

· 试验研究 ·

百米 U75V 钢轨矫直前冷却过程温度场的有限元分析

李 革¹ 崔海燕¹ 陈 林²

(内蒙古科技大学, 1 建筑与土木工程学院; 2 材料与冶金学院, 包头 014010)

摘 要 通过研究 U75V 钢轨冷却过程的热边界条件, 采用三维瞬态非线性有限元法计算了百米钢轨矫直前 845 ~ 150 °C 冷却过程的温度场。结果表明, 在冷却过程中的钢轨横截面不同位置的温度下降速率不同, 在冷却初期 (200 ~ 2 000 s), 每条冷却温度线都出现一个温度降低缓和的“平台”阶段, 如轨底边部冷却速度最快, 开始相变时间最早; 在冷却 2 500 ~ 3 000 s 时, 轨头、轨腰、轨底中心的温度迅速下降, 轨头与轨底边部的温差约 5 °C, 在冷却 5 000 ~ 7 000 s 时, 各部位温差趋于一致; 计算温度值和现场实测值差别小于 50 °C。

关键词 百米 U75V 钢轨 矫直前弯曲度 瞬态温度场 有限元法

Finite Element Analysis on 100-Meter Rail Temperature Field of U75V Steel during Cooling before Straightening

Li Ge¹, Cui Haiyan¹ and Chen Lin²

(1 Architecture and Civil Engineering School and 2 Material and Metallurgy School, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

Abstract With analyzing the thermal boundary conditions in cooling process of U75V steel rail, the temperature field of 100 m steel rail during cooling process at 845 ~ 150 °C before straightening has been calculated by using three-dimensional non-linear finite element method. Results showed that during cooling process the temperature decrease rate was different at different position of cross-section of rail, in initial cooling period (200 ~ 2 000 s) a “platform” period with temperature decreasing slow for each curve occurred, for instance the cooling rate was fastest at edge of rail bottom at which the phase transition was earliest; in cooling for 2 500 ~ 3 000 s, the temperature at rail head, rail waist and median of rail bottom decreased very quickly and the temperature difference between rail head and edge of rail bottom was about 5 °C, in cooling for 5 000 ~ 7 000 s the temperature of each position tended to show no difference; the difference between calculated temperature and measured temperature at situ was less than 50 °C.

Material Index 100 m U75V Steel Rail, Bending before Straightening, Transient Temperature Field, FEM

百米钢轨矫直前冷却过程产生的弯曲变形对钢轨矫直后的平直度和残余应力有很大影响。我国制定的生产标准 YB (T) 68-1987 规定, 钢轨的矫直前弯曲度不得超过钢轨全长的 1/60。UIC 虽然没有直接规定矫直前弯曲度, 但提出了与矫直前弯曲度大小密切相关的残余应力要求。目前, 国内外钢轨先进生产工艺采取各种有效措施, 尽量降低矫直前弯曲度, 如控制轨头、轨底的冷却速度和锯切温度, 轨底贴靠对称冷却方法, 冷床上预反弯等。研究钢轨的矫直前弯曲度, 首先要研究钢轨在冷却过程中的温度场。随着有限元技术的发展, 许多学者对其进行了有限元分析计算, 但这些文献大多没有考虑相变的影响, 有的还只是建立了二维有限元模型^[1,2], 与现场实际情况相差较大。基于此, 本文采用三维瞬态非线性有限元法计算了钢轨冷却过程中的温度场, 计算所采用的热物理参数是随温度变化的, 同时还考虑了材料固态相变的影响。温度场的数值计算为研究钢轨的矫直前弯曲度打下了必要的基础。

1 有限元模型的建立

1.1 有限元网格划分

本文选用 ANSYS 单元库的 solid70 单元进行网格划分。根据对称性, 计算模型在纵向方向取钢轨长度的 1/2, 即 50 m; 横向方向上取横截面的 1/2; 如图 1 所示。

