi} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)} \quad (2)$$

式中: P_z 为横向单位长度上的法向作用力, $P_z = F/l$; x 为接触点距离接触中心的径向距离; R 为托辊半径; E_1 和 E_2 分别为托辊和支撑板的弹性模量; μ_1 和 μ_2 分别为托辊和支撑板的泊松比.

当 $x=0$ 时, 即接触区域的中心处所受到的接触应力 p_0 为最大

$$p_0 = \frac{2P_z}{\pi b} = \sqrt{\frac{F}{\pi l R \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}} \quad (3)$$

基于托辊和支撑板的接触模型,计算出承受的最大接触应力,为托辊系统与支撑板接触试验施加的外载荷提供理论依据。

2 托辊系统与支撑板接触试验

2.1 试验装置

为了得到托辊系统在重载下与支撑板的接触磨损机理,所采取的试验装置示意图如图3所示。其主要由托辊系统试验试件、支撑板、加载油缸、驱动油

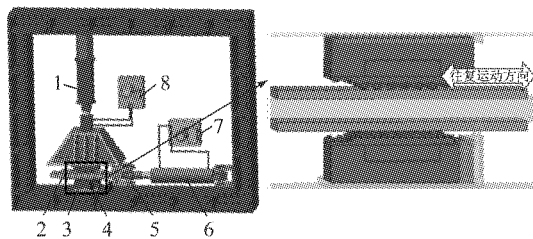
缸和泵站等组成,实物图如图4所示。托辊和支撑板试样的化学成分如表1所示。

试验装置主要由驱动和加载两部分组成。通过泵站1控制加载油缸,对托辊系统与支撑板施加接触载荷;通过泵站2驱动油缸往复伸缩,实现支撑板的往复运动。利用连接销轴将驱动油缸两端固定,并利用左右限位开关控制支撑板往复运动的极限位置。本次试验主要研究在外负载恒定的情况下,改变支撑板循环运动次数,观察托辊系统中托辊与支撑板的表面磨损形貌。

表1 托辊与支撑板试样的化学成分

Tab.1 Chemical composition of roller and supporting plate

试件	质量分数							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
托辊(40Cr)	0.037~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	≤0.25	≤0.25	≤0.25
支撑板(45钢)	0.42~0.50	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	0.80~1.10	≤0.30	≤0.30



1—加载油缸;2—支撑板;3—托辊系统试件;4—限位开关;
5—连接销轴;6—驱动油缸;7—泵站2;8—泵站1

图3 托辊系统与支撑板接触试验示意图

Fig.3 Schematic diagram of contact test of roller system and supporting plate

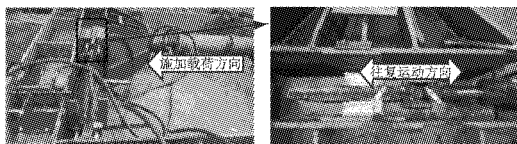


图4 托辊系统与支撑板接触试验实物图

Fig.4 Contact test of roller system and supporting plate

2.2 试验过程

(1)搭建试验系统,如图4所示。

(2)调试泵站1和泵站2,使得泵站1控制加载油缸施加外载荷,泵站2驱动油缸实现支撑板水平往复运动,确保托辊系统中托辊的正常滚动。

(3)施加重载接触载荷10 MPa。调节泵站1的溢流阀旋钮至溢流压力为10 MPa,并控制加载油缸处于伸缸、保压状态。

(4)调节泵站2控制柜上的旋钮至自动状态,记录伸缩循环次数。

(5)伸缩达到2 000次、3 500次、6 000次时分别停止运动,观察磨损现象。

3 磨损机理分析

3.1 试件处理

试验结束后取出托辊,为便于观察,用线切割技术将试验后的托辊切割成20 mm高的圆柱体(如图5所示),将支撑板切割成30 mm×30 mm×8 mm的长方体。

用酒精溶液浸泡托辊和支撑板试样,放入KQ2200DE型数控超声波清洗器中清除表面杂质。利用超景深三维显微镜观察托辊和支撑板试样表面形貌,进行宏观现象分析;用QUANTA250FEG型扫描电子显微镜对托辊试样进行表面微观形貌及能谱分析。

