

文章编号: 1674—8247(2024)05—0059—08

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.05.010

考虑焊接残余应力的钢轨铝热焊焊缝 滚动接触应力分析

张玉华¹ 李 澳² 朱永辉³ 胡伟平²

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081; 2. 北京航空航天大学; 北京 100191;

3. 中国铁路济南局集团有限公司, 济南 250001)

摘 要: 铝热焊焊缝的滚动接触应力是钢轨滚动接触疲劳问题的关键影响因素。本文开展了静力拉伸试验研究母材与焊缝材料的基本力学性能, 采用 Chaboche 塑性本构方程描述两种材料在塑性阶段的力学响应。利用 ABAQUS 计算了铝热焊焊接过程的温度场和残余应力场。建立了轮轨滚动接触应力分析的有限元计算模型, 并将焊接残余应力分析与焊缝滚动接触应力相结合, 提出了考虑焊接残余应力的轮轨滚动接触应力计算方法。最后, 分析了焊缝局部应力场的特点。研究结果表明: (1) 焊缝边缘处相比中心处承受更大的接触压力, 残余应力的存在会增加焊缝的滚动接触应力以及焊缝边缘处的接触压力; (2) 随着车轮滚动次数的增加, 焊缝的塑性应变会不断累积, 进而影响钢轨疲劳伤损的演化。

关键词: 铝热焊; 焊接热过程; 焊接残余应力; 滚动接触应力; 有限元

中图分类号: U213+9.2; TG 457.1

文献标志码: A

59

Analysis of Rolling Contact Stress in Rail Aluminothermic Weld Joints Considering Weld Residual Stress

ZHANG Yuhua¹ LI Ao² ZHU Yonghui³ HU Weiping²

(1. China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;

2. Beihang University, Beijing 100191, China;

3. China Railway Jinan Bureau Group Co., Ltd., Jinan 250001, China)

Abstract: Rolling contact stress in aluminothermic weld joints plays a crucial role in rail rolling contact fatigue issues. In this study, static tensile tests were conducted to investigate the fundamental mechanical properties of parent rail material and weld metal. The Chaboche plastic constitutive equation was adopted to describe the mechanical response of both materials in the plastic regime. Utilizing ABAQUS software, the temperature field and residual stress field during the aluminothermic welding process were calculated. A finite element computational model was established to analyze rolling contact stress between wheel and rail, integrate the assessment of weld residual stress with the calculation of rolling contact stress in the weld zone. This led to the proposal of a method for calculating rail-wheel rolling contact stress that accounts for the presence of welding residual stress. Lastly, the characteristics of the local stress field within the weld were analyzed. The results show that: (1) The edges of the weld bear higher contact pressures compared to the center, and the presence of residual stress exacerbates rolling contact stress and contact pressure at the weld edges. (2)

收稿日期: 2023-02-06

作者简介: 张玉华(1977-), 男, 研究员。

引文格式: 张玉华, 李澳, 朱永辉, 等. 考虑焊接残余应力的钢轨铝热焊焊缝滚动接触应力分析 [J]. 高速铁路技术, 2024, 15(5): 59-66.

ZHANG Yuhua, LI Ao, ZHU Yonghui, et al. Analysis of Rolling Contact Stress in Rail Aluminothermic Weld Joints Considering Weld Residual Stress [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(5): 59-66.

As the number of wheel revolutions increases, plastic strain accumulates in the weld, consequently influencing the evolution of rail fatigue damage.

Key words: aluminothermic welding; welding thermal process; weld residual stress; rolling contact stress; finite element

铝热焊由于具有操作简单、焊接速度快、适用于野外流动作业等优点被广泛应用于钢轨焊接工艺中^[1-2]。与闪光焊、气压焊相比,铝热焊在焊接过程中无加压、顶锻等步骤,流程简单,加工成本低。然而,铝热焊在焊接过程中如操作不规范,易产生气孔、夹杂、热裂、焊缝材料晶粒粗大等缺陷,影响焊接接头的力学性能^[3]。

铝热焊焊接会导致焊缝材料的力学特性发生局部变化,包括材料的硬度、显微组织以及强度等^[4]。焊缝材料属性的弱化以及其与母材的材料属性不均匀性是导致焊接接头裂纹萌生与扩展的重要原因,许多学者对焊缝材料以及母材的力学性能做了深入的研究^[5-7]。钢轨在铝热焊焊接过程中存在不均匀的温度分布,冷却时会产生残余应力。何波^[8]等利用 ANSYS 对平板铝热焊的温度场和残余应力场进行了模拟; Liu^[9]等利用 ABAQUS 实现了钢轨铝热焊温度场以及残余应力的计算,发现残余应力会显著影响焊接接头的疲劳性能。

铝热焊钢轨在承受车轮周期性的接触力时会发生滚动接触疲劳而失效破坏,而且裂纹往往萌生于铝热焊焊缝内部。焊缝在滚动接触应力的作用下,局部发生应力集中现象,同时,由于焊缝材料内部存在气孔、夹杂等缺陷,导致焊缝局部材料的力学性能相比母材有所削弱,从而焊缝处易出现裂纹^[10]。研究焊缝局部的滚动接触应力场特性是进行铝热焊焊缝疲劳失效分析的关键之一。周宇^[11]等利用试验和有限元仿真技术研究了钢轨滚动接触疲劳问题中磨损与裂纹萌生的预测方法; Sakalo^[12]等利用最大剪应力幅值作为疲劳判据,研究了滚动接触疲劳中损伤的累积过程;有学者研究了残余应力对钢轨滚动接触疲劳裂纹萌生的影响。可以看到,滚动接触应力分析是研究滚动接触疲劳问题的关键因素,而铝热焊焊接过程产生的残余应力会对焊缝的滚动接触应力场产生影响。

