

文章编号:1005-0523(2019)04-0008-09

# 重载铁路车辆轴重对钢轨疲劳裂纹萌生和磨耗发展的影响

周宇<sup>1,2</sup>, 黄旭炜<sup>1,2</sup>, 张东风<sup>3</sup>, 张聪聪<sup>1,2</sup>

(同济大学 1.道路与交通工程教育部重点实验室, 2.上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 200804;  
3.中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055)

**摘要:**采用钢轨滚动接触疲劳裂纹萌生和磨耗共存发展预测方法,分析重载铁路车辆轴重对钢轨疲劳裂纹萌生和磨耗发展的影响。研究发现,在800 m小半径、钢轨材质为U75V热处理的曲线外轨上,随着车辆轴重从23 t逐步增加到30 t,钢轨平均磨耗发展速率从3.813 2  $\mu\text{m}/\text{万次}$ 增加到4.208 3  $\mu\text{m}/\text{万次}$ ,平均疲劳累积损伤从0.019 5万次增加到0.028 8万次,裂纹萌生寿命从31.8万次减少到23.1万次。轴重平均每增加1 t,钢轨平均磨耗发展率增加1.48%,平均疲劳累积损伤率增加6.81%,而裂纹萌生寿命减小3.93%。

**关键词:**轴重;轨道几何不平顺;磨耗;裂纹萌生;共存

**中图分类号:**U216

**文献标志码:**A

随着我国重载铁路运输列车轴重的增大<sup>[1]</sup>,编组的加长,重载铁路运输能力大大提高,但同时也导致曲线钢轨的疲劳裂纹萌生和磨耗现象愈加严重<sup>[2]</sup>,降低了钢轨使用寿命,增加铁路养护维修部门的工作量。

现有列车轴重(荷载)对钢轨疲劳损伤和磨耗的影响研究中, Franklin F J等<sup>[3]</sup>就钢轨材料在润滑和不同荷载情况下的滚动接触疲劳(rolling contact fatigue, RCF)和磨耗性能进行了实验分析。陈明韬,王文建等<sup>[4-5]</sup>学者探究了轴重与轮轨接触磨耗、疲劳裂纹之间的关系。李霞<sup>[6]</sup>基于非 Hertz 轮轨滚动接触理论和 Archard 磨耗模型建立车轮磨耗预测模型,分析了车辆轴重对车轮磨耗和 RCF 的影响。Makoto 等<sup>[7]</sup>人利用大型的滚动-滑动接触试验机,探究了轴重(转化为相应荷载)等参数对钢轨材料磨耗的影响。现有研究均表明轴重增加对于磨耗与疲劳裂纹萌生有明显影响,但多局限于实验观测与定性分析,提出的模型也没有考虑到钢轨疲劳裂纹萌生与磨耗间的共存发展关系<sup>[8]</sup>。

本文采用钢轨 RCF 裂纹萌生和磨耗共存发展预测方法,考虑轨道几何不平顺对轮轨接触、磨耗和疲劳损伤的影响来改进仿真模型,量化分析重载车辆轴重提高对钢轨裂纹萌生和磨耗的影响。

## 1 考虑轨道几何不平顺的钢轨裂纹萌生与磨耗共存发展预测方法

基于连续系统离散化的思想,将车轮荷载反复作用下的钢轨疲劳裂纹萌生和磨耗共存发展这一无限连续的过程,等效为有限离散过程<sup>[8-9]</sup>。如图1所示,主要有两个阶段:①磨耗-疲劳单独发展子阶段;②磨耗型面替换-疲劳累积子阶段。在①阶段,钢轨型面暂时保持不变,分别计算磨耗和疲劳损伤。当磨耗量到达设定值时,进入②阶段,首先将钢轨型面替换为减少上述磨耗量并平滑后的型面。同时,累积前①阶段的车轮通过次数和轨头各点疲劳损伤。之后进入下一次循环,直到钢轨任意点萌生疲劳裂纹,具体如1.1,1.2节所述。

收稿日期:2019-01-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678445,51878661);中国铁路总公司科技研究开发计划重大项目(2017G003-A);石家庄铁道大学道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室项目(STKF201715)

作者简介:周宇(1977—),男,副教授,博士,博士生导师,研究方向为轨道管理和轨道养修技术。

通讯作者:黄旭炜(1995—),男,硕士研究生,研究方向为轨道养护维修技术。

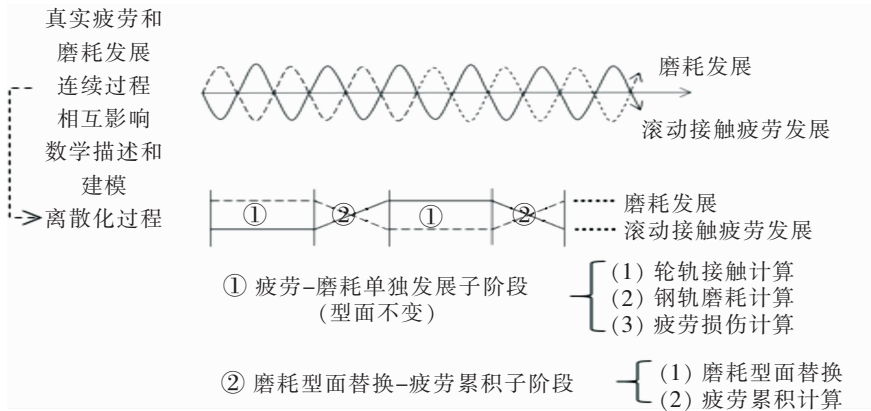


图 1 裂纹萌生和磨耗共存发展预测思路

Fig.1 The prediction method for the coexistence of crack initiation and wear growth

