

# P60 钢轨鱼鳞伤萌生寿命

石嵘<sup>1</sup>, 范志毅<sup>2</sup>, 何越磊<sup>1</sup>

(1. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 上海 201620; 2. 上海工程技术大学基础教学学院, 上海 201620)

**[摘要]** 上海轨道交通 1 号线锦江乐园至莘庄路段 P60 钢轨使用至今已出现不同程度伤损。曲线路段的部分钢轨外轨内侧出现鱼鳞伤, 严重的鱼鳞伤甚至向下发展导致核伤。鱼鳞伤在疲劳裂纹的初期发展缓慢, 随着疲劳荷载次数增加, 裂纹深度扩展速率  $dh/dN$  发生转折。定义裂纹深度扩展速率发生转折时对应的疲劳荷载的次数为鱼鳞伤萌生寿命。

**[关键词]** 钢轨; 鱼鳞伤; 疲劳裂纹; 裂纹深度扩展速率; 萌生寿命

**[中图分类号]** U213.42 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)08-0065-04

当列车在曲线路段行驶时, 外侧车轮的轮缘紧靠外股钢轨内侧。钢轨在疲劳荷载的作用下产生接触性疲劳伤损, 在外股钢轨轨头内侧轨距角处出现细微裂纹, 随着裂纹扩展形成鱼鳞伤, 严重时产生剥离掉块。根据上海城市轨道交通工务部门统计, 鱼鳞伤占钢轨伤损的 29%。每年都有不少钢轨因为鱼鳞伤较为严重提前下道。通过对上海轨道交通 1 号线曲线路段钢轨调查发现, 许多外股钢轨出现明显的鱼鳞伤。车轮在状态不良的钢轨上行走会加剧车轮的振动, 由此干扰列车正常运营。并且鱼鳞伤可能发展成核伤, 最终导致钢轨断裂, 造成行车安全隐患。

金属疲劳理论一般认为, 在足够大的交变应力下, 金属中位置最不利或较弱的晶体, 沿最大剪应力作用面形成滑移带, 滑移带开裂成为微观裂纹。在构件外形突变或表面刻痕或材料内部缺陷等部位, 都可能因较大的应力集中引起微观裂纹。分散的微观裂纹经过集结沟通, 将形成宏观裂纹。以上是裂纹的萌生过程。已形成的宏观裂纹在交变应力下会逐渐扩展。虽然裂纹的扩展因应力水平的高低时而持续时而停滞, 但工务部门把对钢轨宏观裂纹的管理检测放到重要地位。工程中如果能够定义宏观裂纹出现时间, 无疑将对工务部门管理维修保养钢轨

的策略制定起到科学明确的指导作用。钢轨出现可见宏观裂纹时, 裂纹深度  $h$  有很大的随机性, 一般为 0.4~2.0 mm。按这种方法定义鱼鳞伤萌生寿命没有明显的物理意义, 也没有统计数据的支持。上海城市轨道交通工务部门跟踪检测鱼鳞伤的裂纹深度, 当裂纹深度  $h$  达到 8 mm 时, 为安全起见更换钢轨。因此定义有明确物理意义的鱼鳞伤萌生寿命有重要意义。

## 1 鱼鳞伤形成机理

从赫兹接触理论可知, 在轮轨接触时, 接触面附近轨头为三向受压应力状态。压应力  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  最大值出现在轨头表面上, 两者沿轨头踏面深度方向  $y$  增加而减小,  $b$  为钢轨接触椭圆的短半轴(见图 1)。 $\sigma_x$  为钢轨行车方向的压应力,  $\sigma_y$  沿轨头踏面深度方向  $y$  按第三强度理论计算, 与钢轨行车方向成  $45^\circ$  的剪应力  $\tau_{45^\circ} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}$ 。随着向下深度  $y$  的增加  $\sigma_x$  较  $\sigma_y$  衰减得快, 因此最大剪应力  $\tau_{\max}$  则出现在轨头踏面下某一深度<sup>[1]</sup>。

列车设计轴重  $P = 160$  kN, 轮轨的实际接触面积微小, 因此接触压应力最大值  $\sigma_{\max}$  超过 1 000 MPa, 有时甚至可达到 3 000 MPa 以上。随着车轮的滚动, 轮

