

基于 ANSYS Workbench 的百米 U75V 重轨热-结构耦合分析

郭喜平 崔立刚 张波

(内蒙古科技大学机械工程学院, 包头 014010)

摘要 基于传热学理论、摩擦分析理论、以及热弹塑性分析理论等,采用 SolidWorks 三维建模软件建立 60 kg/m重轨模型。采用 ANSYS Workbench 对重轨终轧后冷却过程进行热结构耦合有限元分析,揭示了温度场,应力场以及应变场分布情况及变化规律。结果表明,重轨总体温度分布轨头温度最高,轨腰温度次之,轨底温度最低;重轨出现弯向轨底-弯向轨头-弯向轨底-弯向轨头的变化过程,直到终冷重轨依旧保持着弯向轨头趋势;从整体看,重轨两端应力小于中段应力,轨底应力大于轨头应力,轨腰应力最小。

关键词 热结构耦合 瞬态温度场 有限元方法 应力场 应变场

Based on ANSYS Workbench Hundred Meters U75V Rail Thermal Structure Coupling Analysis

Guo Xiping, Cui Ligang and Zhang Bo

(Department of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010)

Abstract Based on heat transfer theory, friction analysis theory, and thermal elastoplastic analysis theory, SolidWorks 3D modeling software was used to establish a 60 kg/m heavy rail model. Thermal structural coupling finite element analysis of cooling process after heavy rolling with ANSYS Workbench, reveals the distribution and variation of temperature field, stress field and strain field. The results show that the overall temperature distribution of the heavy rail is the highest in the rail head temperature, followed by the waist temperature, and the lowest temperature at the rail bottom. The cooling process of the heavy rail experience the bent rail base-bent rail head-bent rail base-bent rail head. until the final-cooling heavy rail still maintained the trend of turning to the rail head; overall, stress at both ends of the heavy rail is less than that at the middle section, the rail bottom stress is greater than the rail head stress, and the rail waist stress is the minimum.

Material Index Thermal Structure Coupling, Transient Temperature Field, Finite Element Method, Stress Field, Strain Field

目前随着 Computer Aided Engineering 技术的不断成熟,国内外学者对其进行了大量的模拟分析^[1-3]。本次模拟以 U75V、60 kg/m的重轨为研究对象,应用 SolidWorks 三维软件建立模型,并导入 ANSYS Workbench 有限元软件中进行瞬态热分析,将热分析中得到的温度场作为热-结构耦合分析的初始载荷,从而计算终冷后热变形及残余应力,得出相关结论。

1 热分析边界条件的确定

1.1 模型的建立

根据弹性力学基础理论^[4],考虑现场实际情况,选取型号为 U75V、60 kg/m的重轨进行模拟分析,为了减少计算时间且考虑电脑性能的综合影响,选取重轨长度为2 000 mm,采用 SolidWorks 三维建模软件建立模型,采用六面体网格进行网格划分,最终重轨有限元模型的节点数为 28344,单元数为 5260。划分网格后的有限元模型见图 1。

1.2 材料参数

本研究选取重轨的材料为 U75V,密度为7 850 kg/m³^[5]。这种材料具有较高的强度,在定义重轨材料时需要输入弹性模量、泊松比、屈服极限等参数^[6-7],如表 1~表 3 所示。

2 热力学分析

2.1 初始条件

本次模拟选取的重轨模型为平直重轨,无弯曲度。重轨在冷床上的冷却状态为空冷,传热边界

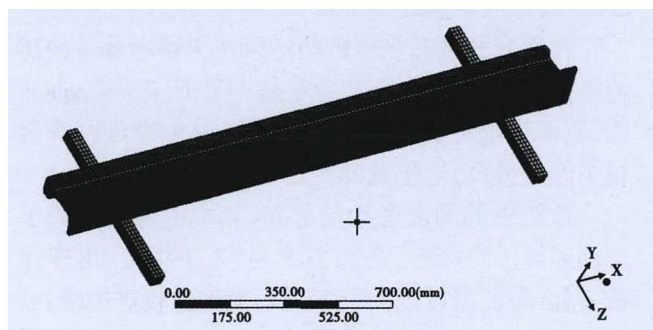


图 1 重轨有限元模型

Fig. 1 Finite element model of heavy rail

表 1 弹性模量与泊松比, U75V 钢

Table 1 Modulus of elasticity and Poisson's ratio, steel U75V

温度/℃	弹性模量/GPa	泊松比
30	209	0.30
200	199	0.26
350	189	0.23
600	168	0.13
850	133	0.12
950	103	0.12