本文开展了母材与焊缝材料的静力拉伸试验获得其基本力学性能,根据试验数据以及 Chaboche 塑性本构模型^[13]标定了两种材料的本构参数。利用 ABAQUS 软件以及生死单元技术实现了铝热焊温度场以及残余应力场的数值计算,建立了轮轨滚动接触疲劳有限元计算模型,通过编写用户自定义材料子程序 UMAT 实现了滚动接触应力的计算。最后将残余应力

分析与滚动接触应力分析相结合,实现了考虑残余应力影响的焊缝接触应力计算,并分析了焊缝区域应力场的特点。

1 钢轨铝热焊焊缝材料及母材的基本力学性能测试

铝热焊焊接后的钢轨中存在两种材料:母材和焊缝材料。钢轨-车轮滚动接触力学响应取决于两种材料的基本力学性能,如弹性模量、屈服极限等。为了分析焊接残余应力和轮轨滚动接触应力,需要首先获得两种材料的基本力学性能。因此,从焊接好的钢轨中制取两种材料的试样用于静力拉伸试验,将所得试验数据用于本构方程的参数标定,最终将标定的参数应用于焊接残余应力和钢轨-车轮的滚动接触应力计算。

1.1 试样制备

用于静力拉伸试样制备的毛坯料来自于一段包含焊缝的钢轨。焊缝材料试样在钢轨头部焊缝居中处垂直取样,在钢轨底部焊缝中水平取样,母材试样则在钢轨母材位置以同样方法取样,如图1所示。试样尺寸如图2所示。

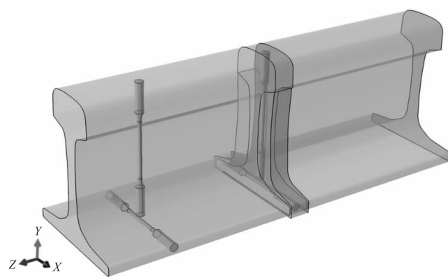


图1 静力拉伸试样的取样方式图

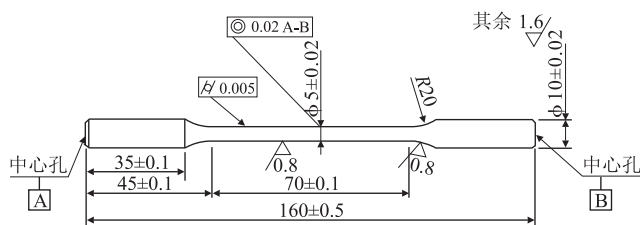


图2 静力拉伸试验的试样尺寸图

1.2 试验结果

将制备好的试件在室温条件下进行静力拉伸试

验,得到母材与焊缝材料的力学性能参数,如表 1 所示。

表 1 母材与焊缝材料的力学性能参数表

项目	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa
母材	245	0.308	1 007
焊缝材料	240	0.308	876

1.3 本构方程

金属材料的线弹性本构方程为:

$$\epsilon_{ij}^e = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} \tag{1}$$

式中: E ——材料的弹性模量(GPa);
 ν ——材料的泊松比;
 σ_{ij} 、 ϵ_{ij}^e ——柯西应力张量以及弹性应变张量(MPa);
 δ_{ij} ——Kronecker 符号。

钢轨-车轮滚动接触问题属于高度局部化的问题,在接触区域往往会产生塑性变形。采用 Chaboche 塑性本构模型来描述金属材料进入塑性阶段后的力学响应。材料的屈服准则以及塑性流动公式为:

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{3}{2} \dot{\lambda} \frac{S_{ij} - \alpha_{ij}}{(S_{ij} - \alpha_{ij})_{eq}} \tag{2}$$

$$\dot{p} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p} = \dot{\lambda} \tag{3}$$

$$f = \sqrt{\frac{3}{2} (S_{ij} - \alpha_{ij})(S_{ij} - \alpha_{ij})} - Q \tag{4}$$

式中: $\dot{\epsilon}^p$ ——塑性应变率;
 $\dot{\lambda}$ ——塑性乘子;
 S_{ij} ——柯西应力张量的偏量部分(MPa);
 α_{ij} ——随动硬化的背应力张量(MPa);
 \dot{p} ——累积塑性应变率;
 Q ——屈服面半径(MPa)。

忽略各向同性硬化的影响,屈服面半径保持不变,即 $Q = \sigma_y$, σ_y 为屈服应力。随动硬化法则表达为:

$$\alpha_{ij} = \sum_{k=1}^M \alpha_{ij}^{(k)} \tag{5}$$

$$\dot{\alpha}_{ij}^{(k)} = \frac{2}{3} C_k \dot{\epsilon}_{ij}^p - \gamma_k \alpha_{ij}^{(k)} \dot{p} \tag{6}$$

