

# 磨损对钢轨滚动接触疲劳损伤的影响

王文健, 郭俊, 刘启跃, 朱旻昊

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 摩擦学研究所, 成都 610031)

**摘要:** 通过对广深铁路钢轨疲劳斜裂纹与钢轨侧磨的现场调查及钢轨滚动疲劳模拟试验, 研究了钢轨滚动接触疲劳损伤与磨损之间的关系, 分析了轮、轨滚动疲劳过程中钢轨磨损率对疲劳裂纹形成及裂纹扩展寿命的影响。结果表明: 钢轨磨损严重时, 疲劳斜裂纹损伤就表现轻微, 钢轨滚动疲劳损伤与磨损之间表现为相互竞争与制约的耦合作用关系; 通过增加磨损率能减轻钢轨的滚动疲劳损伤, 有利于延长钢轨的疲劳裂纹扩展寿命。

**关键词:** 钢轨; 疲劳裂纹; 磨损; 疲劳寿命

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2010)01-0017-03

## Effect of Wear on Rolling Contact Fatigue of Rail

WANG Wen-jian, GUO Jun, LIU Qi-yue, ZHU Min-hao

(Tribology Research Institute, State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The relationship between rolling contact fatigue damage and wear of rail had been explored by the investigation on rail fatigue oblique crack and side wear volume on Guangzhou-Shenzhen high-speed railway and rolling simulation test of rail. The effects of wear rate of rail on formation of fatigue crack and crack propagation life had been analyzed in the rolling wear of wheel-rail process. The results indicate that when rail wear was severe, rail fatigue oblique crack was relatively slight. The relationship between rolling contact fatigue crack damage and rail wear was manifested as mutual competitive and restrictive coupling mechanisms. In the practical application, increasing wear rate of rail could alleviate rolling contact fatigue of rail and prolong the fatigue life.

**Key words:** rail; fatigue crack; wear; fatigue life

## 0 引言

随着重载与高速铁路的快速发展,许多关键技术问题急需解决,其中钢轨滚动接触疲劳与磨损就是铁路运输中复杂的技术问题之一,它严重影响我国铁路运输的安全性与经济性。钢轨滚动接触疲劳与磨损是一个极其复杂的科学问题,涉及多个学科的知识及理论。现我国主要通过提高列车轴重、运行速度及增加行车密度等措施来提高铁路的运输能力,这些措施不仅加剧了钢轨的磨损与疲劳损伤,同时也带来极大的安全隐患,严重时将发生出轨事故,给人的生命和财产造成巨大损失<sup>[1]</sup>。因此研究钢轨

材料的疲劳与磨损性能对预防和掌握钢轨材料的损伤具有十分重要的意义。

滚动接触疲劳过程中伴随有磨损现象的发生,材料疲劳裂纹的形成与磨损之间有着密切的竞争关系,从而使形成疲劳裂纹的几率下降。为此,Donzella等<sup>[2]</sup>提出了一个评价钢轨磨损与接触疲劳之间竞争机制的预测模型,并通过试验验证了该模型的有效性。通常随着材料磨损的增大,滚动接触疲劳产生的微裂纹来不及扩展就被磨耗掉<sup>[3]</sup>。钢轨出现疲劳裂纹后,裂纹的扩展除取决于应力、材料的强度外,还取决于使用过程中钢轨的磨损率。目前国内这方面的研究报道并不多,研究也不够深入。为此,作者通过对我国广深铁路钢轨疲劳斜裂纹的现场调查及钢轨滚动疲劳模拟试验,研究了钢轨滚动接触疲劳损伤与磨损相互竞争与制约的耦合机制,分析了钢轨磨损率对疲劳裂纹形成及裂纹扩展寿命的影响。

收稿日期: 2008-12-01; 修訂日期: 2009-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50675183); 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2009AA04Z424); 西南交通大学创新团队培育计划资助项目(2007IRT01)

作者简介: 王文健(1980—), 男, 山东费县人, 讲师, 博士。

## 1 现场调查结果

自2000年4月以来,广深铁路中半径为1 600,1 400 m和非高速区段半径为1 000 m及以下曲线钢轨分别出现了斜线状裂纹,此裂纹沿钢轨作用边分布,呈45°角,迎行车方向朝钢轨踏面中心扩展<sup>[3]</sup>。斜裂纹不产生剥离掉块,在发展到一定程度后快速扩展形成大尺寸横向疲劳裂纹,直至发生钢轨断裂,严重危及列车运行安全。2002年平湖至布吉区间上行曲线2处的钢轨正是由于这种疲劳斜裂纹在轨头内部沿行车方向向下发展而导致断裂。