表 2 导热系数与比热容, U75V 钢

Table 2 Thermal conductivity and specific heat capacity, steel U75V

温度/℃	导热系数/ [W · (m · °C) ⁻¹]	比热容/ [J · (kg · °C) ⁻¹]
20	41.59	473
100	39.71	482
200	37.48	498
300	34.95	513
400	32.32	529
500	30.00	599
600	28.96	635
650	28.08	756
720	34.81	1 080
750	23.38	577
850	25.68	624
950	26.92	720

表 3 线膨胀系数, U75V 钢

Table 3 Linear expansion coefficient, steel U75V

温度/℃	线膨胀系数/10 ⁻⁶
27	11.0
227	11.5
327	13.1
527	13.9
627	14.3
877	15.2

条件主要涉及对流和辐射的计算,见参考文献[8-9]。

假设冷床温度与室温相同,为 37℃,考虑到重轨纵向与径向的温差,根据实测数据,拟合随位置变化的函数^[10]。由于初始温度不均匀,故先做稳态热分析。将上述边界条件约束到有限元模型上,得到重轨的温度场分布如图 2 所示。

2.2 终冷时刻温度场分析

将得到的稳态热分析的结果作为瞬态分析的初始条件模拟计算。图 3 为重轨与冷床正向分布云图,图 4 为重轨轨底分布云图。从图 4 中可以看出轨头温度最高,轨腰温度次之,轨底温度最低。

重轨中部的温度均匀分布,其端面温度较低于中部温度。终冷时,最高温度为 58.399℃,出现在轨头处,最低温度为 53.615℃,出现在轨底边缘。

2.3 实测温度与模拟温度对比

本文选取重轨相同位置的节点与实际测量的温

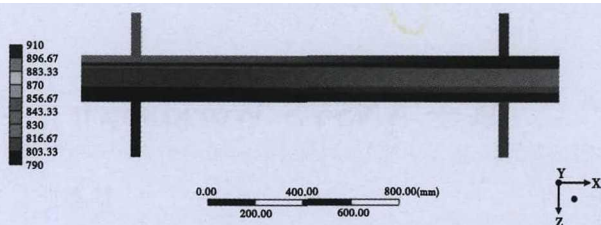


图 2 重轨稳态温度场分布云图

Fig. 2 Distribution cloud diagram of stable status temperature field of heavy rail



图 3 重轨与冷床温度场正向分布云图

Fig. 3 Heavy rail and cooling bed temperature field positive distribution cloud diagram

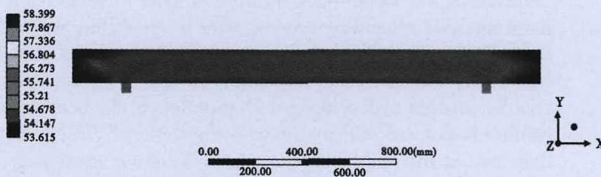


图 4 重轨轨底温度场分布云图

Fig. 4 Heavy rail track bottom temperature field distribution cloud diagram

度进行比较^[11]。由于现场环境条件的制约,测量人员测量时与重轨有一定的距离,因此所测数据会低于实际温度。由表 4 可知,重轨的模拟温度比测量温度高 3~10℃,且温度变化趋势与现场冷却情况基本相符,因此温度场模拟结果较为真实,可为重轨的实际生产提供较高的参考价值。

3 热-结构耦合分析

3.1 前处理

在 ANSYS Workbench 软件中利用载荷传递法进行模拟分析,将得到瞬态温度场的温度作为热载

表 4 重轨实测温度与模拟温度对照表

Table 4 Heavy rail measured temperature and simulated temperature comparison table

时间/s	实测/℃	模拟/℃
0	910~920	910
3 600	130~150	139.7
5 400	85~95	88.54
7 200	65~75	68.85
9 000	50~60	58.44