1.2 钢轨的热物理参数

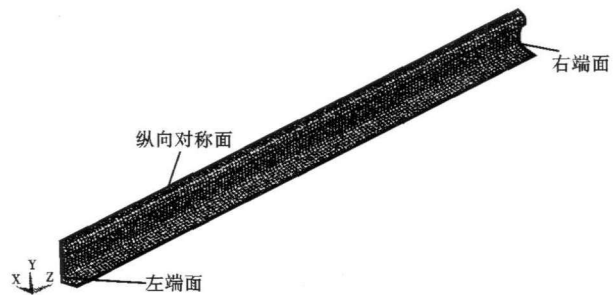


图 1 有限元法计算模型及网格划分图
Fig. 1 Model of finite element method and mesh division

钢轨的化学成分和热物理参数^[3,4],见表 1、表 2。钢轨在降温过程中会发生固态相变并释放潜热,本文采用输入热焓值的方法来模拟这一过程。

表 1 U75V 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of U75V steel / %

C	Si	Mn	P	S	V
0.70 ~ 0.78	0.50 ~ 0.70	0.75 ~ 1.05	≤ 0.025	0.008 ~ 0.025	0.04 ~ 0.08

表 2 U75V 钢的热物理参数

Table 2 Thermal physical parameters of U75V steel

温度/ °C	导热系数/ [W(m·°C) ⁻¹]	密度/ (kg·m ⁻³)	热辐射 系数	定压热容/ [J(kg·°C) ⁻¹]	热焓×10 ⁸ / (J·m ⁻³)
30	48.1	7 850	0.8	490	0
200	45.2	7 850	0.8	540	8.0
350	38.1	7 850	0.8	607	16.8
600	32.7	7 850	0.8	712	27.3
850	24.4	7 850	0.8	830	57.9
900	16.0	7 850	0.8	920	60.2

1.3 初始条件和边界条件的确定

经现场实测,钢轨轧制的终轧温度为 920 ~ 930 °C,钢轨上冷床的温度为:轨底 840 °C、轨腰 860 °C、轨头 850 °C。为方便起见,计算的初始温度设定为均匀温度 845 °C。钢轨的横截面相对其侧面来说很小,所以散热面只考虑钢轨的侧面。在图 1 的计算模型中,只考虑钢轨侧面的表面换热,忽略左端面的散热,而右端面 and 纵向对称面采用绝热边界条件。

为确定钢轨表面与空气的换热系数,本文将钢轨的侧面分为 7 个部分,编号见图 2。

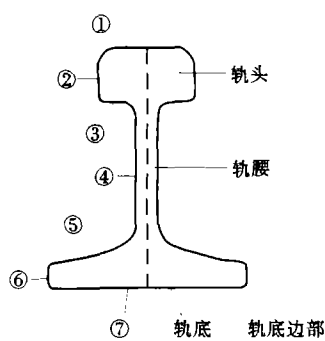


图 2 钢轨侧面的计算面编号
Fig. 2 Face number for calculated position of rail side

单根钢轨与周围空气既进行辐射换热,又与其接触的空气进行对流换热。因此,钢轨换热面的总换热系数为^[5]:

$$h = h_c + h_r \quad (1)$$

式中: h_c - 对流换热系数; h_r - 辐射换热系数。

恒温自然对流换热与物体的形状和位置有关^[5]。本文用到以下 3 种情况:

(1) 竖直平壁层流特征系数:

$$Nu = 0.59 (GrPr)^{1/4}$$

(2) 水平板上表面层流特征系数:

$$Nu = 0.54 (GrPr)^{1/4}$$

(3) 水平板下表面层流特征系数:

$$Nu = 0.27 (GrPr)^{1/4}$$

式中: Pr - 普朗特数; Gr - 格拉晓夫数; $Gr = ga_v \Delta t_c l_c^3 / \nu^2$; a_v - 气体体积膨胀系数, $a_v = 1/T_m$, $T_m = (t_u + 273)$, $t_u = 0.5(t_u - t_f)$; Δt_c - 温差, $\Delta t_c = (t_u - t_f)$; t_u - 钢轨的表面温度; t_f - 与钢轨表面进行换热的流体温度(本文取 30 °C); l_c - 钢轨侧面各计算面的特征尺寸; ν - 运动粘度。

