

带有焊瘤的钢轨接头喷风冷却数值模拟

胡梦伟¹, 胡侠², 吕其兵¹, 项学明², 杨泽仁¹, 袁炜¹

1. 西南交通大学材料科学与工程学院 四川成都 610031

2. 四川省国有资产经营投资管理有限责任公司 四川成都 610000

摘要: 目前, 国内的焊轨基地焊后热处理与粗磨工位布置有两种方式: 一种是热处理在前, 另一种是粗磨在前。接头粗磨前后存在1mm厚度的焊瘤, 可对接头起到保护作用, 防止其在低温环境下喷风冷却过程中因冷却速度过快而产生马氏体等有害组织。为了探究带有焊瘤接头喷风冷却过程, 基于ANSYS平台下的FLUENT模块与瞬态热模块耦合系统, 建立了喷风冷却模型。仿真结果表明: 钢轨表面曲率偏大的区域流速偏大, 钢轨表面曲率偏小的区域流速就偏小; 接头不同位置的冷却速度从慢到快排序为: 轨头心部<轨底三角区<轨腰<轨底脚, 冷却结束后接头最高温度出现在轨头心部, 最低温度出现在轨底脚; 带有焊瘤接头在喷风冷却过程中较打磨干净接头温度要高, 且冷却速度要小。

关键词: 焊瘤; 钢轨接头; 喷风冷却; 数值模拟; 流场; 温度场

Numerical simulation of air-jet cooling of rail joints with welding slag

HU Mengwei¹, HU Xia², LÜ Qibing¹, XIANG Xueming², YANG Zeren¹, YUAN Wei¹

1. Department of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China

2. Sichuan State-owned Assets Operation and Investment Administration Co., Ltd., Chengdu 610000, Sichuan, China

Abstract: At present, there are two ways of post-welding heat treatment and rough grinding position arrangement in the domestic welding rail base: one is heat treatment first, and the other is coarse grinding first. The 1mm thickness welding slag of the joint before and after rough grinding can protect the joint and prevent the harmful tissues such as martensite from being generated due to the excessive cooling rate in the process of blast cooling in low temperature environment. In order to explore the air-jet cooling process of joints with welding slag, this paper establishes a jet cooling model based on the coupling system of the FLUENT module and the transient thermal module under the ANSYS platform. The simulation results show that the flow velocity in the region with larger rail surface curvature is larger, and the flow velocity in the region with smaller rail surface curvature is smaller. The cooling speed at different positions of the joint is sorted from slow to fast as follows: the center of the rail head<the triangle of the rail bottom<the waist of the rail bottom<the foot of the rail bottom. After the end of cooling, the highest temperature of the joint appears in the center of the rail head, and the lowest temperature appears in the foot of the rail. Joints with welding slag have a higher temperature than those of polished joints during the cooling process of air spray, and the cooling speed is smaller.

Keywords: welding slag; rail joint; air-jet cooling; numerical simulation; flow field; temperature field

第一作者: 胡梦伟, 研究生, 主要从事钢轨闪光焊接及焊后热处理工艺研究, E-mail: 1807381292@qq.com。

通信作者: 项学明, 高级经济师, 博士, 主要从事投资和科技创新管理, E-mail: 156848968@qq.com。

1 序言

钢轨在进行闪光对焊之后,晶粒会变得粗大,接头的性能会下降,因此需要焊后热处理。我国钢轨焊接标准TB/T 1632.2—2014《钢轨焊接 第2部分:闪光焊接》规定,国内的钢轨在经过闪光焊之后必须进行焊后热处理,以满足性能要求。若钢轨焊接接头未经过焊后热处理,则会因存在极大的应力而难以满足强度要求。通过大量研究发现,提高接头强度最有效的方式就是焊后热处理^[1, 2]。常见的焊后热处理分为感应加热与喷风冷却两部分,其中喷风冷却会通过冷却速度影响钢轨接头组织与性能,因此在焊后热处理中占据重要地位。

目前,国内外部分学者对钢轨焊后喷风冷却的研究主要采用试验的方式。邓佳荣等^[3]通过研究U75V钢轨喷风冷却工艺,得出钢轨接头在喷风冷却至500℃以下,会发生自回火,导致接头性能变差,而喷风冷却至400℃以下就不会发生自回火。KANG等^[4]将U75V重轨试样加热到900℃,在保温后进行50~90s的强制冷却,探究了焊后热处理后U75V重型钢轨硬化层与冷却时间的关系。JI^[5]研究了U71Mn等温转变曲线与连续冷却曲线,试验结果表明,将冷却速度控制在2~8℃/s,有利于形成高强度且耐磨的珠光体。吴家豪^[6]通过仿真软件FLUENT对钢轨喷风冷却过程进行数值模拟,得到了接头在冷却过程中流场与温度场,并阐述了冷却速度与接头组织之间的关系。

目前,工厂焊接焊瘤粗磨工位与焊后热处理工位顺序两种方式都有,对于现场焊也是如此。现场焊后热处理容易受到环境的影响,而焊瘤可以对接头起到保护作用。当环境温度过低时,会导致接头在热处理冷却过程中因冷却速度过快而生成马氏体组织,故选择热处理在前、打磨在后的工位布置方式。目前,学者们的研究对象均为打磨干净的焊接接头,针对带有焊瘤的接头相关研究仍处于空白阶段。为此,本文采用数值模拟的方式对带有1mm厚度焊瘤的钢轨接头焊后喷风冷却过程进行相关研究。

2 模型介绍

2.1 模型的建立

在钢轨喷风冷却过程中,涉及空气与钢轨表

面的热量交换,这种热量交换实际上是通过对流换热的方式进行的。对流换热系数是1701年由牛顿提出,故也称“牛顿冷却定律”,计算公式为

$$q = h(t_w - t_\infty) \quad (1)$$

式中 q ——热流密度 (W/m^2);

h ——对流换热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$];

t_w ——固体表面的温度 (K);

t_∞ ——来流温度 (K)。

钢轨接头内部的热量传递是通过热传导的方式进行的,这种传热方式属于三维非定态热传导,可通过热扩散方程 (Heat Equation) 来求解,即

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中 x, y, z ——空间直角坐标系方向;