广深线钢轨疲劳斜裂纹的发展特点主要表现为发生在加速曲线段,在没有侧磨的曲线上钢轨疲劳斜裂纹发展更快,损伤程度更为严重。调查表明<sup>[4]</sup>,在相同曲线半径、超高运行速度条件下,由于上行线运行中车轮依靠蠕滑力导向,而不靠接触导向,故基本上没有钢轨侧磨,其钢轨疲劳斜裂纹中重伤和轻伤的数量明显多于下行线钢轨的;下行线因接触导向产生的钢轨侧磨也只有2.0~3.5 mm,但钢轨斜裂纹中重伤为零,轻伤的数量也明显少于上行线。由此可知,上行线斜裂纹的形成与发展比下行线的多且快,表现为钢轨侧磨量越大,斜裂纹损伤程度越轻微。据调查统计,钢轨使用9 a的垂直磨耗只有1.0~1.5 mm,因此广深高速铁路多年运营后钢轨磨损量是非常小的。

此外,广深线钢轨斜裂纹形成发展的特点还表现在PD3热轧钢轨的斜裂纹发展速度比U71Mn热轧钢轨的快。广深线铺设的钢轨中最早出现疲劳斜裂纹的就是PD3热轧钢轨,2002年发生的2次断轨均是PD3钢轨,皆因斜裂纹向下扩展形成横向大尺寸疲劳裂纹所导致,在断轨的断口上发现在PD3钢轨内部的斜裂纹已发展成为核伤,如图1所示。



图1 PD3热轧钢轨斜裂纹内部核伤

Fig. 1 Internal core wound of oblique crack of PD3 hot rolling rail

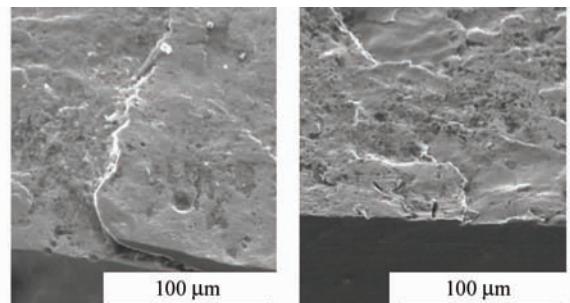
## 2 试样制备与试验方法

试验材料取自使用过的PD3和U71Mn两种热轧钢轨,用JD-1型轮轨模拟试验机进行钢轨滚动模拟试验<sup>[4]</sup>,试验模拟轴质量16 t,曲线半径1 200 m,车速160 km·h<sup>-1</sup>,疲劳循环次数10<sup>6</sup>。用TG328A型天平称量试样磨损前后的质量,以计算试样的磨损质量损失;用QUANTA200型扫描电镜(SEM)观察试样的疲劳损伤形貌。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 磨损质量损失与磨损形貌

试验结果表明,U71Mn热轧钢轨的磨损质量损失(约5.7 g)明显大于PD3热轧钢轨的(3.2 g),即PD3热轧钢轨具有更好的耐磨性。由图2可见,PD3钢轨疲劳裂纹已沿一定夹角向材料纵深方向扩展且裂纹长度较长,而U71Mn钢轨表面的磨痕无明显剥离掉块痕迹及疲劳微裂纹。由于U71Mn钢轨的磨损质量大于PD3钢轨的,裂纹可能来不及扩展就被磨损掉,在一定程度上减缓了疲劳微裂纹的产生与发展,因此U71Mn钢轨表现出更好的抗疲劳损伤性能。



(a) PD3钢轨 (b) U71Mn钢轨

图2 钢轨疲劳损伤的SEM形貌

Fig. 2 SEM photographs of fatigue damage of rail roller (a) PD3 rail and (b) U71Mn rail

