

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20190396

热轧中厚板超快速冷却过程温度场数值模拟

孙明翰， 郑 义， 曲春涛， 金世哲， 许志强， 杜凤山
(燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心，河北 秦皇岛 066004)

摘 要：超快速冷却工艺作为热轧钢板生产的核心技术，对改善板材产品组织形态、提升产品性能具有重要意义。在中厚钢板的超快速冷却过程中，心部与表面之间的冷却速度差异使得钢板在厚度方向上形成内外温度差，而超快速冷却中钢板表面的换热机制较为复杂，两者综合提升了中厚板冷却机制的界定难度。为提升中厚板超快冷模型计算精度，完善其换热体系，建立了中厚钢板轧后超快速冷却过程中等效换热系数反求法的数学模型。该模型依托离散解析法，基于导热微分方程及物体正规阶段的状态特点，将求得的超越方程根转化为等效换热系数，并将此作为超快冷温度场模型的边界条件。在此基础上，构建了超快速冷却温度场仿真模型，验证了 20 mm 钢板超快速冷却机制下的温度场。结果表明，等效换热系数反求法的数学模型能够适用于中厚钢板的超快冷工艺。

关键词：热轧钢板；超快速冷却；等效换热系数；反求法

文献标志码：A **文章编号：**0449-749X(2020)03-0050-08

Numerical simulation of temperature field in ultra-fast cooling process of hot rolled plate

SUN Ming-han, ZHENG Yi, QU Chun-tao, JIN Shi-zhe, XU Zhi-qiang, DU Feng-shan
(National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: The ultra-rapid cooling process is the core technology for the production of hot-rolled steel sheets, which is of great significance for improving the structure of the plate products and improving the performance of the products. In the ultra-rapid cooling process of medium-thick steel plates, the difference in cooling speed between the core and the surface causes the steel plate to form an internal and external temperature difference in the thickness direction, but the heat transfer mechanism of the steel plate surface in the ultra-rapid cooling is complicated. Therefore, all of them increase the difficulty of defining the cooling mechanism of the plate. In order to improve the calculation accuracy of the ultra-fast cooling model of medium and heavy plates and improve its heat exchange system, this article establishes a mathematical model for the inverse method of equivalent heat transfer coefficient in the ultra-rapid cooling process of medium-thick steel plates after rolling. The model relies on the discrete analytical method, the thermal differential equation and the state characteristics of the normal phase of the object. The model transforms the obtained transcendental equation root into the equivalent heat transfer coefficient, and the result is used as the boundary condition of the ultra-fast cold temperature field model. On this basis, a super-fast cooling temperature field simulation model was constructed to verify the temperature field under the ultra-fast cooling mechanism of 20 mm steel plates. The results showed that the mathematical model of the inverse heat transfer coefficient inverse method could be applied to the ultra-fast cooling process of medium-thick steel plates.

Key words: hot rolled steel plate; ultra-fast cooling; equivalent heat transfer coefficient; inverse method

伴随着热轧板材市场需求提升，热轧板材的性能需求、质量需求已经远高于以往水平。作为热轧钢板轧后的必经环节，超快速冷却技术以其独有的冷却机制，通过在精轧机与冷床之间布设快速冷却装置来改善材料冷却后的组织形态，使得材料具有较强的力学性能^[1-3]。同时，超快冷机制的应用还能够最大限度地提升轧后板材的合金利用率，省去了普通热轧钢板应用前的热处理工艺，具有极高的实用价值^[4-6]。截止目前，超快速冷却技术已经广泛应用于首钢、鞍钢、南钢等大型钢铁企业，并取得了较

