

文章编号:1005-0523(2011)05-0077-06

基于临界平面法的钢轨裂纹萌生寿命预测模型研究

王少锋,许玉德,周宇,李海锋

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

摘要:临界平面法是常用的钢轨裂纹萌生寿命预测方法,诸多文献分别基于此研究了相关的预测模型,但计算出的钢轨裂纹萌生寿命时间比现场观测到的裂纹萌生寿命稍短。通过对预测模型进行理论分析,结果认为,蠕滑力在裂纹萌生预测模型中起十分重要的作用,尤其是纵向蠕滑力与自旋蠕滑力。采用全蠕滑状态是致使预测结果比实际观测结果要短的重要原因之一。此外,摩擦热应力产生的残余应力为拉应力,不平顺导致接触应力的改变,钢轨材质与夹杂物的影响,以及裂纹萌生阶段的选取准则,磨损的影响等,都应在钢轨滚动接触疲劳裂纹萌生寿命预测中有合理考虑。

关键词:钢轨;裂纹萌生寿命;临界平面;预测模型;蠕滑力

中图分类号:U213.4

文献标志码:A

随着客运列车运行速度提高和货运列车轴重增加,钢轨受力状态更加复杂,滚动接触疲劳损伤尤其是疲劳裂纹越来越严重。它不仅增加铁路的运营成本,而且导致轨面不平顺,影响列车运行品质,同时引起恶性循环使轮轨间冲击力增大,进一步加快钢轨伤损的发展,甚至造成钢轨断裂,直接危及行车安全^[1-2]。滚动接触疲劳裂纹受一系列因素的影响,包括环境条件、轮/轨断面、曲线半径、坡度、钢轨表面润滑方法、钢轨的冶金工艺、车辆特性、轨道几何形位偏差以及钢轨的打磨方法等。为了掌握钢轨疲劳裂纹的萌生周期,诸多学者对此建立了相关预测模型。但是预测模型发展至今,仍然有许多尚待完善的地方,其精度与实际观测到的有所差距。因此,为寻求更为精确的预测模型,本文对其中所涉及到的各个参数以及应该考虑到的参数进行理论分析。

1 基于临界平面法的钢轨裂纹预测模型

疲劳寿命分析法现已发展了多种分析方法^[3-5]。临界平面法^[6]的原理是根据裂纹萌生扩展的机理,确定一个物理量,认为该物理量的最大值所在的平面即为临界面。

基于临界平面法的思路,Jang和Schitoglu^[7]提出了基于应变能的疲劳参数 FP

$$FP = \left(\langle \sigma_{\max} \rangle \frac{\Delta \epsilon}{2} + J \Delta \tau \Delta \gamma \right) \quad (1)$$

式中: FP 为截面的疲劳伤损量; $\langle \rangle$ 为MacCauley括号; $\sigma_{\max}$ 为裂纹平面的最大正应力; $\Delta \epsilon$ 为垂直于裂纹表面的正应变幅值; $\Delta \tau$ 为裂纹平面的剪应力幅值; $\Delta \gamma$ 为裂纹平面的剪应变幅值;常数 J 依赖于材料和荷载,从拉伸/扭转实验得到。

这种方法考虑了平均应力对疲劳裂纹萌生寿命影响,把裂纹萌生(临界平面上剪应力(应变))和扩展(正应力(应变))的物理量通过能量的方式有机地联系起来。文献[8-9]在Manson-Coffin公式的基础上,将 FP 的最大值 $FP_{\max}$ 所在的平面定义为疲劳裂纹萌生计算的平面,并分别建立有限元模型,如图1(a)所示。

收稿日期:2011-08-05

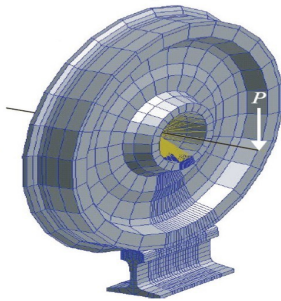
基金项目:国家自然科学基金项目(50908179);高等学校博士学科点专项科研基金项目(200802471003)

