

# 双相钢差厚板退火过程的温度场

柯迪文<sup>1</sup>, 刘相华<sup>1,2</sup>, 支颖<sup>1</sup>  
(1. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 研究院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 为了获得性能可控的冷轧双相钢差厚板, 需要了解其退火过程中的温度变化规律. 采用 ABAQUS 有限元软件模拟双相钢差厚板在退火过程中不同厚度处的温度分布, 结果发现, 当差厚板不同区域有相同的冷却速度时, 冷却速度越大, 厚区与薄区对流换热系数之比越接近差厚比, 从 2.12 变为 2.03, 且对流换热系数与冷却速度为线性关系; 当差厚板不同区域的冷却强度相同时, 随着冷速的增加, 差厚板薄、厚区温差增大, 从 124 ℃ 升至 141 ℃. 随着差厚板斜率的增加, 温度影响区长度增加.

**关 键 词:** 差厚板; 退火; 温度场; 有限元; 双相钢

中图分类号: TG 156.2      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2018)08-1118-05

## Temperature Field in Annealing Process of Dual-Phase Steel TRB

KE Di-wen<sup>1</sup>, LIU Xiang-hua<sup>1,2</sup>, ZHI Ying<sup>1</sup>  
(1. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Research Academy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Xiang-hua, E-mail: liuxh@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** To gain cold rolled dual phase steel TRB (tailor rolled blank) with controllable performance, the annealing temperature variation during annealing is necessary to know. The temperature distribution of dual-phase steel TRB at different thickness in the annealing process was simulated by the finite element software ABAQUS. The results showed that when the different areas in TRB is in same cooling rate, the bigger the cooling rate is, the less gap between the ratio of the convection heat transfer coefficient, which changes from 2.12 to 2.03, and the ratio of thickness is. The convection heat transfer coefficient is directly proportional to cooling rate. When cooling intensity is same in different areas in TRB, the temperature difference between thick and thin area increases from 124 ℃ to 141 ℃ with increased cooling rate. If the slope of TRB increases, the length of temperature affected zone increases.

**Key words:** tailor rolled blank; annealing; temperature-field; finite element; dual-phase steel

在现今资源日益紧张、环境问题日益突出的大环境下,世界各国对现有工业都提出了绿色环保、节能降耗要求,轻量化则是节能降耗的有效途径之一. 根据实际承载条件的变化采用变厚度板材<sup>[1]</sup>可以最大限度地节省材料而不降低使用性能. 轧制差厚板(tailor rolled blank, TRB)作为一种变厚度板材,能够起到良好的节材减重效果<sup>[2-5]</sup>.

双相钢差厚板兼顾差厚板节材的优点和双相钢低屈强比、高强度、高加工硬化率、良好的强塑匹配等优点会更加节省材料<sup>[6-7]</sup>. 双相钢差厚板的轧制问题已经解决<sup>[5]</sup>,但是双相钢差厚板的热处理工艺还需深入研究. 为了满足各种性能要求,双相钢差厚板在连续退火过程中的不同厚度区对应的退火工艺会不一样<sup>[8]</sup>. 而退火过程中的冷却工艺对差厚板温度的影响更明显,在冷却过程中在同一冷却强度下,差厚板的温度分布不均,而要使差厚板温度分布均匀,差厚板不同区域的冷却

强度就不同,这些都需要深入研究.故本文采用有限元方法模拟双相钢差厚板退火冷却过程的温度变化,获得了双相钢差厚板不同区域在相同冷却强度中的温度分布,分析了不同冷却速度对温度分布规律的影响.模拟了双相钢差厚板不同区域在冷却速度相同情况下,冷却速度和换热系数之间的关系.研究了不同形状差厚板冷却过程的温度分布规律.为制定和优化双相钢差厚板的退火工艺提供参考.