式中: C_k 、 γ_k ——需要标定的材料参数(MPa);
 M ——背应力个数,取 2 个。

1.4 参数标定结果

单轴加载条件下材料的应力应变关系为:

$$\sigma = \sigma_y + \sum_{k=1}^2 \frac{C_k}{\gamma_k} (1 - e^{-\gamma_k \epsilon_p}) \tag{7}$$

根据试验的应力应变数据,利用非线性曲线拟合方法得到两种材料的参数标定结果,如表 2 所示,标定参数的数值计算结果与试验数据的对比如图 3 所示。

表 2 母材与焊缝材料的本构方程参数标定结果表

项目	C_1 /MPa	C_2 /MPa	γ_1	γ_2	σ_y /MPa
母材	24 994	2 679	88	7.384	528
焊缝材料	171 410	27 052	1 803	74.197	433

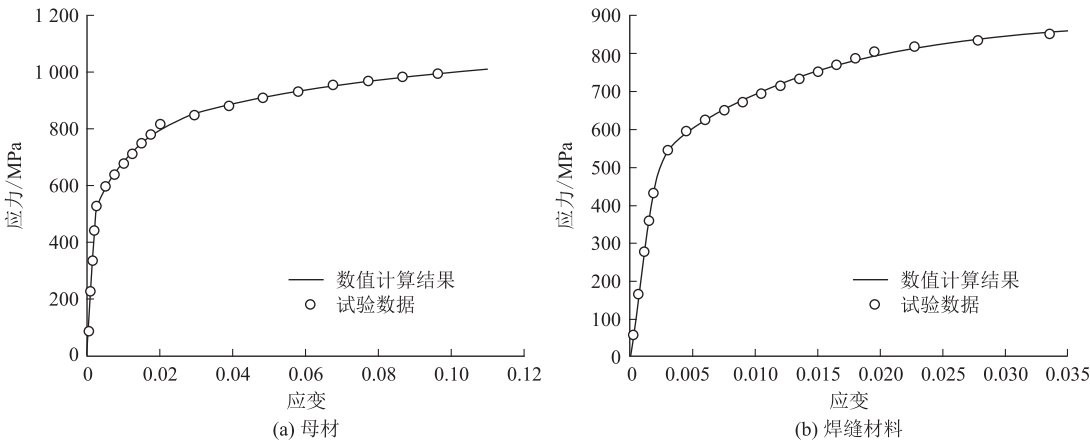


图 3 标定参数数值计算结果与试验数据对比图

2 钢轨铝热焊焊接热过程数值模拟

由于焊接残余应力主要来源于铝热焊焊接热过程,因此,要计算焊接残余应力必须先进行焊接热过程模拟,得到焊缝局部的温度分布,进而计算得到焊缝处的残余应力。

2.1 铝热焊焊接工艺

铝热焊具有由于操作方便、适合流动作业、热容量大、焊接时间短、接头平顺性好等优势被广泛应用于钢轨焊接工艺中^[14]。铝热焊的原理是:利用还原剂和金属氧化物反应产生的大量热量熔融母材,液态的母材和反应物一起在型腔中冷却凝固从而实现焊接。钢轨

铝热焊的工艺流程为^[15]:

(1) 轨端干燥与除锈去污

利用预热枪对轨端进行加热干燥,去除钢轨表面的水分,用角磨机、钢丝刷等对钢轨的端面、轨头、轨腰等打磨除锈。

(2) 对轨

为了防止焊接过程中轨道轴线不对齐而影响焊接过程,必须在焊接开始前对轨。以轨脚处为基准,焊缝宽度控制在 25 ~ 30 mm,接着进行水平调整,检查焊缝两端钢轨轨头、轨腰、轨底等是否平直,最后进行尖点调整。

(3) 砂型安装与封箱

将砂型贴合钢轨侧面左右摩擦使砂型与钢轨装配处紧密贴合,浇筑孔对准焊缝中心并与轨底垂直,之后进行封箱。

(4) 预热

将预热枪垂直轨端面放置在轨腰处使焊接的端面均匀受热。

(5) 焊剂反应与浇注

用预热枪点燃高温火柴引发焊剂反应,产生的钢水流入型腔内完成浇注。

(6) 拆模、推瘤、打磨

浇注完成后移除坩埚、拆除模板与轨头砂型,完成推瘤去除浇注棒,最后将焊接好的钢轨进行表面打磨。

2.2 铝热焊焊接热过程有限元分析模型

为提高有限元的计算效率,保证铝热焊温度场的计算准确性,重点考虑铝热焊过程中的热过程,包括预热、浇注、拆模与推瘤、冷却。前三步计算结果作为初始温度场导入冷却计算模型中,通过热力耦合分析得到残余应力场,如图4所示。

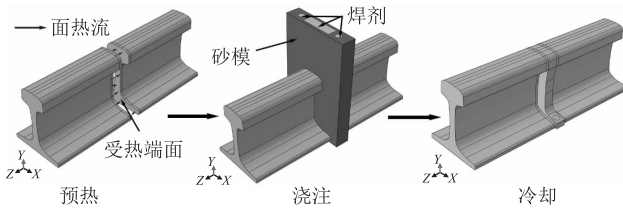


图4 铝热焊有限元计算流程示意图

为简化计算,仅考虑热传导的传热方式,热平衡公式为:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k(T) \nabla^2 T + Q \quad (8)$$

