

基于有限元法计算重轨钢淬火过程的换热系数

陈 林 王慧军 陈昆宇 刘志敏

(内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010)

摘 要 提出一种利用有限元软件结合实验计算换热系数的方法, 根据实测的温度曲线, 将影响 U75V 钢轨 ($\% : 0.74\text{C}, 0.76\text{Si}, 0.82\text{Mn}, 0.014\text{P}, 0.028\text{S}, 0.071\text{V}$) 换热系数的诸多因素进行非线性耦合, 建立了换热系数的几何模型, 通过 Python 语言编制计算换热系数的迭代程序, 求得该钢淬火过程的换热系数。以计算的换热系数作为已知边界条件, 在 DEFORM-3D 中对耦合了相变的钢轨喷雾淬火的温度场进行模拟, 模拟计算的冷却曲线与实测冷却曲线一致。

关键词 U75V 重轨钢 换热系数 喷雾淬火 相变潜热 有限元法

Calculation of Heat Transfer Coefficient of Heavy Rail Steel in Quenching Process Based on Finite Element Method

Chen Lin, Wang Huijun, Chen Kunyu and Liu Zhimin

(School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

Abstract A method to calculate the heat transfer coefficient is proposed by using finite element software combined with experimental calculation that is based on measured temperature curves, carrying out the nonlinear coupling on various factors which have influence on the heat transfer coefficient of U75V rail steel ($\% : 0.74\text{C}, 0.76\text{Si}, 0.82\text{Mn}, 0.014\text{P}, 0.028\text{S}, 0.071\text{V}$), the geometric model of the heat transfer coefficient of steel in quenching process is established and the heat transfer coefficient is obtained by iterative program of calculated heat transfer coefficient prepared with Python language. Using calculated heat transfer coefficient as a known boundary conditions, the simulation on temperature field of rail spray quenching coupled with phase transition in the DEFORM-3D is carried out. The simulated-calculation cooling-curve corresponds to the measured cooling curve.

Material Index U75V Heavy Rail Steel, Heat Transfer Coefficient, Spray Quenching, Phase Transition Latent Heat, Finite Element

换热系数是定量评价淬火过程介质冷却能力的物理量, 对淬火工艺的制定、淬火介质的选择以及淬火后工件的变形规律的研究具有重要的意义^[1]; 同时换热系数作为边界条件是计算机模拟淬火过程组织、温度及应力场的重要参数。然而, 大型商用有限元软件大多是将换热系数或是热流密度作为边界条件输入量, 以求出温度、组织和应力场, 而将换热系数作为未知量进行求解是困难的^[2]。故对淬火过程中换热系数的反向传热求解的大量研究是用有限元差分法, 将热传导方程中的微分用差分代替进行求解^[3-5]。

用有限元差分法计算换热系数的大部分研究没有把相变潜热、热导率等因素非线性地耦合于计算换热系数过程中, 淬火过程中相变潜热、热导率等对换热系数的影响又是显著的^[6-8]。在文献[9]中将材料的热焓随温度的变化(即相变潜热)进行非线性拟合后, 作为定压比热容的一部分耦合在非线性热传导控制方程中, 在一定程度上提高了计算的精

度, 同时也增加了计算的复杂程度。但是仍然不能解决用有限元差分法计算换热系数的固有弊端, 实测温度作为计算换热系数的关键参数, 测温的位置对计算的精度影响较大, 所测温度越接近工件表面计算结果相对越精确, 在实际的测温过程中工件表面的温度是很难准确的测得, 无论是用红外测温枪还是在工件表皮下埋热电偶等方法。文献[10]中利用有限元法进行了换热系数的计算, 通过自编制的有限元温度场、组织场及换热系数优化程序将相变潜热等非线性因素耦合在有限元模型中进行求解, 提高了计算换热系数的可靠性, 但同时也增加了编程的计算量。

本文以有限元软件 ABAQUS 为平台建立计算换热系数的有限元模型, 利用 Python 计算机语言编制计算换热系数的迭代程序, 通过有限元软件进行几何建模和定义材料属性, 不仅能将影响换热系数的非线性因素相变潜热耦合于计算中, 也可将热导率、比热容、热辐射、对流、传导、几何形状等诸多因

数耦合于计算中。

1 计算原理

1.1 温度场的控制方程

有限元传热分析的基本原理是:根据 Fourier 的传热定律和能量守恒定律,建立有限元分析问题的控制方程,即物体的瞬态温度场 $T(x, y, z, t)$ 应满足以下控制方程^[11]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho Q = \rho c_T \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (1)$$