### 1 双相钢差厚板退火有限元模型

采用大型商业有限元软件 ABAQUS 计算差厚板的温度场.因轧制差厚板的宽度远远大于厚度,故近似按照二维传热问题处理.采用二维温度场计算模型,其钢板的内部传热方程为

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = \frac{\rho c}{\kappa} \frac{d\theta}{dt} \tag{1}$$

冷却过程的边界方程为

$$\kappa \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} l_x + \frac{\partial \theta}{\partial y} l_y \right) + h(\theta - \theta_\infty) + \varepsilon \sigma_b (\theta^4 - \theta_\infty^4) = 0 \tag{2}$$

式中: $\kappa$  为导热系数; $l_x, l_y$  为  $x, y$  方向的法向余弦; $h$  为对流换热系数; $\varepsilon$  为物体表面黑度; $\sigma_b$  为斯特潘玻尔兹曼常数; $\theta_\infty$  为环境温度.

#### 1.1 有限元模型

参照力学中的圣维南原理,认为远离过渡区

的部位其温度分布接近于等厚度板,故取轧制差厚板几何模型如图 1 所示,在上、下表面施加热交换边界,计算采用 DC2D4 单元,单元长、宽都约为 0.2 mm.

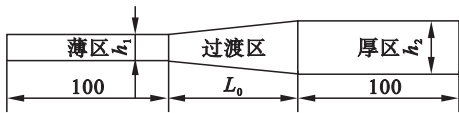


图 1 差厚板示意图  
Fig. 1 Explanatory views of tailor rolled blank

差厚板的差厚比为

$$D = h_1/h_2 \tag{3}$$

差厚板过渡区斜率为

$$\Delta = (h_2 - h_1):L_0 \tag{4}$$

各个试样的几何特征如表 1 所示.

表 1 试样的几何特征  
Table 1 Geometrical characteristics of samples

试样 编号	薄区厚 度 $h_1$ mm	厚区厚 度 $h_2$ mm	差厚比	过渡区 斜率	对比 参数
1 <sup>#</sup>	1.0	2.0	2	1:100	差厚比
2 <sup>#</sup>	1.0	1.5	1.5	1:100	
3 <sup>#</sup>	1.0	2.0	2	1:50	过渡区 斜率
4 <sup>#</sup>	1.0	2.0	2	1:25	

#### 1.2 计算条件

本文所用双相钢的成分(质量分数,%)为:C 0.102, Si 0.417, Mn 1.78, P 0.0148, S 0.0013, Al 0.040 1.双相钢的热物性参数<sup>[9]</sup>见表 2.

表 2 双相钢的热物性参数  
Table 2 Thermophysical properties of dual-phase steel

温度 $\theta/^\circ\text{C}$	25	50	100	150	200	300	400	450	800
热传导系数 $\lambda$ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	65.3	65.2	64.9	55.0	45.2	36.4	28.5	28.5	28.5
比热容 $c$ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	460	468	485	502	519	552	586	602	602

为数据处理和叙述方便,本文的冷却速度  $v_T$  是指差厚板薄区表面中点从 800  $^\circ\text{C}$  冷却到 50  $^\circ\text{C}$  时的平均冷却速度;把等厚区中与等厚区表面中点温度的温差大于 5  $^\circ\text{C}$  的区域称为过渡区温度影响区,其长度称为温度影响区长度  $L_T$ ;本文所述薄区(厚区)温度指的是薄区(厚区)上表面中点的温度.

模拟研究的方案及步骤如下:

1) 1<sup>#</sup>差厚板试样:模拟双相钢差厚板冷却强度相同时,冷却速度对双相钢差厚板温度场的影

响.模拟工艺为:差厚板薄区从 800  $^\circ\text{C}$  冷却到 50  $^\circ\text{C}$ ,薄区到达 50  $^\circ\text{C}$  即计算终止;冷却速度分别为 10,20,30,40,50 和 60  $^\circ\text{C}/\text{s}$ .同时测量空冷过程的温度变化并与模拟空冷的结果进行对比.