式中: ρ ——材料密度 (kg/m^3);

C ——材料比热容 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$];

T ——温度 (K);

t ——时间 (s);

k ——导热率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$];

Q ——产热率 (W/m^3)。

在铝热焊的数值计算过程中涉及到两种材料:钢轨材料和砂模材料。两种材料的热学参数取自文献[9]。需要说明的是,在实际的铝热焊工艺流程中,传热过程十分复杂,涉及到固态金属熔融成液态产生的相变潜热影响,以及液态金属对流换热的影响。为了简化分析,利用焓法将潜热影响转化为材料比热的变化来考虑,而对流换热的影响则通过将材料的导热系数提高5倍来考虑。

铝热焊热过程的有限元计算模型网格如图5所示。整体模型包括 27 108 个 C3D4 单元和 58 878 个 C3D8 单元。在预热阶段,利用商用计算软件 ABAQUS 生死单元技术将钢轨之外的单元抑制,对轨端面施加面热流预热。在浇注阶段将模具、浇注棒、焊剂等单元激活,利用预定义场将焊剂初始温度设置为 2 050 °C,随之进行热传导。浇注结束后,利用生死单元技术抑制浇注棒、模具等单元实现拆模和推瘤。浇注完成后的温度场通过预定义场导入冷却模型中完成残余应力的计算。

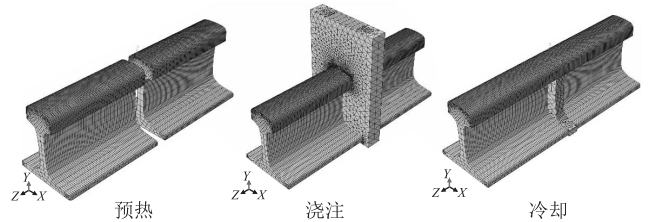


图5 铝热焊有限元模型网格示意图

2.3 铝热焊温度场计算结果

焊接过程中的温度变化如图6所示。预热结束时轨腰处的温度最高,之后激活焊剂单元模拟浇注过程。焊剂的初始温度假设为均匀分布,各个位置均为 2 050 °C,经过 240 s 的热传导完成浇注过程。随即抑制多余的焊剂、模具、浇注棒等单元实现拆模与推瘤。由图6可知,冷却开始时钢轨的最高温度处位于焊缝以及轨头处。焊趾处的温度变化历程如图7所示。预热阶段焊趾处温度上升较快,之后激活的高温焊剂单元造成了较大的温度梯度,使得焊趾处温度急剧变化。在冷却阶段后期焊趾处温度变化缓慢,钢轨需要较长时间才能冷却至室温。

3 考虑焊接残余应力的钢轨铝热焊焊缝滚动接触应力计算

3.1 铝热焊焊接残余应力计算

基于铝热焊焊接完成后的温度场,定义母材和焊

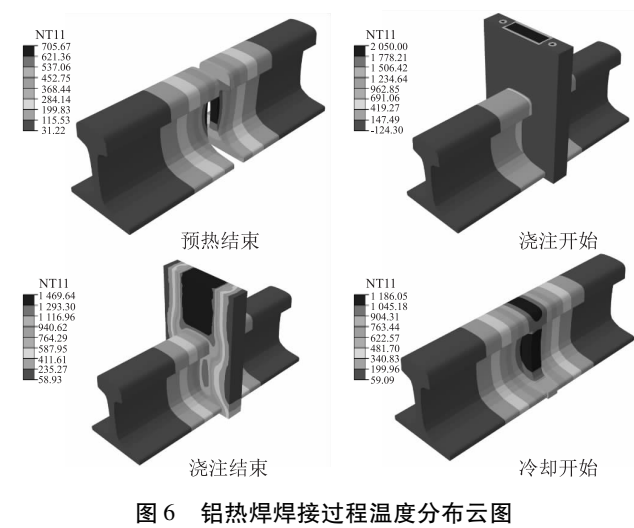


图 6 铝热焊焊接过程温度分布云图

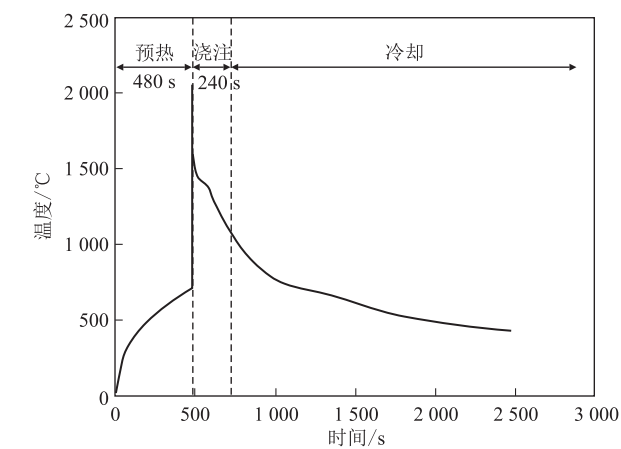


图 7 焊趾处在铝热焊数值计算过程中的温度变化图

3.2 焊缝滚动接触应力计算

车轮-钢轨之间的接触应力状态是列车安全运行至关重要的因素,接触应力会影响钢轨的磨损、疲劳等性能。许多学者对轮轨接触应力的数值计算方法开展了研究^[16-18]。建立轮轨滚动接触应力有限元计算模型,如图 10 所示。需要说明的是,轮轨滚动接触是一个动态载荷问题,在关注轮对整体载荷时采用动态分析方法更为合适^[19-20]。然而,考虑到本文主要关注局部接触应力,若采用显示动力学方法所得的接触应力