### 1.1 磨耗-疲劳单独发展子阶段

在该子阶段,钢轨型面暂时不变,假设是第  $R$  次循环(钢轨阶段型面  $R$ ),车轨系统动力学模型中钢轨型面设定为此阶段型面  $R$ ,考虑几何不平顺计算得到轮轨接触斑状态。然后先进行磨耗计算。单车轮通过造成的钢轨磨耗计算是以 Archard 磨耗理论为基础,公式如下

$$\frac{V_m}{D} = K \cdot \frac{N}{H} \quad (1)$$

式中: $V_m$ 为磨耗体积, $\text{cm}^3$ ; $D$ 是单元上的滑动量, $\text{mm}$ ; $K$ 为磨耗系数,与滑动量和正压力相关; $N$ 即轮轨法向力, $\text{N}$ ; $H$ 为材料的硬度, $\text{HB}$ 。将轮轨接触斑沿钢轨纵向分成纵向条带,确定每条带中的滑动区面积,再用式(1)计算各条带滑动区所引起的磨耗量,最后得到整个接触斑引起的钢轨横断面的磨耗量<sup>[8-9]</sup>。

由于轨道几何不平顺使得车轮通过钢轨某一横断面的接触斑不在同一位置,而是以一定的范围呈现(光带宽度),如图 2 所示,以车辆的某轮位外轮通过曲线中点的钢轨断面为例。将轨面上所有接触斑作用范围(即光带宽度范围)等分为  $n$  份,记做  $n$  个接触位置,且每份宽度远小于 1 个轮轨接触斑的宽度,使得接触斑中心位于每个接触位置的中心。同时假设接触斑作用在每个接触位置中心的概率分别为  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ ,则该子阶段车轮通过断面  $W_R$  次时,在第  $n$  个接触位置上通过次数为  $W_R \beta_n$ 。再将钢轨可能的磨耗范围等分成  $m$  份,记做  $m$  个磨耗位置,接触斑按此划分纵向条带。当 1 个接触斑位于第  $n$  个接触位置时,其对轨面造成的磨耗深度为  $\alpha_n$ (在接触斑影响范围内才会产生磨耗,范围外不会产生磨耗)。则第  $n$  个接触位置在该子阶段引起的轨面磨耗为  $W_R \beta_n \alpha_n$ 。

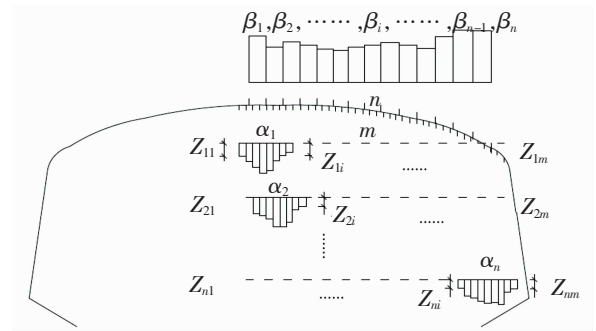


图 2 考虑轨道几何不平顺的钢轨磨耗计算

Fig.2 Calculation of rail wear considering track geometric irregularity

图 2 中  $Z_{n1}, Z_{n2}, \dots, Z_{nm}$  为 1 个接触斑位于第

$n$  个接触位置时在轨面各个磨耗位置处分别造成的磨耗深度,也即接触斑每一纵向条带计算的磨耗。

则该子阶段轨面总磨耗深度  $\alpha_{\text{sum}}$  与平均每次车轮通过时的轨面磨耗量  $\alpha_{\text{avr}}$  计算如下

$$\alpha_{\text{avr}} = \frac{\alpha_{\text{sum}}}{W_R} = \frac{W_R \beta_1 \alpha_1 + W_R \beta_2 \alpha_2 + \dots + W_R \beta_n \alpha_n}{W_R} = \frac{W_R \sum_{i=1}^n \beta_i \alpha_i}{W_R} = \sum_{i=1}^n \beta_i \alpha_i \quad (2)$$

上述过程完成了考虑轨道几何不平顺的轨面磨耗计算。另一方面需要计算该阶段钢轨在轮轨接触应力

作用下的疲劳损伤。根据金属疲劳临界平面法理论,认为当通过材料内部某点的任意平面上的应力应变引起的疲劳参量  $P$  为最大值时,疲劳裂纹在该点萌生<sup>[10]</sup>。疲劳参量  $P$  最大值由式(3)确定

$$P_{\max} = \langle \sigma_{\max} \rangle \frac{\Delta \varepsilon}{2} + J \Delta \tau \Delta \gamma \quad (3)$$

