

地铁曲线段轮轨接触三维有限元分析

王晨阳, 赵吉中, 徐 祥, 阚前华

(西南交通大学力学与工程学院, 成都 610031)

摘 要:建立曲线段地铁线路的轮轨接触三维有限元模型,研究行车速度、曲线半径、轴重、钢轨超高、轮轨接触位置和摩擦系数等因素对轮轨接触状态的影响,结果表明:钢轨最大等效应力先随行车速度的增加而减小,且一旦行车速度超过设计速度,等效应力就随之增大;改变钢轨的曲线半径和超高不会影响最大等效应力谷值的变化,但轴重的增加会使等效应力的谷值升高;曲线半径和超高的增加或速度的降低,将会导致接触位置为靠近轮缘一侧工况下的钢轨最大等效应力下降,远离轮缘一侧工况下的钢轨最大等效应力上升;不同摩擦系数因数下的钢轨最大等效应力变化不大。

关键词:地铁线路;曲线半径;轮轨接触;有限元;等效应力

中图分类号:U448.13

文献标志码:A

引 言

地铁已成为城市轨道交通的重要组成部分,具有载客量大、快速、正点、低能耗、少污染、乘坐舒适的优点,享有“绿色通道”的美誉。然而,由于城市规划的原因,地铁线路有很多小曲线半径段,轮轨滚动接触疲劳和磨损在这些区域尤为突出,极大的危害了地铁的安全运行,已经成为地铁线路伤损的主要诱因。

轮轨接触诱发的钢轨伤损一直是国内外学者研究的热点和难点。例如,Olofsson等^[1]通过实验调查了钢轨材料的磨损、塑性变形和摩擦特性;Ramanan等^[2]对轮轨接触应力进行了研究,认为直接把荷载加在接触点上或轮缘上的方法^[3]误差较大;Zhao等^[4]的研究发现硬化率对钢轨切向伤损影响最大;文献^[5-7]通过研究轴重与温度对钢轨伤损的影响,发现裂纹起始点在钢轨次表

面;Bruner等^[8]研究了钢轨弯曲应变和轮轨侧向接触力的关系;刘洋等^[9]研究了钢轨不同大小剥离掉块损伤对钢轨剥离掉块伤损区域的影响,发现在剥离掉块伤损区域长度为20 mm、深度为4 mm时,钢轨等效塑性应变最大,且伤损区域后侧的值为前侧的3~4倍,但其研究只是局限在二维情况下,未给出接触斑法向接触力的具体形式;肖乾等^[10-11]研究了直线线路上摩擦系数和轮轨冲角对高速列车轮轨滚动接触面间蠕滑力和蠕滑率的影响,发现摩擦系数对轮轨接触斑面积和最大接触应力影响非常小;随着摩擦系数增加,旋转中心在接触斑内沿牵引方向前移,轮轨冲角对纵向蠕滑率几乎没有影响,但对横向蠕滑率有较大的影响;该研究只是局限在直线段,未考虑横向力作用^[12-13];王文建等^[14]对轮轨损伤行为和钢轨滚动接触疲劳进行了实验研究,分析了轨道参数对轮轨接触斑的影响,并针对钢轨疲劳损伤与磨损提

收稿日期:2018-03-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0304500);四川省杰出青年基金项目(2017JQ0019)

作者简介:王晨阳(1991-),男,河南开封人,硕士生,主要从事轮轨滚动接触疲劳方面的研究,(E-mail)823379263@qq.com

出了预防措施;陆文教等^[15]对地铁车轮磨耗对轮轨接触损伤和动力学性能进行了研究;张璘等^[16]对地铁直线段轮对横移量对轮轨磨耗的影响进行了有限元分析,重点讨论了不同横移量下接触斑的变化;黄龙文等^[17]建立了铁路曲线段轮轨接触表面应力和内部应力计算的数学模型。

