

中厚板控冷过程的数值模拟与冷却变形分析

王峰丽 李谋渭 张少军 王邦文
(北京科技大学机械工程学院 北京 100083)

丁德洲
(鞍钢新轧钢股份有限公司)

于晓光
(鞍山科技大学)

摘要: 介绍了采用热弹塑性有限元法进行钢板冷却过程数值模拟的基本原理并进行中厚板横向冷却变形分析。以高密集射流冷却时钢板表面的对流换热边界为基础, 采用有限元法对钢板冷却过程的温度场和应力/应变场进行数值模拟, 对模拟得到的温度时间历程曲线和应力及塑性应变的变化进行比较, 分析钢板横向变形的主要原因, 并提出改善措施, 为采用适当工艺措施使中厚板控冷获得平直板形提供了理论基础。

关键词: 中厚板 控制冷却 数值模拟 有限元法 横向变形

中图分类号: TG335.11

0 前言

中厚板控制冷却的工艺要求, 除获得完善的性能外, 平直的板形是冷却设备实用化的关键。由弹塑性基本原理知道, 钢板冷却过程中引起翘曲的内在因素是相变、屈服应力和导热系数, 其诱导因素则是不均匀冷却。而影响冷却均匀的原因很多, 在采用同一种冷却方式的前提下, 诸如钢板自身条件(冷却前的板形和表面质量)、冷却区长度、上下集管水量比、纵向集管分布间距和横向射流间距等都对钢板的变形产生不同程度上的影响^[1]。采用数值模拟方法分析钢板横向变形的主要原因, 为中厚板控冷获得平直板形提供了理论基础。

1 热弹塑性有限元的基本原理

钢板控冷过程不存在外载荷, 引起热应力和热变形的原因是温度分布不均匀, 各点的膨胀量不同, 因此钢板控冷过程的应力/应变属于热弹性或热弹塑性问题。当应力超过材料的屈服应力后, 应力—应变关系呈非线性, 即应变不仅取决于当时的应力状态, 还与整个加载历史有关。在处理弹塑性问题时, 采用了几个假设^[2~5]: 塑性变形的体积不变定律; 材料服从 Mises 屈服准则, 还显示各向同性强化; 塑性区的行为服从流动法则; 与温度有关的机械性能、应力应变在微小的时间增量内线性变化。

若材料的弹性模量 E 、泊松比 μ 和热膨胀系数 α 都是温度 T 的函数, 则在弹性区域内, 全应变增量

由弹性应变增量和温度应变增量组成, 即

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_e + \Delta \varepsilon_T = \Delta \varepsilon_e + \alpha \Delta T \quad (1)$$

根据虎克定律, 并考虑弹性矩阵 e 是温度 T 的函数, 计算出

$$\Delta \sigma = e(\Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon_T) \quad (2)$$

$$\text{式中 } \Delta \varepsilon_T = \left(\alpha + \frac{\Delta e}{dT} \sigma \right) \Delta T$$

在塑性区, 全应变增量由弹性应变增量、塑性应变增量和温度应变增量组成

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_e + \Delta \varepsilon_p + \Delta \varepsilon_T \quad (3)$$

塑性区域内应力应变关系的增量表达式为

$$\Delta \varepsilon = e_{ep}(\Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon_T) + \Delta \sigma_T \quad (4)$$

式中 e_{ep} ——弹塑性矩阵

$$e_{ep} = e - e_p$$

$$e_p = \frac{e \frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial \sigma} \left(\frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial \sigma} \right)^T e}{H' + \left(\frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial \sigma} \right)^T e \frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial \sigma}}$$

$$\Delta \sigma_T = \frac{e \frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial \sigma} \frac{\partial H}{\partial T} dT}{H'_T + \left(\frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial \sigma} \right)^T e \frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial \sigma}}$$

$$H'_T = \frac{\partial H}{\partial \varepsilon_p}$$

2 中厚板冷却的数值模拟

2.1 某厂钢板冷却装置组成简介

该厂中厚板轧后控冷装置(图 1)由上集管、下集

管、侧吹装置、前后水封和气封等基本设备组成，冷却区入口、出口处分别装有红外测温仪，可以将开冷温度、终冷温度和返红温度在线输入计算机系统。针对不同厚度的钢板和不同的热处理工艺，采取不同的冷却制度(集管的开启组数和钢板速度)。