好的产能效果。为此,国内诸多优秀学者展开了相关研究。王国栋等^[7]提出以超快冷为核心的新一代 TMCP 技术,并提出了多种强化机制,优化现有轧制工艺;同时,还指出依据钢材的不同成分、性能及相变情况实现细晶、纳米级析出、相变组织强化,充分发掘了钢材料的潜力^[8]。研究表明,超快速冷却技术具有极高的应用前景^[9-10]。但作为热轧带钢生产的创新技术,在工业生产中的应用仍存在一系列亟需研究的问题。其中,超快速冷却过程中的换热机制问题直接影响了该理论的计算精度,尤其是在中厚钢板轧后冷却过程中的换热问题。高温的热轧钢板经空气的短暂冷却后,进入水冷区进行冷却水射流冲击,进而发生由流体力学、换热现象所共同决定的换热机制^[11-12]。

当冷却介质冲击热轧钢板表面时,热轧钢板的表层金属区会出现 3 种不同的换热区,即辐射换热区、汽膜换热区和射流冲击换热区^[11,13]。在辐射换热区,主要以热轧钢板与周围环境之间的热辐射为主,且该区域的换热系数通常较小;在汽膜换热区,主要以热轧钢板与冷却介质之间蒸汽层的膜状沸腾换热为主,而且钢板表面所形成的蒸汽膜将会减小其换热系数;在射流冲击换热区,主要以热轧钢板和冷却介质之间的对流换热和热辐射为主,根据水流量和射流冲击速度的不同,对流换热系数将在一定范围内波动^[14]。付天亮等^[15]以汽雾射流冷却的形式分析了 10 mm 钢板在轧后超快速冷却状态下的换热区分布与钢板温降规律,并给出了射流角为 30°时的钢板平均冷速与临界热流密度。汪贺模等^[16]采用有限差分法与反向热传导法,得到了试验条件下 25 mm 钢板表面的对流换热系数与表面温度变化规律,分析不同水流量对换热系数与表面温度变化规律的影响。童朝南等^[17]以现场数据与热传递机制为基础,将换热系数回归模型加入钢板冷却的有限元模型中,以获得淬火过程中间数据,解决了现场无法测量钢板冷却过程温度值的难题。而中厚板因自身厚度特点,在冷却过程中往往会呈现出心部与表面之间存在较大温差的现象,超快速冷却的表面换热区又存在着较为复杂的换热机制,这使得中厚板超快速冷却过程中的换热变得极为复杂。因此,亟需针对热轧中厚钢板制定合理的冷却工艺,以丰富控制冷却技术在厚热轧钢板中的应用。

因此,本文在前人研究基础之上,针对热轧中厚钢板在超快速冷却过程中的换热进行研究,构建超快速冷却温度场模型并应用于中厚钢板的分析中,

以便解决中厚钢板心部冷却困难而产生的问题。为此,本文将研究超快速冷却机理及其换热过程,选取合理的换热系数求取方法,从而得出适宜的等效换热系数作为温度场模拟的边界条件,这不仅具有指导意义,而且还能为实际生产中合理地制定冷却工艺提供可靠的理论根据。

1 等效换热系数模型的建立与验证

1.1 等效换热系数模型假设

模型建立过程中需要进行合理且必要的假设,主要包括:(1)热轧钢板在超快冷装置中是匀速运动的,且钢板长度方向上各点处的超快冷过程几乎相同,并认为宽展方向上的温度分布是均匀的;(2)热轧钢板为各向同性,忽略其相变潜热的影响;(3)忽略超快速冷却过程中板材移速对表面换热系数的影响;(4)冷却介质温度保持恒定。

1.2 等效换热系数模型建立

依托反求法,基于超快速冷却原理,应用数值离散法对超快速冷却过程中热轧钢板的等效换热系数进行分析求解,并应用于热轧钢板超快速冷却温度场模型的模拟分析。

本研究中所选用的材料为 Q345,其化学成分见表 1。在数学模型建立的过程中,引用参考文献中所测得的热轧钢板超快速冷却过程中的温度历程曲线,试验曲线如图 1 所示^[18]。无限大平板传热模型如图 2 所示^[19]。图 2 中, δ_0 为 1/2 钢板厚度; h_w 为等效换热系数; T_f 为边界流体温度。