式中: $\langle \rangle$ 为 MacCauley 括号, $\langle \sigma_{\max} \rangle = 0.5(|\sigma_{\max}| + \sigma_{\max})$ ;  $\sigma_{\max}$  为裂纹面上的最大正应力; $\Delta \varepsilon$  为车轮与钢轨接触时引起的各点所有平面上的正应变幅值最大值; $\Delta \tau$  和  $\Delta \gamma$  分别为车轮与钢轨接触时引起的各点所有平面上剪应力幅值和剪应变幅值的最大值; $J$ 为材料参数。

同样考虑几何不平顺的情况下,轮轨接触斑在轨面的接触位置分成了  $n$  个(图 2),接触斑在不同接触位置的应力情况也是不同的。则此型面阶段( $R$ )轨头第  $j$  点的疲劳损伤为

$$D_{Rj} = \sum_{k=1}^n \frac{\beta_{Rk} W_R}{F_{Rjk}} \quad (4)$$

式中: $k$  为接触斑在轨面的接触位置; $W_R$  含义同上文; $\beta_{Rk}$  为该型面阶段( $R$ )时 1 个接触斑作用在钢轨第  $k$  个接触位置的概率,如图 2; $F_{Rjk}$  为该型面阶段( $R$ )时,1 个接触斑作用在钢轨第  $k$  个接触位置在  $j$  点的裂纹萌生寿命(车轮通过次数),其计算公式如下<sup>[10]</sup>

$$P_{Rj\max} = \begin{cases} \frac{\sigma'^2}{E} (2F_{Rj})^{2b} + \sigma' \varepsilon' (2F_{Rj})^{(b+c)} & \langle \sigma_{\max} \rangle \frac{\Delta \varepsilon}{2} \geq J \Delta \tau \Delta \gamma \\ \frac{\tau'^2}{G} (2F_{Rj})^{2b} + \tau' \gamma' (2F_{Rj})^{(b+c)} & J \Delta \tau \Delta \gamma \geq \langle \sigma_{\max} \rangle \frac{\Delta \varepsilon}{2} \end{cases} \quad (5)$$

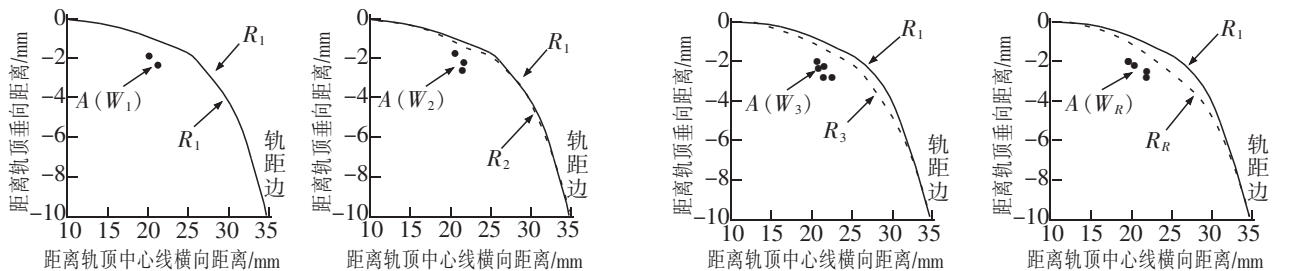
式中: $\sigma'$ 、 $\tau'$  分别为拉伸、剪切疲劳强度系数; $\varepsilon'$ 、 $\gamma'$  分别为拉伸、剪切疲劳延性系数; $b$  为疲劳强度指数; $c$  为疲劳延性指数; $P_{Rj\max}$  为该型面阶段( $R$ )时钢轨  $j$  点的疲劳参量最大值,计算公式见(3)。其余符号同前。

根据上述公式,分别计算该子阶段钢轨的磨耗与疲劳损伤。当钢轨任意位置最大垂直磨耗深度到达设定值时,结束磨耗-疲劳单独发展子阶段,进入磨耗型面替换-疲劳累积子阶段。

## 1.2 磨耗型面替换-疲劳累积子阶段

当进入磨耗型面替换-疲劳累积子阶段时,钢轨型面替换为减少上述磨耗量并平滑后的磨耗型面。同时,将前一磨耗-疲劳单独发展子阶段得到的车轮通过次数  $W_R$  和轨头各点疲劳损伤  $D_{Rj}$  累积,之后进入下一钢轨型面阶段(第  $R+1$  个)的离散循环。

随着钢轨型面变化,若型面上的某点  $j$  没有在磨耗过程中被磨掉,根据 Miner 线性疲劳累积法则,当该点累积的疲劳损伤达到临界值,即  $\sum D_j = D_{1j} + D_{2j} + D_{3j} + \dots + D_{Rj} = 1$  时,认为在第  $R$  个型面阶段的第  $j$  点上裂纹萌生,其磨耗和疲劳累积的过程如图 3 所示。图中黑点为轨头内发生疲劳损伤累积的点,  $A$  点是最后萌生裂纹的点,括号中  $W_R (R=1 \sim R)$  为该型面在替换前的车轮通过次数。



