

高锰钢铁路辙叉应力状态有限元分析

王为波¹ 赵朋成¹ 张敏² 马伯江¹ 李镇江¹ 赵程¹ 侯俊英¹

(1 青岛科技大学机电学院, 青岛 266061; 2 西安理工大学材料学院, 西安 710048)

摘要 高锰钢(1.14% C、12.72% Mn)在使用过程中受到复杂的交变冲击载荷作用,表面出现剥落掉块现象而提前失效。用 ANSYS 8.0 软件对辙叉内部应力状态进行了有限元分析,得出辙叉表面垂直方向最大应力达 5 381 MPa,水平方向应力 2 450 MPa,硬化层深度 15 mm;剪应力 700 MPa,作用深度 1.5 mm,剪应力加速铁路辙叉表面剥落。通过高锰钢微合金化,可细化晶粒提高材料韧性,延长辙叉使用寿命。

关键词 高锰钢 铁路辙叉 剥落 应力状态 有限元分析

Finite Element Analysis on Stress Conditions of High Manganese Steel Railway Frog

Wang Weibo¹, Zhao Pengcheng¹, Zhang Min², Ma Bojiang¹, Li Zhenjiang¹, Zhao Cheng¹ and Hou Junying¹

(1 College of Electro-mechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061;

2 College of Materials, Xi'an University of Science and Engineering, Xi'an 710048)

Abstract Due to complex and alternative impact load action during service the flaking and spalling occurred at surface of high manganese steel 1.14C-12.72Mn led to failure ahead of service time. With finite element analysis on internal stress conditions of railway frog by software ANSYS 8.0 it was obtained that maximum vertical stress at surface of frog was up to 5 381 MPa while horizontal stress was 2 450 MPa with hardened layer depth 15 mm; and shearing stress was 700 MPa with depth 1.5 mm which accelerated the surface flaking and spalling of railway frog. Microalloying of high manganese steel is available to fine grain and increase toughness of materials to prolong the service life of frog.

Material Index High Manganese Steel, Railway Frog, Spalling, Stress Condition, Finite Element Analysis

铁路辙叉在使用过程中受到车轮巨大的复杂交变冲击载荷作用,表面经常产生剥落掉块等现象^[1],进而造成磨损到限失效^[2]。本文采用有限元法对铁路辙叉表面的应力状态进行了模拟分析。

1 铁路辙叉表面剥落掉块形貌

高锰钢铁路辙叉的化学成分(%)为:1.14C、12.72Mn、0.39Si、0.019S、0.036P,已使用的辙叉表

面剥落掉块失效形貌如图 1 所示。辙叉表面形成一条剥落沟,为块状龟裂剥落,裂纹的扩展方向呈现出不规则的曲线形貌。在图 1(b)中已剥落断面,下面还出现粗大的二次裂纹,并向内部扩展,可见辙叉在使用过程中受到严重的损伤。

2 有限元模拟和分析

采用有限元软件 ANSYS 8.0,对交变载荷作用

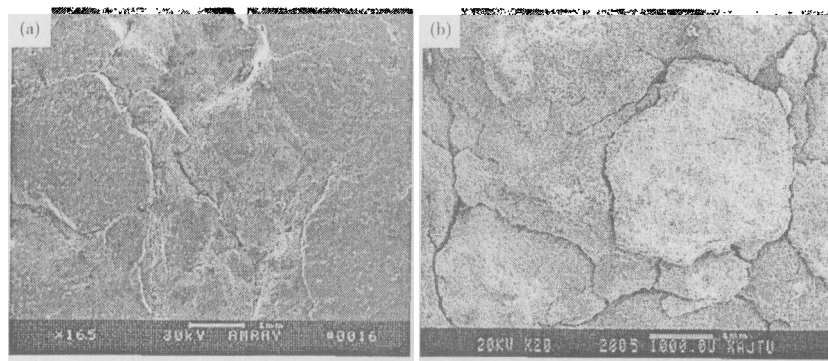


图 1 辙叉表面剥落的形貌:(a) 剥落断面;(b) 表面的剥落掉块

Fig. 1 Morphology of surface spalling of frog: (a) spalling fracture; (b) surface flaking and spalling