2) 1<sup>#</sup>差厚板试样:模拟双相钢差厚板冷却速度相同时,不同厚度区域的冷却强度和冷却速度的关系.过渡区采用薄、厚区冷却强度的线性插值.冷却速度分别为 10,20,30,40,50 和 60  $^\circ\text{C}/\text{s}$ .

3) 分析差厚板几何特征对差厚板冷却过程温度场的影响,对比不同差厚比的 1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>试样和

不同斜率的 1<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>,4<sup>#</sup>试样在相同冷却强度下的温度场.

## 2 双相钢差厚板冷却过程温度场的模拟结果及分析

### 2.1 空冷过程的模拟与验证

按方案 1) 模拟 1<sup>#</sup> 试样空冷过程的温度变化, 获取薄、厚区的温度变化曲线.

将厚度为 1 ~ 2 mm 的冷轧双相钢差厚板剪成如图 2 所示形状, 其纵向截面几何参数见表 1 中 1<sup>#</sup> 试样, 并在薄区和厚区中心焊接热电偶. 然后将钢板放入 800 ℃ 的马弗炉中, 待温度稳定后, 从炉中取出钢板, 空冷, 记录空冷过程温度变化.

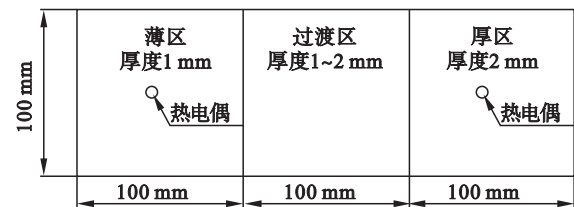


图 2 实验用差厚板形状

Fig. 2 Experimental tailor rolled blank

实验和模拟的温度变化曲线如图 3 所示. 从图中可见两者符合较好, 最大偏差不超过 20 ℃, 说明模拟计算准确, 后续模拟计算可信度高.

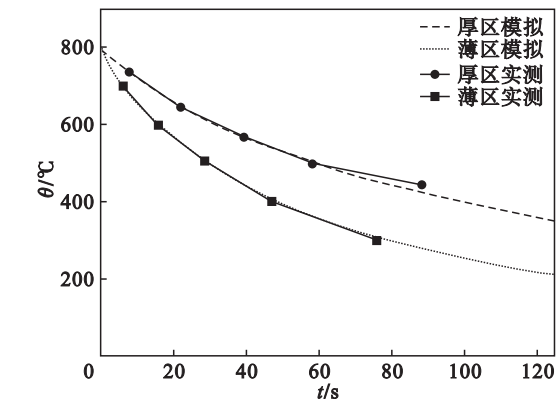


图 3 差厚板空冷过程模拟和实测对比

Fig. 3 Comparison of air cooling process between simulation and experiment

### 2.2 冷却速度对温降过程的影响

按照方案 1) 的条件进行模拟, 获得了在相同冷却强度下的差厚板的温度场分布.

当薄区温度到达 50 ℃ 时, 计算终止, 不同冷却速度条件下的薄、厚区温差见图 4. 冷却过程中差厚板心表温差小于 10 ℃, 可以忽略.

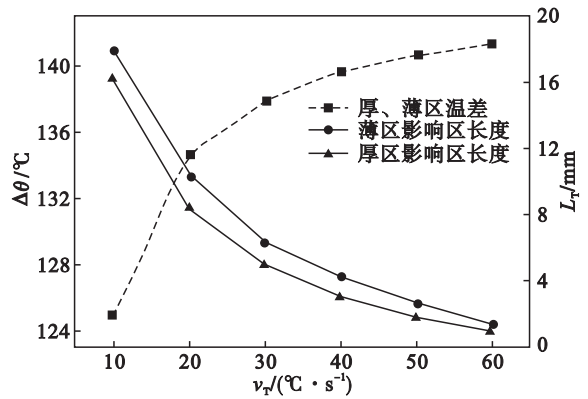


图 4 冷却速度对温度场的影响

Fig. 4 Temperature field affected by cooling rate

从图 4 中可见, 随着冷却速度从 10 ℃/s 增加到 60 ℃/s, 薄、厚区的温差由 124 ℃ 增加到 141 ℃, 并趋于定值. 当双相钢差厚板不同部位冷却强度相同时, 轧向热传输起到平衡薄、厚区温度, 减小薄、厚区温差的作用. 当冷却速度增加时, 冷却的时间减少, 使轧向热传输的时间减少, 轧向传输的热量减少, 从而使薄、厚区的温差增大.