荷施加到重轨模型上,同时约束冷床的所有自由度,使得重轨自由弯曲。重轨与冷床接触是一种高度的非线性行为,不可以只采用一组线性方程表示,因此本文采用牛顿-拉夫森算法。

重轨在冷却过程中,重轨发生弯曲变形的同时伴随着与冷床的摩擦,因此重轨与冷床的接触类型为摩擦接触,本文摩擦系数取 $0.3^{[10]}$,采用增广拉格朗日接触算法。

由于重轨与冷床在冷却过程中处于相互接触并且相切的状态,在两个接触面之间,只允许沿法向分离和沿切向移动,但不能发生相互渗透。因此需要通过定义接触刚度的大小控制接触表面穿透量的大小,接触刚度大小的定义影响模型收敛的难易程度,因此选取合适的接触刚度比例因子是保证模拟结果准确性的关键因素,综合考虑本次模拟选取的接触刚度比例因子为 1。

3.2 弯曲变形分析

重轨受材料因素以及外界边界条件的影响下,在冷却过程发生了复杂的弯曲变形过程。为了详细的说明重轨的弯曲变化,选取几个关键时刻进行分析,其位移分布云图如图 5 所示,分析如下:

(1) 0 ~ 300 s 时,由于轨底比轨头的散热面积要大,因此轨底的冷却速率大,其收缩量也大,轨底边缘由于温度较低会有少部分提前发生相变,但对重轨整体弯曲变化影响不大,所以重轨初始冷却阶段弯向轨底,300 s 时刻弯曲挠度达到 8.082 8 mm。

(2) 300 ~ 465 s 时,300 s 后轨底总体进入相变阶段伴随着潜热的释放,冷却速率降低,而轨头仍然要比轨底的冷却速率快,重轨总体弯向轨头,弯向轨底的挠度逐渐变小,465 s 时刻弯曲挠度减小为 7.379 mm。

(3) 465 ~ 650 s 时,465 s 后轨头处于相变阶段,

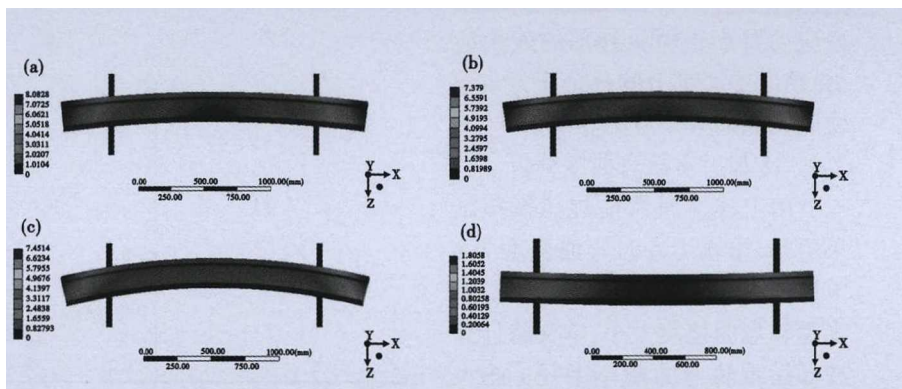


图 5 重轨 Z 方向位移云图:冷却 300 s (a), 465 s (b), 650 s (c), 900 s (d)
Fig. 5 Heavy rail track distribution clouds diagram at Z diraction; cooling for 300 s (a), 465 s (b), 650 s (c), 900 s (d)

其体积随潜热的释放开始膨胀,冷却速率开始逐渐减小,此时轨头、轨腰、轨底都已经处于相变阶段,但总的来看轨底冷却速率较大,弯向轨底挠度再次逐渐变大。650 s 时弯曲挠度为 7.451 4 mm。

(4) 650 s 后重轨整体处于相变完成阶段,此时重轨轨头的温度要高于轨底温度,温降速率较快,重轨由轨底弯向轨头,直到终冷重轨依旧保持着弯向轨头的变化趋势。900 0 s 终冷时刻弯曲挠度为 1.805 8 mm,弯向轨头。