缝材料的表面换热系数,在 20 ℃ 的空气中冷却。由于温度场的不均匀以及边界条件的约束作用,在冷却过程中结构会产生残余应力。冷却后的温度场以及冷却过程的边界条件如图 8 所示。冷却结束时焊趾平面 3 个方向的残余应力分布如图 9 所示。铝热焊焊接过程在钢轨轴向方向会产生较大的残余应力,从而影响轮轨滚动接触应力状态。

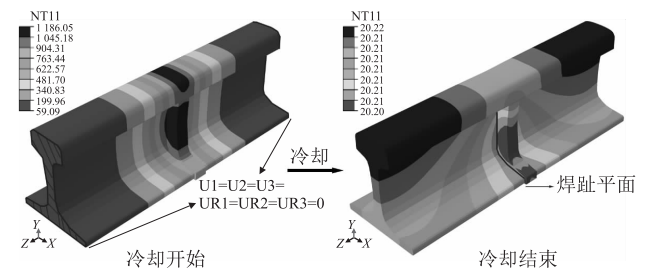


图 8 冷却过程有限元模型的边界条件和冷却结束时的温度分布图

分布容易出现较大波动,不利于分析焊接残余应力对接触应力的影响规律。因此,本文采用准静态的隐式求解方法进行接触应力分析。

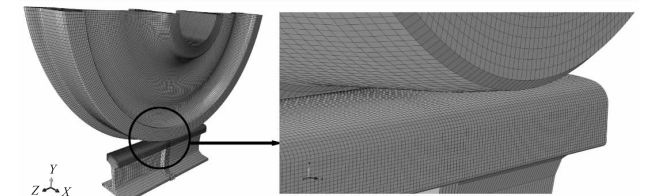


图 10 轮轨滚动接触应力有限元计算模型网格示意图

模型中焊缝高 176 mm,在计算中钢轨总长 500 mm,约为焊缝高度的 3 倍。计算模型的边界条件如图 11 所示。钢轨底部固支约束,左右两端面对称约束,即将钢轨视为无限长。计算结果表明,钢轨接触应力分布呈现较强的局部化特征,即模型约束条件对结果的影响并不明显,计算中所取的轮轨长度和边界条件亦满足计算要求。车轮中心处耦合参考点控制车轮的运动状态。参考点处施加垂直轨面向下的轴重载荷 70 kN^[21],同时对参考点施加 Z 方向水平位移载荷以

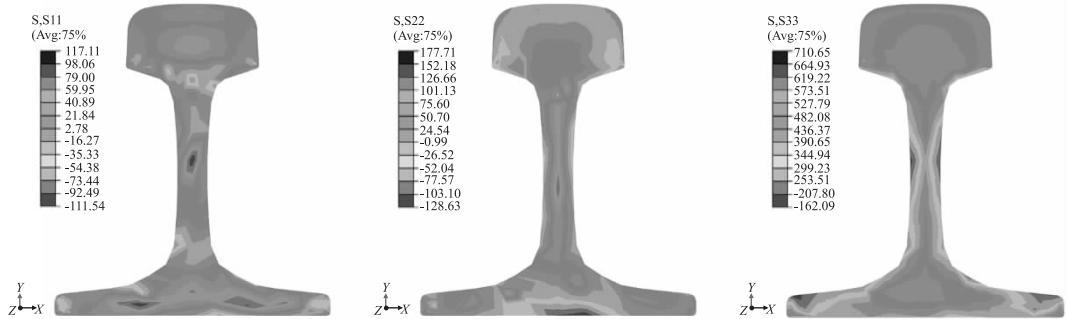


图 9 焊趾平面 3 个方向的残余应力分布云图

及角速度实现车轮的往复滚动^[22]。

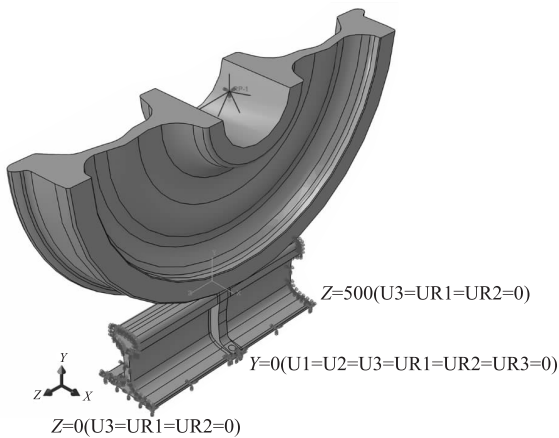


图 11 轮轨滚动接触应力有限元计算模型边界条件图

为验证模型的适用性,计算了正常钢轨不含焊缝钢轨和含焊缝钢轨但不考虑残余应力的情况。轮轨滚动接触 von Mises 应力计算结果如图 12 所示。图 12(a)显示的正常钢轨的接触应力分布规律与有关学者的结果一致。另外,可以看出,两种情况的接触应力分布规律非常相似,但是有焊缝情况下的最大 von Mises 应力略高于正常钢轨情况,且有焊缝时最大应力位于焊缝与母材的交界处,这是由焊缝与母材力学性能的差异造成局部的材料不连续而导致的。有焊缝钢轨的最大