综上所述,已有研究对地铁曲线段轮轨接触行为的研究还不够深入。曲线段钢轨由于超高和离心力的存在,其受力状态比直线段钢轨更为复杂和恶劣。因此,基于已有直线钢轨伤损的研究成果,进一步深入研究曲线段钢轨的各类参数对轮轨接触行为的影响十分必要,可以为地铁运营及维护提供一定的参考,具有重要的工程实际意义。

本文通过有限元软件 ANSYS 建立了参数化的三维轮轨接触模型,通过改变轮轨接触中行车速度、超高、曲线半径、轴重、轮轨接触位置和摩擦系数等参数,研究了它们对曲线段地铁在行驶过程中最大等效应力的影响。

1 轮轨接触有限元模型

1.1 有限元网格

车轮采用 LM 踏面,材料型号为 ER8,钢轨采用 60 kg/m 轨型,材料型号为 U75V。车轮和钢轨的几何模型如图 1 所示。

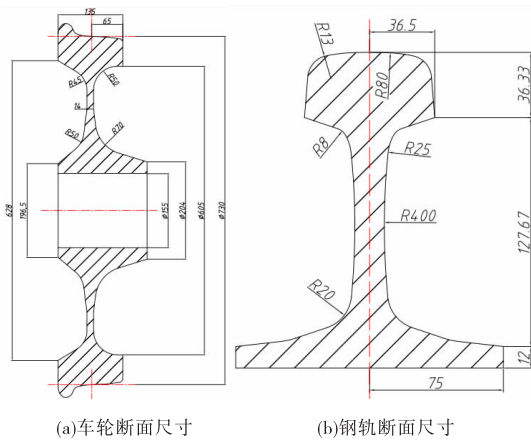


图 1 轮轨几何模型

采用有限元软件 ANSYS14.5 进行三维有限元分析,车轮和钢轨均选取 SOLID185 实体单元。采用面-面接触模拟车轮与钢轨的接触过程,目标单元和接触单元分别为 TARGE170 和 CONTA173。

为了获得轮轨接触斑准确的计算结果,对车轮接触中心左右 15° 范围和钢轨接触中心左右 100 mm 的长度区域进行了精细网格划分。进行轮轨接触分析之前,首先进行弹性赫兹接触验证,保证有限元分析获得的最大接触应力与解析解之间的误差不超过 5%,否则继续优化网格,直到满足误差要求为止。最终,满足上述要求的接触区单元网格尺寸取 2 mm,轮轨接触有限元网格如图 2 所示。

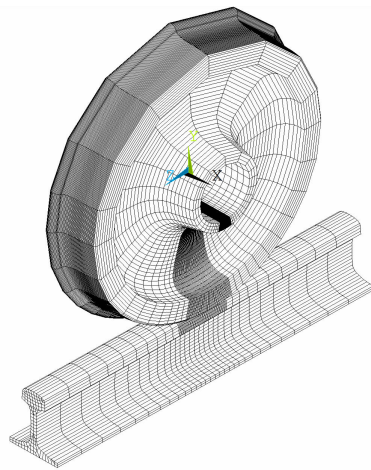


图 2 轮轨接触有限元网格

1.2 材料参数

对车轮和钢轨进行现场取样,进行单调拉伸试验,基本材料性能:车轮和钢轨的弹性模量分别为 217 GPa 和 208 GPa,泊松比均为 0.3,密度为 7900 kg/m³。采用多线性各向同性硬化模型模拟车轮和钢轨的塑性流动特性,在实验曲线上取应力-应变数据点确定多线性各向同性硬化模型的材料参数,取点分布如图 3 所示。在实验曲线曲率较大的区域,增加取点数提高模拟的精度。