3.3 残余应力分析

重轨在冷却过程中,受生产工艺所限,钢轨内部势必存有残余应力,残余应力的存在对材料的性能影响很大,尤其是疲劳寿命,是决定重轨质量好坏的关键因素,因此对重轨的残余应力模拟分析是不可避免的。

图 6 (a) 为重轨正向应力分布云图,图 6 (b) 为重轨底部残余应力分布云图,图 6 (c) 是终冷时刻重轨中间截面的残余应力图。

从整体来看,重轨两端应力小于中段应力,轨底应力大于轨头应力,轨腰应力最小。最大残余应力出现在轨底边缘其值为 2.407 MPa。从中间截面的残余应力分布云图可以看出,轨腰的残余应力最小,轨头与轨底残余应力较大,轨头中心部分的残

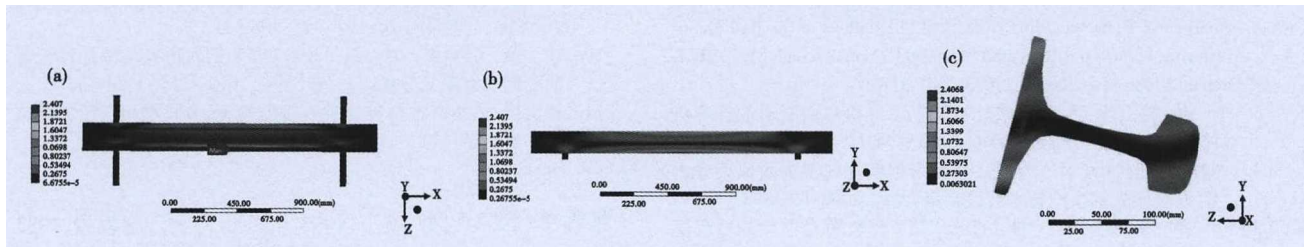


图 6 (a) 重轨正向应力分布云图;(b) 重轨底部残余应力分布云图;(c) 终冷时重轨中间截面残余应力图
Fig. 6 Distribution cloud diagrams of positive stress (a) and bottom residual stress (b) of heavy rail;(c) residual stress diagram of middle section of heavy rail at cooling end

余应力要小于轨头外部的残余应力,轨底中心部分的残余应力小于轨底两侧的残余应力。

3.4 冷却后重轨弯曲度分析

由上述重轨弯曲规律模拟结果可知,重轨终冷时弯曲挠度为 $b = 1.8058 \text{ mm}$,为了准确的得到百米重轨弯曲挠度大小,本文将计算冷却后重轨弯曲曲率半径 r 的大小,推算百米重轨冷却后的弯曲度。重轨弯曲挠度示意图如图 7 (a)所示,百米重轨弯曲挠度示意图如图 7 (b)所示。计算方法如下:

$$r^2 = (r - b)^2 + l^2$$

式中: r -重轨曲率半径; b -弯曲挠度; l -为轨底中线两端点变形后距离的一半。

终冷后经 ANSYS 后处理,通过对重轨(图 7a)上述 A、B、C 坐标的提取,计算得出线段 AB 长度为 1996.6422 mm ,即 $l = AB/2 = 998.3211 \text{ mm}$,将已知条件代入上述公式求得 2 m 重轨经过 2.5 h 冷却后弯曲曲率半径为 275957 mm 。

参考预弯曲线,由于百米重轨在冷却过程中,中段平直,只有两端距离中部 32 m 内发生大变形(图 7b),因此 AB 弧长取 32 m,根据弧长公式,将上述求得的弯曲曲率半径及弧长代入公式,求得角 θ 值,在根据余弦公式求得百米重轨弯曲度 h 为 1851 mm 。