接触应力为 645 MPa,超过了两种材料的屈服强度,因此在车轮往复滚动过程中会产生累积塑性应变,对钢轨的磨损、疲劳等性能造成危害。

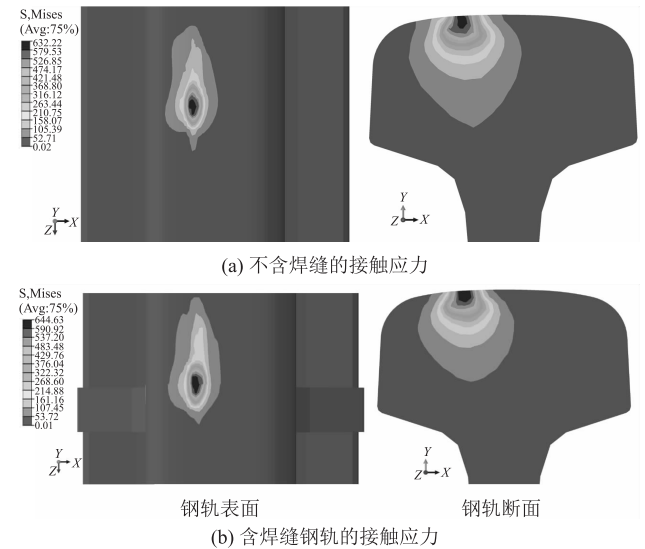


图 12 轮轨滚动接触应力计算云图

焊缝中心和焊缝边缘接触压力的对比曲线如图 13 所示,其中点 A 取自焊缝边缘,点 B 取自焊缝中心。可以看到焊缝边缘承受着比焊缝中心处更高的接触压力,这也意味着焊缝边缘相比焊缝中心更容易破坏而失效。

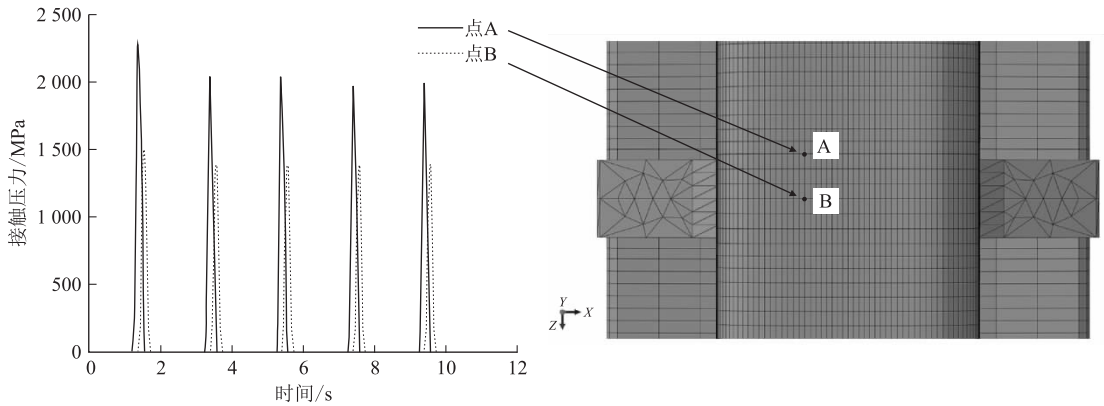


图 13 焊缝边缘和焊缝中心接触压力变化曲线图

3.3 考虑焊接残余应力的焊缝滚动接触应力计算结果

将计算得到的残余应力场作为初始应力导入轮轨滚动接触应力计算模型中,研究考虑焊接残余应力的焊缝滚动接触应力分布。von Mises 应力如图 14 所示。对比图 12 可知,残余应力的作用会改变滚动接触应力场的分布,并且增加滚动接触应力的最大值。这说明对焊缝而言,残余应力的存在是有害的。

车轮运动至焊缝边缘处时的接触压力如图 15 所示。由于材料性能的不连续变化,接触斑在焊缝与母材交界处也呈现出不连续的特征,并且接触压力的最大值较无残余应力也有所增加。

焊缝边缘和焊缝中心两处(点 A、点 B 具体位置如图 13 所示)的等效塑性应变累积曲线如图 16 所示。由于焊接热过程的作用,两处位置均存在初始塑性应变,并且焊缝边缘处塑性应变比中心处大。随着