### 3.2 疲劳裂纹与磨损的相互关系

钢轨的损伤主要有磨损和疲劳两种形式<sup>[5]</sup>,由于磨损与滚动接触疲劳是不可分离的两种损伤形式,因此它们之间存在一定的相互作用。广深铁路钢轨材料疲劳损伤与侧磨及钢轨模拟试验结果均表明,当钢轨磨损严重时,疲劳损伤就表现轻微。PD3钢轨的耐磨性较U71Mn钢轨好,但PD3钢轨的疲劳损伤更为严重。因此,轮轨滚动疲劳过程中疲劳裂纹与磨损是相互影响的。Paris<sup>[6]</sup>给出了单个裂纹扩展速率和表面磨损率之间的关系(式1),其模

型见图3。

$$\frac{da_{\text{net}}}{dN} = \frac{da}{dN} - \frac{w}{\sin\theta} = C(\Delta K)^m - \frac{w}{\sin\theta} \quad (1)$$

式中:  $C$  和  $m$  为常数;  $\Delta K$  为裂纹应力强度因子;  $da_{\text{net}}/dN$  为载荷单位循环作用下裂纹净扩展长度;  $a_{\text{net}}$  为裂纹净长度;  $N$  为扩展寿命;  $a$  为裂纹长度;  $w/\sin\theta$  为载荷作用时因表面材料磨损导致裂纹长度被截断的速率;  $w$  为载荷单位循环作用下的磨损率;  $\theta$  为裂纹和平面间的夹角。分析可知,滚动磨损过程中,磨损对疲劳裂纹扩展具有一定的抑制和阻碍作用,即如果裂纹尖端扩展速率大于因表面材料磨损对裂纹根部的截断率,则疲劳裂纹将继续扩展;反之,裂纹长度将随磨损的进行不断缩短,直至裂纹彻底被磨掉。对于多个裂纹存在的情况,其裂纹扩展与磨损之间的相互作用机理是与单个裂纹相同的。

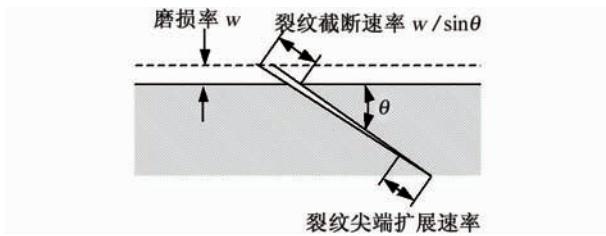


图3 磨损率与裂纹尖端扩展速率关系模型

Fig. 3 Relationship model between wear rate and crack tip growth rate

由式(1)可得

$$N = \int_a^{a_{\text{临}}} \frac{da}{C(\Delta K)^m - \frac{w}{\sin\theta}} \quad (2)$$

利用式(2)可得到不同磨损率情况下PD3和U71Mn两种热轧钢轨的单个疲劳裂纹扩展寿命<sup>[7]</sup>,如图4所示。可见,在初始阶段,随磨损率的增加裂纹的扩展寿命缓慢增加,当磨损率增加到一定值后,裂纹扩展寿命急剧增加;一旦因磨损导致裂纹长度被截断的速率等于裂纹扩展的速率时,从理论讲裂纹扩展寿命将无限大,此时疲劳裂纹的扩展与磨损将处于一个动态平衡状态。因此,通过增加钢轨磨损率可以有效地延长疲劳裂纹的扩展寿命。实际上,靠轮轨之间的作用而形成的自然磨损是不可能有效抑制裂纹扩展的,而利用钢轨打磨的方法通过人工增加钢轨磨损率,就能起到预防和减缓钢轨疲劳裂纹的扩展<sup>[8-9]</sup>。通过钢轨非对称打磨能改变轮轨接触导向力并增加侧磨,从而有效地减缓钢轨疲劳斜裂纹的形成与发展<sup>[10]</sup>。