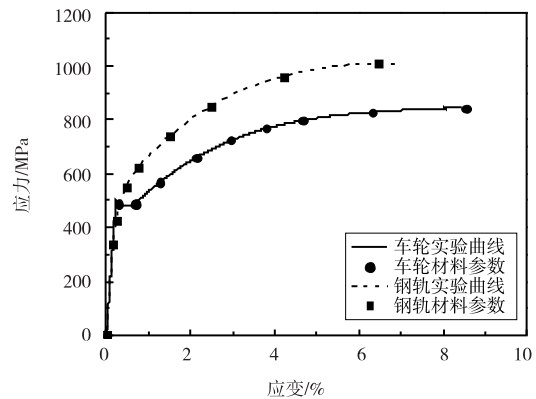


图 3 车轮与钢轨的实验和模拟的单拉曲线

1.3 载荷和边界条件

列车在通过曲线时,作用在车轮上的载荷除轴重外,还必须考虑由离心力和超高所引起的横向力作用,可通过指向曲线外侧的离心力与车辆自重导致的指向曲线内侧的重力分量之差计算,其受力示意图如图4所示。

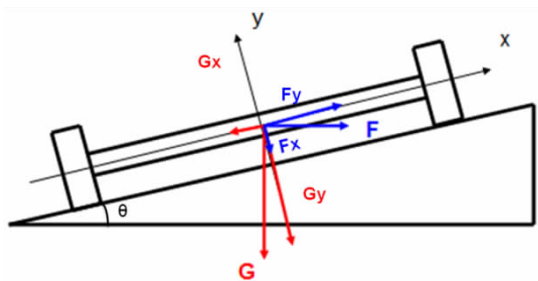


图4 曲线段钢轨受力分析示意图

向心力 F 计算:

$$F = \frac{mv^2}{R} \tag{1}$$

其中, v 为列车的行车速度, R 为钢轨的曲线半径, m 为列车质量。重力 G 和向心力 F 沿 x 和 y 方向的分量即为横向力 F_x 和垂向力 F_y 。

$$F_x = F \cdot \cos\theta - G \cdot \sin\theta \tag{2}$$

$$F_y = F \cdot \sin\theta + G \cdot \cos\theta \tag{3}$$

将轮轴节点与车轮中心点耦合,集中力施加在耦合点上。同时,为了增加有限元计算的收敛性,将 F_x 和 F_y 分两个载荷步进行施加。为简化起见,不考虑轨枕对钢轨的弹性支撑作用,对钢轨底部施加固定位移约束。

2 钢轨等效应力影响因素分析

2.1 曲线半径对钢轨等效应力的影响

曲线半径主要是描述曲线上某处弯曲变化的程度,是曲线段钢轨特有的一种参数。采用控制变量的方式研究曲线半径对钢轨等效应力的影响,采用表1所示的三组工况,曲线半径分别取250 m、300 m和400 m,其他参数不变(超高为0.096 m,轴重为12 t,摩擦系数为0.1),提交 AN-SYS 进行计算。其中,符号“ Δ ”表示参数的增量值。

表1 曲线半径和速度变化参数

编号	速度/(km/h)	曲线半径/m
Cr1	35 ~ 80, $\Delta = 5$	250
Cr2	40 ~ 80, $\Delta = 5$	300
Cr3	45 ~ 80, $\Delta = 5$	350

图5为钢轨最大等效应力随车速的变化情况。其中每个数据点代表一个工况,而数据点所对应的纵坐标,即为当前工况钢轨的最大等效应力值。由图5可知,速度变化对钢轨最大等效应力影响显著。当速度区间处在35 km/h ~ 80 km/h时,增大速度会导致钢轨的最大等效应力先减小,在达到最小值后迅速增大。值得注意的是,这种增长趋势并不是线性的,随后最大等效应力随速度增加而增加的趋势会逐渐减缓。