下的辙叉内部应力状况进行模拟。一个典型的分析过程可分为建立模型、划分网格、施加载荷、求解和后处理4个步骤。模拟分析采用多线性随动强化(MKIN),它是使用多线性来表示应力-应变曲线,并使用Von Mises屈服准则;在程序的参数设置中,需要的输入最多包括5个应力-应变数值点。

2.1 模型的属性设置

(1)选择单元类型。ANSYS单元库提供了近200种单元。针对铁路辙叉的几何结构和受力状态,采用SOLID42作为它的单元类型^[3]。

(2)定义辙叉材料属性。高锰钢的弹性模量E为210 GPa,泊松比 ν 为0.3,并依次输入。采用单位制:力(N),长度(mm),时间(s),压力(MPa)等。

(3)定义和填充多线性随动强化数据表,填入高锰钢的应力-应变值,取自辙叉材料拉伸试验中4组数据: $\sigma_1 = 91.3$ MPa, $\varepsilon_1 = 0.001$; $\sigma_2 = 298.9$ MPa, $\varepsilon_2 = 0.007$; $\sigma_3 = 369.0$ MPa, $\varepsilon_3 = 0.011$; $\sigma_4 = 639.2$ MPa, $\varepsilon_4 = 0.52$ 。

2.2 建立模型、划分网格和施加载荷

由于涉及到铁路辙叉主要是其水平和垂直方向上的应力和应变分布,因此采用二维有限元模型。辙叉在使用过程中,表面的加工硬化深度约15 mm,表面剥落层的深度为0~2 mm,次表面的二次裂纹离表面的深度2~5 mm;同时为了减少计算时间,选择模型的高度为12 mm,宽度为16 mm。

采用圣维南原理^[4],对辙叉表面载荷进行简化,即把表面非均匀载荷简化为垂直方向的集中压力载荷F和平行于表面的水平力f。铁路轨道承受载荷为50~200 kN,表面摩擦系数 μ 为0.02^[5],同时考虑到冲击载荷的作用,因此垂直载荷F取200 kN,f为6 kN。划分网格的模型和受力状况见图2。

2.3 设置载荷步并执行求解

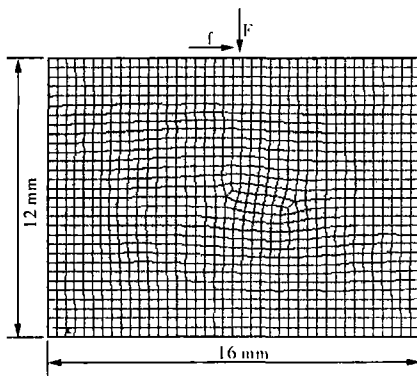


图2 铁路辙叉有限元模型及受力情况

Fig.2 Finite element model and load condition of railway frog

由于高锰钢辙叉受到交变载荷的作用,因此加载方式是交变加载,载荷步设置为4步。4步设置如下,t0:F=0,f=0;t1:F=200 kN,f=6 kN;t2:F=0,f=0;t3:F=200 kN,f=6 kN。施加载荷后执行求解,结果输出采用图形显示方式,并选择等值图的模式输出结果。

3 铁路辙叉有限元模拟结果和分析

3.1 模拟结果

从图3(a)可以看出,在Y方向837 MPa的等应力作用范围有15 mm,这与实际的高锰钢辙叉硬化层的测试结果是一致的^[6],即该区域不断发生塑性变形而产生加工硬化;同时在接触点的最大应力值达5 381 MPa,与文献[7]介绍的车轮与钢轨的接触表面存在着5 000 MPa压应力相吻合。X方向存在2 454 MPa的应力(图3c),这是因为辙叉受到摩擦力和冲击载荷的作用。Y方向应变为0.25e-04 mm,X方向应变为0.72e-05 mm(图3b和d);图3e为辙叉的剪应力,XY方向的剪应力一端受拉力,另一端受到压应力作用,最大剪应力达776 MPa,其中应力值超过686 MPa的深度约1.5 mm,剪应力的存在加速辙叉表面的剥落。图3f为辙叉的应力矢量图,可以看出,在接触点附近,辙叉受到的应力最大。