T ——温度 (K);

q ——内热源强度 (W/m^3);

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

ρ ——密度 (kg/m^3);

c_p ——比热容 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]。

此外,在喷风冷却过程中,钢轨自身的一部分热量还会通过热辐射的方式向外传递,这是由于钢轨接头在正火结束后处于高温状态,通过电磁波辐射的方式向附近的低温空气传递热量。实际物体辐射热流量的计算公式可以用斯忒藩-玻尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 定律的经验修正形式,即

$$\varphi = \varepsilon \sigma A (T^4 - T_0^4) \quad (3)$$

式中 φ ——热流量 (W);

ε ——发射率;

A ——辐射体表面积 (m^2);

σ ——斯忒藩-玻尔兹曼常数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$], 约为 5.57×10^{-8} ;

T ——辐射体温度 (K);

T_0 ——环境温度 (K)。

本次仿真计算采用的是ANSYS中的FLUENT与瞬态热模块耦合计算,计算模块结构如图1所示。为了使用相变焓设置而引用了瞬态热模块,故直接将FLUENT中的对流换热系数引入到瞬态热模块中钢轨各个表面而代替喷风过程,这样的数据传递会对仿真计算造成一定的误差,但设计思路合理且可以参考文献[7]。



图1 计算模块结构

本次仿真计算的试验材料为60kg/m的U75V重型钢轨。带有焊瘤的钢轨接头如图2所示。喷风模型采用由成都艾格科技公司生产的喷风装置进行建模，仿真采用全断面等压强的方式对钢轨接头进行喷风，喷风盒模型如图3所示。

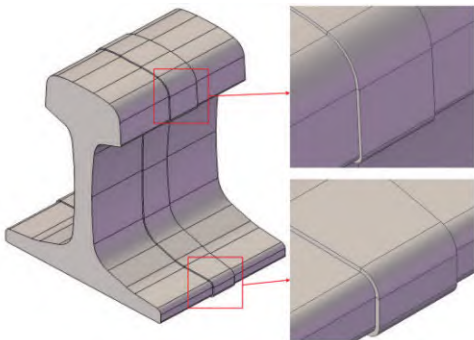


图2 带有焊瘤的钢轨接头

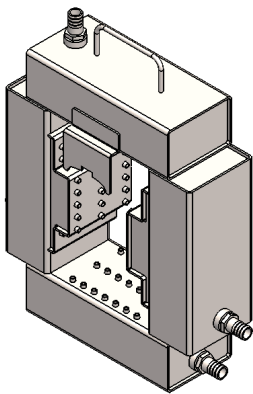


图3 喷风盒模型

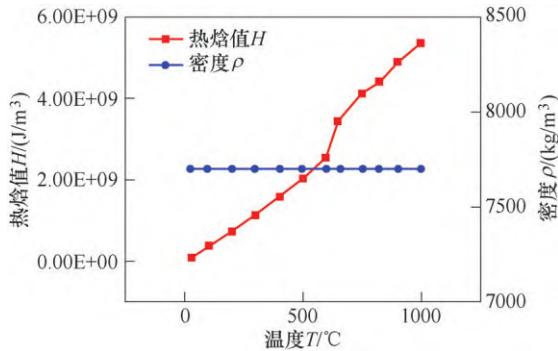
2.2 材料参数的选取

本文研究的材料是轨型为60kg/m的U75V钢轨，其化学成分见表1。在喷风冷却过程的仿真计算中，U75V钢轨的热物性参数均会随温度而发生改变。本次仿真主要采用U75V钢轨的热物性参数为密度 ρ 、导热系数 λ 、比热容 c_p 和热焐值 H ，根据相关文献^[7-9]得到各参数随温度变化曲线如图4所示。由于U75V钢轨在冷却过程发生相变的温度区间为800~500℃之间^[10]，因此本次仿真的研究的主要温度区间也设置为800~500℃之间。在该温度区间内，U75V

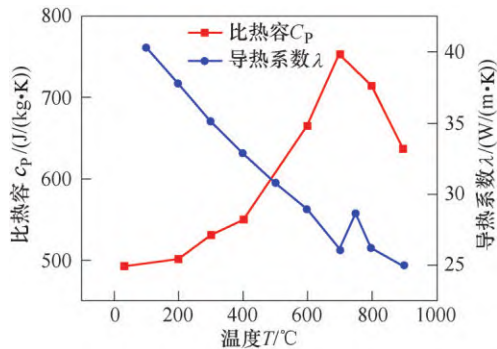
钢轨的密度几乎不随温度变化，因此将材料密度规定为7700kg/m³这一恒定值。

表1 U75V热轧钢的化学成分（质量分数）（%）

Si	C	Mn	P	S	V	Al	Fe
0.50 ~ 0.80	0.71 ~ 1.05	0.75 ~ 1.05	≤ 0.03	≤ 0.025	0.03 ~ 0.07	≤ 0.004	余量



a) 热焐值 H 与密度 ρ



b) 比热容 c_p 与导热系数 λ

图4 U75V钢轨的热物性参数

2.3 初始条件与边界条件的设定

喷风过程是对接头进行全断面等压强喷风，设置入风口压强为0.18MPa，喷风时间为180s，初始环境温度为25℃，风温同环境温度为25℃，具体工艺参数见表2。仿真步长为1s，仿真步数为180步，仿真总时长为180s。

表2 喷风工艺参数

喷风位置	喷风压强/MPa	喷风时间/s	环境温度/℃	风温/℃
全断面	0.18	180	25	25

由于感应加热结束之后，钢轨接头的温度实际上是不均匀分布的，因此钢轨接头断面在正火过程中存在温差，且在正火结束时轨底温度最高。轨头、轨腰、轨底三角区的中心常用来作为温度特征点而进行相关研究^[11-13]。为了简化模型计算，采用