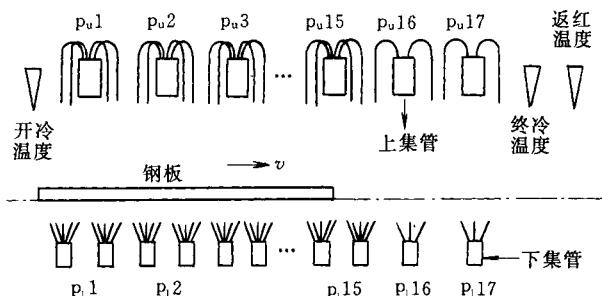


图 1 某厂冷却装置组成示意图

2.2 数值模拟的建模过程

在研究钢板应力应变场时，为了提高模拟的求解效率，降低节点数，进行二维有限元模拟，取钢板纵向(长度方向)中心处的一个截面进行研究，该截面的几何条件为：板宽 2 m，板厚 32 mm。采用四节点平面单元划分映射网格，钢板上下表面受到冷却水射流冲击发生换热，表面温度梯度比心部大，因此在网格划分时采用表面密心部疏的方法，其几何与分网模型示意图如图 2 所示。

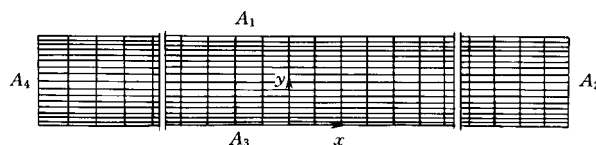


图 2 钢板的几何与分网模型

(1) 定解条件

- ① 几何条件: $-b/2 \leq x \leq b/2$, $0 \leq y \leq \delta$ (b 为板宽, δ 为板厚)
- ② 初始条件: $t = 0$, $T(x,y)$ 为开冷温度
- ③ 边界条件: 钢板上表面 A_1 受到上集管射流冲击或流水冷却, 下表面 A_3 受下集管射流冲击冷却, 侧面 A_2 、 A_4 为流水冷却, 其边界条件均为第三类边界。

(2) 物理条件

在钢板温度和应力/应变的有限元计算中，为获得准确的模拟结果，考虑材料的物理性能随温度变化。对于试验，用高强度低合金钢 Q345B(GB/T 1591—94)^[6]，其成分中 C、Mn、Si 元素的质量分数接近于 16Mn 钢，性能指标也接近于 16Mn 钢，在对其进行有限元数值模拟时，参照 16Mn 的物性参数，如表 1 所示^[7,8]。钢板冷却过程中温度变化很大，计算瞬态值时根据表中的数据使用插值法求得相应温度下的属性值。

表 1 16Mn 钢的物性参数

温度 $\theta/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	比定压热容 $c_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	热导率 $\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	泊松比 μ	弹性模量 E/GPa	热膨胀系数 $\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$	切变模量 G/GPa
100		481	42.95		201	8.31	75
200		508	41.02		191	10.99	72
300		530	38.23		181	12.31	—
400		560	35.74		171	13.22	—
500	7 840	605	33.20	0.33	162	13.71	—
600		680	30.81		153	13.94	—
700		824	29.39		144	14.00	—
800		1360	38.38		135	14.04	—
900		718	25.39		126	14.06	—

(3) 模拟过程

为使数值模拟真实反应控冷过程，通过对钢板表面对流换热边界条件的分析，考虑钢板在整个冷却过程中要经历空冷—水冷—空冷三个阶段，以此定义模拟程序中的载荷步。而钢板在水冷区的冷却过程，根据钢板通过冷却区的速度分别计算不同冷却方式的作用时间，采用了分步循环加载的方法。

对钢板冷却过程应力应变场的 ANSYS 模拟，采用热应力分析的间接耦合法，即先进行热分析，求出温度场，然后将求得的节点温度作为体载荷施加在结构应力的分析中。结构分析的基本程序如下所示：

```

/prep7
etchg, tts
mptemp, 1, 100,200,300,400,500,600
mptemp, 7, 700,800,900
mpdata, ex, 1, 1, 2.01e11, 1.91e11, ...
mpdata, alpx,1,1, 8.31e-6, 10.99 e-6, ...
mp, nuxy, 1,0.33
finish
/solu
tref,25
ldread,temp,,,time1,,,rth
time,time1
    
```

```

solve
save
steptime12=0.2
step2=(time2-time1)/steptime12
*do,i,1,step2
subtime2=time1+steptime12*i
lread,temp,,subtime2,,rth
time,time1+steptime12*i
solve
save
*enddo
steptime13=2
step3=time3/steptime13
*do,i,1,step3
subtime3=time2+steptime13*i
lread,temp,,subtime3,,rth
time,time2+steptime13*i
solve
save
*enddo