综合分析表明,铁路钢轨滚动疲劳损伤与磨损

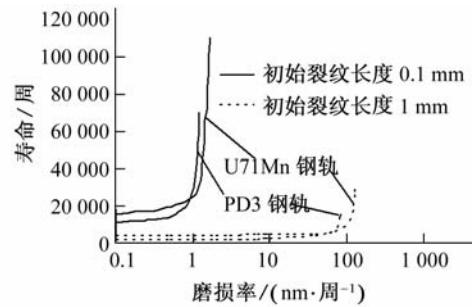


图4 钢轨磨损率对裂纹扩展寿命的影响

Fig. 4 Effect of wear rate of rail on life of crack propagation

之间存在着相互竞争与制约的耦合作用关系,这主要表现为磨损严重时,疲劳损伤往往较轻;而疲劳损伤严重时,磨损相对轻微。实际中,裂纹扩展速率与钢轨材料磨损率的关系主要表现为,若裂纹的扩展速率大于钢轨材料的磨损率,那么钢轨材料的疲劳损伤对钢轨的失效就占据主导地位;相反,若钢轨材料的磨损率大于钢轨材料裂纹的扩展速率,那么钢轨材料的磨损对钢轨失效就占主导地位,因此只有裂纹扩展速率与材料的磨损率达到平衡时才能最大限度地延长钢轨的使用寿命。

实际中为了最大程度地延长钢轨使用寿命,在选择钢轨材料时,就需要充分考虑钢轨的损伤形式,即决定钢轨使用寿命的是磨损还是疲劳损伤。研究表明,重载与高速铁路由于使用条件和运输环境等诸方面存在很大的变化,因此在钢轨损伤上存在明显差异<sup>[1]</sup>。重载线路上钢轨损伤以磨损及塑性变形为主,选材时应要求钢轨材料强度高,抗压溃性和耐磨性强;高速线路由于运行速度高、轴重轻,钢轨以疲劳损伤为主,选材时应考虑选用强度低、裂纹萌生和扩展速率较低的材料,即要求钢轨的韧性较大,具有较好的抗疲劳性能。

## 4 结 论

(1) 铁路钢轨疲劳损伤与磨损之间表现为相互竞争与制约的耦合作用关系;即磨损严重时,疲劳损伤往往较轻;而疲劳损伤严重时磨损相对轻微。

(2) 钢轨磨损对疲劳裂纹扩展具有抑制和减缓作用,实际中增加磨损率能减轻钢轨的疲劳损伤,有利于延长钢轨的疲劳裂纹扩展寿命。

## 参考文献:

- [1] 刘启跃,王文健,周仲荣.高速与重载铁路钢轨损伤及预防技术差异研究[J].润滑与密封,2007,32(11):11-14.

(下转第23页)

过量  $\text{CeO}_2$  反而起到加速  $\text{TiC}_4$  熔化的作用, 降低了涂层中硬质点相的比例, 且使硬质相富聚, 对涂层的硬度也不利。

由图 7 可见, 不同涂层表面主要由  $\text{TiC}_4$  和镍、钼、铁固溶体组成, 涂层中不存在单质钛和碳, 说明在激光熔覆过程中,  $\text{TiC}_4$  (熔点 3 260 °C) 未发生分解, 镍、钼起粘接作用, 涂层表面相组成同原始粉组成一致; 随着  $\text{CeO}_2$  添加量的增多, 也未发现新的物相, 涂层组织没有发生本质变化。由于  $\text{CeO}_2$  加入量较低, 因此铈峰强度较弱, 无法分清涂层表面稀土元素及其化合物的峰值。

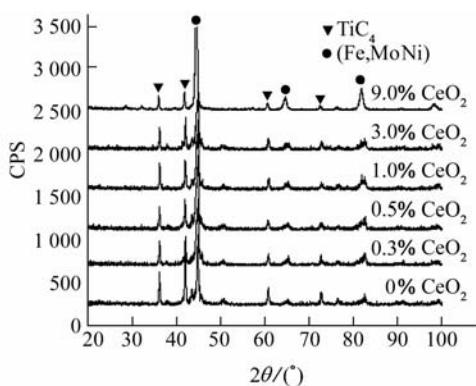


图 7 不同  $\text{CeO}_2$  添加量陶瓷涂层表面的 XRD 谱

Fig. 7 XRD patterns of clad coating surface with different  $\text{CeO}_2$  contents

### 3 结 论

(1) 用激光熔覆法制备  $\text{CeO}_2$  改性的  $\text{TiC}_4$  陶瓷涂层具有典型的包覆相和硬质点相结构。

(2) 在涂层中添加适量( $0.3\% \sim 1.0\%$ ) $\text{CeO}_2$ , 可改善涂层的相对密度, 涂层具有较高的显微硬度(约 700 MPa), 较不含稀土时增加 10%; 添加过量( $\geq 1.5\%$ ) $\text{CeO}_2$  时, 涂层显微硬度反而明显下降(最后仅 450 MPa)。

(上接第 19 页)

- [2] DONZELLA G, FACCOLI M, GHIDINI A, *et al.* The competitive role of wear and RCF in a rail steel[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72: 287-308.
- [3] 邢澍. 摩擦疲劳学——一个新的学科[J]. 国外铁道车辆, 1995 (1): 30-33.
- [4] 王文健. 轮轨滚动接触疲劳与磨损耦合关系及预防措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [5] 刘启跃, 张波, 周仲荣. 铁路钢轨损伤机理研究[J]. 中国机械工程, 2002, 13(18): 1596-1599.
- [6] PARIS P C, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85: 528-534.

