

U75V 钢 60AT 钢轨轧后空冷过程弯曲变形的演变

陈 林 王慧军 李泽远 刘宇雁
(内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010)

摘要 通过 Gleeble-3500 热模拟试验机测定了 U75V 钢 ($\% : 0.75\text{C}, 0.63\text{Si}, 0.95\text{Mn}, 0.025\text{P}, 0.004\text{S}, 0.26\text{Cr}, 0.05\text{V}$) 的 CCT 相变曲线, 利用 DEFORM-3D 有限元软件, 通过建立 60AT 钢轨轧后空冷过程中温度场、组织转变计算模型, 研究分析了 60AT 钢轨 150 ~ 700 s 轧后空冷过程中温度、组织对弯曲变形的影响。结果表明, 60AT 钢轨具有的大体表比轨腰对钢轨整体断面温度分布影响较大, 钢轨空冷 150 s 时, 60AT 钢轨断面上还未发生相变, 组织全部为奥氏体, 随着温度的降低, 空冷 650 s 时, 钢轨断面基本上珠光体转变量为 97.2%, 同时, 弯曲变形受组织转变影响较大, 终冷时, 钢轨在 Y 方向 (侧弯) 弯曲挠度 -0.07 mm, 即弯向轨底短边, 在 Z 方向 (正弯) 弯曲挠度为 0.228 mm, 即弯向轨头, 计算结果为钢轨矫直过程中的预弯提供参考。

关键词 U75V 钢 60AT 钢轨 轧后空冷 温度场 组织 挠度变形

Evolution of Bending Deformation of U75V Steel 60AT Rail during Air-Cooling Process after Rolling

Chen Lin, Wang Huijun, Li Zeyuan and Liu Yuyan
(School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

Abstract The continuous cooling transformation (CCT) curves of U75V steel ($\% : 0.75\text{C}, 0.63\text{Si}, 0.95\text{Mn}, 0.025\text{P}, 0.004\text{S}, 0.26\text{Cr}, 0.05\text{V}$) are measured by a Gleeble-3500 thermal simulation testing machine, and the calculated model for temperature field and structure transformation of 60AT rail during air-cooling process after rolling is established by using DEFORM-3D finite element software to study and analyze the effect of temperature and structure on bending deformation of 60AT rail during 150 ~ 700 s air-cooling process after rolling. Results show that the effect of great volume to surface-area ratio of rail waist of 60AT rail on distribution of temperature at whole rail section is larger, with rail air-cooling for 150 s, there is no phase transformation at section of 60AT rail and the structure is all austenite, with temperature dropping i. e. air cooling for 650 s, the 97.2% austenite at rail section transfers to pearlite, besides the effect of structure transformation on bending deformation of rail is larger, at end air-cooling the bending deflection of rail in Y-direction (lateral bending) is -0.07 mm, i. e. the bending is toward rail bottom short edge, and the bending deflection of rail in Z-direction (positive bending) is 0.228 mm, i. e. the bending is toward rail head. The calculation results are available for reference of pre-bending in rail straightening process.

Material Index U75V Steel, 60AT Rail, Air-Cooling after Rolling, Temperature Field, Structure, Deflection Deformation

铁路运输线路是由路基、轨道、道岔和桥梁隧道等部分组成的一个整体工程, 其中道岔是铁路轨道设备的一个重要组成部分。随着我国铁路运输向高速、重载荷、高车流密度、大运量方向发展, 原有的 U75V 材质钢轨难以满足使用要求, 急需高强度处理钢轨, 作为道岔轨部分已采用特种断面钢轨 (简称为 AT 型钢轨) 来制作, AT 型钢轨制作的道岔具有刚度大、耐磨性好、安全、寿命长等优点^[1-2]。

U75V 钢 60AT 钢轨轧后冷却过程中弯曲变形对下道工序→矫直的质量影响是至关重要的, 因此本文通过 DEFORM-3D 有限元软件把二者耦合在一起进行计算, 研究分析 60AT 钢轨轧后空冷过程中温度场、组织场对弯曲变形的影响, 定量描述了 60AT U75V 钢轨空冷工程中弯曲变形的演变规律, 以提高 60AT 钢轨的质量^[3-5]。