4 结论

(1) 重轨终冷时刻其温度分布为轨头温度最高,轨腰温度次之,轨底温度最低。重轨中部的温度

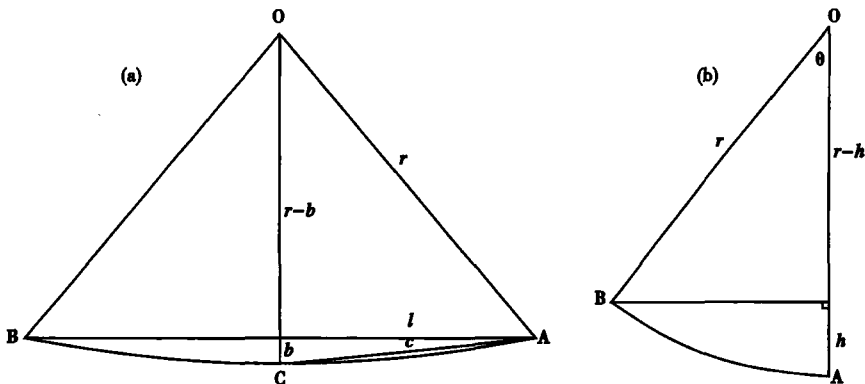


图 7 (a)重轨弯曲挠度示意图;(b)百米重轨弯曲挠度示意图
Fig. 7 (a) Schematics of heavy rail bending deflection; (b) schematics of 100 m heavy rail bending deflection

均匀分布,其端面温度低于中部温度。

(2) 重轨冷却过程经历了弯向轨底-弯向轨头-弯向轨底-弯向轨头的弯曲变化过程,直到终冷重轨依旧保持着弯向轨头的变化趋势。9 000 s 终冷时刻弯曲挠度为 1.5303 mm 。

(3) 从整体来看,重轨两端应力小于中段应力,轨底应力大于轨头应力,轨腰应力最小。最大残余应力出现在轨底边缘其值为 2.407 MPa 。从中间截面的残余应力分布云图可以看出,轨腰的残余应力最小,轨头与轨底残余残余应力较大,轨头中心部分的残余应力要小于轨头外部的残余应力,轨底中心部分的残余应力小于轨底两侧的残余应力。

(4) 2 000 mm 长 U75V 重轨经自然冷却后弯向轨头的弯曲曲率半径为 275957 mm ,以此近似推断出百米重轨弯曲度为 1851 mm ,满足百米重轨弯曲变化范围。

内蒙古自然科学基金项目(2014MS0534)资助

参考文献

[1] Basu J, Srimani S L and Gupta D S. Rail Behaviour during Cooling After Hot Rolling[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2004, 39(1): 15-24.

[2] Jonas W Ringsberg and Torbjorn Lindback. Rolling Contact Fatigue Analysis of Rails Including Numerical Simulations of the Rail Manufacturing Process and Repeated Wheelrail Contact Loads[C]. International Journal of Fatigue. 2003; 547-558.

[3] 李 革, 赵玉萍, 黄献海. 热轧钢轨空冷过程弯曲变形的计算机模拟[J]. 塑性工程学报, 2006, 13(3): 74-77.

[4] 刘毅军, 刘树山, 李 芳, 等. 热轧带钢精轧轧辊失效原因分析[C]//全国轧钢生产技术会议文集, 大连, 2008: 896-898.

[5] 李 革, 崔海燕, 陈 林. 百米 U75V 钢轨矫直前冷却过程温度场的有限元分析[J]. 特殊钢, 2009, 30(1): 1-3.

[6] 秦瑞廷. 终轧钢轨热预弯空冷后矫前弯曲度控制机理研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学硕士学位论文, 2014: 57-58.

[7] 贾 昊. U75V 百米高速重轨矫直前预弯冷却数值模拟[D]. 鞍山: 辽宁科技大学硕士学位论文, 2012: 29-32.

[8] 董永刚. 钢轨万能轧制过程理论与实验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学工学博士学位论文, 2008: 45-46.

[9] 沙 刚, 刘相华, 徐列平. 钢轨在轧制过程中的温度场[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 1996(4): 408-411.

[10] 李 革, 贾宝华, 姜 旭. 百米 U75V 钢轨矫直前冷却过程弯曲变形的有限元分析[J]. 特殊钢, 2010, 31(3): 14-15.

[11] 童山虎. 热预弯重轨复合矫直数值模拟[D]. 鞍山: 辽宁科技大学硕士学位论文, 2013: 24.

郭喜平(1962-),男,硕士(1993年东北大学),副教授,1983年包头钢铁学院(本科)毕业,机械力学研究。

收稿日期:2018-04-23