```

2.3 模拟结果及分析

(1) 温度场模拟结果

图 3 为规格为 12 m×2 m×32 mm 的 Q345B 钢板，在钢板运行速度为 1 m/s 的工况下，有限元模拟得到的钢板上表面某点和心部相应点的温度时间历程曲线。

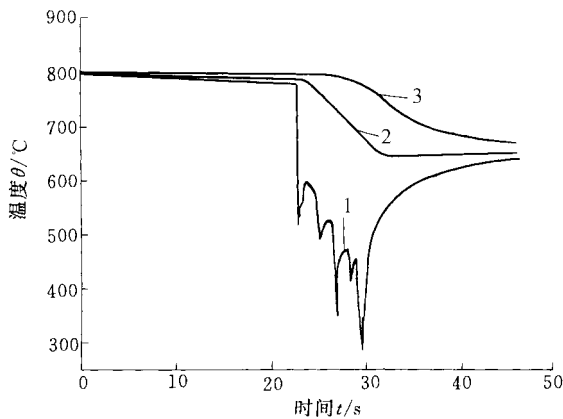


图 3 钢板控冷过程的温度时间历程曲线
1. 钢板上表面 2. 距上表面 1/4 处 3. 钢板心部

从图中看到，在水冷阶段，钢板上表面的温度变化曲线呈锯齿形，而心部温度的降低是一个连续平稳的过程。这是由于钢板上表面受冲击换热区、混合换热区和横向流水换热区三种换热载荷的周期性作用，存在温度的不断降低和回升，而心部温度变化是钢板内部导热的结果，变化相对平缓。水冷阶段结束后，钢板表面和心部的温度趋于一致，正是钢板返红的过程。

从此温度时间历程曲线可以很清楚地看出钢板冷却的温度变化过程。曲线上的一个个温度速降区域(锯齿的下降边)，是钢板上表面受冲击换热区作用的结果，也就是说，每一个温度速降区域对应钢板长度方向的一组集管。在第 15 组集管对应处存在一个比相邻集管冷却强度高的区域，这是因为在 14 和 15 组集管间设置了侧吹装置，将滞留在钢板表面的水层清除，使得 15 组集管射流的换热强度增强，从而使钢板在此处迅速降温的缘故。可以想象，每个上集管包含的射流组数越多，冲击区覆盖钢板的面积越大，扩大了高效冷却区的面积，提高了冷却能力。而且要获得理想冷却方式，可以通过此曲线来调整冷却制度，通过集管及其射流的合理配置，使整个冷却过程满足控冷工艺要求，达到改善钢材组织性能的目的。

(2) 应力/应变场结果分析

下面是在单组上集管水流率 192 m³/h，单组下集管水流率 180 m³/h，即上下集管水量比为 1：1.87(一组上集管对应两组下集管)工况下对钢板进行二维应力/应变模拟的计算结果。图 4 为 t = 23 s 时刻(进入水冷区 0.2 s)，以 y 方向位移 u_y 的等值云图形式记录的钢板变形情况。图 5 为刚进入水冷区(t=23s)时刻钢板厚度方向三个截面的等效应力沿板宽方向的分布。钢板冷却过程中的热应力是由截面温度差造成的，冷却速度越大，截面温差越大，产生的热应力越大。比较图 5 和图 4 看出，冷速最大的上表面等效应力最大，冷速最小的中心层等效应力最小。由于钢板上表面冷速大于下表面冷速，上表面的热应力大于下表面，则上表面比下表面收缩得快，因此造成钢板向快冷的上表面横向翘曲变形。

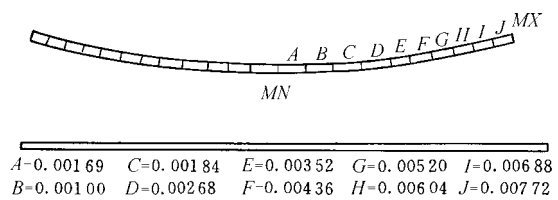


图 4 钢板进入水冷区 0.2 s 时的变形(m)