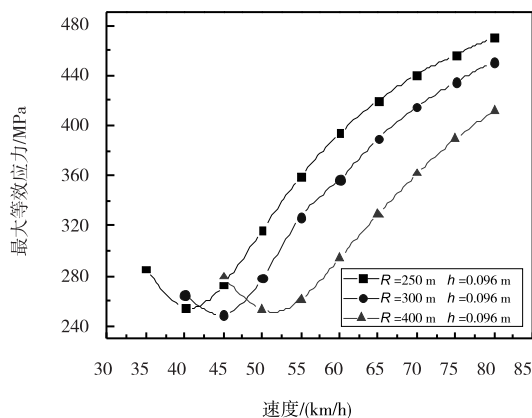


图5 曲线半径对钢轨等效应力的影响曲线

进一步比较不同曲线半径下的结果可知,不同曲线半径下的最大等效应力的谷值几乎不变,即曲线半径的改变对钢轨最大等效应力的谷值影响不大。同时,随着曲线半径的降低,最大等效应力的谷值对应的速度随之降低。这意味着随着曲线半径的减小,当行车速度也要减小到合适的值,才能降低钢轨的最大等效应力。

2.2 超高等等效应力的影响

为研究超高等对钢轨最大等效应力的影响,选取了超高分别为0.096 m、0.106 m和0.120 m(表2),保持其它参数不变(曲线半径为300 m,轴重为12 t,摩擦系数为0.1),共26个工况进行分析。

表2 超高等和速度变化参数

编号	速度/(km/h)	超高/m
Se1	40 ~ 80, $\Delta = 5$	0.096
Se2	40 ~ 80, $\Delta = 5$	0.106
Se3	45 ~ 80, $\Delta = 5$	0.120

将表2中26个工况的计算结果进行汇总,绘制不同超高等下钢轨最大等效应力随速度变化曲线(图6)。由图6可知,钢轨最大等效应力先随着速度的增加而减小,在设计速度附近达到谷值,随着速度的增加最大等

等效应力开始增大,但是这种增加的趋势会逐渐放缓。与曲线半径对最大等效应力的影响类似,超高分别为 0.096 m、0.106 m 和 0.120 m 的三条曲线的谷值几乎相同,这表明超高的变化并不会影响钢轨最大等效应力谷值的变化。此外,不同超高中最大等效应力谷值对应的速度不同:超高值越大,最大等效应力谷值对应的速度越大。这是因为,超高越大,重力的水平分量越大,列车的离心力可通过重力的分量进行平衡;当速度逐渐增加时,离心力越来越大,超高引起的重力分量不足以平衡离心力时,必须依靠外轨的挤压来平衡离心力,导致钢轨的最大等效应力急剧增加,随着施加的推移,容易造成外轨在短时间内造成严重磨损。

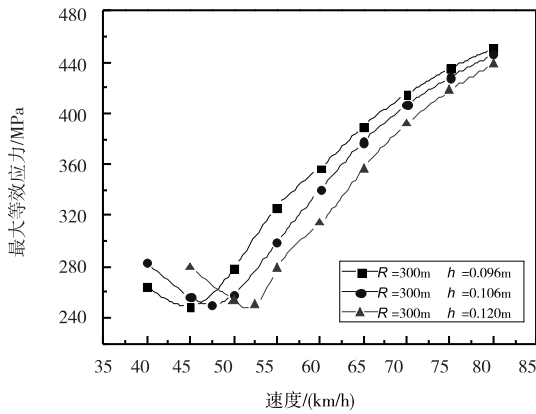


图 6 超高对最大等效应力的影响曲线

2.3 轴重对等效应力的影响

轴重是钢轨承受的全部载荷,其对钢轨等效应力的影响不言而喻。通过改变轴重,其他参数不变,研究轴重对钢轨等效应力的影响。表 3 列出了研究的三组参数,轴重分别为 12 t、15 t 和 18 t,其他参数不变(曲线半径为 300 m,超高为 0.12 m,摩擦系数为 0.1),共 24 个工况。

表 3 轴重和速度变化参数

编号	速度/(km/h)	轴重/t
A11	45~80, $\Delta=5$	12
A12	45~80, $\Delta=5$	15
A13	45~80, $\Delta=5$	18