为观察托辊试样截断面的金相组织变化,需要对托辊截断面进行打磨、抛光、数控超声波清洗、4%硝酸酒精溶液腐蚀、酒精溶液清洗并烘干处理。

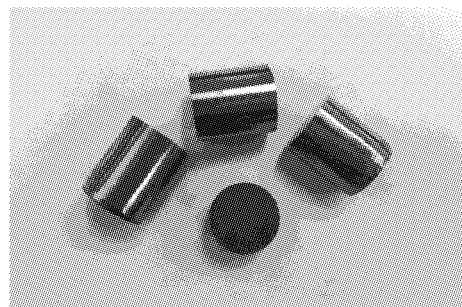


图5 托辊试样

Fig.5 Roller specimens

3.2 托辊与支撑板的表面宏观形貌分析

经2 000次重载接触试验后,在超景深三维显微

镜下观察到托辊与支撑板表面形貌如图 6 所示. 在托辊表面主要存在较为均匀的划痕及少许犁沟现象(见图 6a); 而支撑板表面上存在不同深浅的犁沟状条纹, 与此同时也发现有近似圆形的孔洞(见图 6b). 犁沟的出现是因为两个硬度不同的材料相互接触且发生相对运动时, 材料表面的硬凸起物犁入较软材料表面后形成的. 而且当凸起物受到足够大的压力犁入软材料表面时, 软材料表面会发生塑性变形, 使得表面形貌发生变化. 此时托辊与支撑板之间的磨损类型属于磨粒磨损.

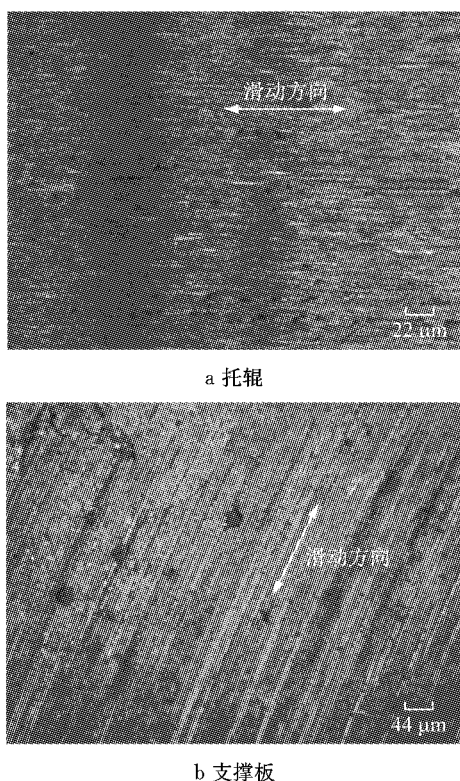


图 6 摩擦 2 000 次托辊与支撑板试样表面形貌
Fig. 6 Surface morphologies of specimens after 2 000 times of wear test

随着循环运动次数增加至 3 500 次, 托辊试件和支撑板在超景深三维显微镜下的图像如图 7 所示. 与 2 000 次试验相比, 托辊表面出现较为明显的犁沟现象, 犁沟方向与往复运动方向一致(见图 7a); 支撑板表面犁沟状条纹变得更深、更宽, 而且孔隙会沿着摩擦方向变长(见图 7b). 支撑板表现出的现象是由于孔隙周围金属在受到磨粒犁削作用时, 被推向磨粒的前方, 或被塑性挤压到与运动方向垂直的犁沟两侧, 且当犁沟两侧存在孔隙时, 这些塑性变形的金属便会填充孔隙, 从而使孔隙变得扁长. 此时, 托辊与支撑板之间的磨损仍属于磨粒磨损.