U75V 钢 60AT 钢轨与普通的 60 kg/m 断面尺寸, 如图 1 所示。由图 1 可知, 60AT 钢轨其断面的不对称性和大体表比轨腰对温度场分布产生较大影响, 不可避免地会对 60AT 钢轨的温度场、弯曲变形、微观组织的转变、应力场的分布造成较大影响, 因此, 研究 60AT 钢轨轧后冷却过程弯曲变形规律, 为对矫直变形过程中残余应力、平直度最小化控制策略起着十分重要的作用^[6-8]。

1 计算模型的建立

U75V 钢化学成分如表 1 所示, 利用 DEFORM-3D 有限元软件模拟组织相变, 首先应测定材料的 CCT 曲线, CCT 曲线在 Gleeble-3500 热模拟试验机上进行, 如图 2 所示。

利用有限元软件 ABAQUS 对空冷的 60AT 钢轨进行换热系数的求解, 具体方法及 U75V 的物理参

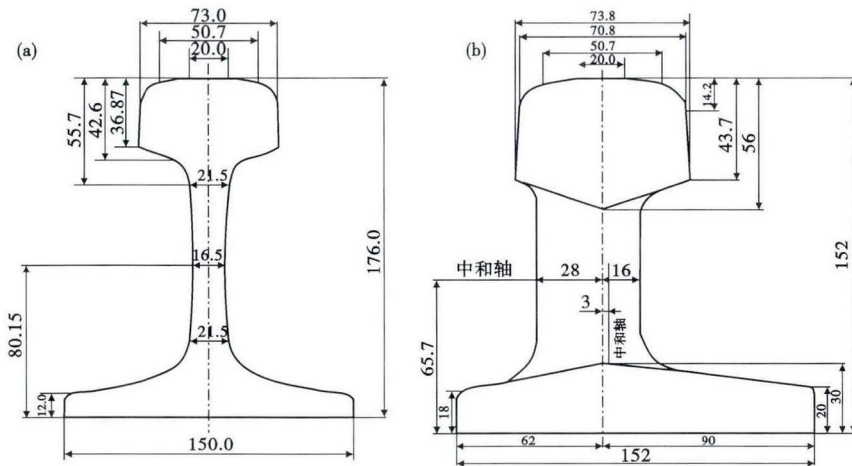


图 1 (a)普通 60 kg/m 钢轨,(b)60AT 道岔钢轨的断面示意图

Fig. 1 Schematics of Section of (a) common 60 kg/m rail and (b) 60AT turnout's rail

表 1 U75V 钢轨化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of U75V rail / %

C	Si	Mn	P	S	V	Cr
0.75	0.63	0.95	0.025	0.004	0.05	0.26

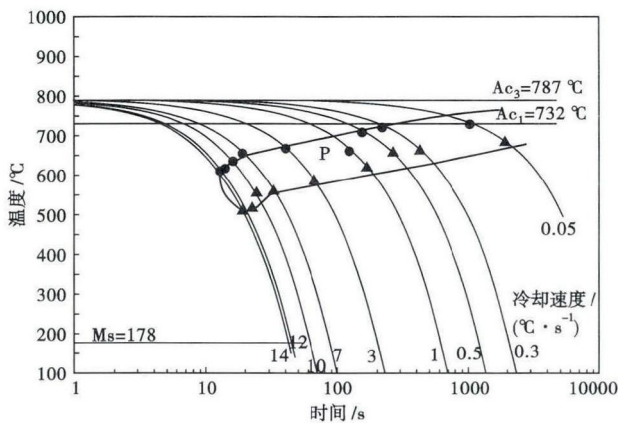


图 2 U75V 钢连续冷却转变 (CCT) 曲线

Fig. 2 Continuous cooling transformation (CCT) curves of tested U75V steel

数见文献[9]。相变过程是一个应力、应变和相变三者相互作用的复杂动态过程,对于 AT 钢轨这种复杂断面且非对称钢轨来讲,其在轧后空冷过程的弯曲变形要比对称钢轨的变形更为复杂,因此在考虑轧后空冷的变形规律应考虑应力对相变的影响,采用 Greenwood-Johnson 模型考虑应力对相变塑性的影响,关于相变塑性的计算见文献[6],将应力对相变的影响作用耦合于相变塑性相关系数 K 值中进行考虑。同时应考虑重力对 Z 方向挠度的影响,珠光体、铁素体相变考虑为扩散型相变,马氏体相变为非扩散型相变过程,建立珠光体应力、应变及相变的计算模