图 7 为钢轨最大等效应力随速度的变化曲线。由图 7 可知,不论轴重为 12 t、15 t 或是 18 t,钢轨的最大等效应力随速度的变化规律相同。随着速度的增加,最大等效应力先减小,当到达谷值后,速度的继续增大会导致

等效应力的增加,但是这种增加的速率会逐渐放缓。不同轴重对应曲线的谷值不同,即轴重对钢轨最大等效应力的谷值影响较为显著,轴重越大,钢轨的最大等效应力越大;同时,最大等效应力谷值随着轴重的增加而增加。在地铁设计中,通常考虑满载状况进行行车速度设计,未考虑轴重变化下行车速度的改变也会导致最大等效应力的降低,这将导致附加磨损的产生。

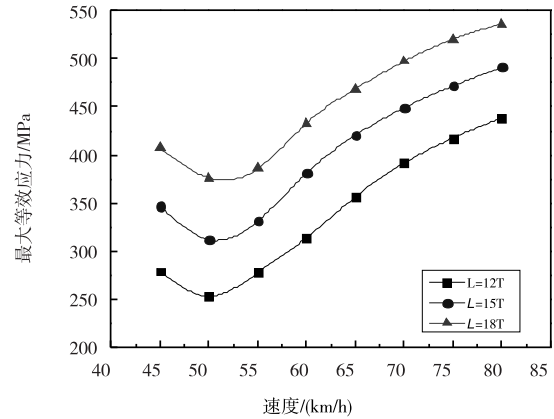


图 7 轴重对最大等效应力的影响

2.4 接触位置对等效应力的影响

由于小曲线半径处受力复杂,车辆行驶过程中,轮轨接触位置不易保持,车轮和钢轨之间会发生不断的相对移动,如图 8 所示。当车轮和钢轨之间发生相对移动时,其接触位置发生相应的变化,钢轨的最大等效应力也会发生改变。以钢轨的顶面中心为原点局部建立坐标系,讨论车轮不同横移量下钢轨最大等效应力的影响。

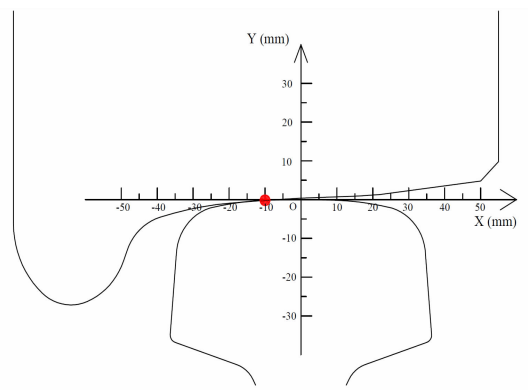


图 8 接触位置坐标系

除需要了解钢轨最大等效应力在不同轮轨接触位置的分布规律外,还需要探究其它参数,如曲线半径、超高、轴重和速度是否会进一步对这种分布规律造成影响,具体工况设计见表 4。

表4 接触位置、曲线半径、轴重和速度变化参数

编号	X 坐标 /mm	曲线半径 /m	超高 /m	轴重 /t	速度 /(km/h)
Cp0	5 ~ 35, $\Delta = 5$	300	0.120	12	60
Cp1	5 ~ 35, $\Delta = 5$	250	0.120	12	60
Cp2	5 ~ 35, $\Delta = 5$	300	0.106	12	60
Cp3	5 ~ 35, $\Delta = 5$	300	0.120	15	60
Cp4	5 ~ 35, $\Delta = 5$	300	0.120	12	70

图9为钢轨接触位置的演化过程。由图9可知,由于钢轨表面是由多段曲面组成,其表面的接触状态较为复杂,接触斑并未呈现出与赫兹弹性接触理论解相符的椭圆形,而是随着接触位置坐标X的增加,接触斑面积呈现出先增大后减小的趋势。