经 6 000 次试验后观察托辊与支撑板得到图像

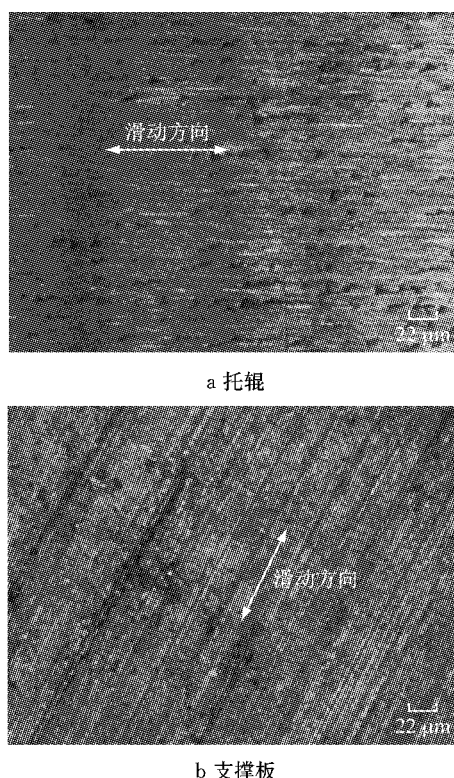


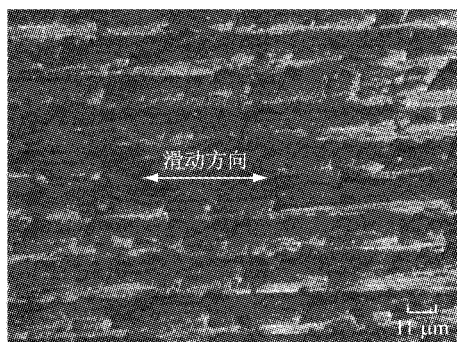
图 7 摩擦 3 500 次托辊与支撑板试样表面形貌
Fig. 7 Surface morphologies of specimens after 3 500 times of wear test

如图 8 所示. 托辊表面与 3 500 次试验得到的图像相比, 犁沟状条纹变得均匀且更宽更深, 沿沟槽侧边都形成脊缘, 并且在边缘处出现黏着现象(见图 8a); 支撑板表面除了有犁沟现象之外, 还发生了较为严重的黏着现象, 表面有很多粘合面剪切脱落的痕迹(见图 8b). 此时磨损最为剧烈, 表面受到多次犁削作用后, 犁沟深度已达到最大值, 这是由于低周疲劳作用, 磨损表面产生的磨屑增多, 磨屑被碾碎细化而形成一个粉尘垫隔离两接触表面, 在托辊与支撑板接触之间形成了三体接触^[18]. 该种情况下托辊表面主要的磨损机理属于磨粒磨损和轻微的黏着磨损, 而支撑板表面主要的磨损机理属于黏着磨损.

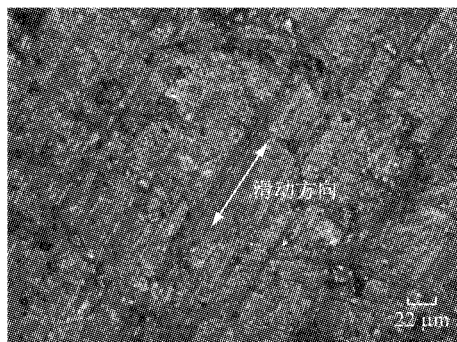
3.3 托辊的表面微观形貌分析

经 3 500 次磨损试验后, 在扫描电子显微镜下观察托辊试样的表面微观形貌如图 9 所示, 此时磨损主要是磨粒磨损. 从图中可以看到, 沿着犁沟表面孔隙会出现小颗粒状组织黏着在基体表面, 通过对 A、B 点的能谱分析(见图 10), 表明小颗粒状组织均为基体, 这是由于托辊与支撑板表面的微凸起物在摩擦过程中受切向力的作用使得表面材料脱落, 形成磨屑颗粒黏着在基体表面. 而且从托辊表面微观形貌可以看出, 当磨粒滑过表面时, 除了切削外, 大部分磨粒把犁沟时表面材料的全部磨屑推向前方或者