式中: ρ -材料密度; c_T -材料比热容/ $[J \cdot (kg \cdot K)^{-1}]$; K_x, K_y, K_z -沿 x, y, z 方向的热传导系数/ $[W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$; Q -物体内部的热能/ $(W \cdot kg^{-1})$ 。

1.2 初始条件

设初始条件为(IC):

$$T(x, y, z, t=0) = \bar{T}_{(x, y, z)} \quad (2)$$

式中: $\bar{T}_{(x, y, z)}$ -给定的初始温度函数。

1.3 边界条件

金属件淬火过程的边界条件为 3 类边界条件,同时 3 类边界条件还是对流和换热的混合换热边界^[10],其表达式为:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_F = H_k(T_w - T_c) + H_a(T_w^4 - T_c^4) = H(T_w - T_c) \quad (3)$$

式中: H_k, H_a -对流和辐射换热系数; T_w -工件表面温度; T_c -淬火介质温度; n -边界面外法线方向; F -金属件边界; H -总换热系数。

计算机 Python 语言编写计算换热系数的迭代程序。计算程序主要分为两个部分:

(1)编写温度与换热系数的计算模型,此模型在调用几何模型和材料属性的基础上进行计算,将影响换热系数的相变潜热、对流、辐射及几何形状等因素非线性地拟合于计算换热系数的模型之中。

(2)编写寻求满足条件的换热系数迭代程序。整个计算过程为依据高温金属的换热系数范围,在模型中输入开始淬火的温度实测值 T_1^{exp} 和其初始估计的换热系数 h_1 ,提交 ABAQUS 模拟计算给定时间步长的整个有限元模型的温度场,计算结束后提取与试验所测温度点所对应于计算模型中网格节点上的计算温度值 T_1^{cal} ,将计算值与实测值进行比较。如果 $|T_1^{cal} - T_1^{exp}| \geq \Delta T$ (ΔT 为温度误差),则修正换

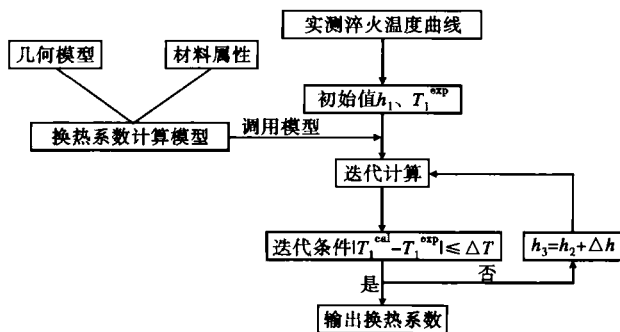


图 1 计算流程图

Fig. 1 Calculation flowchart

热系数为 h_2 ($h_2 = h_1 + \Delta h$),以新的换热系数 h_2 继续迭代上述过程进行求解计算,直到 $|T_2^{cal} - T_1^{exp}| \leq \Delta T$ (T_2^{cal} 为换热系数 h_2 对应的计算温度值)为止,完成第一个时间步长的计算,得到第一个淬火温度 T_1^{exp} 的换热系数 h_1 。重复上述迭代过程,直到整个淬火过程结束,计算流程图如图 1 所示。

整个迭代流程如图 1 所示,说明以下几点: ΔT 为计算值与实测值的误差值; h_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 为换热系数; T_i^{cal}, T_i^{exp} 分别为换热系数 h_i 对应的计算温度值与实测温度值。

在计算过程中给定初始换热系数 h_1 提交计算模型进行计算,提取对应节点温度值 T_1^{cal} ,当 h_1 不满足 $|T_1^{cal} - T_1^{exp}| \leq \Delta T$ 时,直接重新赋值 $h_2 = 2h_1$,计算出的节点温度 T_2^{cal} ,满足条件输出换热系数,仍然不能满足条件时, $h_3 = h_2 + \Delta h$ $\left[\Delta h = \frac{h_2 - h_1}{T_1 - T_2} (T_2 - T_1^{exp}) \right]$,接下来以 h_3 的迭代形式迭代到满足条件为止,输出该温度对应的换热系数计算值。