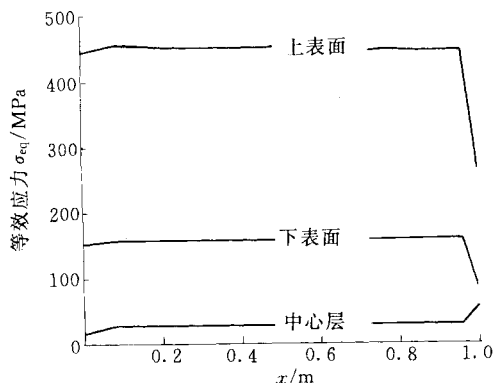


图 5 等效应力沿板宽方向分布

图 6 为控冷过程不同时刻钢板中心截面的 y 方向位移 u_y 沿板宽方向的分布变化情况。由图 6 和图 3 可知, 钢板一进入水冷区($t=23$ s)就产生了变形, 在刚出水冷区($t=29.8$ s)时刻变形达到最大值, 空冷阶段($t=35.5 \sim 44.4$ s)翘曲变形逐渐有所缓解, 但冷却结束仍存在不可恢复的塑性变形。图 7 为钢板上下表面和心部某处的应力和塑性应变随时间变化的计算结果。因为残余翘曲的大小由钢板冷却前的温度分布和冷却过程中板厚方向的塑性应变决定, 而冷却前钢板温度均匀分布, 所以塑性应变决定残余翘曲的大小。由图 7 b 知钢板上下表面的塑性应变差出现在水冷阶段的开始时间段, 即冷却初期就决定了钢板的残余翘

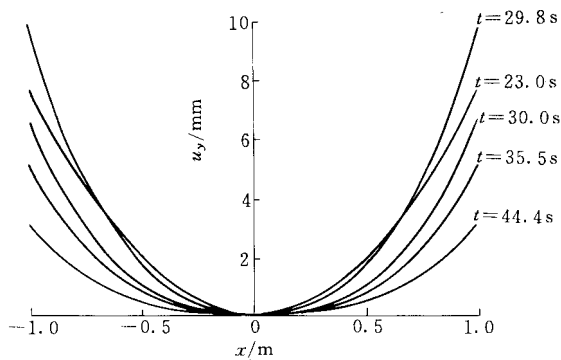
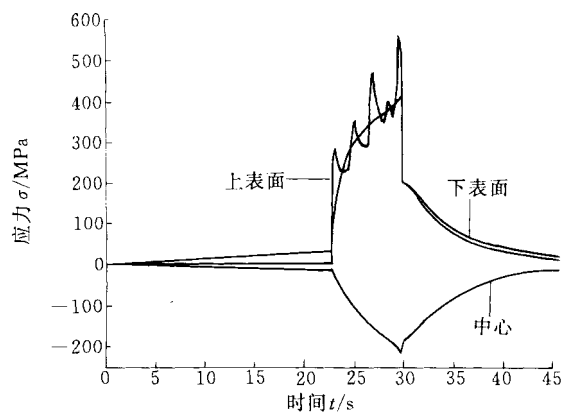
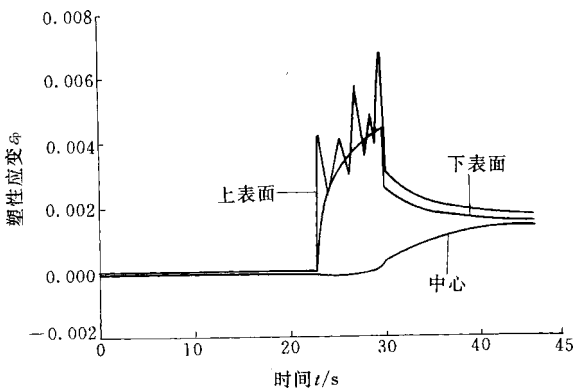


图 6 不同时刻 u_y 沿板宽方向分布



(a) 应力变化



(b) 塑性应变变化

图 7 钢板冷却过程应力和塑性应变的变化

曲。结合图 6 和图 7 知, 必须调整上下水量比, 尽量减小水冷开始时上下表面的应力和塑性应变差, 这是获得平直板形的前提。

3 钢板控冷过程的变形分析

钢板水冷后的变形很复杂, 变形形状也很多, 如耳波、前后端变形和整体歪。结合对钢板横向变形的有限元模拟结果, 分析中厚板在控冷过程出现的变形原因, 并提出相应的改善措施, 列入表 2。从表 2 的分析可以看出, 使冷却后钢板产生变形的主要原因是长度和宽度方向的冷却不均匀, 而对于厚度方向, 表面和心部的温度梯度对钢板的变形没有影响, 上下表面的冷却均匀性主要通过调节上下集管的水量比来达到。