Y方向的自由度位移,随离接触点距离的增加而减小(图4a),X方向的自由度位移量的图形比较复杂些,接触点左侧是右侧位移量的两倍(图4b)。X和Y方向的自由度位移和见图4c,与图4a比较可知,由于有X方向应力的作用,在辙叉的近表面的位移矢量和在X方向比图4a中仅有Y方向应力作用的范围要大些。

3.2 结果分析

高锰钢铁路辙叉在垂直方向的交变压力作用下,在组织缺陷处裂纹形核并扩展,形成表面裂纹;同时在剪应力的作用下,次表面将产生位错运动,位错在非金属夹杂物或晶界等阻碍处堆积。因为在滚动过程中,在剪应力方向反复作用下,位错的相互切割产生空穴,空穴集中形成空洞,最后发展成为次表面裂纹;裂纹形成后,在载荷的继续作用下,裂纹扩展,最后折向表面,与表面的裂纹相结合,即造成辙叉表面的剥落。

4 结论

(1)铁路辙叉在使用过程中表面的压应力非常大,达到5 381 MPa左右,X方向的水平应力有2 454 MPa,最大剪应力达776 MPa,剪应力的存在加速辙

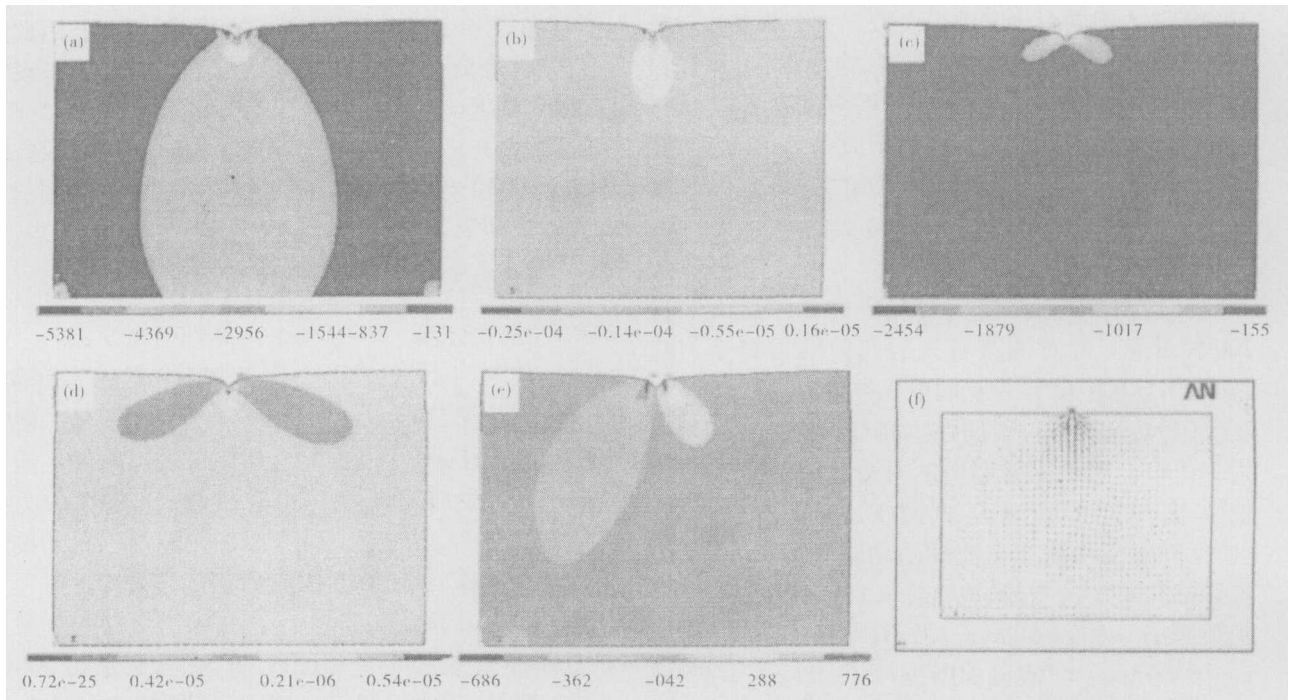


图 3 铁路辙叉 X、Y 方向的应力、应变图:Y 方向应力(a)和应变(b);X 方向应力(c)和应变(d);XY 方向剪应力(e);应力矢量图(f)
 Fig.3 Schematic of stress, strain of railway frog : stress (a) and strain (b) in Y direction; stress (c) and strain (d) in X direction; shearing stress (e) in XY direction; and stress vector diagram (f)

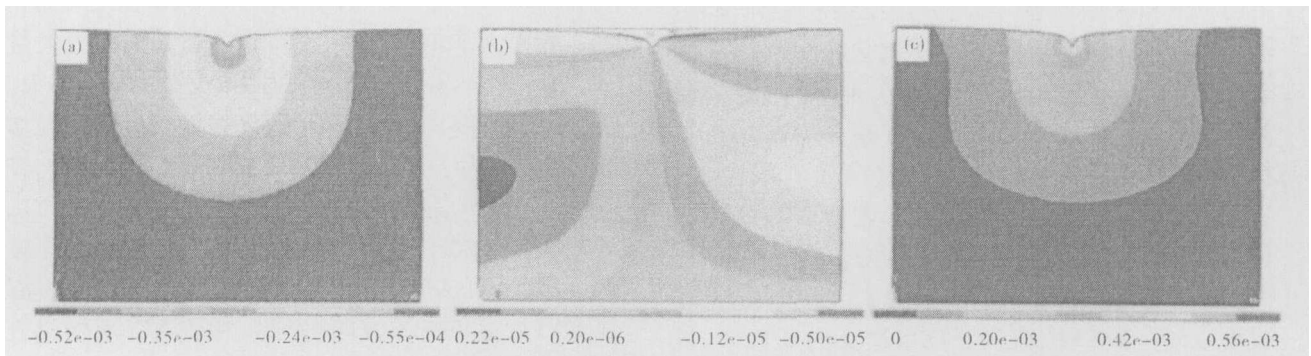