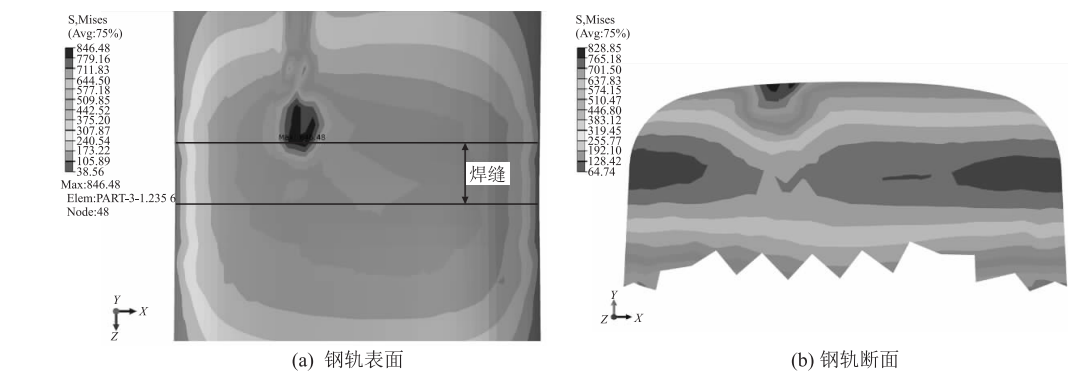


图 14 考虑残余应力影响的轮轨滚动接触应力计算云图

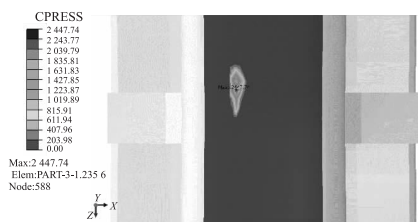


图 15 考虑残余应力影响的接触压力云图(车轮位于焊缝边缘处)

车轮滚动次数增加,两处塑性应变不断累积,对焊接接头造成不可逆的损伤而危害列车的安全运行。

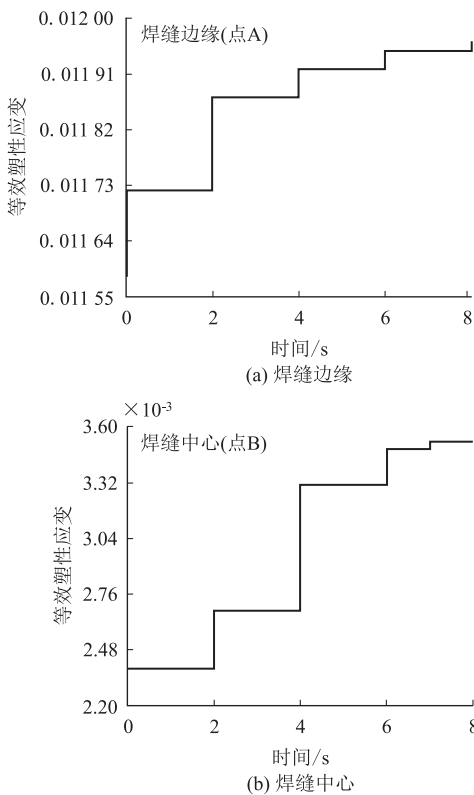


图 16 焊缝边缘和中心处等效塑性应变累积曲线图

4 结论

本文通过静力拉伸试验研究了铝热焊钢轨母材和焊缝材料的基本力学性能,标定了两种材料塑性本构方程的参数;采用 ABAQUS 实现了钢轨铝热焊焊接过程温度场的模拟以及焊接残余应力场的计算,将残余应力场导入轮轨滚动接触应力计算模型中,建立了考虑残余应力影响的轮轨滚动接触应力计算模型,研究了焊缝处的应力应变特征,得到主要结论如下:

- (1) 由于铝热焊焊接热过程的影响,焊缝材料比母材的抗拉强度和屈服应力有所下降,这种力学性能的不匹配容易让焊缝与母材的交界处承受更大的接触载荷。
- (2) 钢轨在铝热焊焊接过程的冷却阶段会产生残余应力,该应力会增加焊缝滚动接触应力,同时增加焊缝边缘处承受的接触压力,对焊缝的安全带来不利影响。
- (3) 钢轨在铝热焊焊接过程后会存在塑性应变,焊缝边缘处的塑性应变远大于焊缝中心处,且随着车轮的往复滚动,塑性应变会不断累积。

参考文献:

[1] 江明明,何柏林. 钢轨焊接方法与焊接接头的质量控制研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(13): 7-10, 6.
JIANG Mingming, HE Bolin. Investigation of Rail Welding Method and Quality Control of Welded Joint[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(13): 7-10, 6.

[2] 张琪,李力,宋宏图,等. 无缝线路钢轨焊接技术发展现状及趋势[J]. 热加工工艺, 2017, 46(3): 10-12.
ZHANG Qi, LI Li, SONG Hongtu, et al. Development Status and Trends of Seamless Rail Welding Technologies[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(3): 10-12.

[3] 王磊. 铝热焊焊接常见的缺陷、成因及其质量控制[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2016(12): 163-164.
WANG Lei. Common Defects, Causes and Quality Control of Thermoite Welding[J]. Management & Technology of SME,