(a) 第 1 个磨耗型面对应的疲劳累积点 (b) 第 2 个磨耗型面对应的疲劳累积点 (c) 第 3 个磨耗型面对应的疲劳累积点 (d) 第  $R$  个磨耗型面对应的疲劳累积点

图 3 随着型面变化的钢轨疲劳累积损伤

Fig.3 Cumulative fatigue damage with the change of rail profile

## 2 预测模型的实施与验证

根据第1节所述方法,按表1车辆、轨道条件建立车轨系统动力学计算模型,预测曲线外轨的疲劳裂纹萌生和磨耗共存发展,与现场观测结果对比,验证模型可靠性。

表1 主要参数  
Tab.1 Main parameters

项目	参数	项目	参数
车辆模型	C70型敞车	转向架	ZK6
轴重	23 t	车速	50 km/h
曲线半径	800 m	轨底坡	1:40
钢轨类型	U75V 热处理	钢轨硬度	340~400 HB
车轮踏面	LM 磨耗型	钢轨密度	7 890 kg/m <sup>3</sup>
钢轨弹性模量	214 GPa	钢轨初始型面	75 kg/m 标准型面
钢轨屈服强度	838 MPa	泊松比	0.29
几何不平顺	实测高低+轨向	更新型面的磨耗限值	0.04 mm

为了保证计算精度的情况下缩短计算时间,定义接触斑在轨面的接触位置和磨耗位置随着型面变化取值  $n=m=15\sim 25$ ,将每轮位外轮在每个型面阶段的接触斑接触位置等分为3份分别统计概率,以1节车辆第1轮位的外轮为例,某个型面阶段接触斑作用在轨面3个接触位置的概率分别为45%,10%和45%,如图4所示。

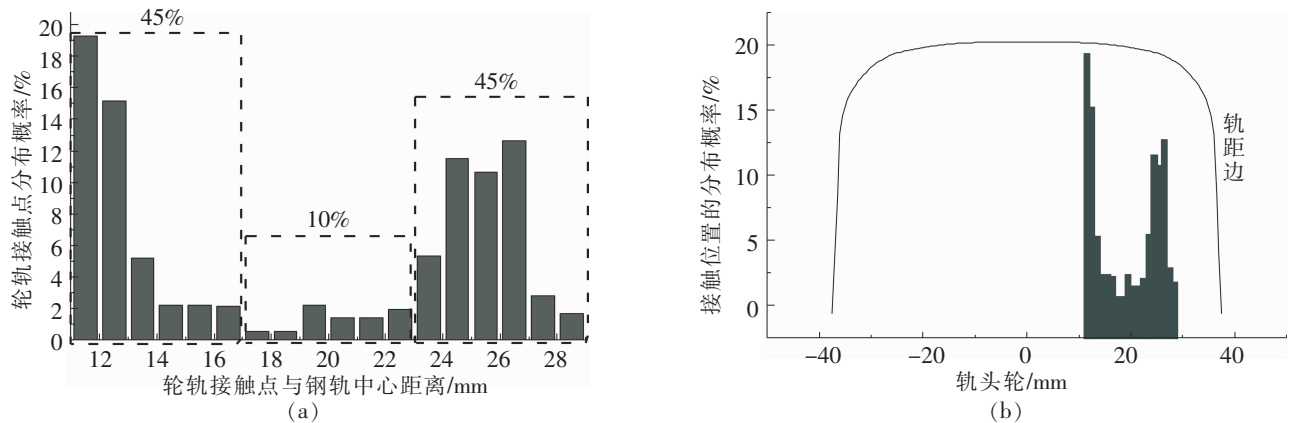


图4 某个型面阶段轮轨接触点分布

Fig.4 Distribution of wheel-rail contact positions at some profile stage

接触位置分布概率与车轮轮位有关,也会随着型面改变而变化,此处仅代表该轮位在第  $R$  个型面阶段的接触位置概率分布。

同样的统计其他轮位外轮在此型面阶段的接触位置分布概率与接触斑状态,按前文所述考虑轨道几何不平顺的钢轨裂纹萌生与磨耗共存发展预测方法进行阶段交替循环,直至轨头某处裂纹萌生,预测的萌生寿命为31.8万次(车轮通过次数)。而现场观测的钢轨疲劳裂纹萌生寿命<sup>[1]</sup>基于某重载铁路典型曲线(半径800 m)的外轨,同样为75 kg/m,U75V 热处理钢轨。观测结果显示从新轨上道到通过总重约3~6.5 MGT,外轨大部分区段萌生裂纹,换算成车轮通过次数约为16.3~35.4万次。本文的仿真结果数值在现场观测范围内,因此建立的模型能较好地进行了裂纹萌生与磨耗共存发展的预测。