图 4 自由度位移图:(a) Y 方向;(b) X 方向;(c) X 和 Y 方向的和
 Fig.4 Schematic of freedom displacement in X direction (a), Y direction (b) and sum in X and Y direction (c)

叉表面的剥落。

(2) 为避免辙叉表面剥落掉块,延长辙叉的使用寿命,必须改善和提高材料质量;如通过添加 Mo、V、Ti、Nb、RE 和 Cu 等合金元素对高锰钢进行微合金化,从而达到细化晶粒、减少组织疏松和夹杂物等铸造缺陷、提高材料韧性和腐蚀疲劳等综合力学性能的目的。

教育部国家重点实验室高等访问学者基金项目(编号:200101)

参考文献

1 张敏,王为波,周永欣,等. 高锰钢铁路辙叉内部铸造缺陷对使

用性能的影响. 铸造技术,2005,26(3):174

2 王全生,翟耀忠. 高锰钢辙叉质量的改进. 中国铁路,2005(6):24
 3 邢静忠,王永岗,陈晓霞,等. ANSYS7.0 分析实例与工程应用. 北京:机械工业出版社,2004
 4 苟文选. 材料力学 I. 北京:科学出版社,2005
 5 金学松,张继业,温泽峰,等. 轮轨滚动接触疲劳现象分析. 机械强度,2002,24(2):250
 6 张敏,王为波,周永欣,等. 加工硬化对 1.14C-12.72Mn 钢铁路辙叉表面剥落的影响. 特殊钢,2005,26(3):45
 7 江晓禹,金学松. 轮轨接触表面有液态介质时的接触问题研究. 工程力学,2005,22(2):27

王为波(1976-),男,硕士,讲师,2006 年西安理工大学毕业,金属材料失效分析和新材料开发。

收稿日期:2006-09-06