作者简介:王少锋(1982—),男,博士研究生,研究方向为重载铁路钢轨伤损。

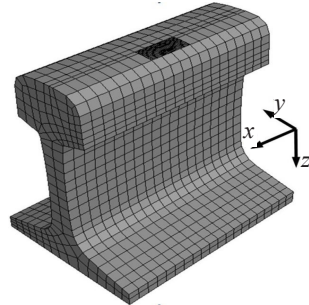
$$FP_{\max} = \left(\langle \sigma_{\max} \rangle \frac{\Delta \varepsilon}{2} + J \Delta \tau \Delta \gamma \right)_{\max} = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f (2N_f)^{(b+c)} \quad (2)$$

式中: $FP_{\max}$ 为最大疲劳伤损量,它所在的材料平面即裂纹平面; σ'_f 为疲劳强度系数; ε'_f 为疲劳延性系数; E 为弹性模量; b 和 c 为疲劳强度指数和疲劳延性指数; N_f 为失效周期次数,即裂纹萌生寿命。

文献[8-9]建立的临界平面如公式(2)所示,有限元模型如下图所示,在 Ringsberg^[11]所建的三维裂纹萌生寿命预测模型基础上,克服了 Ringsberg 模型中当在接触中发生塑性变形时,接触条件不能更新,可能会因有效接触荷载的减少而失效的缺点。改进方法是利用轮轨接触有限元模拟中的约束来解决完整的接触条件,轮轨都用有限元网格建模,轮对在轨道上沿滚动方向施加荷载和转动。



(a) 文献[8-9]所建立的有限元模型



(b) 文献[12-14]所建立的有限元模型

图1 最新的研究文献中所建立的轮轨有限元模型

Fig.1 Wheel-rail FEM models in recent research

文献[12-14]根据钢轨轨头应力应变情况,建立轮轨接触有限元子模型,如图1(b)所示。认为在接触斑内,钢轨处于三向压缩状态,有比较大的静水压力;在接触斑后缘出现了比较小的拉应力区,但应力值较小,静水压力对滚动接触疲劳裂纹萌生寿命影响比较大,应该在滚动接触疲劳分析中考虑静水压力对滚动接触疲劳裂纹萌生寿命影响。定义静水压力影响系数 φ_H 为

$$\varphi_H = \left(\sqrt{1 + \frac{9(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \frac{\sigma_H^3}{|\sigma_H| \sigma_{eq}^2}} \right)^{-1} \quad (3)$$

式中: σ_H 为静水压力; σ_{eq} 为 Von Mises 等效应力; ν 是泊松比。

并修改了临界面方法,建立了考虑静水压力影响的滚动接触疲劳裂纹萌生寿命预测模型:

$$FP_{\max} = \frac{(\tau'_f)^2}{G} (2N_f)^{2b} + \varphi_H \tau'_f \gamma'_f (2N_f)^{(b+c)} \quad (4)$$

式中: τ'_f 为剪切疲劳强度系数; γ'_f 为剪切疲劳延性系数; G 为剪切模量。

2 影响裂纹萌生预测模型的因素研究

文献[8-9]用所建立的模型预测了新干线的 $FP_{\max}$ 与裂纹萌生寿命 N_f , 预测所得的结果比现场观测到的裂纹萌生寿命要短。文献[12-14]用所建立的模型预测了重载铁路随机轮轨力作用下疲劳裂纹萌生概率^[13-14]。预测得到的疲劳裂纹萌生寿命也比现场观测到的裂纹萌生寿命要短。通过分析这两个模型,本文认为,基于临界平面法的钢轨裂纹萌生寿命预测模型之所以与实际情况存在差异,主要是因为以下几个因素。

2.1 钢轨接触表面的应力分布

对于轮轨接触表面的压力状态,模型是用 Hertz 理论来模拟轮轨接触表面压力大小与分布以及接触斑状态^[15]

$$P = P_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{m}\right)^2 - \left(\frac{y}{n}\right)^2} \quad (5)$$

式中: P 为接触斑内某一点接触压力; P_0 为接触斑的最大接触压力; x, y 分别为接触斑内该点的横纵坐标值; m 和 n 为接触斑长半轴和短半轴。 P_0, m 和 n 的值根据轮轨接触几何和轴重确定。