### 3 重载铁路车辆轴重对裂纹萌生和磨耗共存发展的影响

本节通过改变多体动力学模型中车辆类型、转向架类型及轴重,预测不同轴重下钢轨的磨耗与疲劳裂纹共存发展情况,相关参数如表 2 所示,其余线路条件如表 1。

表 2 轴重参数  
Tab.2 The parameters of axle load

车辆类型	转向架类型	轴重/t
C70 型敞车	ZK6	23
C80 型敞车	ZK6	25
C80 型敞车	DZ4	27
C96 型敞车	DZ4	30

#### 3.1 钢轨型面磨耗发展率

在不同车辆轴重下,钢轨均经历 6 次型面变化阶段后萌生裂纹。根据钢轨型面替换前后的磨耗量及对应的车轮通过次数,可以计算每个型面阶段的磨耗发展率和裂纹萌生时的平均磨耗发展率<sup>[12]</sup>,如表 3 所示。

表 3 不同车辆轴重下的钢轨型面磨耗发展率  
Tab.3 The wear rate of rail profile under different axle loads

磨耗阶段	不同车辆轴重阶段磨耗发展率			
	23 t	25 t	27 t	30 t
R1~R2	4.094 9	4.315 6	4.446 0	4.561 6
R2~R3	4.003 9	4.204 4	4.323 7	4.508 9
R3~R4	3.915 0	4.058 9	4.204 0	4.380 3
R4~R5	3.803 7	3.931 8	4.053 0	4.169 2
R5~R6	3.611 2	3.683 2	3.793 2	3.901 0
R6~萌生	3.449 5	3.472 0	3.575 1	3.728 4
平均磨耗发展速率	3.813 2	3.944 3	4.065 9	4.208 3

从表 3 可以看出,当仅考虑车辆轴重一个变量时,随着车辆轴重的增大,平均磨耗发展率呈增大的趋势。以 23 t 为标准,25 t 轴重时,钢轨平均磨耗发展率增大了 3.44%;27 t 轴重时,平均磨耗发展率增大了 6.63%;30 t 轴重时,平均磨耗发展率增大了 10.36%。轴重平均每增加 1 t,平均磨耗发展率增加 1.48%。这一点从 Archard 磨耗模型中,磨耗体积与法向力成正比也能得到解释。而不同车辆轴重下钢轨阶段磨耗发展率随车轮通过次数变化如图 5 所示,以及整个仿真过程钢轨型面随着磨耗的变化如图 6 所示。

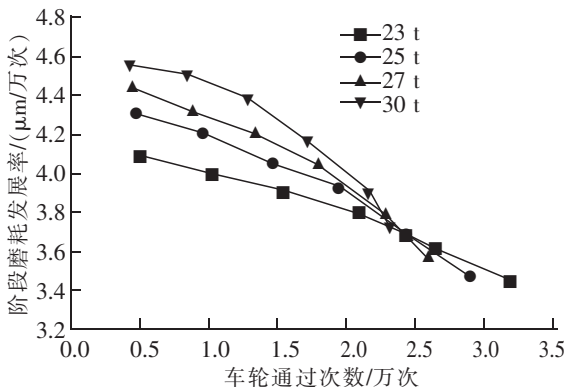


图 5 不同车辆轴重下磨耗发展率随车轮通过次数变化  
Fig.5 The wear rate under different axle loads with the change of wheel passing times

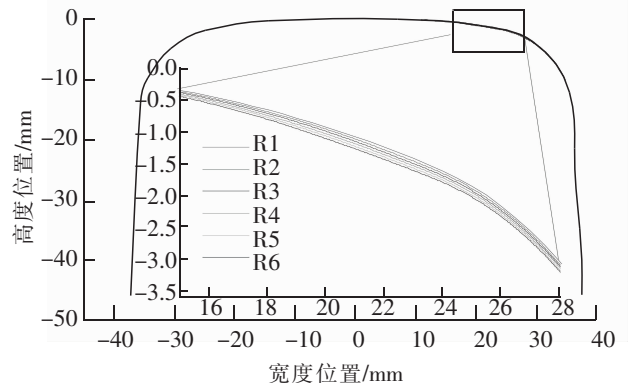


图 6 钢轨型面变化示意图  
Fig.6 The change of rail profile



从图 5 同样可以看出车辆轴重越大,阶段磨耗发展率越大,即每次车轮通过造成的磨耗就越大,每个阶段就越快达到更新型面的磨耗限值,即累积的车轮通过次数越少。图 6 则展示了 6 次迭代的钢轨型面变化。