不同冷速对温度影响区长度的影响如图 4 所示, 从中可见, 随着冷却速度增加, 过渡区影响区域减小, 还可以发现厚区的影响区要小于薄区. 对于同样的热量改变, 由于体积不一样, 薄区温度的改变明显大于厚区, 所以过渡区对薄区的影响大于厚区, 使温度影响区在薄区比在厚区大; 同时由于冷却速度增加, 轧向传热对温度的影响所占比重越来越小, 温度变化越来越取决于边部散热, 所以和轧向热传输明显相关的过渡区对薄、厚区的影响减小.

冷却速度为 10 ℃/s 时的冷却过程如图 5 所示. 可见薄区和厚区温差明显, 尺寸过渡区同时也是温度过渡区.

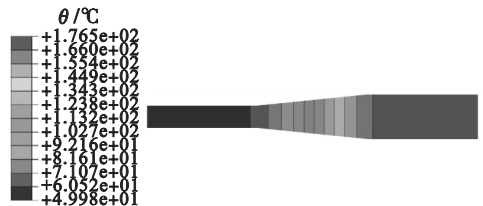


图 5 差厚板 10 ℃/s 冷却终止时的温度分布图

Fig. 5 Temperature distribution on TRB in 10 ℃/s

### 2.3 冷却速度与冷却条件的关系

按照方案 2) 所示的方法模拟在双相钢差厚板各部分温度保持一致的条件下, 冷却速度与差厚板不同部位冷却强度的关系, 如图 6 所示.

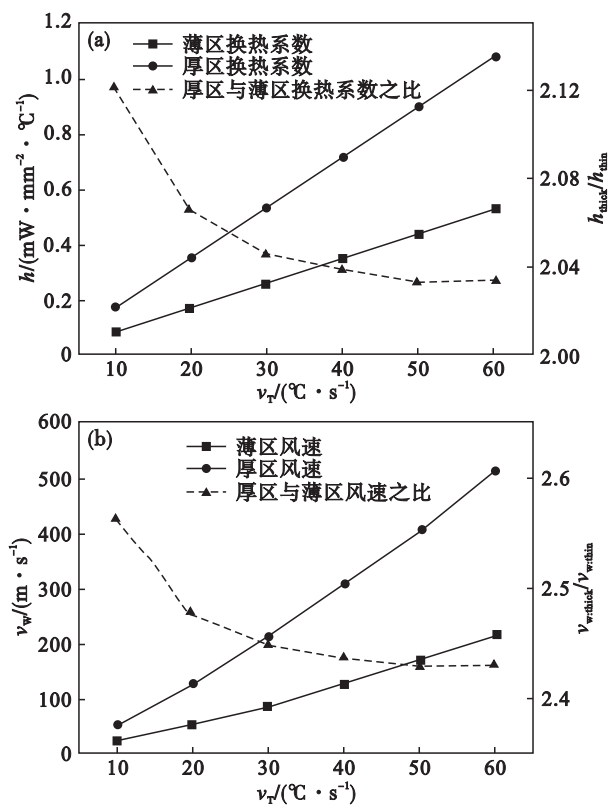


图 6 冷却速度与冷却条件的关系  
Fig. 6 Relationship between cooling rate and cooling conditions  
(a)—冷却速度和换热系数；(b)—冷却速度和冷却风速.