点温度代替区域温度，将钢轨划分为4个部分，分别为轨头、轨腰、轨底三角区和左右轨底脚，对其设置不同的温度，由下文热电偶测温试验测得的双频感应正火结束的最终温度作为各区域的初始温度，钢轨接头初始温度场云图如图5所示。虽然这样会与实际的双频感应正火的最终温度场存在一定出入，但从后续的温度曲线验证与金相组织验证来看，该初始温度场的简化较为贴合实际且具有一定的合理性。

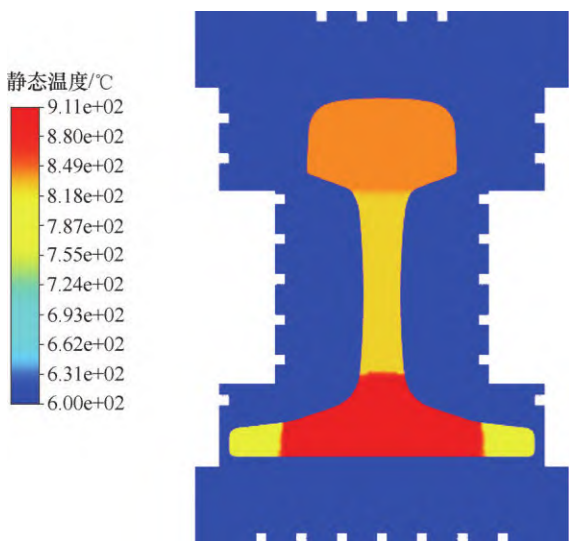


图5 钢轨接头初始温度场云图

3 带有焊瘤接头的喷风过程结果分析

3.1 喷风过程流场的结果分析

钢轨在喷风冷却过程中，其表面及附近的空气中空气分子的运动是具有一定规律性的，为了探究空气分子的运动规律、了解其如何与钢轨表面进行交互，故对钢轨喷风冷却过程的流场进行仿真计算。在仿真计算完毕之后，对钢轨周围的空气域取纵截面，得到钢轨不同截面速度矢量云图如图6所示。取钢轨表面，得到表面的速度矢量云图如图7所示。对喷风盒各入风口取空气运动迹线，如图8所示。

由图6a可知，该模型的喷风冷却过程采用全断面喷风，且各个喷风口的流速均相同，越靠近喷风口，流速越大，最大流速为184m/s。由图6b可知，空气分子在冲击到钢轨表面时会产生明显的回旋，并形成涡流，对后续空气分子的定向冲击产生一定的影响。在轨腰的焊瘤处可以明显发现存在小型的涡流场，这是受焊瘤凸起作用的影响而产生的。大

型旋涡与小型旋涡叠加在一起，影响后续空气分子的运动。由图6c可知，虽然钢轨喷风冷却模型是对称的，但由于空气分子的不规则运动，导致钢轨两侧的流场分布不同，无法做到完全对称。由图6d可知，喷风口距离钢轨表面距离越远，空气束末端就越发散，冷却就越均匀。这是由于喷风口对空气分子施加的压力是一定的，随着空气分子运动距离加大，施加的定向压力就变得越小，速度也就会变小，因此空气分子易受到来自不同方向上其他空气分子的撞击，获得动能，从而产生其他方向上的速度矢量，就会偏离原定向运动，导致空气束末端变得发散。

由图7可知，钢轨表面不同区域流速存在差异，这种差异与钢轨表面曲率有关。由速度矢量云图颜色可知，区域1、区域2和区域4处的流速偏大，平均流速分别为65.2m/s、65.4m/s和57.6m/s。区域3的流速偏小，平均流速仅为12.4m/s。可以明显发现，钢轨表面曲率偏大的区域，流速就偏大；钢轨表面曲率偏小的区域，流速就偏小。这是因为钢轨表面曲率偏大的区域，其形状的变化程度就偏大，空气分子在经过该区域时所受到的表面黏滞作用就会减弱，故流速衰减就相对缓慢。

由图8可知，空气分子的运动轨迹较单一，均从喷风口笔直地向钢轨表面运动，在撞击到表面之后会向四周无规律地散开，并填满整个空气域。

3.2 喷风过程温度场的结果分析

喷风冷却过程的温度场分布与冷却速度会直接影响到钢轨接头的最终组织成分与性能。其中，接头温度场均匀性越好，其组织分布就越均匀，性能分布就越合理^[14]。而喷风冷却过程的冷却速度是直接决定接头晶粒大小的重要参考指标，故研究钢轨喷风冷却过程的温度场具有重要意义。模拟设置的喷风时间为180s，实际将钢轨接头最高温度冷却至500℃以下就可以停止喷风了，因此实际的模拟时间为177s，不同时刻钢轨接头纵截面、横截面温度场云图分别如图9、图10所示。

由图9a可知，在喷风冷却过程中，热量从轨头心部和轨底三角区呈仿形依次向外传递，形成数圈等温线，且分布不均匀。轨头心部与轨底三角区温度分布呈现三角形形貌，有对称趋势并向轨腰处收缩。接头温度偏高区出现在轨头与轨底三角区，且