对流换热系数和辐射换热系数为:

$$h_c = \frac{Nu \lambda_f}{l_c} \quad (2)$$

$$h_r = \frac{F \epsilon \sigma_b [(t_u + 273)^4 - (t_f + 273)^4]}{t_u - t_f} \quad (3)$$

式中: λ_f - 流体的热导率; ϵ - 热辐射系数; σ_b - 黑体的辐射常数, $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k}^4)$; F - 角系数,由代数分析法确定^[5],篇幅原因不再叙述,见表 3。

表 3 钢轨侧面的角系数 F
Table 3 Angle factor F of rail side

面号	1	2	3	4	5	6	7
角系数	1.0	1.0	0.78	0.55	0.83	1.0	1.0

将钢轨的相关尺寸代入式(2)中,得出各个温度下不同表面对流换热系数 h_c ; 将表 3 中的角系数代入式(3),得出各个温度下不同表面的辐射换热系数 h_r ; 由式(1)可得钢轨的总换热系数 h , 见图 3。

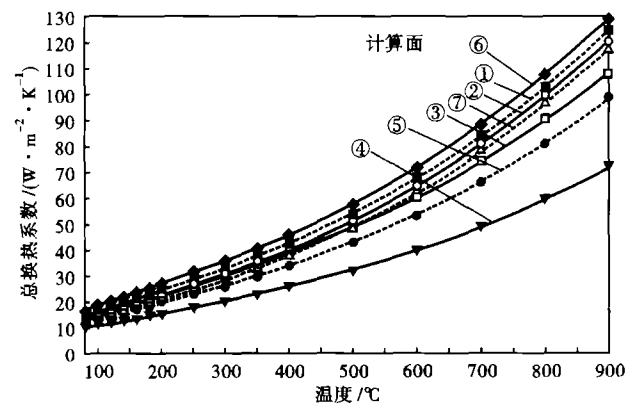


图 3 钢轨冷却的总换热系数

Fig. 3 Total coefficient of heat transfer during cooling of rail

2 温度场计算结果分析

由于钢轨只是侧面散热,所以沿轴线方向的温

度场是恒定的,只研究钢轨某一截面的温度场既可。轨头、轨腰和轨底的随时间的变化曲线,见图4。从图4中看出,钢轨冷却过程中其横截面上不同部位的温度不同,这是由于钢轨横截面上不同部位的冷却速度不同所致。在冷却初期(200~2000 s)每条温度线都出现了一个温度变化缓和的“平台”阶段(图4a),这是材料发生固态相变的阶段。在此阶段,钢轨释放出潜热,温度下降较慢;但由于横截面上不同部位的温度不同,使得每个部位发生相变的

时间不同,“平台”阶段发生的时间也存在差异,如轨底边部冷却速度最快,它开始相变的时间最早;在这个阶段,轨底边部温度最低,其它部位温度相差不大。随着冷却过程的进行,在2500~5000 s范围内,轨头、轨腰、轨底中心的温度迅速下降,与轨底边部的温差逐渐缩小,轨头与轨底边部的温差在5℃左右。在5000~7000 s范围内,各部位温差继续缩小,最后趋于一致。