- 2016(12): 163–164.
- [4] LIU Yang, TSANG K S, TAN ZHI'EN E, et al. Investigation on Material Characteristics and Fatigue Crack Behavior of Thermoite Welded Rail Joint[J]. Construction and Building Materials, 2021, 276: 122249.
- [5] 杨璐,卫璇,张有振,等. 不锈钢母材及其焊缝金属材料单拉本构关系研究[J]. 工程力学, 2018, 35(5): 125–130, 151.
YANG Lu, WEI Xuan, ZHANG Youzhen, et al. Research on the Tensile Stress-strain Relation of Stainless Steel Base Material and Its Weld Metal Material[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(5): 125–130, 151.
- [6] 张超华,王晓霞,常茂椿,等. 焊缝金属的屈服强度和材料的加工硬化对Q345钢焊接残余应力与变形计算精度的影响[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 160–168.
ZHANG Chaohua, WANG Xiaoxia, CHANG Maochun, et al. Effects of Yield Strength of Weld Metal and Material Strain Hardening on Prediction Accuracy of Welding Residual Stress and Deformation in a Q345 Steel Joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 160–168.
- [7] LIU Yang, TSANG K S, HOH H J, et al. Structural Fatigue Investigation of Transverse Surface Crack Growth in Rail Steels and Thermoite Welds Subjected to In-plane and Out-of-plane Loading[J]. Engineering Structures, 2020, 204: 110076.
- [8] 何波,孙长青,陈威. 铝热焊的温度场及残余应力场有限元分析[J]. 焊接技术, 2010, 39(1): 20–23, 1.
HE Bo, SUN Changqing, CHEN Wei. Finite Element Analysis of Welding Temperature and Residual Stress Field of Thermoite Welding[J]. Welding Technology, 2010, 39(1): 20–23, 1.
- [9] LIU Yang, TSANG K S, SUBRAMANIAM N A, et al. Structural Fatigue Investigation of Thermoite Welded Rail Joints Considering Weld-induced Residual Stress and Stress Relaxation by Cyclic Load[J]. Engineering Structures, 2021, 235: 112033.
- [10] 谢瑜龙,丁昊昊,林强,等. 轮轨滚动接触疲劳损伤机制与预测方法研究[J]. 高速铁路新材料, 2022, 1(1): 20–29.
XIE Yulong, DING Haohao, LIN Qiang, et al. Research Progress of Wheel-rail Rolling Contact Fatigue Damage Mechanism and Prediction Method[J]. Advanced Materials of High Speed Railway, 2022, 1(1): 20–29.
- [11] 周宇,王钰,卢哲超,等. 钢轨滚动接触疲劳裂纹萌生和磨损共存预测方法验证[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 411–420.
ZHOU Yu, WANG Yucheng, LU Zhechao, et al. Verification of Prediction Method for Coexistence of Rolling Contact Fatigue Crack Initiation and Wear Growth in Rail[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(3): 411–420.
- [12] SAKALO V, SAKALO A, TOMASHEVSKIY S, et al. Computer Modelling of Process of Accumulation of Rolling Contact Fatigue Damage in Railway Wheels[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 111: 7–15.
- [13] CHABOCHE J L. A Review of some Plasticity and Viscoplasticity Constitutive Theories[J]. International Journal of Plasticity, 2008, 24(10): 1642–1693.
- [14] 杜全斌,张肇伟. 铝热焊接技术的开发与应用[J]. 农机使用与维修, 2019(9): 24–27.
DU Quanbin, ZHANG Zhaowei. Development and Application of Aluminum Heat Welding[J]. Agricultural Mechanization Using & Maintenance, 2019(9): 24–27.
- [15] 田国鹏,张银龙. 54E1钢轨铝热焊工艺及质量控制[J]. 工程建设与设计, 2019(3): 196–198.
TIAN Guopeng, ZHANG Yinlong. Alumino-thermic Welding Process and Quality Control of 54E1 Rail[J]. Construction & Design for Engineering, 2019(3): 196–198.
- [16] 陈雨,王攀杰,孙耀亮,等. 考虑曲面接触斑的轮轨滚动接触行为分析[J]. 铁道学报, 2021, 43(5): 27–36.
CHEN Yu, WANG Panjie, SUN Yaoliang, et al. Analysis of Wheel-rail Rolling Contact Behavior Considering Curved Contact Patch[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(5): 27–36.
- [17] 王平,周佳仪,王攀杰,等. 三种非赫兹滚动接触模型的对比研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(1): 39–47.
WANG Ping, ZHOU Jiayi, WANG Panjie, et al. Comparative Study of Three Non-Hertzian Rolling Contact Models[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(1): 39–47.
- [18] MEYER K A, SKRYPNYK R, PLETZ M. Efficient 3d Finite Element Modeling of Cyclic Elasto-plastic Rolling Contact[J]. Tribology International, 2021, 161: 107053.
- [19] 姚力,朱胜阳,韦强文,等. 400 km/h高速铁路无砟轨道列车竖向设计荷载动力学研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(2): 73–78.
YAO Li, ZHU Shengyang, WEI Qiangwen, et al. Study on Dynamics of Vertical Design Load for Trains on Ballastless Track of 400 km/h High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 73–78.
- [20] 陈浩. 基于动力学分析的高速铁路钢轨磨损预测方法研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(6): 17–22.
CHEN Hao. Study on Prediction Method of Rail Wear of High-speed Railway Based on Dynamic Analysis[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(6): 17–22.
- [21] 王立飞,刘志明,金新灿. 高速车轮载荷谱的试验研究[J]. 铁道车辆, 2016, 54(2): 4–7, 1.
WANG Lifei, LIU Zhiming, JIN Xincan. Test and Research on Load Spectrum for High Speed Wheels[J]. Rolling Stock, 2016, 54(2): 4–7, 1.
- [22] LI Fukai, HU Weiping, MENG Qingchun, et al. A New Damage-Mechanics-Based Model for Rolling Contact Fatigue Analysis of Cylindrical Roller Bearing[J]. Tribology International, 2018, 120: 105–114.