型。然后建立长度为 1 000 mm 的全断面 60AT 钢轨的 1/2 几何模型,进行模拟计算。

2 轧后空冷过程中温度、组织、应力分析

轧后空冷过程中不同时刻 x 面(即模型中间断面)的温度、组织、纵向应力云图如图 3。由图 3 中可以看出,60AT 钢轨轧后空冷过程可分为相变前阶段、相变中阶段和相变后阶段,温度分布规律均呈现有规律的层状分布,如图 3(a)(d)(g)(h)中黑色相对高温区从钢轨空冷开始直到空冷结

束均温度分布在轨头和轨腰处,且形成一个整体,60AT 钢轨轨腰对中间断面温度分布有很大影响;组织场的变化规律基本上随温度场的变化情况一致,都呈层状分布,只是钢轨相变时间短且快,温度变化时间较慢。在 60AT 钢轨轧后空冷过程中,由于钢轨内部温度场分布的不均匀和组织场转变的不同时,产生了一定的热应力和相变应力,应力场的分布基本上遵循一个规律,即分布呈层状,正在发生或者刚刚完成奥氏体向珠光体转变的部位为压应力,其余的部位为拉应力。

综合图 3,可以得出 60AT 道岔钢轨轧后空冷过程中模型中间断面上珠光体转变量随时间的变化曲线如图 4 所示。

由图 4 可以看出,60AT 轧后空冷过程中模型中间断面上珠光体转变从第 150 s 后开始,首先珠光体转变集中在钢轨轨头四棱边及轨底部分,直到第 350 s 时转变量曲线较平缓,说明珠光体转变较少,200 s 内珠光体转变量从 0 平缓增加到 22.1%。从第 350 s 后到第 650 s 时,由于轨头轨腰温度下降,珠光体转变开始,所以转变量曲线斜率增大,在 300 s 的时间内模型中间断面上的珠光体转变量从 22.1% 快速增加到 97.2%。在第 650 s 后到第 700 s 时,模型中间断面上只有少量奥氏体未向珠光体转变,且集中在钢轨的轨头和轨腰的心部,因此珠光体转变曲线又趋于平缓,550 s 内钢轨整个截面的珠光体转变量达 97.2%。