这样处理的好处是可以加快逼近最佳换热系数的速度,缩短计算时间,就 h_1 的取值大小没有要求,事实上可以取任何值, h_1 的作用是赋予第一个淬火实测值 T_1^{cal} 一个换热系数,使编制的计算程序通过调用 ABAQUS 计算模型在 ABAQUS 中得以启动计算过程; h_2 的作用是为换热系数补偿量 Δh 提供一个比例,使得整个迭代程序能快速的迭代计算出满足条件的换热系数值,但 h_1 的取值对第一个实测温度 T_1^{cal} 对应的换热系数计算值有直接的影响,其取值范围影响计算第一个换热系数的迭代次数,如果 h_1 的取值接近第一个换热系数的计算值,只需经过很少的迭代次数就会得到满足迭代条件的换热系数值。因此,关于 h_1 的取值一般根据高温金属的换热

系数范围估计一个相近值进行计算即可。

2 计算结果及分析

以 U75V 钢轨的喷雾淬火为算例,计算钢轨在喷雾淬火中的表面综合换热系数。将计算后的换热系数,作为边界条件在有限元软件 DEFORM-3D 中模拟计算耦合了相变等因素的温度场,提取对应节点上的温度值与实测温度进行对比,说明此种方法计算换热系数的可靠性。

2.1 实验材料及设备

本实验的材料是钢厂提供的 U75V 钢轨,其化学成分如表 1 所示,钢轨的其他热物性参数如表 2 所示^[12-14]。根据表 2 的物理化学参数在 ABAQUS 有限元软件中定义材料属性,对影响换热系数的诸多因数进行非线性的耦合,建立计算换热系数的几何模型。

取钢轨长 500 mm,在钢轨轨头两端面 9 mm 和 20 mm 处钻 $\Phi 10\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的孔,安装绝热热电偶作为测试点,计算时取一端 9 mm 处的热电偶所测的温度值为求解计算换热系数的温度值,另一端 20 mm 处的温度值用于检验计算结果,安装热电偶示意图如图 2 所示。

钢轨的喷雾淬火在喷雾台架上进行,整个喷雾过程为连续喷雾,由 STEP7 软件编程 PLC(Programmable Logic Controller)计算机控制,温度的采集由热电偶输入 ADAM(Advance Data Access Method)数模转换采集,经相应的计算机软件实时记录,其中包括水、气的比例大小的输出都有 ADAM 数模块采集,经计算机实时记录,整个喷雾淬火装置构架如图 3 所示。

表 1 U75V 钢轨化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of U75V rail steel / %

C	Si	Mn	P	S	V
0.74	0.76	0.82	0.014	0.028	0.071

表 2 U75V 钢轨热物性参数

Table 2 Thermal parameters of U75V rail steel

温度/ ℃	比热容/ [J · (kg · ℃) ⁻¹]	线膨胀系数/ 10 ⁻⁵	杨氏模量/ GPa	泊松比
30	492	0.067	209	0.30
200	502	0.179	109	0.26
300	531	0.321	—	—
350	—	—	189	0.23
400	549	0.490	—	—
600	665	0.831	168	0.13
700	753	1.000	—	—
800	715	1.120	—	—
850	—	—	133	0.12
900	635	1.300	109	0.12