图 6a 显示了冷却速度和对流换热系数的关系,可见随着冷却速度的增加,差厚板的对流换热系数近似直线增加,差厚板厚区和薄区之间的对流换热系数之比也越来越接近差厚比,最终趋近于略大于差厚比的一个定值. 本文以氢氮混合气为冷却气计算出薄、厚区对应的冷却风速<sup>[10-11]</sup>,如图 6b 所示. 上述结果表明,当薄区和厚区冷却风速之比趋近于 2.4 时,能获得薄区和厚区接近一致的温度分布.

当辐射换热系数一定时,冷却速度与对流换热系数  $h$  成正比. 所以冷却速度增加,对流换热系数线性增加. 从边界方程可以看出,当辐射散热所占的比值小到可以忽略时,体积与对流换热系数成正比,而体积与厚度是正比关系;所以当对流换热系数与厚度成正比关系时,能获得薄区和厚区接近一致的温度分布.

## 2.4 差厚板几何形状对温度分布的影响

### 2.4.1 差厚比对温度场的影响

对过渡区斜率相同、差厚比分别为 2 和 1.5 的 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 试样按方案 3) 进行模拟,以便了解同一工艺条件下不同差厚比的差厚板温度变化情况. 冷却终止时薄、厚区的温差如图 7 所示.

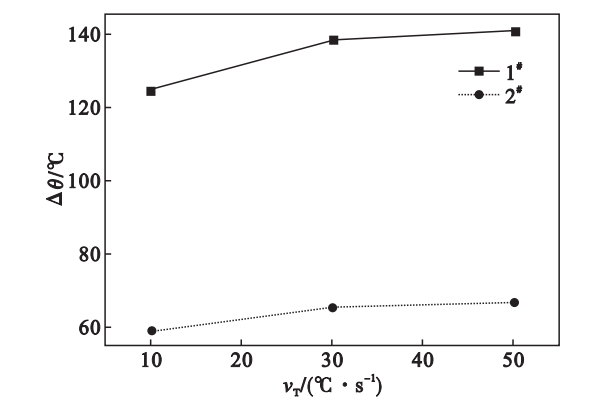


图 7 不同差厚比差厚板冷却终止时薄、厚区温差  
Fig. 7 Temperature difference between thick region and thin region with different ratio of thick to thin

从图 7 中可以看到,不同差厚比差厚板的薄、厚区温差依然有如图 4 一样的规律,并且随着冷却速度的增加,薄、厚区温差增加,不过薄、厚区的温差增幅随冷却速度的增加而降低. 差厚比为 1.5 时的厚区温度的变化幅度没有差厚比为 2 时明显.

### 2.4.2 过渡区斜率对温度场的影响

在差厚比相同的条件下,不同过渡区斜率对差厚板温度场影响不同,如图 8 所示.

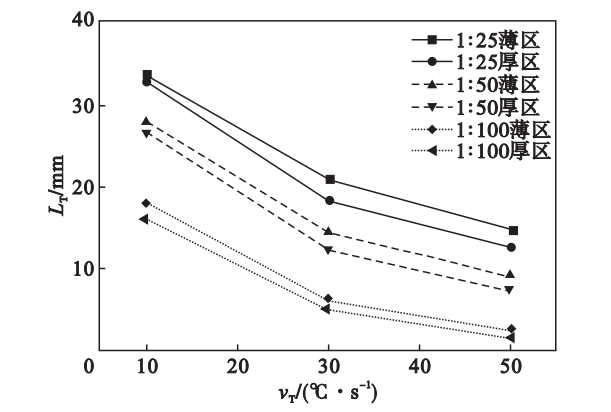


图 8 不同斜率差厚板的温度影响区长度  
Fig. 8 Length of temperature influenced zone with different slope of transition region