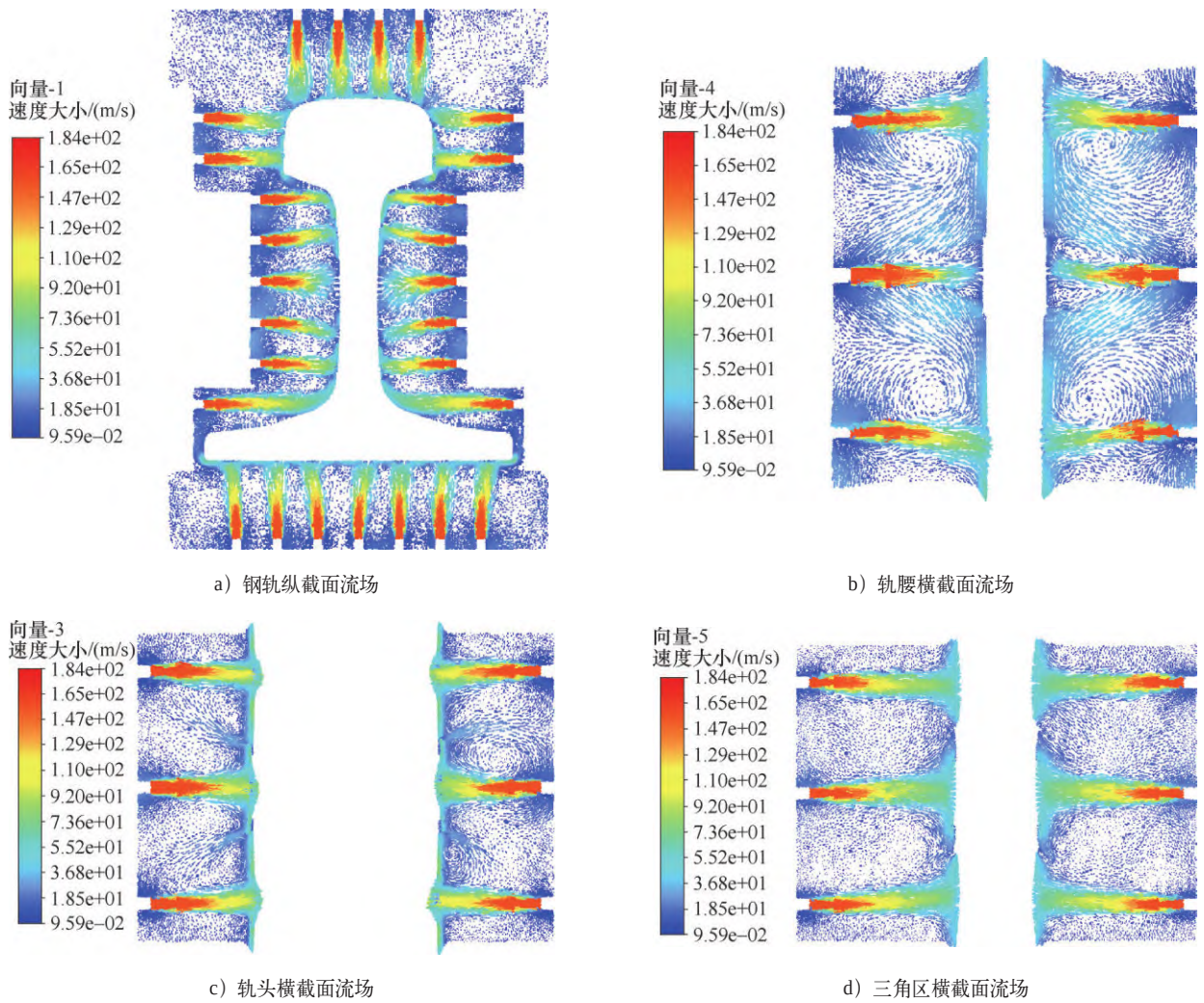


图6 钢轨不同截面流场速度矢量云图

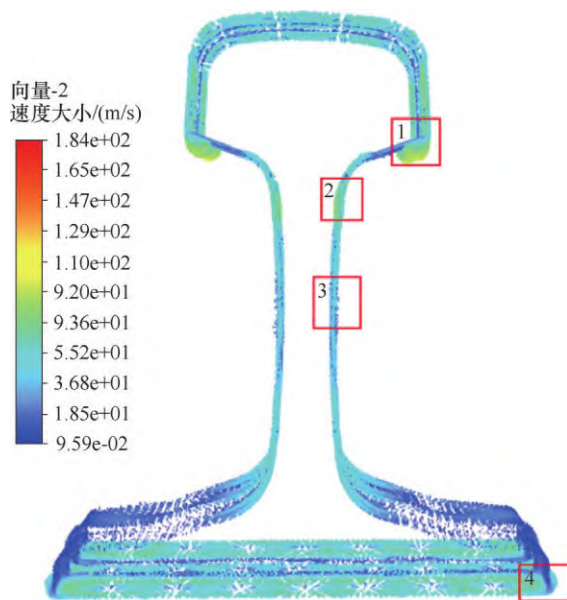


图7 钢轨表面速度矢量云图

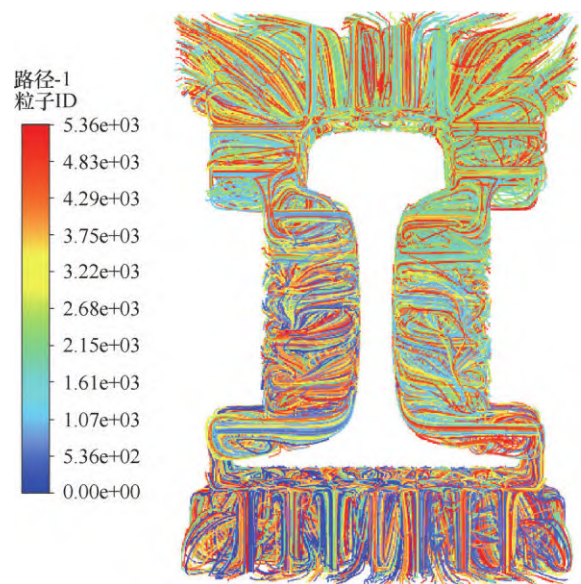
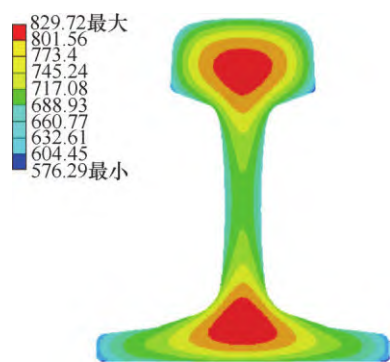
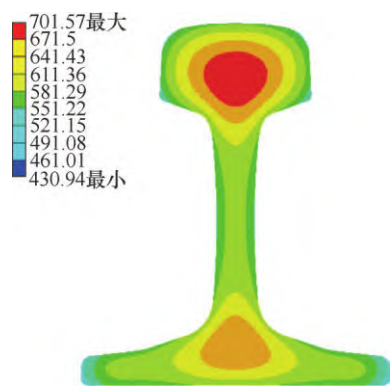