**[收稿日期]** 2008-04-30; **[修回日期]** 2008-06-16

**[基金项目]** 上海市教委资助项目(06NS027); 上海市教育委员会重点学科建设资助项目(J51401)

**[作者简介]** 石 嵘(1970-), 女, 内蒙古呼和浩特市人, 上海工程技术大学讲师, 主要研究方向为工程力学、轨道力学

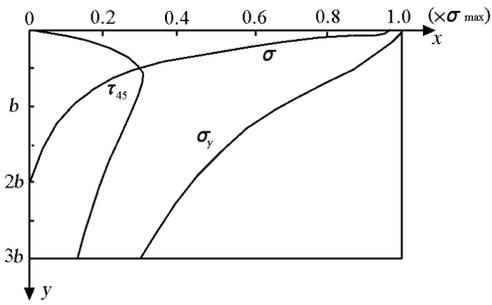


图1 轮轨接触时轨头内应力分布

Fig.1 The stress distribution of wheel contacting rail

轨的接触压应力在最大值  $\sigma_{max}$  与零之间不断变化,当超过疲劳极限时在轨头表面产生疲劳细微裂纹。钢轨体内达到  $\tau_{max}$  时的作用点就是疲劳裂纹源,其深度与列车的轴重和轮轨接触位置有关。裂纹源形成后,在接触压应力和剪应力共同作用下,裂纹按一定方向扩展形成鱼鳞伤<sup>[2]</sup>。钢轨鱼鳞伤是由于表面接触疲劳裂纹引起,长度一般为 10 ~ 25 mm,深度 5 ~ 10 mm,有明显的方向性,一旦产生并得以向表面发展到一定程度后形成剥离掉块(见图 2),严重时以裂纹尖端为源向下发展形成核伤。

无缝线路在焊接接头前后,道床翻浆板结处,鱼鳞伤与剥离较其他部位严重,且发展较快。鱼鳞伤的伤损程度与曲线半径,年通过总量,钢轨的材质有关。曲线半径越小鱼鳞伤的萌生寿命越短。鱼鳞伤出现曲线半径在 1 500 m 内的区段,曲线半径大于 2 000 m 的路段几乎不出现鱼鳞伤<sup>[3]</sup>。

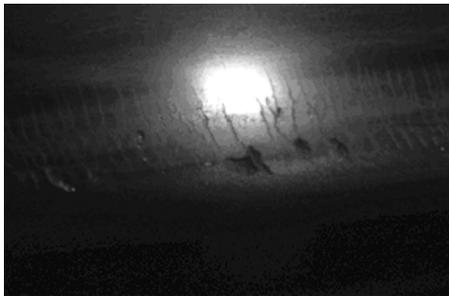


图2 上海轨道交通 1 号线钢轨鱼鳞伤

Fig.2 Corner fine cracks of rails on Shanghai Metro Line1

## 2 疲劳裂纹深度扩展速率测试

### 2.1 测试取样

上海轨道交通 1 号线采用无缝 P60 钢轨。P60 的屈服极限  $\sigma_s = 456$  MPa,抗拉强度  $\sigma_b = 883$  MPa,弹性模量  $E = 2.1 \times 10^5$  MPa<sup>[4]</sup>。莘庄站至锦江乐园

站路段的曲线半径为 1 200 m。该路段钢轨于 1997 年 7 月 1 日投入使用,至今不少钢轨已出现不同程度的伤损。在该路段选取 5 根钢轨上各 1 个测点(见表 1),每间隔一个月测量一次裂纹的深度  $h$ 。测量时间从 2007 年 1 月 8 号开始至 2007 年 12 月 8 日。

表 1 测试点的位置

Table 1 The positions of monitoring points

	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5
行别	上行	上行	上行	下行	下行
里程	SK2 + 100	SK2 + 600	SK2 + 800	SK2 + 900	SK3 + 100
轨号	6	26	36	38	6