从图 8 可见,随着过渡区斜率的增加,薄、厚区温度影响区长度增加. 随着冷却速度的增加,不同斜率差厚板的薄、厚区温度影响区长度都减小. 温度影响区长度与过渡区的斜率成正比,且薄区的温度影响区长度大于厚区的温度影响区长度. 这是因为,斜率增加,则过渡区的长度减小,轴向传热增加,使温度影响区长度增加. 从图 8 还可以看到,随着冷却速度的增加,过渡区斜率为 1:100 的 1<sup>#</sup> 试样的薄、厚区温度影响区长度的差值减小,而过渡区斜率为 1:25 的 4<sup>#</sup> 试样的薄、厚区温



度影响区长度的差值增大. 对于斜率为 1:25 的 4<sup>#</sup> 试样,较大的斜率导致轧向热传输明显,对温度的影响不可忽略. 从图 4 可知,随着冷却速度的增加,薄、厚区温差增大. 轧向热传输随着冷却速度的增加而增大,从而使薄区和厚区温度影响区长度的差值增加. 斜率较小时,表面热传输是导致温度不同的决定性因素,而轧向热传输对温度差异化的影响随冷却速度增加而降低,所以差值减小.

### 3 结 论

1) 当差厚板试样不同区域的冷却速度一致时,对流换热系数随冷却速度的增加线性增大. 厚区与薄区的对流换热系数之比会逐渐降低,由 2.12 减小到 2.03,并趋近于略大于差厚比的常数.

2) 当双相钢差厚板试样不同部位采用相同的冷却强度时,冷却速度由 10 °C/s 增加到 60 °C/s,则差厚板的薄、厚区温差由 124 °C 增加到 141 °C.

3) 差厚板试样温度影响区长度随过渡区斜率的增加而增加:在 50 °C/s 的冷速下,当斜率由 1:100 增加到 1:25 时,薄区温度影响区长度由 2.6 mm 增加到 14.8 mm,厚区由 1.8 mm 增加到 12.8 mm.

4) 在空冷条件下,差厚板试样薄、厚区表面温度实测值与有限元模拟计算值对比表明,利用有限元计算得到的表面温度偏差不超过 20 °C. 模拟计算可靠.

### 参考文献:

[1] Merklein M, Johannes M, Lechner M, et al. A review on tailored blanks-production applications and evaluation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(2): 151–164.

[2] Zhang Y, Tan J. Numerical simulation and vertical motion control of rolls for variable gauge rolling [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2015, 22(8): 703–708.

[3] Wang D C, Dong L C, Liu H M, et al. Velocity preset and transitional zone's shape optimization for tailor rolled blank [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2015, 22(4): 279–287.

[4] Liu X H. Prospects for variable gauge rolling: technology, theory and application [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2011, 18(1): 1–7.

[5] Liu X H, Zhao Q L, Liu L Z. Recent development on theory and application of variable gauge rolling: a review [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2014, 27(3): 483–493.

[6] Peranio N, Li Y J, Roters F, et al. Microstructure and texture evolution in dual-phase steels: competition between recovery, recrystallization, and phase transformation [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(16): 4161–4168.

[7] Kuang C F, Zheng Z W, Zhang G T, et al. Effects of overaging temperature on the microstructure and properties of 600MPa cold-rolled dual-phase steel [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2016, 23(8): 943–948.

[8] Qu S P, Zhang Y C, Pang X L, et al. Influence of temperature field on the microstructure of low carbon microalloyed ferrite-bainite dual-phase steel during heat treatment [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 536: 136–142.

[9] 张海涛. DP590 双相钢电阻点焊过程的数值模拟及实验分析 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.  
(Zhang Hai-tao. Numerical simulation of resistance spot welding process of DP590 dual-phase steel and experimental analysis [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010.)

[10] 窦晨曦. 冷轧带钢在连续退火机组中快速冷却过程的数值模拟 [D]. 沈阳: 东北大学, 2010.  
(Dou Chen-xi. Numerical simulation of cold-rolled strip in cooling process of continuous annealing line [D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.)

[11] 乐启炽, 崔建忠. 传输过程基本原理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 94–100.  
(Le Qi-chi, Cui Jian-zhong. The basic principle of transmission process [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 94–100.)