### 3.2 钢轨疲劳损伤累积

在裂纹萌生预测时,不同车辆轴重下钢轨疲劳阶段损伤与疲劳累积损伤如图 7 所示。

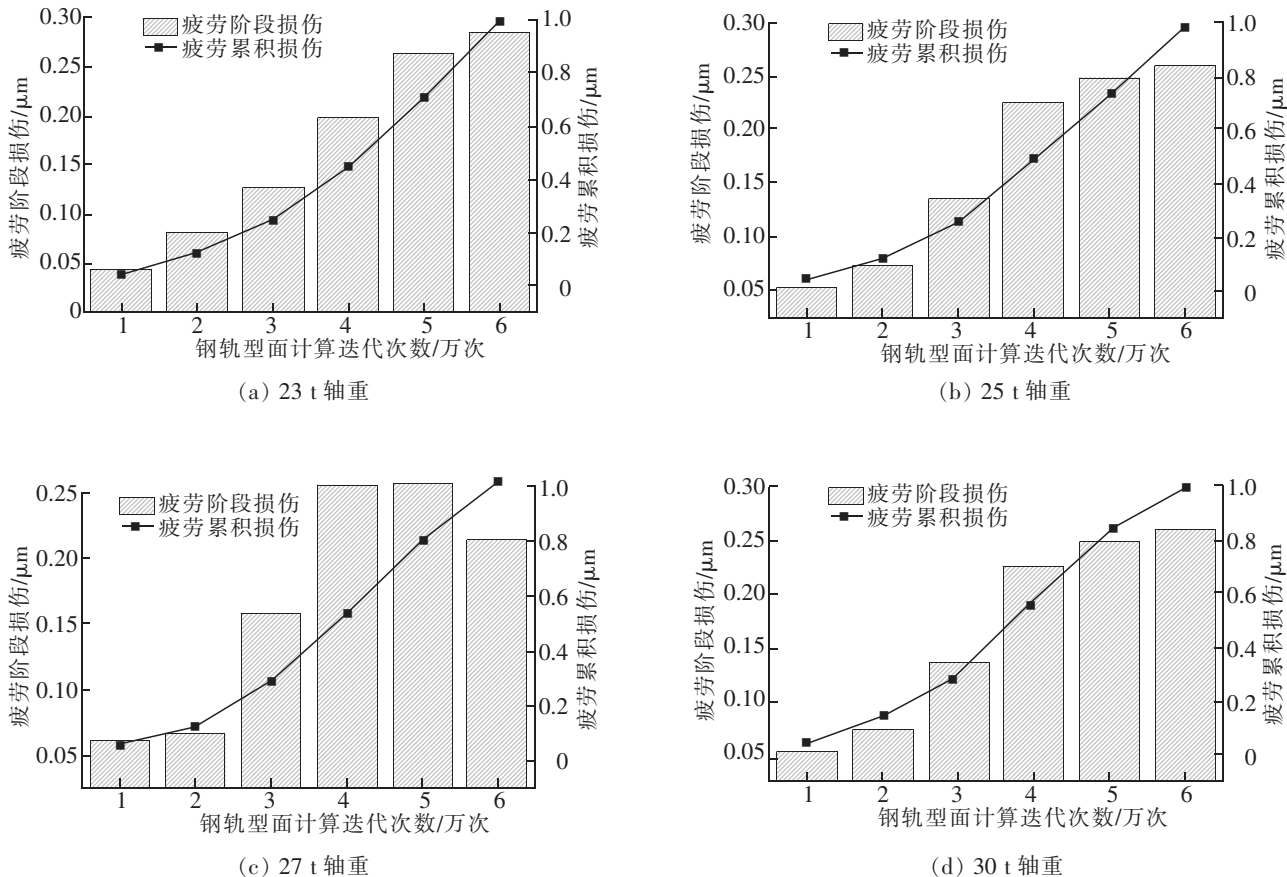


图 7 不同轴重下钢轨疲劳阶段损伤与疲劳累积损伤  
 Fig.7 Multistage and cumulative fatigue in rail under different axle loads

不同轴重情况下,疲劳累积损伤都是呈非线性增长的。对于 23 t 轴重与 25 t 轴重,前 3 次迭代阶段钢轨疲劳阶段损伤较小,随后快速增加;对于 27 t 轴重与 30 t 轴重,前 2 次迭代阶段钢轨疲劳阶段损伤较小,随后快速增加,且 30 t 轴重最后一次迭代很快就达到疲劳裂纹临界点。而不同车辆轴重下钢轨疲劳累积损伤随车轮通过次数的变化如图 8。

图 8 也可以看出疲劳损伤的累积规律基本遵循前期累积平缓,后期较快速。其他参数不变时轴重越大,疲劳损伤累积越快,越早达到疲劳损伤临界值。从平均疲劳累积损伤率来看,23 t 到 30 t 轴重分别为 0.019 5/万次、0.022 0/万次、

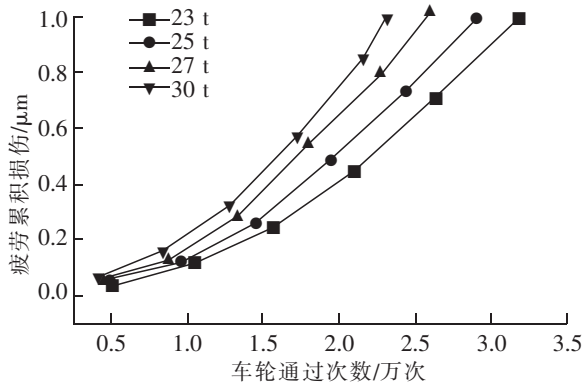


图 8 不同轴重下钢轨疲劳累积损伤随车轮通过次数的变化  
 Fig.8 The cumulative fatigue under different axle loads with the change of wheel passing times

0.025 8/万次、0.028 8/万次。以 23 t 为标准,25 t 时增加了 12.82%;27 t 时增大了 32.31%;30 t 时增加了 47.69%。轴重平均每增加 1 t,平均疲劳累积损伤率增加 6.81%。