两侧而形成堆积,出现“犁皱”现象。



a 托辊



b 支撑板

图 8 摩擦 6 000 次托辊与支撑板表面形貌
Fig.8 Surface morphologies of specimens after 6 000 times of wear test

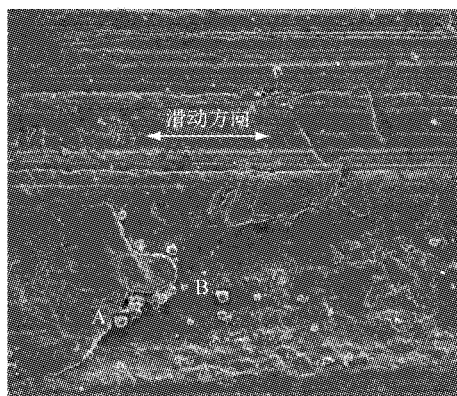
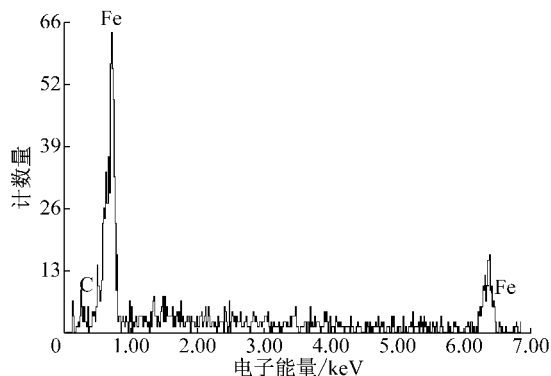


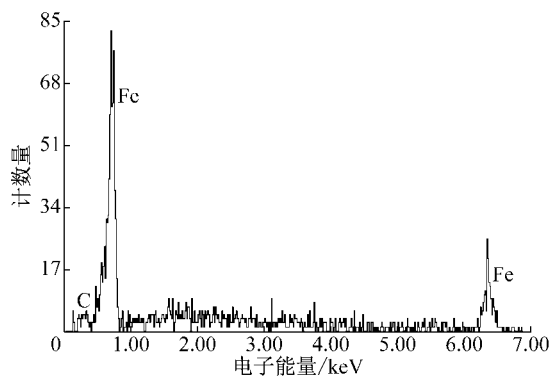
图 9 摩擦 3 500 次托辊表面的扫描电镜图
Fig.9 SEM morphologies of roller surface after 3 500 times of test

用扫描电镜观察 6 000 次接触试验后的托辊表面微观形貌如图 11 所示,此时可以看到黏着磨损现象.托辊与支撑板表面的微凸体在法向压力作用下相互接触时,小部分微凸体顶峰受到很大的压应力,而当压应力超过材料的屈服压力时就会发生塑性变形而形成黏着点,随着磨损次数的不断增加,黏着点在相对滑动方向会不断长大而被剪断,进而形成新的黏着点,新黏着点又被剪断,最终使得较硬的表面

材料脱落并依附在另一接触表面上.除此之外,通过扫描电镜观察托辊截面也会发现有脱落物黏着在托辊表面,如图 12 所示,尽管托辊材料硬度相比于支撑板要高,但材料内部也会存在局部低硬度区,遇到支撑板的高硬度区后,经法向力和切向力共同作用下的多次磨损,支撑板高硬度区产生的脱落物就会依附在托辊表面,形成黏着磨损现象。