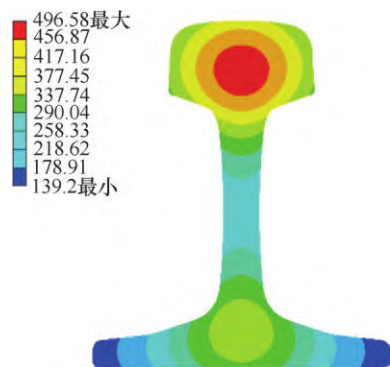
图8 入风口空气运动迹线示意



a) $t = 15s$



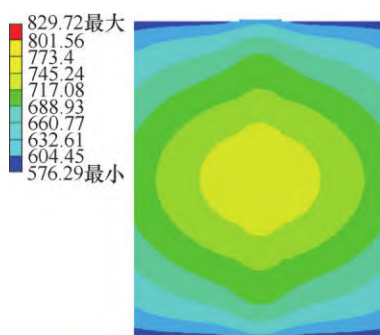
b) $t = 50s$



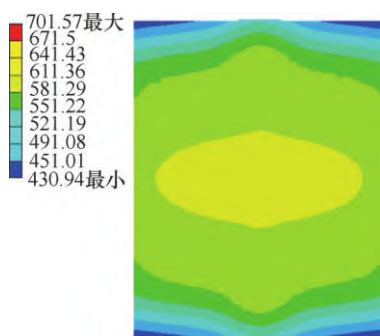
c) $t = 177s$

图9 不同时刻钢轨接头纵截面温度场云图

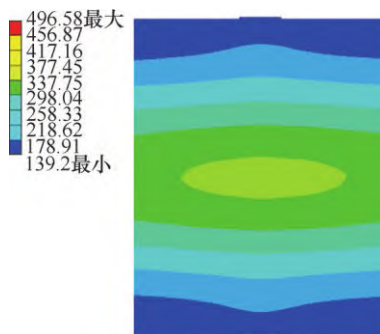
两者的温度相近；温度偏低区域出现在区域1和区域4，这与图7的流场可以形成很好的照应。由于区域1和区域4流速偏大，因此其冷却速度就偏快。空气与钢轨表面的热量传递实际上是对流换热的方式进行的，而对流换热系数又决定着空气与钢轨表面的换热能力。对流换热系数与流体的流速大小密切相关，流体的流速越快，单位时间、单位面积上冲击的空气分子也就越多，热量交换次数就越多，故对流换热系数越大，冷却速度越快^[15]。由图9b可知，接头处最高温度出现在轨头心部，最大值为



a) $t = 15s$



b) $t = 50s$



c) $t = 177s$

图10 不同时刻钢轨接头横截面温度场云图

701.57℃，温度已经高于轨底三角区。最低温度出现在轨底脚，最小值为430.94℃。50s温度场与15s温度场比较可以发现，轨头中心与轨底三角区温度分布依旧呈现三角形形貌，但等温线的圈数明显减少，温度分布更加均匀。由图9c可知，此时接头的最高温度出现在轨头心部，最大值为496.58℃，已经低于预设的最高温度500℃，故停止喷风。最低温度出现在轨底脚，最小值为139.2℃。温度从高到底排序为：轨头心部>轨底三角区>轨腰>轨底脚。这是由于轨头心部与轨底三角区的几何结构比较厚实，热量难以向外传递，故积热现象较为明显。反观较薄的轨腰与轨底脚，热量就容易向外传递，温度就相对较低。

由图10可知,接头在喷风冷却过程中,热量从心部不断向外传递,越靠近外部温度越低,最低温度依旧出现在轨底脚。等温线呈椭圆形,且在焊瘤位置处有小凸起。随着时间推移到50s,热量继续向外扩散,中心高温区域面积变大。等温线的形状发生变化,变得更扁平,外围焊瘤处等温线凸起更加严重。当 $t=177s$ 时,中间高温区域面积缩小,热量传递趋势减弱。等温线的形状继续发生变化,外围等温线几乎已经平行,温度分布变得更加稳定。同时轨底脚温度变得更低,且低温区域扩大。随着喷风冷却的进行,热量会从接头心部不断地向表面扩散,主要是通过热传导的方式进行。