计算结果与实测数据的比较,见图5。由图5可

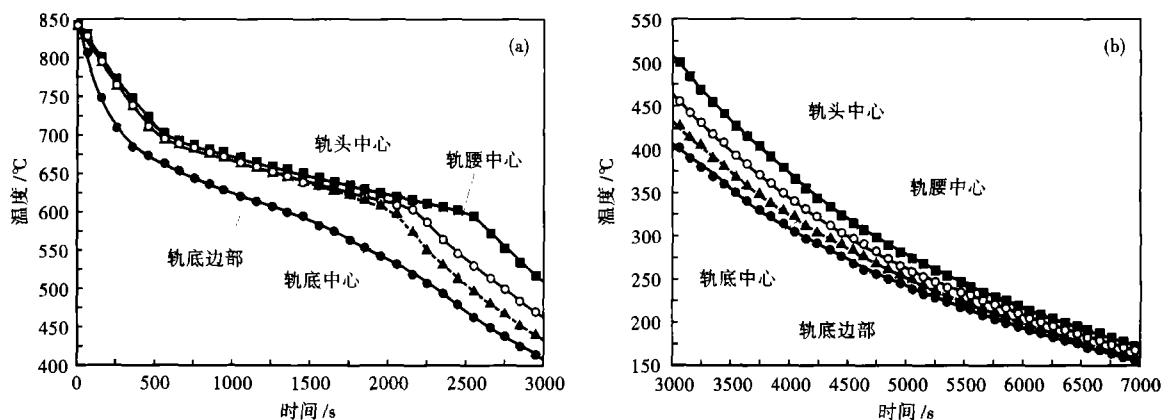


图4 钢轨不同部位的温度-时间曲线(a)0~3000 s;(b)3000~7000 s

Fig. 4 Temperature-time curves for different position of rail: (a) 0~3000 s; (b) 3000~7000 s

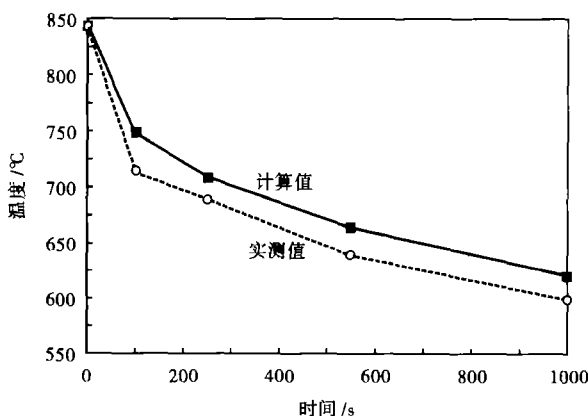


图5 钢轨轨底中心温度计算值与实测值比较

Fig. 5 Comparison between calculated temperature and measured temperature at median of rail bottom

以看出,计算温度值和现场实测值基本吻合。

3 结论

(1) 本文建立的钢轨非线性瞬态温度场分析的三维有限元模型,准确确定了钢轨的热边界条件,同时考虑了材料热物理参数随温度变化及金属固态相变的影响,温度场的计算值与现场实测值基本吻合,计算模型较符合实际工况。

(2) 钢轨冷却过程中其横截面上不同部位的温度不同,在冷却初期每个部位发生相变的时间不同,温度变化较为复杂;在冷却中后期,各部位的温度由高到低的顺序为轨头、轨腰、轨底中心、轨底边部。

(3) 钢轨材料的固态相变及钢轨的异型横截面是影响其温度场的重要因素。

包头市重大科技攻关资助项目(2006Z1006)

参考文献

- 1 Lenard J C. A Study of Temperature Distribution in Rails during Intermittent Cooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 1991, 25(3):303
- 2 胡盛德. 重轨断面温度场的 FEM 模拟. *武汉科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 26(3):224
- 3 Basu J. Rail Behaviour during Cooling After Hot Rolling. *The Journal of Strain Analysis for Engineer Design*, 2004, 39(1):15
- 4 李曼云. 钢的控制轧制和控制冷却技术手册. 北京:冶金工业出版社, 1998
- 5 戴锅生. 传热学. 第2版. 北京:高等教育出版社, 1999

李 革(1967-),男,硕士,教授,系主任,1994年西安交通大学毕业,计算力学、成型过程的数值模拟等。

收稿日期:2008-07-21