对于纵向力,这几个模型都假定轮轨接触斑处于全蠕滑状态,则根据库仑摩擦定理,横向力与纵向力和法向接触压力成正比,这样钢轨的横向力与纵向力分布为^[8-14]

$$T_y = \mu_y P = \mu_y P_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{m}\right)^2 - \left(\frac{y}{n}\right)^2} \quad (6)$$

$$T_x = \mu_x P = \mu_x P_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{m}\right)^2 - \left(\frac{y}{n}\right)^2} \quad (7)$$

式中: T_x, T_y 分别为横向力与纵向力; μ_x, μ_y 分别为横向摩擦系数与纵向摩擦系数。

只有当轮轨之间的接触斑处于全蠕滑状态,也就是极限状态,此时轮对在钢轨上没有转动而处于完全滑动的状态,以上公式才适用。而曲线上的轮轨接触应力状态中,蠕滑力占有十分重要的因素。轮轨横向力是轮轨法向力和切向蠕滑力的横向分量,而轮轨垂向力是轮轨法向力和切向蠕滑力的垂直分量^[16]。自旋蠕滑也是轮轨疲劳裂纹产生的主要因素,致使在预测裂纹时的轮轨接触力十分复杂,当前研究条件下,无论是实验装置还是数值模拟,都很难考虑到自旋效应的实际影响。横向蠕滑力由于在轮轨受力系统中所占比例较小,因此在仿真与试验中可以忽略或者对其理想化处理。

另外,用 Hertz 理论来解决钢轨接触斑,并不符合实际情况。因为当轮对在钢轨上运动时,由于各种原因会产生轮对摇头和点头以及蛇形运动。当轮轨贴靠时, Hertz 接触面积远小于非 Hertz 接触面积,最大 Hertz 接触压力远大于最大非 Hertz 接触压力。

曲线半径 R_0 也是影响蠕滑力大小的一个重要因素。文献[17]指出,当 $R_0 = \infty$ 和 3 000 m 时,轮轨之间无滑动,当 $R_0 = 300$ m 时,大约 4/5 的接触斑处于滑动状态。这是引起曲线钢轨严重磨损和疲劳破坏的重要原因之一。

因此,对于基于临界平面法的钢轨裂纹萌生寿命预测模型,要精确的考虑轮轨接触斑与钢轨的受力状态,就必须在轮轨蠕滑理论的基础上,考虑影响蠕滑力大小的各个因素,才能使预测模型更符合钢轨实际受力状态。

2.2 动态振动

轮对在钢轨上运动时是一个动态的过程,钢轨所承受的压力应以动力学理论来解决。而现今的研究方法(仿真分析和实验研究)中,考虑钢轨与轮对的动态振动的影响都是非常困难的。高速引起轮轨系统接触振动,而振动又引起接触压力的降低。列车速度对轮轨蠕滑力也有影响,并且速度越大,影响就越大^[16]。蠕滑力的大小正是依赖于接触压力,接触斑处于滑动状态下时,蠕滑力对接触斑的正压力依赖性更大。而模型里的垂向压力 P_0 ,是以轴重来代替。如果考虑到动态振动,钢轨的垂向压力与轴重有很大的差别,每一轮对通过时的垂向力都不会相同。

因此,从轮对于钢轨系统的动态振动方面来考虑钢轨的接触应力,将更进一步提高基于临界平面法的裂纹萌生预测模型的精确性。

2.3 钢轨材质参数

以上裂纹萌生预测模型中对轮对和钢轨都采用有限元建模,而对钢轨内部材质所用的是各向同性随动硬化模型,采用非线性各向同性随动硬化模型来描述塑性状态下应力—应变的关系,描述弹性区的硬化和循环硬化,能够同时描述蠕变和循环塑性硬化。而未能考虑到钢轨材质的内部夹杂物对钢轨裂纹萌生所起的重要作用。由于制造与冶炼方法的原因,钢轨材质不可避免的会出现夹杂物。而夹杂物造成不同