对钢轨接头重要位置进行取点,取点位置如图11所示。设置测量监控,对各点位温度进行采集,重点点位温度曲线如图12所示。

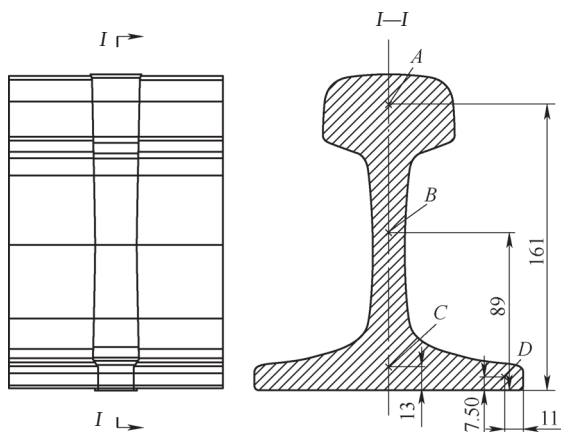


图11 接头重点点位取点位置示意

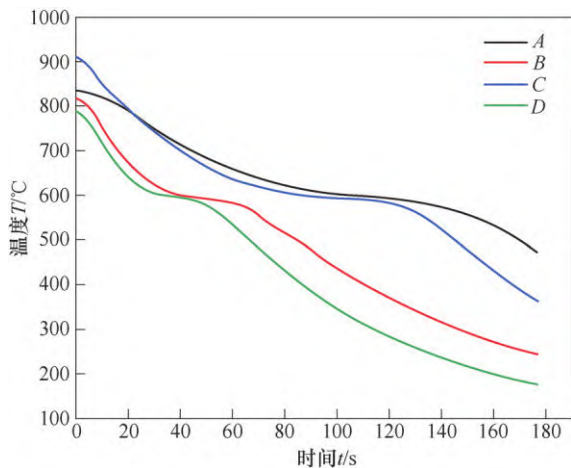


图12 接头重点点位温度曲线

李波等^[16]测得了U75V钢轨的动态连续冷却组织转变图(CCT曲线)。结果表明,U75V钢冷却速度

为 $2\sim 3^{\circ}\text{C/s}$ 时组织最佳,且不要超过 5°C/s ,否则就会生成马氏体。由图12可知,通过计算得到A点、B点、C点的 $t_{8/5}$ 分别为152s、80s、126s,冷却速度分别为 $V_A=1.96^{\circ}\text{C/s}$, $V_B=3.76^{\circ}\text{C/s}$, $V_C=2.37^{\circ}\text{C/s}$ 。由于轨底脚D点的初始温度未到 800°C ,无法计算 $t_{8/5}$,因此选择从最高温度到 500°C 这一温度区间,所用时间为67s, $V_D=4.35^{\circ}\text{C/s}$ 。各点位的冷却速度均 $< 5^{\circ}\text{C/s}$,均不会生成马氏体,说明模拟计算的喷风压强较为合适,接头组织符合实际要求。各点位冷却速度从慢到快排序为: $V_A < V_C < V_B < V_D$,轨头心部A点冷却速度最慢,其次轨底三角区C点,接着是轨腰中心B点,冷却速度最快的是轨底脚D点。所有点位的冷却趋势均为先快速下降、然后出现缓降平台,最后再快速下降。出现温度缓降平台是由于钢轨接头在正火结束后组织完全奥氏体化,其在冷却过程中会发生由奥氏体向珠光体的组织转变,这一转变过程会释放相变潜热,导致钢轨不同区域冷却速度变慢,故形成缓降温度平台^[17]。在喷风冷却开始前,轨底三角区C点的温度要高于轨头心部A点,但冷却结束后C点的温度反而要低于A点,这说明轨头心部的散热确实要弱于轨底三角区。轨底脚的冷却速度要大于轨腰处,其散热能力在钢轨接头处是最强的,故在实际喷风冷却过程中要注意避免轨底脚因冷却速度过快而产生马氏体组织。

4 带有焊瘤接头与打磨干净接头温度场对比分析

对打磨干净接头进行喷风冷却模拟,仅对模型进行更改,如图13所示,其余设置条件均与带有焊瘤接头喷风冷却过程保持一致,得到其温度场云图与重点点位的温度曲线。带有焊瘤接头(下文简称接头a)与打磨干净接头(下文简称接头b)的最终时刻温度场云图对比如图14所示,温度曲线对比如图15所示。

由图14可知,两者最终时刻温度场云图大致相同,但局部存在差异。接头b在相同冷却条件下,最终时刻的最高温度为 491.65°C ,最低温度为 137.98°C ,均低于接头a;接头b的轨头心部高温等温线所围面积要小于接头a,轨底三角区高温等温线所围面积也小于接头a;接头b的轨底脚低温区域面积要大于接头a;接头b在轨腰处两侧出现了向内部收缩的低温区,而接头a则没有;由于焊瘤存在的原

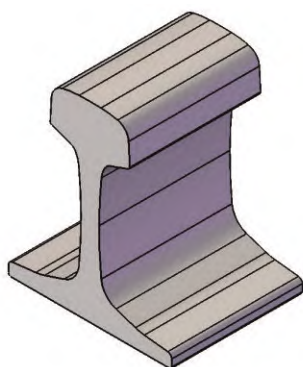


图13 打磨干净钢轨接头三维视图

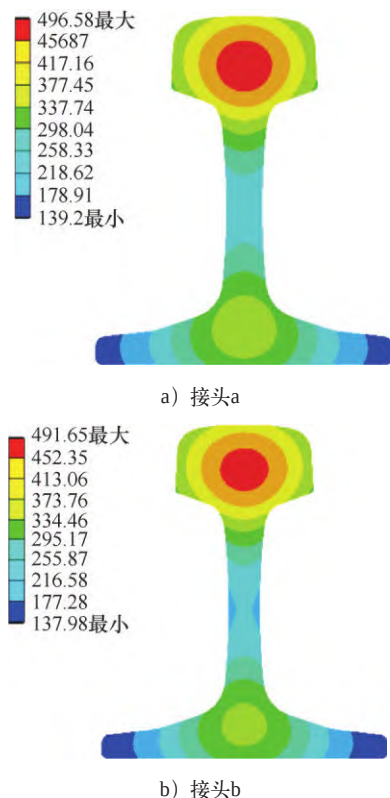


图14 最终时刻温度场云图

因，接头a的温度场区域要更宽。

由图15可知，接头b在冷却过程中的温度曲线下降趋势与接头a保持一致，均是先快速下降，然后出现温度缓降平台，最后再快速下降。接头b的所有点位的温度曲线均在接头a下方，且温差随时间不断发生变化。A与A₁点在冷却前125s温度几乎保持一致，在125s至177s温差随时间逐渐增大，最大温差为8.24℃，出现在172s；B与B₁点在冷却前40s温差随时间逐渐增大，在40~45s温差由于相变潜热作用而缩紧，在45s至177s温差随时间先增大后减小，最大温差为38.2℃，出现在84s；C与C₁点在冷却前110s温度几乎保持一致，在110~177s温差随时