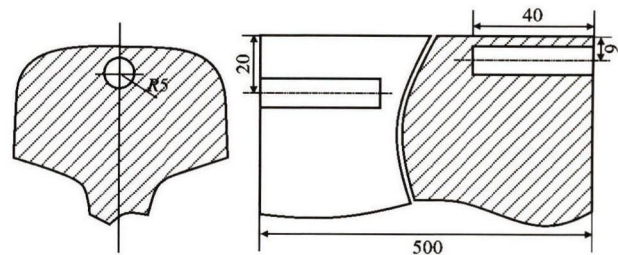


图 2 安装热电偶示意图
Fig. 2 Schematics of installation of thermocouple

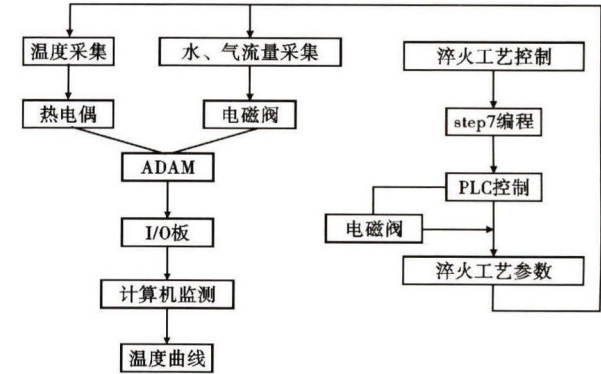


图 3 淬火装置构架
Fig. 3 Quenching device structure

表 3 U75V 钢轨喷雾淬火参数

Table 3 Spray quenching parameters of U75V rail steel

长度/ mm	水流量/ (m ³ · h ⁻¹)	气流量/ MPa	喷雾时间/ s	淬火温度/ ℃
500	1.2	0.25	200	887

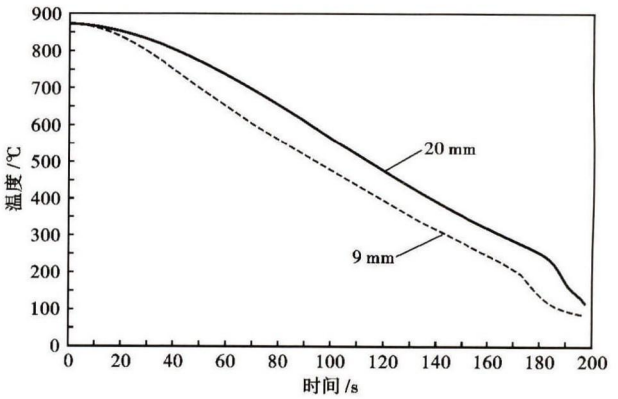


图 4 轨头实测温度曲线
Fig. 4 Measured temperature curve of rail head

2.2 试验过程及结果

喷雾淬火中的雾是由压缩空气以一定的压力值与水混合经喷气嘴喷出的,喷雾介质的冷却能力与水和气的流量比例有关系,本文主要是提出一种计算换热系数的方法,实验条件及工艺如表3所示。

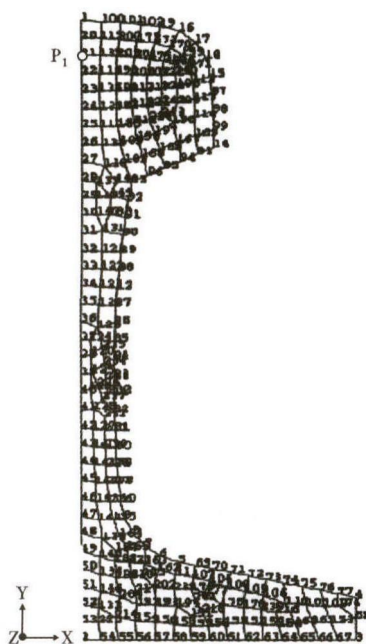


图 5 ABAQUS 中对应于 20 mm 处的节点 P₁

Fig. 5 Corresponding to 20 mm place at node P₁ in ABAQUS

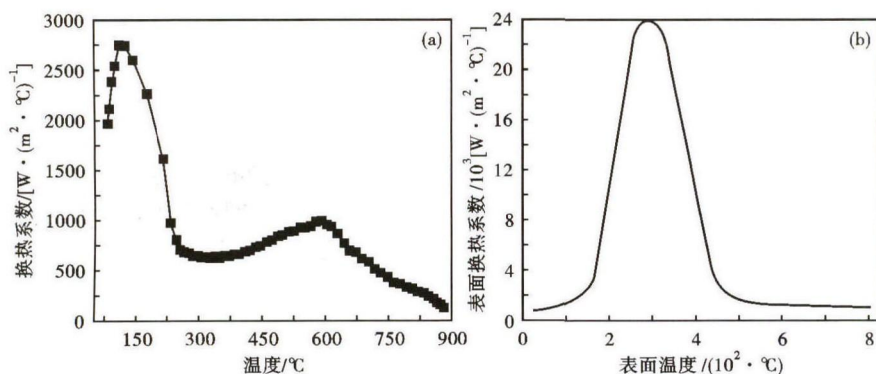


图 6 换热系数计算值:(a)钢轨喷雾淬火;(b)圆柱体端部水淬

Fig. 6 Calculated value of heat transfer coefficient: (a) rail spray quenching; (b) round body end water quenching