根据著名的 Winkler 假定,钢轨是一根支承在连续弹性基础上的无限长梁<sup>[5]</sup>,受力如图 3 所示。每节车厢在钢轨上作用 4 个轴重  $P_1, P_2, P_3, P_4$ ,在  $A_1, A_2, B, C$  截面产生负弯矩,轴重作用处产生正弯矩,正弯矩对裂纹起闭合效应,不计入荷载次数<sup>[6]</sup>。该路段疲劳荷载次数的计算:每天通过的客车近 340 次,列车多为 6 节编组,每 1 节车厢通过钢轨任一截面产生的负弯矩为 5 次,正弯矩为 4 次。每天钢轨承受疲劳荷载 10 200 次。每个月承受疲劳荷载为  $3.1 \times 10^5$  次。

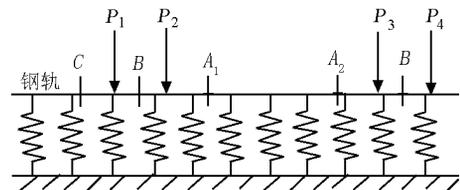


图3 钢轨受力图

Fig.3 The force diagram of steel rail

### 2.2 测试数据分析

钢轨从出现细纹到破坏经历裂纹萌生、裂纹扩展、疲劳裂纹断裂三个阶段。目前对于鱼鳞伤的萌生寿命没有明确定义。工程上通常把构件出现可见细微裂纹时认为裂纹萌生。开始测试时 5 个测点的平均裂纹深度  $\bar{h} = 5.6$  mm,此时钢轨使用已接近 10 年,从出现可见细微裂纹至今也已经多年,在此之前裂纹深度  $h$  发展缓慢,甚至在很长的一段时间内不加深,裂纹处于比较稳定的状态。监测数月后,发现裂纹深度扩展速率发生明显的变化,裂纹向纵深扩展加速。

### 2.3 鱼鳞伤萌生寿命

每个测点处裂纹深度  $h$  发展到一定阶段后,

裂纹的深度扩展速率  $dh/dN$  发生转折。定义此时疲劳裂纹承受的疲劳载荷次数为鱼鳞伤萌生寿命,之后裂纹进入扩展阶段。在鱼鳞伤萌生之后,

裂纹的深度扩展速率  $dh/dN$  明显增大。在测量期间,5个测点处裂纹深度扩展速率  $dh/dN$  变化如图4所示。

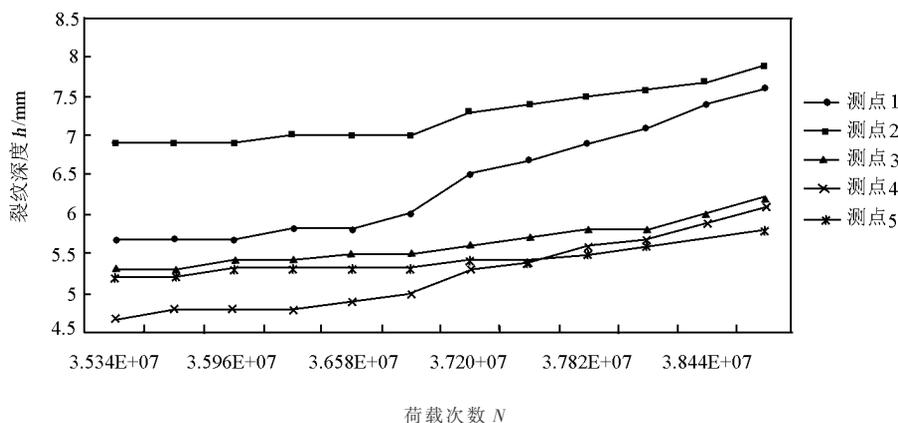


图4 观测期间裂纹深度扩展速率  $dh/dN$

Fig.4 The crack depth expanding speed rate during monitoring

测点的鱼鳞伤裂纹萌生寿命见表2。

表2 测点的鱼鳞伤萌生寿命

Table 2 The initial lives of corner fine cracks of monitoring points

测试时间	使用时间/月	深度 $h/mm$	鱼鳞伤萌生寿命 $N/次$	
测点1	2007年5月	118	5.8	$3.658 \times 10^7$
测点2	2007年6月	119	7	$3.689 \times 10^7$
测点3	2007年2月	115	5.3	$3.565 \times 10^7$
测点4	2007年4月	117	4.8	$3.627 \times 10^7$
测点5	2007年6月	119	5.3	$3.689 \times 10^7$
平均值		117	5.6	$3.646 \times 10^7$