### 3.3 钢轨疲劳裂纹萌生位置

在裂纹萌生与磨损发展共存预测模型中,通过累积轨头内部各点疲劳损伤量来找到裂纹萌生位置,当某点的疲劳累积损伤达到临界损伤值时,该点裂纹萌生。仿真得到不同车辆轴重下钢轨疲劳裂纹萌生预测位置如表 4 所示,萌生位置平面示意图如图 9 所示。

表 4 不同车辆轴重下的钢轨疲劳裂纹萌生位置  
Tab.4 The initiation position of fatigue crack in rail under different axle loads

车辆轴重/t	萌生位置/mm	
	X(与轨顶中心水平距离)	Z(与钢轨顶面垂直距离)
23	17.658	2.87
25	17.033	2.59
27	16.942	2.70
30	16.427	2.46

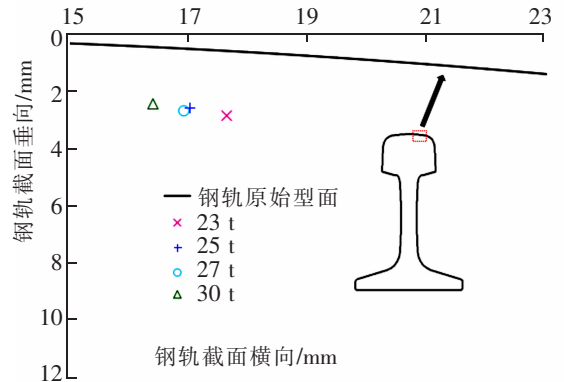


图 9 不同车辆轴重下的钢轨疲劳裂纹萌生位置平面示意图

Fig.9 Two-dimensional map of fatigue crack initiation position in rail under different axle loads

结合表 4、图 9 可以得知:不同车辆轴重下的钢轨疲劳裂纹均萌生在钢轨表面以下 2~3 mm 处,横向位置在距离轨顶中心 16~18 mm 范围内。随着轴重从 23 t 增大到 30 t,钢轨的疲劳裂纹萌生位置在横向上分别距离轨顶中心 17.658,17.033,16.942 mm 和 16.427 mm,在垂向上分别距离钢轨表面 2.87,2.59,2.70,2.46 mm。

### 3.4 钢轨疲劳裂纹萌生寿命与磨损的关系

不同车辆轴重下钢轨的裂纹萌生寿命(车轮通过次数)预测结果如表 5,而车辆轴重、平均磨损发展率和疲劳裂纹萌生寿命相互间的关系如图 10。

表 5 不同车辆轴重下的钢轨疲劳裂纹萌生寿命  
Tab.5 The initiation life of fatigue crack in rail under different axle loads

车辆轴重/t	裂纹萌生寿命/万次
23	31.8
25	28.9
27	25.9
30	23.1

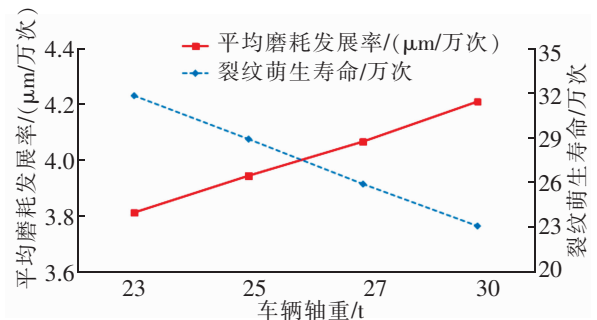


图 10 车辆轴重、平均磨损发展率和疲劳裂纹萌生寿命的关系

Fig.10 Relationship between axle load, average wear rate and initiation life of RCF crack

可见,在本文小半径曲线情况下,钢轨疲劳裂纹萌生寿命随着车辆轴重的增加而减小。以 23 t 时钢轨的裂纹萌生寿命 31.8 万次为标准,25 t 轴重时,钢轨的裂纹萌生寿命为 28.9 万次,减小了 8.99%;27 t 轴重时寿命为 25.9 万次,减小了 18.47%;30 t 轴重时寿命为 23.1 万次,减小了 27.6%。轴重平均每增加 1 t,裂纹萌生寿命减小 3.93%,对钢轨的裂纹萌生寿命的影响不可忽视。

综合仿真结果,在800 m小半径曲线、U75V热处理钢轨材质情况下,轴重每增加1 t,平均磨耗发展率增加1.48%,平均疲劳累积损伤率增加6.81%,裂纹萌生寿命减小3.93%,即图10所示的随着列车轴重的提高,钢轨裂纹萌生寿命下降,平均磨耗发展率却增加。因此,面对车辆轴重的提高,应在线路特别是小半径曲线地段采用更高硬度的钢轨如贝氏体、过共析钢轨等,同时考虑周期性钢轨打磨/铣磨作业,从而减缓疲劳裂纹、改善轮轨关系、延长钢轨使用寿命。

## 4 结论

本文在考虑轨道几何不平顺钢轨裂纹萌生和磨耗共存发展预测方法的基础上探究小半径曲线、U75V热处理钢轨材质情况下重载铁路车辆轴重对钢轨磨耗与裂纹萌生的影响,主要结论如下:

1) 在车辆、线路、钢轨等参数不变时,随着车辆轴重增大时,钢轨的磨耗加快,平均磨耗发展率增加。以23 t轴重时平均磨耗发展率 $3.813\ 2\ \mu\text{m}/\text{万次}$ 为标准,25 t轴重时为 $3.944\ 3\ \mu\text{m}/\text{万次}$ ,增大了3.44%;27 t轴重时为 $4.065\ 9\ \mu\text{m}/\text{万次}$ ,增大了6.63%;30 t轴重时为 $4.208\ 3\ \mu\text{m}/\text{万次}$ ,平均磨耗发展率增大了10.36%。

2) 车辆轴重越大,疲劳损伤累积越快,越早达到疲劳损伤临界值。从平均疲劳累积损伤率来看,以23 t轴重时0.019 5/万次为标准,25 t轴重时为0.022 0/万次,增大了12.82%;27 t轴重时为0.025 8/万次,增大了32.31%,30 t轴重时为0.028 8/万次,增大了47.69%。

3) 随着车辆轴重增大,钢轨疲劳裂纹的萌生寿命逐渐减小。以23 t轴重时钢轨的裂纹萌生寿命31.8万次为标准,25 t轴重时,为28.9万次,减小了8.99%;27 t轴重时寿命为25.9万次,减小了18.47%;30 t轴重时寿命为23.1万次,减小了27.6%。

4) 随着列车轴重的提高,钢轨裂纹萌生寿命下降,平均磨耗发展率增加。车辆轴重平均每增加1 t,平均磨耗发展率增加1.48%,平均疲劳累积损伤率增加6.81%,裂纹萌生寿命减小3.93%。

## 参考文献:

- [1] 国家铁路局, TB 10625-2017 重载铁路设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2017:1.
- [2] ZHOU Y, WANG S F, WANG T Y, et al. Field and laboratory investigation of the relationship between rail head check and wear in a heavy-haul railway[J]. *Wear*, 2014, 315(1):68-77.
- [3] FRANKLIN F J, WEEDA G J, KAPOOR A, et al. Rolling contact fatigue and wear behaviour of the infrastar two-material rail[J]. *Wear*, 2005, 258(7):1048-1054.
- [4] 陈明韬, 王文健, 彭亮, 等. 轴重与钢轨滚动接触磨损关系研究[C]//第八届全国摩擦学大会论文集, 2007:66-68.
- [5] 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.
- [6] 李霞, 温泽峰, 金学松. 重载铁路车轮磨耗和滚动接触疲劳研究[J]. *铁道学报*, 2011, 33(3):28-34.
- [7] JIN Y, ISHIDA M, NAMURA A. Experimental simulation and prediction of wear of wheel flange and rail gauge corner[J]. *Wear*, 2011, 271(1):259-267.
- [8] 周宇, 张杰, 王少峰, 等. 考虑磨耗的钢轨疲劳裂纹萌生寿命预测仿真[J]. *铁道学报*, 2016, 38(7):91-97.
- [9] 于森. 基于非线性损伤累积的钢轨疲劳裂纹萌生预测研究[D]. 上海:同济大学, 2017.
- [10] ZHOU Y, HAN Y B, MU D S, et al. Prediction of the coexistence of rail head check initiation and wear growth [J]. *International Journal of Fatigue*, 2018(6):289-300.
- [11] WANG J, XU Y, LIAN S, WANG L. Probabilistic prediction model for initiation of RCF cracks in heavy-haul railway. *International Journal of Fatigue*, 2011(33):212-216.
- [12] 周宇, 木东升, 邝迪峰, 等. 城市轨道交通钢轨磨耗和裂纹萌生分析与选型建议[J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(4):82-89.



# Influence of Axle Load of Heavy Haul Vehicle on Rail Fatigue Crack Initiation and Wear Growth

Zhou Yu<sup>1,2</sup>, Huang Xuwei<sup>1,2</sup>, Zhang Dongfeng<sup>3</sup>, Zhang Congcong<sup>1,2</sup>

(1.Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education,

2.Shanghai Key Laboratory of Road Infrastructure Durability and System Safety Tongji University, Shanghai 201804, China;

3.Railway Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 10055, China)

**Abstract:** The prediction method for the coexistence of the rail rolling contact fatigue (RCF) crack initiation and wear growth was applied to analyze the influence of axle load on RCF crack initiation and wear growth. The high rail with a small radius of 800 m and a material of U75V heat treatment was taken as the research object. This study found that as the axle load of the vehicle increased from 23 t to 30 t, the average wear rate of the rail increased from  $3.813 \times 10^{-4} \mu\text{m}/10^4$  to  $4.208 \times 10^{-4} \mu\text{m}/10^4$  cycles. The average cumulative fatigue rate was from  $0.019 \times 10^{-4}$  cycles to  $0.028 \times 10^{-4}$  cycles and the initiation life of crack reduced from  $3.18 \times 10^5$  cycles to  $2.31 \times 10^5$  cycles. For each additional ton in axle load, the average rate of wear increases by 1.48%, the average cumulative fatigue rate increases by 6.81%, and the initiation life of crack decreased by 3.93%.

**Key words:** axle load; track geometry irregularity; wear; crack initiation; coexistence