表 2 钢板冷却变形原因分析

变形种类		
耳波	前后端变形	整体歪
宽度方向冷却不均匀	横向冷却不均匀 ①冷却方式不当	上下表面冷却不均匀(主要发生于厚板)
①钢板上下集管水量比不合适	②上板面存在冷却水的二次冷却, 钢板两端存在纵向流下冷却水的冷却, 钢板头部受到下喷水的冲击使冷却加快, 铲水现象是造成前后端变形的主要原因	①辊速增加使上板面冷却能力降低 ②板宽增大后使上板面冷却能力增强 ③冷却区长度不合适
改善措施	①同时冷却方式比连续冷却方式能增强长度方向冷却的均匀性 ②下集管射流方向向钢板前进方向倾斜, 增加辊速也能在一定程度上解决前后端变形, 设置前后吹扫装置	①增大上/下水量比 ②降低上/下水量比 ③适当增加冷却区长度, 不易产生整体歪

为使钢板获得平直的板形, 可采取以下措施:

①钢板宽度方向采用横向冷却强度曲线(中凸且左右对称)布置射流间距, 尽量采用边部遮蔽装置。②钢板上下水量比要适当, 一般在 1:2~3 左右。③在条件许可的情况下采用同时冷却方式, 在必须采用连续冷却方式的情况下可使钢板以匀加速方式通过冷却区。在现场实际操作中可协调各种影响因素, 达到控制钢板冷后板形平直的目的。

4 结论

对中厚钢板控冷过程的温度场进行有限元数值模拟表明, 在水冷阶段, 钢板上表面的温度变化曲线呈锯齿形, 心部温度的降低是一个连续平稳的过

程。相应的应力应变场的模拟结果显示, 当钢板上表面冷速大于下表面时, 上表面的内应力大于下表面, 则上表面比下表面收缩得快, 因此造成钢板向快冷的上表面翘曲。在冷却过程中, 钢板一进入水冷区就产生了变形, 在刚出水冷区时变形达到最大值, 空冷阶段翘曲变形有所缓解, 但冷却结束仍存在不可恢复的塑性变形。因此必须调整上下水量比使水冷结束时不存在残余变形, 这是钢板控冷后获得平直板形的前提。

参 考 文 献

- 1 钱振声. 控制冷却过程中影响钢板均匀冷却的因素及其控制. 宽厚板, 2000, 6(1): 1~6
- 2 谢贻权, 何福保. 弹性和塑性力学中的有限单元法. 北京: 机械工业出版社, 1982
- 3 王祖城, 汪家才. 弹性和塑性理论及有限单元法. 北京: 冶金工业出版社, 1983
- 4 Hamouda A M S, Sulaiman S, Lau C K. Finite element analysis on the effect of workpiece geometry on the quenching of ST50 steel. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 119: 354~360
- 5 吉原直武. 厚钢板控制冷却中的翘曲解析. 钢铁译文集, 2001 (1) : 62~68
- 6 贾沛泰. 国内外常用金属材料手册. 南京: 江苏科学技术出版社, 1994
- 7 谭真. 工程合金热物性. 北京: 冶金工业出版社, 1994
- 8 孙珍宝. 合金钢手册(第一分册, 下册). 北京: 冶金工业出版社, 1992

STUDY ON NUMERICAL SIMULATION OF CONTROLLED COOLING MEDIUM STEEL PLATE AND ANALYSIS ON ITS DEFORMATION

Wang Fengli Li Mouwei Zhang Shaojun

Wang Bangwen

(Beijing University of Science and Technology)

Ding Dezhou

(Aagang New Steel Co. Ltd)

Yu Xiaoguang

(Anshan University of Science and Technology)

Abstract: The basic theory of analyzing thermo-elasto-plastic behavior is described by finite-element method and the causes of transverse deformation are explained. Based on convective heat transfer boundary conditions of steel plates subjected to large density impingement jets, the thermal field of medium steel plate is computed numerically. And by the indirect coupling method of thermal stress, a mathematical model incorporating thermo-elasto-plastic behavior is developed to analyze the causes of plate deformation. Compared thermal stress with corresponding time-dependent temperature history, defective shapes can be prevented by the appropriate control of water flow ratio between top and bottom headers.

Key words: Medium steel plate Controlled cooling

Numerical simulation Finite element method

Transverse deformation

作者简介: 王峰丽, 女, 1971年出生, 博士研究生。主要研究方向为机电智能化系统。