3 钢轨轧后空冷弯曲变形分析

60AT 钢轨轧后空冷过程中的弯曲变形计算方

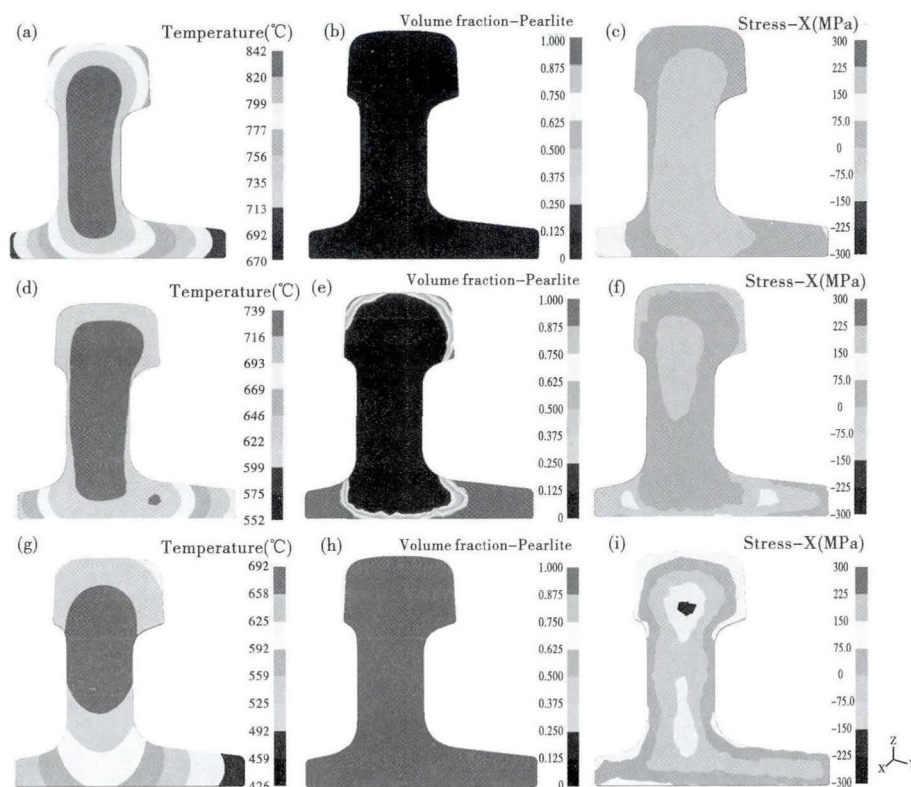


图 3 60AT 钢轨轧后空冷过程断面温度 (a) (d) (g), 组织 (b) (e) (h) 和纵向应力 (c) (f) (i) 云图, 空冷时间: (a) (b) (c) 150 s; (d) (e) (f) 350 s; (g) (h) (i) 700 s

Fig. 3 Cloud graph of temperature (a) (d) (g), structure (b) (e) (h) and longitudinal stress (c) (f) (i), air-cooling time: (a) (b) (c) 150 s; (d) (e) (f) 350 s; and (g) (h) (i) 700 s of 60AT rail in air-cooling process after rolling

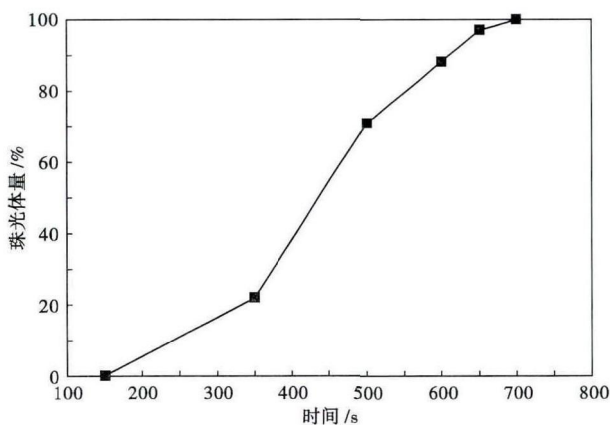


图 4 60AT 钢轨轧后空冷过程中中间断面珠光体转变量

Fig. 4 Percentage of transformed pearlite at middle section of 60AT rail in air-cooling process after rolling

法如图 5 所示。其中 Q1 点位于 60AT 钢轨模型中间断面的轨头表面中心点上, Q2 点位于 60AT 钢轨模型端部面的轨头表面中心点上, 所以有:

$$S_y = S_y^{Q2} - S_y^{Q1} \quad (1)$$

式中: S_y - 60AT 钢轨模型在 y 方向的挠度; S_y^{Q1} - Q1 点在 Y 方向的挠度; S_y^{Q2} - Q2 点在 Y 方向的挠度。

$$S_z = S_z^{Q2} - S_z^{Q1} \quad (2)$$

式中: S_z - 60AT 钢轨模型在 Z 方向的挠度; S_z^{Q1} - Q1 点在 Z 方向的挠度; S_z^{Q2} - Q2 点在 Z 方向的挠度。

因此, 当 $S_y > 0$ 时, 即表明 60AT 钢轨弯向轨底长边方向, 当 $S_y < 0$ 时, 即表明 60AT 钢轨弯向轨底短边方向; 当 $S_z > 0$ 时, 即表明 60AT 钢轨弯向轨头方向, 当 $S_z < 0$ 时, 即表明 60AT 钢轨弯向轨底方向。

在 DEFORM-3D 有限元仿真软件里首先提出各时刻 P1 点在 Y 方向, Z 方向的挠度和 P2 点在 Y 方向, Z 方向的挠度的数据, 即有了 S_y^{Q1} , S_y^{Q2} , S_z^{Q1} 和 S_z^{Q2} , 再依据式(1)和式(2)计算出 60AT 钢轨模型在 Y 方向, Z 方向的挠度, 绘出曲线, 如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 60AT 钢轨空冷过程无论是在 Y 方向的弯曲变形还是在 Z 方向的弯曲变形均经历了 3 次转变, 且变化非常明显, 60AT 钢轨的弯曲变形与其温度场变化和组织的转变有着十分密切的联系。