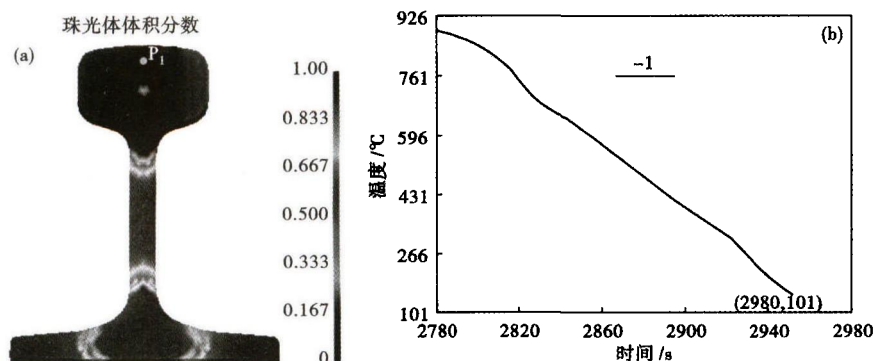


图 7 (a)600 °C 时 20 mm 处 P₁ 点的珠光体转变量;(b)计算模拟点 20 mm 处 P₁ 点温度曲线

Fig. 7 (a) Amount of pearlite transformation at P₁, 20 mm place, 600 °C; (b) temperature curve at calculated-simulation point, 20 mm P₁ place

在整个喷雾淬火中用热电偶对钢轨断面 9 mm、20 mm 处进行降温记录,整个喷雾过程时长 200 s,记录时间间隔为 1 s,实测温度曲线如图 4 所示。

用 Python 语言编制在 ABAQUS 环境中计算换热系数的迭代程序,将 9 mm 处的实测温度值按一定的时间间隔取点作为迭代程序条件的实测值 T_i^{exp} ,输入计算换热系数的迭代程序,提交 ABAQUS 求解计算,提取 ABAQUS 中对应于钢轨轨头 20 mm 处 P₁ 点 21 节点处的温度值,作为迭代计算条件的 T_i^{cal} ,如图 5 所示。 h_1 取 100,时间间隔取 3 s,开始淬火温度 887 °C,绝对温度差值精度 1 °C,经迭代计算的随温度变化的换热系数如图 6(a) 所示,其中图 6(b)圆柱体端部水淬换热系数数据来自文献[15]。

图 4 为喷雾淬火的实测冷却曲线,图 6(a) 是根据本文提出的算法,依据图 4 的数据计算的随温度变化的换热系数曲线。

从图 6(a) 可以看出,在喷雾淬火过程中,表面换热系数与温度表现出较强的非线性关系。在整个

喷雾淬火过程中换热系数整体上与水淬所经历的模态沸腾阶段、泡状沸腾阶段和对流阶段三阶段有所不同^[7,15-16]。

由于喷雾淬火介质的冷却能力与水相比要柔和得多,在淬火过程中雾介质与炙热的钢轨表面接触的瞬間被汽化,这种汽化的程度要远大于水在钢轨表面汽化的程度,因此与水淬相比喷雾淬火没有模态沸腾阶段,而是直接进入泡状沸腾阶段,与水淬相比喷雾的汽化潜热并没有水淬的多,所以刚开始并没有像水淬达到最大的换热系数;随着钢轨表面的温度下降,在 600 °C 左右出现换热系数的第一个峰值,这是由于在 600 °C 时轨头中心测温处珠光体相变基本完成使得相变潜热达到最大[图 7(a)]。

当温度在 600 ~ 300 °C 时,换热系数又有所下降,这是由于相变潜热所释放的潜热在逐渐下降;下降到 300 ~ 110 °C 时,换热系数急剧增大到 2 700

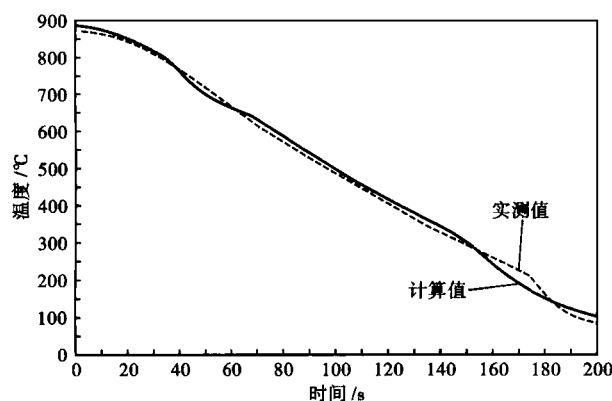


图8 计算与实测温度曲线

Fig.8 Calculated and measured temperature curve

$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 左右,这是因为在此阶段,换热系数由两部分组成,第一部分是汽化潜热、第二部分是随着钢轨表面的温度下降到低温阶段,雾水汽化的不够充分,使得残留下的雾水附着于钢轨表面与钢轨发生对流换热;当钢轨温度低于 $100^\circ C$ 后,温度低于淬火介质的沸点温度,沸腾停止,泡状沸腾阶段结束,进入单一的对流冷却,此时冷却速度较小,换热系数开始下降。