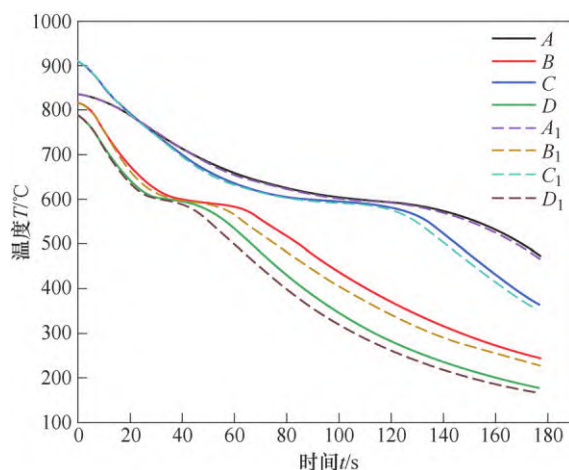


图15 两者重要点位的温度曲线（实线为接头a，虚线为接头b）

间逐渐增大，最大温差为21.55℃，出现在145s；D与D₁点在冷却前40s温度几乎保持一致，在40~177s温差随时间先增大后减小，最大温差为37.04℃，出现在65s。通过计算A₁点、B₁点、C₁点的 $t_{8/5}$ 分别为150s、71s、122s，冷却速度分别为 $V_{A_1}=2.0^{\circ}\text{C/s}$ ， $V_{B_1}=4.24^{\circ}\text{C/s}$ ， $V_{C_1}=2.45^{\circ}\text{C/s}$ 。D₁点从最高温冷却到500℃所用时间为59s， $V_{D_1}=4.85^{\circ}\text{C/s}$ 。在相同的条件下，接头a比接头b各点冷却速度依次衰减了2%、11.3%、3.3%、10.3%，发现轨腰处冷却速度衰减最多，轨头心部冷却速度衰减最少。接头b各点的冷却速度均在5℃/s以内，满足组织要求。

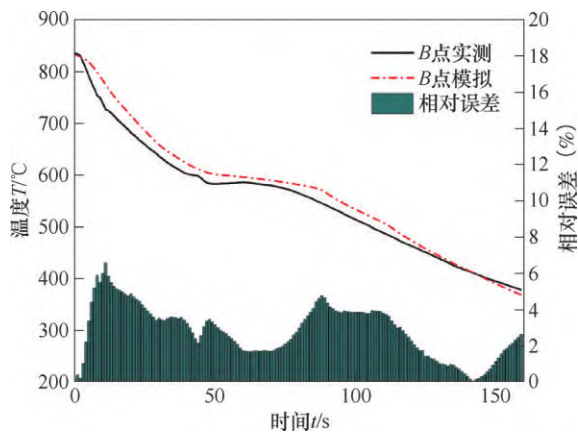
由上述结果可知，在相同的初始温度场与喷风条件下，接头a各点冷却速度要小于接头b，在轨腰处冷却速度衰减最大，衰减值为11.3%。接头a各点温度要高于接头b，最大温差为38.2℃，出现在84s时的轨腰处。这是由于接头a存在的1mm异形焊瘤使接头的表面形状凹凸不平，导致空气分子在焊瘤侧边运动受阻，故传热受阻。从热传导的角度来说，1mm焊瘤覆盖在接头表面，会出现焊瘤区域积热效应，也会影响热量对外传递，从而起到延缓冷却速度、保护接头组织等作用。

5 试验部分

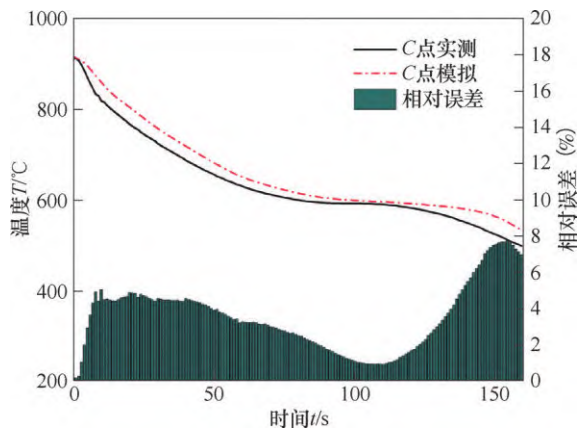
5.1 温度场试验验证

温度场试验验证采用K型热电偶进行全程测温试验。选取一根焊态且带有焊瘤的钢轨，对接头指定位置（见图11）进行钻孔，孔径为4mm，然后将K型热电偶埋入其中。本试验采用成都艾格科技公司研发的ZH120双频感应正火机进行感应加热，采

用喷风盒连接大型储气罐与空压机进行喷风冷却，使用BCL2016P型温度记录仪进行记录喷风冷却过程中的温度曲线，采集间隔为1s。设置管道喷风压强为0.12MPa，将接头最高温度降至500℃以下即可停止喷风，重点部位温度曲线对比如图16所示。



a) B点温度曲线验证



b) C点温度曲线验证

图16 重点部位温度曲线对比

从图16可看出，仿真模型降温曲线与实际降温曲线趋势基本一致。对仿真数据与试验数据进行计算，得到轨腰处B点的最大相对误差为6.59%，平均

相对误差为2.8%；轨底三角区C点的最大相对误差为7.78%，平均相对误差为3.53%。

造成上述误差的原因可能有以下几种。

1) 初始温度场在仿真中进行了简化，与实际双频感应正火结束后的温度场存在差异。

2) 由于储气罐与空压机规格的限制，无法一直维持风压的稳定，导致风压有随时间缓降的趋势。

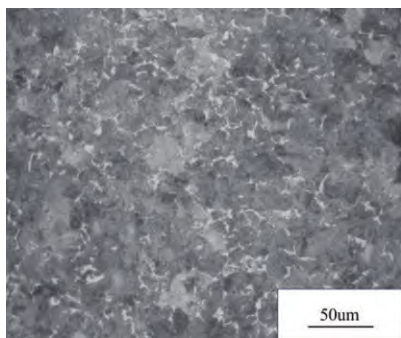
3) 热电偶测温本身存在一定的误差。

综上所述，本文建立的模型依旧可以对不同喷风工艺参数下对接头进行流场与温度场的预测，对实际喷风冷却过程提供理论依据与工艺优化参考。

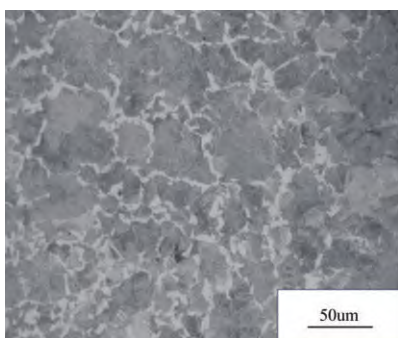
5.2 接头金相组织观察

参考TB/T 1632.2—2014《钢轨焊接 第2部分：闪光焊接》，对上述喷风冷却结束后的带有焊瘤接头进行金相观察，取样位置为轨头心部、轨底三角区与轨底脚。标准要求焊缝的显微组织主要为珠光体，可出现少量铁素体，不得出现马氏体和贝氏体等有害组织，并且要求轨头与轨底脚边缘焊缝晶粒度 ≥ 8 级，轨底三角区的焊缝晶粒度 ≥ 6 级。将试样经过粗磨、精磨、抛光，采用4%的硝酸酒精溶液对其腐蚀处理，最后在500倍金相显微镜下观察，结果如图17所示。