对于钢轨 Y 方向的弯曲变形, 由图 6 可以看出, 在钢轨轧后空冷的初期, 也就是相变前阶段, S_y 的

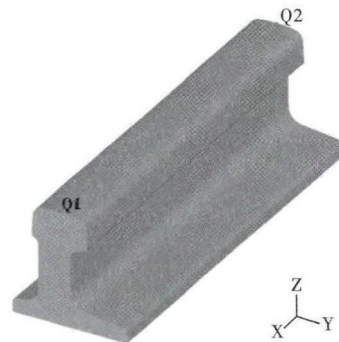


图 5 60AT 钢轨轧后空冷弯曲变形计算方法示意

Fig. 5 Schematics of calculation method for bending deformation of 60AT rail in air-cooling process after rolling

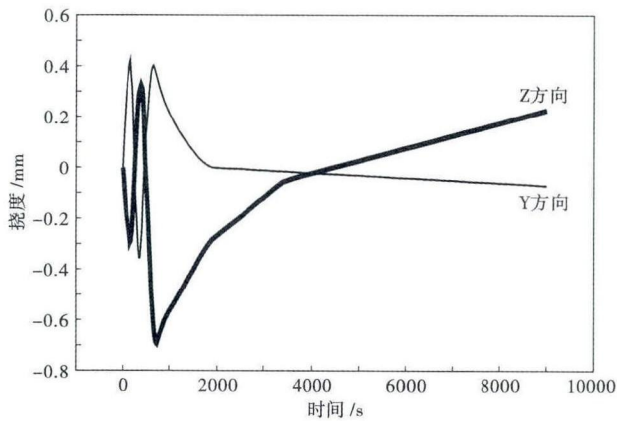


图6 60AT钢轨模型空冷过程弯曲挠度

Fig. 6 Bending deflection of 60AT rail model in air-cooling process

值在0~150 s是大于0且呈上升趋势,说明钢轨首先向轨底长边弯曲,在第150 s时达到最大,其值为0.429 mm,此时结合150 s时60AT钢轨轧后空冷的温度和组织云图图3(a)、图3(b)可以看出,由于第150 s时60AT钢轨奥氏体向珠光体组织转变尚未开始,钢轨轨底长边的温度因其体表较小且小于钢轨轨底短边的温度,所以轨底长边部位的体积收缩速率也比轨底短边的快,造成60AT钢轨在这一时间段内向轨底长边弯曲。

S_y 的值在150~350 s是呈下降趋势发展,且由正变负,说明在这个时间段内60AT钢轨由向轨底长边弯曲逐渐变形到向轨底短边弯曲,在第350 s时达到极值-0.354 mm,此时结合350 s时60AT钢轨轧后空冷的温度和组织云图图3(d)、图3(e)可以看出,在第350 s时60AT钢轨的轨底长边和轨底短边基本上均已完成奥氏体向珠光体转变,在这个时间段的转变过程中,由于轨底长边部分所占体积量较轨底短边部分所占体积量要多,轨底长边珠光体转变体积膨胀量必然大于轨底短边,所以60AT钢轨在150~350 s时要向轨底短边弯曲,此时段温度下降引起的热胀冷缩等因素已不再是影响钢轨Y方向弯曲变形的主要因素。

S_y 的值在350~650 s是呈上升趋势发展,且由负变正,说明在这个时间段内60AT钢轨由向轨底短边弯曲又逐渐变形到向轨底长边弯曲,在第650 s时达到极值0.404 mm,在350~650 s钢轨模型中间断面上的珠光体转变主要发生在轨头和轨腰处,到第650 s时珠光体转变基本上已经接近完成,而轨底长边温度下降速度比轨底短边要快,导致60AT钢轨向轨底短边弯曲,此时间段温度下降引起的热