形式的疲劳裂纹萌生,对高强度钢的疲劳性能危害很大,在裂纹萌生中起重要作用^[18-21]。尽管单独研究钢轨材质对裂纹影响的文献也有很多,但基于临界平面法的钢轨裂纹萌生寿命预测模型尚未考虑到此方面。

2.4 钢轨表面不平顺的影响。

由于各种原因,钢轨轨面不是理想光滑的,必定具有不平顺。钢轨表面不平顺使得轮轨接触斑变化多端,使轮轨接触应力分布更加不均匀,影响轮轨接触动力性能,轮轨接触应力具有更为复杂的随机性,使得其更加难以掌握。接触应力的不均匀将会对疲劳裂纹萌生寿命产生较大的影响,而预测模型中如果未能考虑到不平顺,则更容易使得预测结果与实际观测中所得到的结果有所偏差。如何在预测模型里加入轨面不平顺的影响,对疲劳裂纹萌生寿命预测是有待研究的问题。

2.5 摩擦热应力的影响。

热损伤是高速重载车轮和钢轨主要失效形式之一。目前摩擦热应力对于钢轨滚动接触疲劳裂纹萌生的相关研究不是很多,对于热应力在裂纹萌生中的作用,还没有统一的说法,但对于热应力在材料材质变化以及金属晶体排列方面的研究有不少文献,因此可以从热应力的残余应力方面与对金属性能影响方面结合起来,使得更完整的考虑到裂纹萌生方面的影响因素。

文献[23-24]分析结果表明:热影响区主要在很薄的钢轨表层;钢轨表层温升和热应变均随着蠕滑率的增大而增大。热载荷在钢轨表层产生的周向和轴向残余应力表现为拉应力,当蠕滑率增大到一定值时,考虑热影响时热耦合作用下的周向残余应力和轴向残余应力都表现为拉应力,而不考虑热影响时二者表现为压应力。

文献[25]用有限元法(ANSYS)分析了摩擦温度场和热应力场,用移动载荷法模拟轮轨滚滑状况,考虑摩擦热导致的接触区材料的不均匀变形对摩擦温度和热应力的影响,从该文献结论可以看出,轮轨间的摩擦产生的热应力场不仅产生残余拉应力,从而对钢轨表面裂纹萌生有促进作用,而且还会导致接触区材料的不均匀变形,从而使接触应力和变形呈波动特性。

文献[26]认为,热应力与热损伤主要频繁发生在轮对以及轮缘上,而对于钢轨则比较罕见,一般发生在轮对刹车滑动时对钢轨的热灼伤。

因此,温度对钢轨表面裂纹萌生中做正功,也就是说温度越高越促进钢轨裂纹萌生,并且蠕滑力越大,温度越高,对裂纹萌生的促进作用也就越强。研究热应力的作用,首先要精确研究轮轨间的摩擦所产生的温度场的范围及其效应,该过程应结合反复实验与模拟,然后确定影响参数的值的范围,用来确定修正的模型中热应力的作用。

2.6 磨损的影响

对于磨损与疲劳裂纹之间的关系,研究者们从不同的角度进行了大量研究^[27-28]。研究表明,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。制动力、蠕滑力、轴重以及速度都会影响到钢轨的磨损,磨损又会引起钢轨与车轮型面变形,导致轮轨型面匹配不合理,引起接触应力的改变,从而改变裂纹萌生的位置和寿命。而另一方面磨损又能磨去表面裂纹,从而减缓疲劳裂纹损伤程度。重载铁路钢轨损伤以磨损为主,并伴随强烈的塑性变形;高速铁路钢轨主要为疲劳损伤,无明显塑性变形^[29]。

在城市轨道交通中,短波波磨是主要伤损之一,短波波磨与裂纹之间的相关关系,研究的文献还不是很多,需要进一步考虑。

因此,磨损对于裂纹的影响错综复杂,如何在疲劳裂纹萌生寿命预测模型中加入磨损的因素,有待于进一步的详细研究。

2.7 裂纹萌生寿命长度的界限

裂纹的发展可以归类为不同间隔的阶段。从疲劳损伤发展过程看,有两阶段疲劳寿命模型、三阶段疲劳寿命模型和多阶段疲劳寿命模型。两阶段疲劳寿命模型将疲劳发展过程分为裂纹萌生和裂纹扩展2个阶段(如图2所示),结构或材料从受载开始到裂纹达到某一给定的裂纹长度 a_0 为止的循环次数称为裂纹