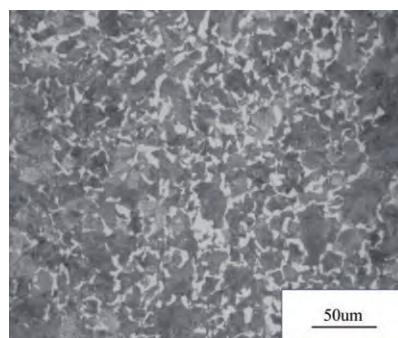
由图17可知，钢轨接头在经过喷风冷却后的焊缝组织主要为珠光体和沿晶界析出的先共析铁素体，并未发现马氏体和贝氏体等有害组织。其中轨底三角区晶粒最为粗大，轨头心部与轨底脚的晶粒较细，且轨底脚沿晶界析出的先共析铁素体最多。经测量，轨头与轨脚晶粒度 ≥ 8 级，轨底晶粒度 ≥ 6 级，符合标准要求。这与上述基于温度场对带有焊瘤接头组织场的预测基本符合，也说明该喷风工艺的冷却速度合理，满足组织标准要求。



a) 轨头心部



b) 轨底三角区



c) 轨底脚

图17 焊缝各位置金相组织

6 结束语

本文建立了带有焊瘤接头喷风冷却三维数值模型, 分析了其冷却过程的流场与温度场的特征, 并结合温度曲线对接头组织进行预测。同时, 对比分析了带有焊瘤与打磨干净接头之间温度场的区别, 得出以下结论。

1) 在喷风流场中, 钢轨表面曲率偏大的区域, 流速就偏大; 钢轨表面曲率偏小的区域, 流速就偏小。

2) 带有焊瘤接头不同位置的冷却速度从慢到快排序为: 轨头心部<轨底三角区<轨腰<轨底脚; 冷却结束后接头最高温度出现在轨头心部, 最低温度出现在轨底脚, 故在实际喷风冷却过程中要注意避免轨底脚冷却速度过快而产生马氏体等有害组织。

3) 带有焊瘤接头在喷风冷却过程中较打磨干净接头温度要高, 最大温差为 38.2°C , 出现在84s的轨腰处; 带有焊瘤接头冷却速度要小于打磨干净接头, 且在轨腰处冷却速度衰减最大, 衰减值为11.3%。未来会针对两者接头的性能进行相关研究, 并与冷却速度结合。

4) 对喷风冷却模型温度场进行了试验验证, 并对带有焊瘤接头焊缝组织进行观察, 发现与上述基于温度场对带有焊瘤接头组织场的预测基本符合, 说明该喷风模型合理且具有实际参考意义。

参考文献:

[1] DING H, DAI J W, DAI T, et al. Effect of preheating/post-isothermal treatment temperature on microstructures and properties of cladding on U75V rail prepared by plasma cladding method[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 399: 126122-126128.

[2] LU C F, CAI C X. Overview on safety management and maintenance of high-speed railway in China[J]. Transportation Geotechnics, 2020, 25: 100397-100407.

[3] 邓佳荣, 李晓雅, 王晓, 等. 喷风冷却工艺对U75V钢轨闪光焊接头硬度及残余应力的影响[J]. 热加工工艺, 2023; 1-6[2024-06-09]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20222432>.

[4] KANG H, ZHAO X M, WU D. Effect of cooling

time on hardened layer of U75V 60kg/m heavy rail after heat treatment[J]. Journal of Central South University, 2012, 43 (11): 4242-4247.

- [5] JI F F. Effect of cooling process on microstructure and properties of 75kg/m heavy rail[J]. Research On Iron and Steel, 2003 (4): 30-33, 62.
- [6] 吴家豪. 基于Fluent的U75V正火冷却过程的数值模拟研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [7] 张文雄. U75V重轨风冷淬火弯曲变形和残余应力的研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2021.
- [8] 张笑天. U75V钢轨闪光焊接工艺的数值模拟研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [9] 陈林, 王慧军, 陈昆宇, 等. 基于有限元法计算重轨钢淬火过程的换热系数[J]. 特殊钢, 2016, 37 (4): 13-17.
- [10] 杜志光. U75钒钢轨固定式闪光焊接接头组织及性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [11] 温飞娟, 袁炜, 吕其兵, 等. 工艺参数对钢轨感应加热影响的数值模拟研究[J]. 热加工工艺, 2023; 1-7[2024-06-09]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20212454>.
- [12] 毛华杰, 王志, 张保军. 钢轨全断面在线感应加热温度场数值模拟[J]. 热加工工艺, 2012, 41 (24): 224-226.
- [13] 董晓蕊. 开合式电磁感应加热钢轨温度场仿真及试验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- [14] 屈岳波, 和平安, 蔡志鹏, 等. 钢轨火焰热处理温度场数值模拟[J]. 计算机辅助工程, 2010, 19 (3): 31-34, 43.
- [15] CONTI R, GALLITTO A A, FIORDILINO E. Measurement of the convective heat-transfer coefficient[J]. Physics Teacher, 2014, 52 (2): 309-313.
- [16] 李波, 朱国明, 陶功明, 等. 高铁用U75V钢轨钢动态CCT曲线[J]. 钢铁研究学报, 2014, 26 (11): 20-24.
- [17] SCOGGIN J, KHAN R S, SILVA H, et al. Modeling and impacts of the latent heat of phase change and specific heat for phase change materials[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112 (19): 193502.

MW 20240815