胀冷缩等又成为影响钢轨弯曲变形的主要因素。

S_y 的值在650~9000 s是呈先快速下降后缓慢下降的趋势发展,说明在这个时间段内60AT钢轨又由向轨底长边弯曲逐渐变形到向轨底短边弯曲,在第9000 s时达到-0.07 mm,可见其最终向轨底短边弯曲的变形量较小,此时结合700 s时60AT钢轨轧后空冷的温度和组织云图图3(g)~图3(i),在这个时间段内首先快速下降是由于轨底短边温度相对较高,冷速较快,所以钢轨快速向轨底短边弯曲,而后面缓慢下降是由于轨底长边和轨底短边温度差逐渐减小,但是轨底短边冷速还是较轨底长边快,因此出现了60AT钢轨继续向轨底短边弯曲但变化缓慢的现象,在这个时间段内温度下降引起的热胀冷缩等因素还是影响钢轨弯曲变形的主要因素。

由图4可以看出,在钢轨轧后空冷的初期,即相变前阶段, S_z 的值在第0~150 s是小于0且呈下降的趋势发展,说明在这个时间段内60AT钢轨是向轨底弯曲,在第150 s达到极值-0.296 mm,此时结合150 s时60AT钢轨轧后空冷的温度和组织云图图3(a)、图3(b)可以看出,在第0~150 s内60AT钢轨奥氏体向珠光体组织转变尚未开始,而轨底冷速大于轨头冷速,轨底的温度明显要小于轨头的温度,因此轨底部分收缩较快,在热应力的影响之下钢轨首先向轨底弯曲。

S_z 的值在150~350 s是呈上升趋势发展,且由负变正,说明在这个时间段内60AT钢轨由向轨底弯曲逐渐变形到向轨头弯曲,在第350 s时达到极值0.326 mm,此时结合350 s时60AT钢轨轧后空冷的温度和组织云图图3(d)、图3(e)可以看出,在第350 s时60AT钢轨的轨底长边和轨底短边基本上都已经完成奥氏体向珠光体转变,而轨头部分还刚刚处于奥氏体向珠光体转变的开始阶段,在这个转变过程中,由于轨底部位奥氏体向珠光体转变的部分较多,轨头较少,轨底珠光体转变体积膨胀量必然大于轨头,所以60AT钢轨在150~350 s时要向轨头弯曲,此时段温度下降已不是影响钢轨Z方向弯曲变形的主要因素。

S_z 的值在350~750 s是呈下降的趋势发展,且由正变负,说明在这个时间段内60AT钢轨由向轨头弯曲又逐渐变形到向轨底弯曲,在第750 s时达到极值-0.694 mm,此时结合350~700 s钢轨模型中间断面上的珠光体转变轨底已经完成,且主要发生在轨头和轨腰处,到第700 s时珠光体转变基本上已经完成,所以由于这种轨头的相变,体积膨胀,导

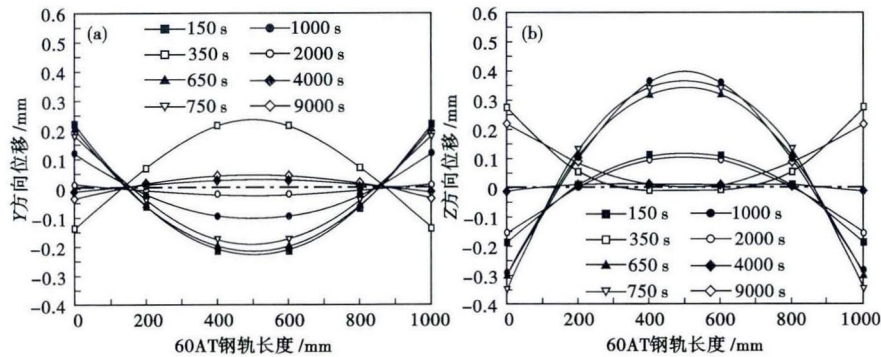


图 7 60AT 钢轨轧后空冷过程 Y 方向(a)和 Z 方向(b)的弯曲变形曲线

Fig. 7 Curves of bending deformation of 60AT rail in air-cooling process after rolling in Y-direction (a) and Z-direction (b)