a A 点



b B 点

图 10 托辊接触表面能谱分析

Fig.10 EDS analysis of contact surface for roller

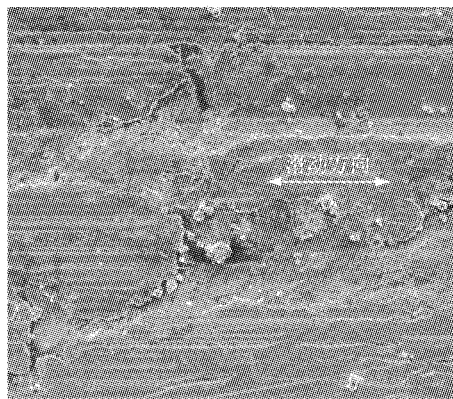


图 11 摩擦 6 000 次托辊表面扫描电镜图
Fig.11 SEM morphologies of roller surface after 6 000 times of test

3.4 托辊截面金相组织变化分析

通过观察重载接触下托辊截面金相组织中珠

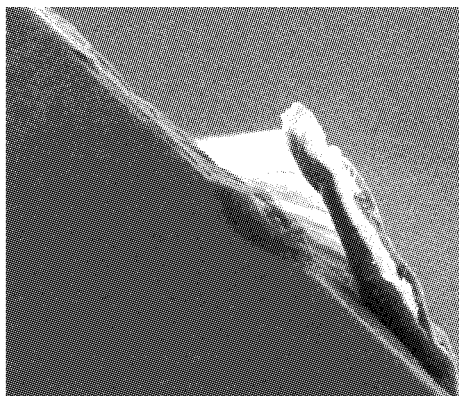


图 12 摩擦 6 000 次托辊截断面的扫描电镜图
Fig. 12 SEM morphologies of roller section
after 6 000 times of test

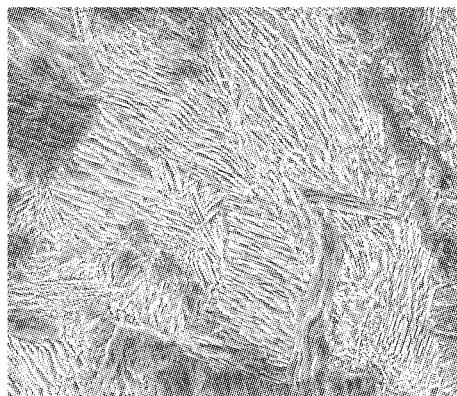
光体变化情况,发现存在位错滑移和组织剪断等现象,更直观地表明托辊因超过其屈服极限而发生了塑性变形^[19],进一步验证托辊存在黏着磨损机理。

利用扫描电子显微镜来观察托辊试件在 6 000 次试验后截断面中心和边缘处的金相显微组织^[20],如图 13 所示.显微组织形貌中存在由一层铁素体片和渗碳体片交替堆砌而成的片状珠光体.图 13a 是托辊中心区域的显微组织,由于此区域相对接触表面受到的载荷小,因此可以看出片状珠光体的层片方向基本取向一致,局部区域存在位错滑移和组织破损、变形现象,发生弯曲和扭转.图 13b 是托辊边缘区域的显微组织,可以清楚地看到此区域内片状珠光体形态变化剧烈,珠光体团被剪切分割成几个亚团,在亚团界面上片状珠光体内的渗碳体片呈明显不连续状态,各亚团界面处存在高密度的位错.部分珠光体中渗碳体由于切应力的作用发生弯曲变形,某些部位甚至发生渗碳体剪断现象,形成短棒状的渗碳体。