萌生寿命,此后裂纹扩展到临界裂纹长度 a_{cr} 为止的循环次数称为裂纹扩展寿命;从疲劳寿命预测的角度看,这一给定的裂纹长度与预测所采用的疲劳寿命性能曲线有关,如下图所示。

以上模型采用的都是两阶段疲劳寿命模型,将疲劳裂纹萌生寿命定义为指完好钢轨在荷载的反复碾压下萌生 0.5 mm 裂纹所经历的轮载作用次数。

三阶段疲劳寿命模型最典型的发展阶段可以分为:① 萌生和早期发展;② 浅裂纹发展;③ 分支裂纹发展^[30]。在每一个发展阶段都由不同的机理所控制,从一个阶段过渡到另一个阶段的过渡点取决于主导裂纹增长模式的力的相对大小与性质。但是在三阶段寿命模型中,第一阶段包含了裂纹萌生与早期的裂纹扩展,而不能很好的区分二者,并且各阶段之间的界限用肉眼观测很难精确定位。

无论采用哪种疲劳寿命预测模型,由于操作的困难性,无法完全与实际检测和观测到的裂纹萌生寿命完全吻合。而选用的疲劳寿命模型与裂纹萌生长度定义则具有一定的随意性,标准未能统一,影响着临界平面法下的裂纹萌生寿命预测结果。

3 结论

通过分析基于临界平面法的钢轨裂纹萌生寿命预测模型,研究影响这些模型预测精度的因素,分析了蠕滑力的影响、动态振动、钢轨材质、轨面不平顺、温度场热应力、磨损、裂纹萌生准则等模型涉及到的因素。分析结果表明,轮轨蠕滑力是钢轨裂纹萌生寿命预测模型中不可忽略的因素,它影响到轮轨的法向力和纵向力的分布,法向力与纵向力又是钢轨裂纹萌生和扩展的最主要的因素,此外,接触斑也是影响蠕滑力以及轮轨受力分布的重要因素,而轨面不平顺又直接引起接触斑的变化与动态振动的改变,从而引起轮轨受力状态的不同。在考虑裂纹应力状态时候有必要将温度应力考虑在内,因为其引起的残余拉应力会对裂纹萌生起促进作用。动态振动、钢轨材质、磨损作用可根据所用的模型及有限元仿真进行理想化处理。

参考文献:

- [1] 陈秀方. 轨道工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005:2-3.
- [2] RINGSBERG J W, LOOMORREY M, JOSEFSON B L, et al. Prediction of fatigue crack initiation for rolling contact fatigue [J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22(3): 205-215.
- [3] SURESH S. 材料的疲劳[M]. 王中光,等,译. 北京:国防工业出版社,1993:8-11.
- [4] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京:国防工业出版社,2003:88-251.
- [5] 曾春华, 邹十践. 疲劳分析方法及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1991:120-143.
- [6] JULIE A B. Fundamentals of metal fatigue analysis [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1990: 29-57.
- [7] JIANG YANYAO, SEHITOGLU H. A model for rolling contact failure[J]. Wear, 1999, 224(1): 38-49.
- [8] 松田博之. レールきしみ割れの発生寿命予測[C]//鉄道総研月例発表会講演要旨, 2009: 1-4.
- [9] MAKOTO AKAMA. Development of finite element model for analysis of rolling contact fatigue cracks in wheel/rail systems [J]. QR of RTRI, 2007, 1(48): 8-15.
- [10] WANG JIANXI, XUYUDE, LIAN SONGLIANG. Probabilistic prediction model for initiation of RCF cracks in heavy-haul railway[J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33(2): 212-216.
- [11] RINGSBERG J W. Life prediction of rolling contact fatigue crack initiation[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(7): 575-586.
- [12] 王建西, 许玉德, 王志臣. 影响钢轨滚动接触疲劳裂纹萌生寿命的主要因素分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009,