(3) 添加适量( $0.3\% \sim 1.0\%$ ) $\text{CeO}_2$  的涂层中  $\text{TiC}_4$  硬质点颗粒呈细球状; 而添加过量( $\geq 1.5\%$ ) $\text{CeO}_2$  时,  $\text{TiC}_4$  颗粒变成粗大的柳叶状。

### 参 考 文 献:

- [1] 王引真, 孙永兴, 何艳玲, *等*.  $\text{CeO}_2$  对等离子喷涂  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层组织和滑动磨损性能的影响[J]. 石油大学学报, 2002, 26(5): 65-68.
- [2] 孙荣禄, 杨贤金. 激光熔覆原位合成  $\text{TiC}-\text{TiB}_2/\text{Ni}$  基金属陶瓷涂层的组织和摩擦磨损性能[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(12): 1221-1224.
- [3] 段国荣, 杨绪杰, 陆路德, *等*. 超微氧化铈粉体的表面改性及分散性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2007, 15(5): 682-684.
- [4] FERRO D, RAU JV, ROSSI A, *et al.* Pulsed laser deposited hard  $\text{TiC}$ ,  $\text{ZrC}$ ,  $\text{HfC}$  and  $\text{TaC}$  films on titanium: hardness and an energy-dispersive X-ray diffraction study[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(8): 1455-1461.
- [5] 马乃恒, 梁工英, 苏俊义. 激光熔覆原位合成  $\text{TiC}_p/\text{Al}$  复合材料表层的滑动摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2000, 22(4): 308-310.
- [6] 程西云, 石磊.  $\text{La}_2\text{O}_3$  对电火花沉积  $\text{TiC}_4$  涂层微观结构及抗磨性能的影响[J]. 机械工程学报, 2007, 43(5): 182-186.
- [7] 刘宁, 刘灿楼, 赵兴中, *等*.  $\text{Mo}, \text{Ni}$  含量与  $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$  基金属陶瓷组织和性能之间的关系[J]. 硬质合金, 1994, 11(2): 74-78.
- [8] 李安敏, 许伯藩, 潘应君.  $\text{La}_2\text{O}_3$  对激光熔覆  $\text{TiC}/\text{Ni}$  基复合涂层的组织和性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(1): 57-59.
- [9] 戴振东, 文明才, 李祥明, *等*. 稀土对等离子喷涂镍-碳化钛陶瓷涂层摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(3): 175-178.
- [10] 沈以赴, 陈继志, 冯钟潮. 稀土在激光熔覆涂层中的分布和行为[J]. 中国稀土学报, 1997, 15(4): 344-346.
- [11] 潘应君, 许伯藩, 张细菊, *等*. 稀土在激光熔覆金属陶瓷复合层中的行为[J]. 武汉科技大学学报, 2003, 26(1): 8-11.
- [12] PEI Y T, GALVAN D, DE HOSSON J, *et al.* Advanced  $\text{TiC}/\text{a-C:H}$  nanocomposite coatings deposited by magnetron sputtering[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2006, 26(4/5): 565-570.

- [7] 王文健, 刘启跃. PD3 和 U71Mn 钢轨钢疲劳裂纹扩展速率研究[J]. 机械强度, 2007, 29(6): 1026-1029.
- [8] KAPOOR A, FLETCHER D I, FRANKLIN. The role of wear in enhancing rail life[J]. Tribology Research and Design for Engineering Systems, 2003: 331-340.
- [9] KAPOOR, SCHMID, FLETCHER D I. Managing the critical wheel/rail interface[J]. Railway Gazette International, 2002, 158(1): 25-28.
- [10] 王文健, 陈明韬, 郭俊, *等*. 高速铁路钢轨打磨技术及其应用[J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(5): 574-577.