致 60AT 钢轨向轨底弯曲,在这个时间段内相变因素仍然是影响钢轨 Z 方向变形的的主要因素,这点与 Y 方向变形的影响因素不同。

S_z 的值在 700 ~ 9000 s 是呈先快速上升后缓慢上升的趋势发展,说明在这个时间段内 60AT 钢轨又由向轨底弯曲逐渐变形到向轨头弯曲,在第 9000 s 时达到 0.228 mm,此时结合 700s 时 60AT 钢轨轧后空冷的温度和组织云图图 3(g) ~ 图 3(i) 可以看出,在这个时间段内首先快速上升是由于轨头温度相对较高,冷速较快,所以钢轨快速向轨头弯曲,而后面缓慢上升是由于轨底和轨头的温度差逐渐减小,但是轨头的冷速还是较轨底快,因此出现了 60AT 钢轨继续向轨头弯曲但变化缓慢的现象,在这个时间段内温度下降成为影响钢轨 Z 方向弯曲变形的的主要因素。

综上所述,60AT 钢轨在 Y 方向和 Z 方向弯曲变形的规律、极值出现时间和影响因素均大致相同,只是数值的大小不同和极值的正负相反。轧后空冷终冷后,60AT 钢轨在 Y 方向的挠度较小,Z 方向的挠度较大,在 Y 方向(侧弯)弯曲挠度 -0.07 mm,即弯向轨底短边方向,在 Z 方向(正弯)弯曲挠度为 0.228mm,即弯向轨头方向。

60AT 钢轨轧后空冷后,无论在 y 方向还是在 z 方向的弯曲变形均可近似成一种圆弧状态,为了直观的反应 60AT 钢轨的弯曲变形情况,本文在 1000 mm 长 60AT 钢轨模型上每隔 200 mm 处取一关键点提取弯曲变形数据,共取了 P1 ~ P6 六个点,然后定量画出其在轧后空冷过程中不同时刻 Y、Z 方向的弯曲变形曲线,如图 7(a,b)所示。

4 结论

(1) 60AT 钢轨空冷过程分为相变前阶段、相变

中阶段和相变后阶段,在 60AT 钢轨空冷过程中,温度分布基本呈有规律的层状,这与 60AT 钢轨非对称断面形状有关,黑色相对高温区从钢轨空冷开始直到空冷结束,主要分布在轨头和轨腰处,其主要原因在于 60AT 钢轨所具有的大体表比轨腰对钢轨整体断面温度分布影响较大。

(2) 弯曲变形受组织转变影响较大,终冷时,在以 1000

mm 长的钢轨为计算模型时,在 Y 方向(侧弯)弯曲挠度 -0.07 mm,即弯向轨底短边方向,在 Z 方向(正弯)弯曲挠度为 0.228 mm,即弯向轨头方向。

国家自然科学基金项目(51361021)和包头市科技计划项目(2015ZZ2010-2)资助

参考文献

- [1] 侯丙盛. 60AT 型尖轨端锻造过程有限元模拟与分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [2] 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.
- [3] Gao Mingxin, Wang Peilong, 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.
- [4] Liu Yuyan, Wang Yan, Chen Lin. Numerical Simulation Analysis in Cooling Temperature Field and Bending Deformation After Rolling of 100-Meter rail[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 121-126: 4523-4527.
- [5] Gao Mingxin, Hao Jia, Jiang Juanjuan. The Effect of Initial Cooling Temperature on Deformation of U75V Heavy Rail After Cooling[J]. Advanced Engineering Forum, 2011, 2-3: 667-672.
- [6] 陈林, 常国, 李泽远. 应力对 U75V 重轨钢珠光体转变的相变塑性影响[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(5): 105-110.
- [7] Chen Lin, Li Zeyuan, Chang Guo, et al. Simulation Analysis on Temperature Field and Microstructure Field of 60AT Rail in Air Cooling[J]. Journal of Metallurgical Engineering (ME), 2014, 3(2): 78-83.
- [8] Chen Lin, Zhang fang, Zhang Zhiyang. Organization Simulation Analysis of the U75V Cooling Process[J]. Journal of Metallurgical Engineering (ME), 2014, 3(1): 48-51.
- [9] 陈林, 王慧军, 陈昆宇, 等. 基于有限元法计算重轨钢轨淬火过程的换热系数[J]. 特殊钢, 2016, 36(4): 13-17.

陈林(1963-), 男, 硕士(北京科技大学), 教授, 内蒙古科技大学(本科)毕业, 材料加工数值模拟及组织控制。
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。E-mail: wanghuijun2014@163.com

收稿日期: 2016-08-29