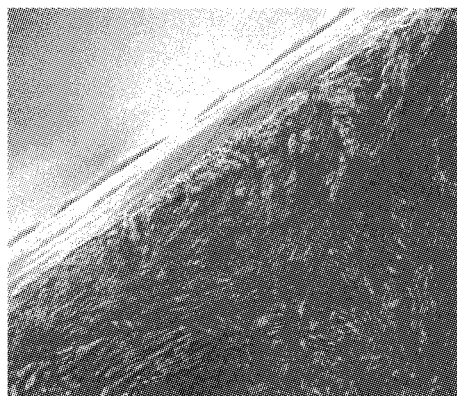
3.5 材料热处理工艺改进建议

为提高试件的使用寿命,避免出现大量磨粒磨损和黏着磨损现象,建议改变托辊和支撑板的热处理工艺.于长山^[21]等人通过对不同含碳量碳素钢的热处理工艺与耐磨性的试验研究,表明采用 830 °C 水淬并高温回火后的 45 钢拥有较高耐磨性;王瑞权^[22]等人对 40Cr 在不同热处理工艺下的组织和摩擦性能研究表明,40Cr 采用 850 °C 正火、810 °C 压温油淬、低温回火处理后马氏体的晶粒较小,硬度较高,耐磨性最佳.因此,对于本文研究对象而言,支撑板建议采用 830 °C 水淬后进行 500 °C 高温回火的调质处理工艺,以提高 45 钢的综合机械性能;托辊建议采用 850 °C 正火、810 °C 压温油淬后低温回火的热处理工艺,这样便于发挥 40Cr 的潜在性能,其耐

磨性最好。



a 中心处



b 边缘处

图 13 托辊截断面的金相显微组织
Fig. 13 Metallographic microstructure
analysis of roller section

4 结论

(1)重载接触条件下,随着磨损次数的增加,托辊表面形貌的犁沟逐渐增多并加深,经 6 000 次试验后表面有些许的黏着现象,因此托辊的磨损机理以磨粒磨损为主,伴随着轻微的黏着磨损.而支撑板经 6 000 次磨损后,表面不仅存在磨痕还出现大量黏着现象,因此支撑板的磨损机理主要表现为综合的磨粒磨损和黏着磨损。

(2)利用扫描电子显微镜观察托辊截断面边缘处的显微组织,其表层片状珠光体片层方向和间距发生了变化,珠光体团被剪切分割,表明托辊已经发生了塑性变形。

(3)为了提高试件的耐磨性,建议托辊采用 850 °C 正火、810 °C 压温油淬后低温回火的热处理工艺,支撑板采用 830 °C 水淬后进行 500 °C 高温回火热处理工艺。

参考文献:

- [1] 董帮源, 刘小君, 王静, 等. 表面织构对重载线接触条件下 40Cr 钢摩擦性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(2): 145.
DONG Bangyuan, LIU Xiaojun, WANG Jing, *et al.* Effect of textured surface on the frictional property of 40Cr steel under high load and line contact[J]. Tribology, 2016, 36(2): 145.
- [2] 屈晓斌, 陈建敏, 周惠娣, 等. 材料的磨损失效及其预防研究现状与发展趋势[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(2): 92.
QU Xiaobin, CHEN Jianmin, ZHOU Huidi, *et al.* Current state and development trend of the research on material wear failure and prevention[J]. Tribology, 1999, 19(2): 92.
- [3] ZHONG W, REN J W, WANG W J, *et al.* Investigation between rolling contact fatigue and wear of high speed and heavy haul railway [J]. Tribology-Materials Surfaces & Interfaces, 2010, 4(4): 197.
- [4] 钟雯, 董霖, 王宇, 等. 高速与重载铁路的疲劳磨损对比研究[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(1): 96.
ZHONG Wen, DONG Lin, WANG Yu, *et al.* A comparative investigation between rolling contact fatigue and wear and high-speed and heavy-haul railway[J]. Tribology, 2012, 32(1): 96.
- [5] 张铁, 张军, 盛友艺, 等. 重载铁路不同磨损阶段车轮与曲线钢轨的接触分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(18): 142.
ZHANG Tie, ZHANG Jun, SHENG Youyi, *et al.* Analysis of the contact between wheel and rail with different wear profiles in curve on heavy haul railway[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(18): 142.
- [6] WANG L, PYZALLA A, STABLBAUER W, *et al.* Microstructure features on rolling surfaces of railway rails subjected to heavy loading[J]. Materials Science & Engineering A, 2003, 359(1/2): 31.
- [7] GARNHAM J E, DAVIS C L. The role of deformed rail microstructure on rolling contact fatigue initiation[J]. Wear, 2008, 265(9/10): 1363.
- [8] GARNHAM J E, DAVIS C L. Very early stage rolling contact fatigue crack growth in pearlitic rail steels[J]. Wear, 2011, 271(1): 100.
- [9] LI G, HONG Z, YAN Q. The influence of microstructure on the rolling contact fatigue of steel for high-speed-train wheel [J]. Wear, 2015, 342/343: 349.
- [10] VRBKA M, ŠAMÁNEK O, ŠPERKA P, *et al.* Effect of surface texturing on rolling contact fatigue within mixed lubricated non-conformal rolling/sliding contacts [J]. Tribology International, 2010, 43(8): 1457.
- [11] CAI W, BELLON P. Subsurface microstructure evolution and deformation mechanism of Ag-Cu eutectic alloy after dry sliding wear[J]. Wear, 2013, 303(1/2): 602.
- [12] NOZAWA J I, KOMOTO T, KAWAI T, *et al.* Tribological properties of polymer-sheet-adhered metal hybrid gear [J]. Wear, 2009, 266(9/10): 893.
- [13] MAO K, LI W, HOOKE C J, *et al.* Friction and wear behaviour of acetal and nylon gears[J]. Wear, 2009, 267(1/2/3/4): 639.
- [14] JIA X, LING X. Influence of Al_2O_3 , reinforcement on the abrasive wear characteristic of Al_2O_3 /PA1010 composite coatings[J]. Wear, 2005, 258(9): 1342.
- [15] 李奇, 王完成, 蔡志海, 等. 载荷对重型车辆发动机活塞环-缸套摩擦学性能的影响[J]. 材料工程, 2014(6): 56.
LI Qi, WANG Xiancheng, CAI Zhihai, *et al.* Influence of loads on tribological property of heavy vehicle engine piston ring-cylinder liner [J]. Journal of Materials Engineering, 2014(6): 56.
- [16] DEVLIN M T, JAO T C, MILNER J, *et al.* Influence of surface roughness on gear pitting behavior [J]. Gear Technology, 2006(5): 30.
- [17] 冯剑军, 谭援强. 基于 Hertz 理论圆柱和平面之间的滑动接触分析[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(4): 346.
FENG Jianjun, TAN Yuanqiang. Analysis on sliding contact of the cylinder and the plane based on Hertz theory [J]. Tribology, 2009, 29(4): 346.
- [18] 王文健. 车轮滚动剥离磨损特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
WANG Wenjian. Research on rolling spalling and wear characteristic of wheel steel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004.
- [19] ZENG D, LU L, ZHANG N, *et al.* Effect of different strengthening methods on rolling/sliding wear of ferrite-pearlite steel[J]. Wear, 2016, 358: 62.
- [20] CHEN H, ZHANG C, LIU W, *et al.* Microstructure evolution of a hypereutectoid pearlite steel under rolling-sliding contact loading [J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 655: 50.
- [21] 于长山, 刘炳日. 碳含量和组织形态对碳素钢抗冲击磨粒磨损性能的影响[J]. 金属热处理, 1996(10): 10.
YU Changshan, LIU Bingri. Effect of carbon content and microstructure morphology on the impact abrasion resistance of carbon steel[J]. Heat Treatment of Metals, 1996(10): 10.
- [22] 王瑞权, 韩秋华, 刘妍研, 等. 热处理工艺对 40Cr 组织和摩擦性能的影响[J]. 热处理技术与装备, 2010, 31(2): 29.
WANG Ruiquan, HAN Qiuhua, LIU Yanyan, *et al.* Effect of heat treatment process on microstructure and frictional properties of 40Cr steel[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2010, 31(2): 29.