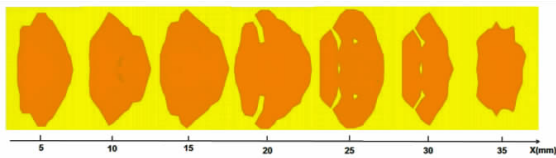


图9 不同接触位置下钢轨顶面接触斑演化云图

图10为Cp0~Cp4五组工况下钢轨横截面的等效应力分布云图。由图10可知,接触位置的移动,对等效应力的分布影响显著,接触坐标 $x = 15$ mm时,出现了多点接触情形。

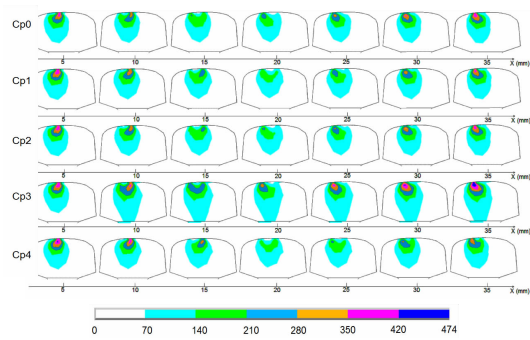


图10 不同接触位置下钢轨横截面等效应力分布云图

为了进一步量化最大等效应力随接触位置的变化情况,图11显示了Cp1, Cp2, Cp3和Cp4四组工况下最大等效应力随接触位置的变化曲线。由图11(a)可知,在接触位置处于 x 轴坐标5 mm~35 mm区间内时,钢轨的最大等效应力先随着 x 轴坐标的增加而减小,而当 x 轴坐标减小到某一谷值后, x 轴坐标的继续增加会导致钢轨最大等效应力的显著增加。曲线半径的变化不会对这种先减后增的趋势造成影响,但会改变最大等效应力谷值对应的速度。这意味着当列车通过一个曲线半径较小的曲线段钢轨且轮轨接触位置落在远离轮缘的一侧时,钢轨的最大等效应力会出现较小值。同理,如果列车通过的曲线段钢轨的曲线半径较大,轮轨接触位置靠近轮缘一侧时钢轨的最大等效应力会有较小值。

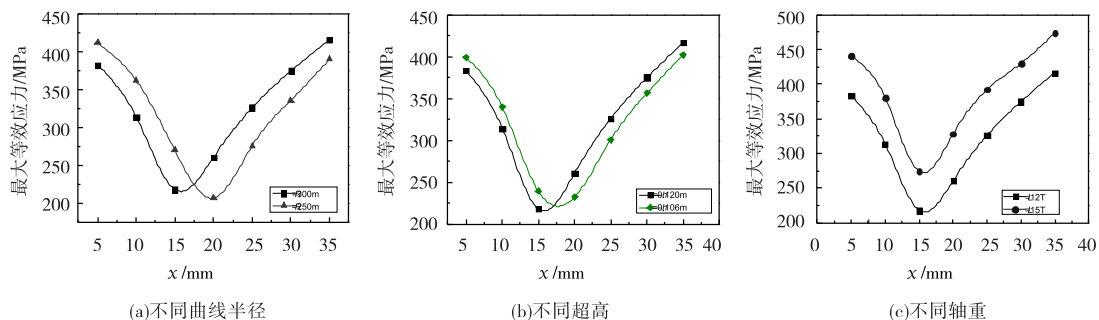


图11 接触位置对等效应力的影响

由图11(b)可知,超高和行车速度的变化对钢轨最大等效应力有显著影响,其值随 X 轴坐标值的增加先增后减。同时,超高的增加会使最大等效应力的谷值向靠近轮缘的一侧移动,而速度的增加会使最大等效应力的谷值向远离轮缘的一侧移动。