参考文献

- [1] Gao Ming-xin, Wang Pei-long, Hao Jia, et al. The Deformation Rule of the Cooled U75V Heavy Rail Caused by the Different Heat Transfer Coefficient [J]. Advanced Materials Research, 2011, 299-300: 1005-1011.
- [2] 黄鹏, 魏兴钊. 用三维有限元求解金属淬火过程的换热系数 [J]. 材料科学与工艺, 2008, 16(2): 204-206.
- [3] 何鹤林. 淬火冷却过程中的换热系数的计算 [J]. 现代制造工程, 2004(6): 68-69.
- [4] Malinowski Z, Cebo-rudnicka A, Telejko T, et al. Inverse Method Implementation to Heat Transfer Coefficient Determination Over the Plate Cooled by Water Spray [J]. Inverse Problems in Science and Engineering, 2015, 23(3): 518-556.
- [5] 陈赫明, 何天淳, 黄协清, 等. 高压气体淬火过程中热传导方程逆问题的求解 [J]. 材料热处理学报, 2001, 22(4): 81-83.
- [6] Cheng He-ming, Zhang Shu-hong, Wang Hong-gang, et al. Finite Element Analysis of Temperature Field With Phase Transformation and Non-Linear Surface Heat-Transfer Coefficient during Quenching [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1998, 19(1): 5-20.
- [7] Cheng He-ming, Xie Jian-bin, Li Jian-yun. Determination of Surface Heat-Transfer Coefficients of Steel Cylinder With Phase Transformation during Gas Quenching With High Pressures [J]. Computational Materials Science, 2004, 29(4): 453-458.
- [8] Kudinov V A, Eremin A V, Stefanyuk E V. Analytical Solutions of Heat-Conduction Problems With Time-Varying Heat-Transfer Coefficients [J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2015, 88(3): 688-698.
- [9] 曾京威, 李自良. 雾化气体淬火时表面综合换热系数的计算 [J]. 材料导报, 2013, 27(11): 151-154.

通过该方法计算得到如图 6(a) 的换热系数作为边界条件, 建立 DEFORM-3D 模拟计算耦合相变的温度场模型, 提出轨头 20 mm 处节点的冷却曲线如图 7(b) 所示, 模拟计算的冷却曲线与实测曲线对比如图 8 所示, 计算结果表明, 两者的结果非常一致。

3 结论

(1) 利用提出的方法计算换热系数, 可以将相变潜热以及诸多影响换热系数的因素耦合于有限元计算模型中, 换热系数通过 Python 计算机语言编制求解迭代程序得到。

(2) 将获得的换热系数作为热分析边界条件在 DEFORM-3D 软件中模拟淬火温度场, 提取对应位置的冷却曲线与实测曲线进行比较, 结果表明用耦合了影响换热系数的诸多非线性因素的方法求解换热系数精度较高。

国家自然科学基金项目(51361021)、内蒙古自然科学基金项目(2012ZD09)和内蒙古高校基金(NJZZ12099)资助

- [10] Li Hui-ping, Zhao Guo-qun, Niu Shan-ting, et al. Inverse Heat Conduction Analysis of Quenching Process Based on Finite Element and Optimization Method [J]. Acta Metall Sinica, 2005, 41(2): 167-172.
- [11] 赵腾伦, 姚新军. ABAQUS6.6 在机械工程中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 157-159.
- [12] 张志扬. 钢轨余热淬火过程组织场及其弯曲变形的模拟研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2013.
- [13] 段金良. 钢轨冷却过程中温度场及弯曲变形数值模拟研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2012.
- [14] 宋华, 高明析, 贾昊, 等. U75V 重轨冷却过程的相变变形 [J]. 塑性工程学报, 2011, 18(3): 95-100.
- [15] 顾剑锋, 潘健生, 胡明娟. 淬火介质换热系数的计算机测算 [J]. 热加工工艺, 1998(5): 13-14.
- [16] 张立文, 朱大喜, 王明伟. 淬火冷却介质换热系数研究进展 [J]. 热处理学报, 2008, 33(1): 53-56.

陈林(1963-), 男, 硕士(北京科技大学), 教授, 材料加工数值模拟及组织控制研究。E-mail: chenlin39805@163.com
王慧军(1988-), 男, 硕士研究生, 钢轨淬火过程的组织性能控制研究。E-mail: wanghuijun2014@163.com

收稿日期: 2016-03-15