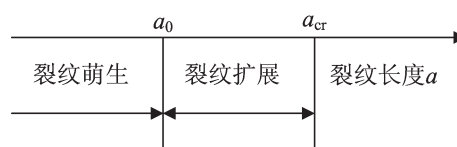


图2 两阶段疲劳寿命模型
Fig.2 Fatigue life model in the two stages

- 37(7):914-918.
- [13] 王建西,许玉德,练松良. 随机轮轨力作用下钢轨滚动接触疲劳裂纹萌生寿命预测仿真[J]. 铁道学报,2010,32(3): 66-70.
- [14] 王建西. 现代运输条件下滚动接触疲劳损伤研究[D].上海:同济大学,2009.
- [15] JOHNSON K L. Contact mechanism [M]. Cambridge:Cambridge University Press,1985:96-119.
- [16] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京:科学出版社,2007:12-19.
- [17] 金学松. 轮轨蠕滑理论及其实验研究[M]. 成都:西南交通大学出版社,2006:70-81.
- [18] Li S X. The influence of inclusion on fatigue behaviors of high-strength steel[J]. China Basic Sci,2005,7(4):14.
- [19] 李守新. 夹杂对高强度钢疲劳性能影响的研究[J]. 中国基础科学,2005,7(4):14.
- [20] Wang Q Y, BATHIAS C, KAWAQOISHI N, et al. Effect of inclusion on subsurface crack initiation and gigacycle fatigue strength[J]. Int J Fatigue,2002,24(12):1269.
- [21] 王冲,曾燕屏,谢锡善. 拉伸与低周疲劳载荷作用下夹杂物特征参数对航空用超高强度钢中裂纹萌生与扩展的影响[J]. 北京科技大学学报,2009,31(5):557-562.
- [22] 米国发,刘彦磊,张斌,等. 夹杂物对轮轨裂纹萌生的影响[J]. 铁道学报,2010,32(4):108-113.
- [23] 李伟,温泽峰. 滚滑接触下钢轨热力耦合分析[J]. 工程力学,2010,27(8):199-216.
- [24] 吴磊,温泽峰. 车轮原地打滑时轮轨接触界面摩擦温升分析[J]. 工程力学,2007,24(10):150-155.
- [25] 王步康,董光能,谢友柏. 滑动接触中摩擦发热的数值分析[J]. 中国机械工程,2002,21:1880-1883.
- [26] ANDERS EKBERG, ELENA KABO. Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading——an overview[J]. Wear,2005,258:1288-1300.
- [27] 王文健,郭俊,刘启跃. 磨损对钢轨滚动接触疲劳损伤的影响[J]. 机械工程材料,2010,34(1):17-23.
- [28] 王文健,郭俊,刘启跃. 轮轨磨损与滚动疲劳裂纹损伤关系及预防研究[J]. 中国表面工程,2010,23(3):106-108.
- [29] 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.
- [30] MC BURSTOW. Current developments in the whole life rail model topredict rolling contact fatigue in rails[C]//The World Congress on Railway Research,2003:445-451.

A Research on Rail Crack Initiation Life Prediction Models Based on Critical Plane Method

Wang Shaofeng, Xu Yude, Zhou Yu, Li Haifeng

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

Abstract: Many relevant prediction models are studied based on the critical plane method, which is commonly used in prediction of rail crack initiation. But the crack initiation life span of the prediction result is shorter than that of site observation. The result of theoretical analysis shows that creep force, especially the longitudinal creep force and spin creep forces, plays an important role in crack initiation prediction models. Full sliding state is an important reason why the predicted result is shorter than the result of actual observations. In addition, the thermal stress generated by friction includes tensile residual stress, change of contact stress caused by irregularity, the impact of the rail materials and inclusion, the selection criteria in crack initiation stage, and the impact of the wear, which should be considered in RCF cracks initiation life prediction.

Key words: rail; crack initiation life; critical plane; prediction model; creep force