鱼鳞伤萌生后,裂纹深度扩展速率发生转变,转变后的平均速率的对比见表3。

表3 裂纹深度扩展速率对比

Table 3 The contrasting of crack depth expanding speed rate

	裂纹萌生前	裂纹萌生后
	裂纹深度 扩展平均速率	裂纹深度 扩展平均速率
测点1	0.049 mm/月	0.257 mm/月
测点2	0.059 mm/月	0.180 mm/月
测点3	0.046 mm/月	0.082 mm/月
测点4	0.041 mm/月	0.162 mm/月
测点5	0.048 mm/月	0.083 mm/月
平均值	0.049 mm/月	0.153 mm/月

依据该鱼鳞伤萌生寿命定义,锦江乐园至莘庄路段 P60 钢轨的鱼鳞伤萌生寿命的均值  $\bar{N} = 3.646 \times 10^7$  次,使用时间的均值  $\bar{t} = 117$  月。

### 3 结语

以上研究对象为锦江乐园至莘庄路段的运营条件下 1 200 m 曲线半径 P60 钢轨。定义钢轨裂纹的深度扩展速率  $dh/dN$  发生转折时,对应的疲劳荷载次数为钢轨鱼鳞伤萌生寿命。该鱼鳞伤萌生寿命定义有明显的物理意义。因此可以将该定义推广应用到其他曲线路段或运营条件下的钢轨,进而得出不同曲线半径下的钢轨鱼鳞伤萌生寿命。

依据上述定义得到锦江乐园至莘庄路段鱼鳞伤萌生寿命的均值  $\bar{N}$  和使用时间均值  $\bar{t}$ ,为工务部门对钢轨管理维修保养的策略制定提供参考。鱼鳞伤萌生之前检修的周期可以较长,萌生后疲劳裂纹深度扩展加快,甚至可能引起核伤,导致钢轨疲劳断裂,因此要加强检修,缩短检修周期。

### 参考文献

- [1] 王午生. 铁道线路工程[M]. 上海:上海科学技术出版社,1999
- [2] 马允生. 钢轨接触疲劳裂纹的产生与防治[J]. 上海铁道科技 2002,4:41-42
- [3] 王志平. 重载快速大运量区段 P60 钢轨鱼鳞伤和剥离掉块的研究[J]. 华东交通大学学报,2005,22(4):1-6
- [4] 铁道部公务局. 铁路工务技术手册——轨道[M]. 北京:中国铁道出版社,1993
- [5] 彦秉善,王其昌. 钢轨力学与钢轨伤损[M]. 成都:西南交通大学出版社,1989
- [6] 周小林,向延念. 焦柳线石门段 U71Mn50kg/m 钢轨核伤扩展寿命的估计[J]. 中南大学学报,2004,35(3):495-499

## Initial life of corner fine cracks on the P60 rails

Shi Rong<sup>1</sup> Fan Zhiyi<sup>2</sup> He Yuelei<sup>1</sup>

(1. College of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. College of Fundamental Studies, Shanghai University of Engineering Science Shanghai 201620, China)

[Abstract] The 60 rails on Shanghai Metro Line 1 from Jinjiang paradise station to Xinzhuang station have wounds of different degrees at the present time. Outer rails on curve railway have corner fine cracks on the inner flank, and some cracks evaluate down and lead to core wounds. Initially corner fine cracks expand slowly on the early stage, with the times of fatigue loads increasing crack depth expanding speed rate  $dh/dN$  breaks. The times of fatigue loads at turn over point is defined as the initial life of corner fine cracks.

[Key words] rail; corner fine cracks; fatigue cracks; crack depth expanding speed; initial life

---

(上接 55 页)

## The research of competence set expansion's managerial decision analysis methods

Wang Huating<sup>1, 2</sup>, Feng Junweng<sup>1</sup>, Miao Chenglin<sup>1</sup>, Wang Jian<sup>2</sup>

(1. School of Economics and Management, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Yongxin Electronic Company Ltd., Nanjing 211178, China)

[Abstract] Competence set expansion is a process that decision - maker expands the obtained competence set to the competence set which is need to solve questions in decision process. This paper analyses the concept of competence set and its expansion and provides competence set expansion's research methods under uncertainty, certainty, multiple criteria and dynamic state.

[Key words] expansion of competence set; habitual domain; managerial decision making