由图11(c)可知,最大等效应力在 $x = 15$ mm附近最小,且轴重的增加会提高谷值,但不会改变谷值出现的位置。而偏移这一位置均会导致最大等效应力的急

剧增加。这意味着,不同曲线半径的曲线段地铁在服役过程中,超高过高或过低、速度过高或高低均会引起钢轨接触位置的移动,一旦偏离初始接触位置,最大等效应力均会增加,进而加速滚动接触疲劳失效。

2.5 摩擦系数对等效应力的影响

地铁曲线段钢轨由于小曲线半径较小,车辆行驶过程中,轮轨接触位置不易保持,服役过程中轮轨表面的平顺度不断被消弱,其摩擦系数也相应的发生变化。为

了探究摩擦系数对列车运行时钢轨最大等效应力的影响,图 12 给出了不同速度下的最大等效应力变化曲线(曲线半径为 300 m,轴重为 12 t,超高为 0.12 m)。由图 12 可知,不同摩擦系数下最大等效应力随速度变化曲线差异不大,这表明摩擦系数对最大等效应力影响不大。需要说明的是,钢轨的滚动接触疲劳与最大等效应力存在关联;然而,钢轨的磨耗不仅跟接触压力、摩擦系数、蠕滑比有关,还与钢轨表层的硬度有关。

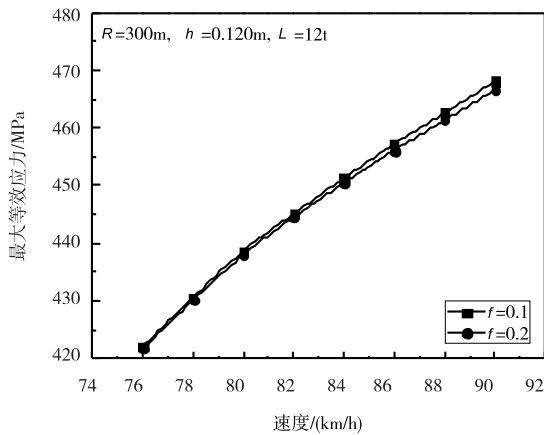


图 12 摩擦系数对最大等效应力的影响

3 结 论

建立了小曲线半径段地铁轮轨接触三维有限元模型,讨论曲线半径、超高、轴重、接触位置和摩擦系数对等效应力的影响,主要结论有:

(1) 曲线半径和超高的改变不会影响钢轨最大等效应力谷值的变化,但轴重的增加会使谷值升高,且钢轨最大等效应力随着轴重的增加而增加。摩擦系数对最大等效应力影响不大。轨道线路设计时,尽量避免线路半径过小,列车应杜绝超载,其会导致轴重增加,对钢轨危害巨大。

(2) 行车速度的增加会使钢轨最大等效应力先增加再减小,在到达谷值以后,随着行车速度的增加最大等效应力开始增大,但是这种增加的趋势会逐渐放缓。列车过弯时如果减速过甚,会导致钢轨最大等效应力增加,影响其使用寿命。

(3) 接触位置靠近钢轨内侧附近时,钢轨最大等效应力随 X 轴坐标的增加呈现出先增后减的趋势。曲线半径和超高的增加,或速度的降低,将会导致接触位置

为靠近轮缘一侧的工况的钢轨最大等效应力减少,远离轮缘一侧的工况的钢轨最大等效应力增大。

通过上述结论可知,在地铁服役过程中,需要控制行车速度、曲线半径和超高三个关键因素,实现地铁线路的变速通行,即在曲率半径很小处,必须控制行车速度在设计值附近。此外,由于轨道下部结构振动的影响,超高在服役过程中将发生变化,可定期测量超高变化,优化行车速度,这样可以保持轮轨接触区的最大等效应力获得最小值,从而提高抗滚动接触疲劳能力。

参 考 文 献:

- [1] OLOFSSON U,TELLISKIVI T.plastic deformation and friction of two rail steels-a full-scale test and a laboratory study[J].Wear,2003,254:80-93.
- [2] RAMANAN L,KRISHNA K R.Thermo-mechanical finite element analysis of rail wheel[J].International Journal of Mechanical Sciences,1999,41:487-505.
- [3] BOGDANSKI S,OLZAK M,STUPNICKI J.Numerical stress analysis of rail rolling contact fatigue cracks[J].Wear,1996,191(1-2):14-24.
- [4] ZHAO B,ZHANG S,LU X,et al.Cyclic tangential loading of a power-law hardening elastic-plastic spherical contact in pre-sliding stage[J].International Journal of Mechanical Sciences,2017,128-129:652-658.
- [5] SRIVASTAVA J P,SARKAR P K,MEEALA V R,et al.Rolling Contact Fatigue Life of Rail for Different Slip Conditions[J].Latin American Journal of Solids & Structures,2017,14(12):2243-2264.
- [6] SRIVASTAVA J P,KIRAN M V,SARKAR P,et al.Numerical Investigation of Ratchetting Behaviour in Rail Steel under Cyclic Rolling-Sliding Contact[J].Procedia Engineering,2017,173:1130-1137.
- [7] MA Y,MARKINE V,MASHAL A A,et al.Modelling verification and influence of operational patterns on tribological behaviour of wheel-rail interaction[J].Tribology International,2017,114:264-281.
- [8] BRUNER M,CATENA M,CORTIS D,et al.Estimation

- of the wheel-rail lateral contact force through the analysis of the rail web bending strains[J]. Measurement, 2017, 99: 23-35.
- [9] 刘洋, 蒋硕, 吴亚平. 剥离掉块对轮轨滑动接触热弹塑性的影响[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(2): 46-55.
- [10] 肖乾, 徐红霞, 成棣. 不同轮轨冲角下高速轮轨稳态滚动接触的蠕滑特性[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(1): 60-66.
- [11] 肖乾, 王成国, 周新建. 不同摩擦系数条件下的轮轨滚动接触特性分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(4): 66-71.
- [12] 周素霞, 薛蕊, 张骞. 地铁线路曲线段磨耗状态下轮轨滚动接触有限元分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(12): 129-135.
- [13] 陶功权, 李霞, 温泽峰, 等. 两种轮轨接触应力算法对比分析[J]. 工程力学, 2013, 30(8): 229-235.
- [14] 王文健, 刘启跃. 轮轨滚动接触疲劳与磨损耦合关系及预防措施[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [15] 陆文教, 陶功权, 王鹏, 等. 地铁车轮磨耗对轮轨接触特性及动力学性能的影响[J]. 工程力学, 2017, 34(8): 222-231.
- [16] 张璘, 刘佳欢, 张军, 等. 地铁直线段轮对横移量对轮轨磨耗的影响[J]. 大连交通大学学报, 2017, 38(5): 11-14.
- [17] 黄龙文, 李正美, 安琦. 铁路曲线区段轮轨接触应力计算方法[J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2017, 43(1): 133-142.

Three-dimensional Finite Element Analysis of Wheel-rail Contact for Curved Subway

WANG Chenyang, ZHAO Jizhong, XU Xiang, KAN Qianhua

(School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610036, China)

Abstract: A three-dimensional finite element model of wheel-rail contact was established to study the influences of operating speed, superelevation, curve radius, wheel-rail contact position and friction coefficient on contact state of rail. The results show that: with the increase of operating speed, the maximum equivalent stress of rail decreases; once the operating speed exceeds the design speed, the maximum equivalent stress turns to an upward trend. The changes of curve radius and axle load have almost no impact on the valley value of maximum equivalent stress, but the increase of axle load can promote the valley value. With the increase of rail radius and superelevation or the decrease of the operating speed, a decreased maximum equivalent stress can be found in where the gauge closed to the flange, but the maximum equivalent stress increases when the gauge is far away from the flange. The frictional coefficient has weak influence on the maximum equivalent stress.

Key words: subway route; curve radius; wheel-rail contact; finite element; equivalent stress