表 1 Q345 钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of Q345 steel %

C	Mn	Si	P	S
0.18	1.15	0.41	0.016	0.009 6

依据上述假设,可将导热微分方程的求取区间进一步规范。轧后钢板中,其各部位的冷却曲线在温度区间上存在差异。为进一步求解等效换热系数,现将温度区间进行离散化处理。由于轧后钢板为对称形式,因而为简化模型,求解中只针对半部分进行分析。现依据一维导热温度场的特性建立导热微分方程^[20-22]。

由于系统处于变化之中且内无热源,因此建立一维非稳态、无内热源的导热微分方程,见式(1)。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T$$

(1)

式中: T 为热力学温度,K; t 为冷却时间,s; a 为热

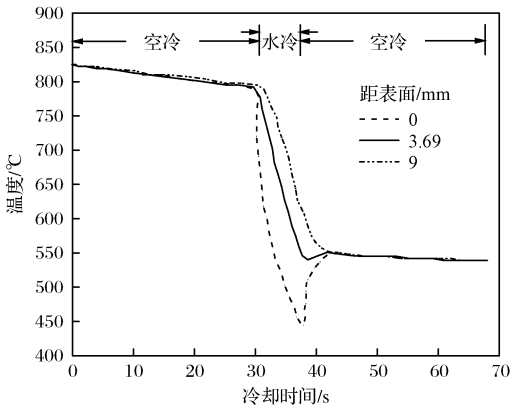


图 1 超快速冷却试验曲线

Fig. 1 Experimental curve of ultra-fast cooling

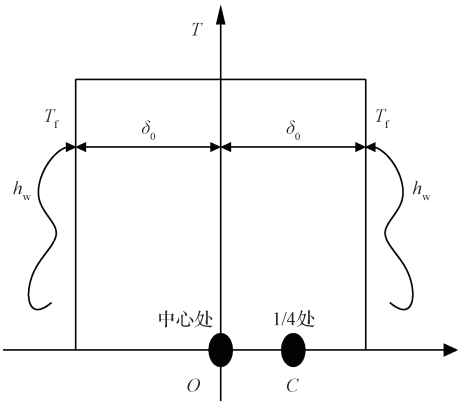


图 2 无限大平板传热模型

Fig. 2 Infinite plate heat transfer model

扩散系数, m^2/s 。

通过钢板超快速冷却过程建立能量平衡公式, 见式(2)。

$$-\rho c_p V \frac{dT}{dt} = hA(T - T_\infty) \tag{2}$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; c_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; V 为导热体体积, m^3 ; h 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A 为换热表面积, m^2 ; T_∞ 为外界环境温度, K 。

式(2)中左半部分表示物体温度降低时所放出的热量, 而右半部分表示周围流体所吸收的热量。对于 $x \geq 0$ 的半块平板, 在一维导热方程基础上加上值域范围, 即

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \delta_0, \quad t > 0 \tag{3}$$

基于上述板材的对称特性, 定义导热微分方程的初始条件和边界条件如下。

(1) 初始条件。

$$T|_{t=0} = T_0, \quad 0 \leq x \leq \delta_0 \tag{4}$$

(2) 边界条件。

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \tag{5}$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta_0} = h_w(T_w - T_\infty) \tag{6}$$

$$\theta(x, t) = T(x, t) - T_\infty \tag{7}$$

该数学模型表达式可以改写为

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \delta_0, \quad t > 0 \tag{8}$$

$$\theta(x, 0) = \theta_0 = T_0 - T_\infty, \quad 0 \leq x \leq \delta_0 \tag{9}$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} \right|_{x=\delta_0} = h_w \theta(\delta_0, t) \tag{10}$$

$$\left. \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \tag{11}$$

式(8)~式(11)为研究问题的数学描写, 对此采用分析变量法进行无穷级数求和, 定义 β_n 为特征值, 借此求出超越方程的根, 见式(12)~式(13)。

$$\frac{\theta(x, t)}{\theta_0} = \frac{T(x, t) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \sin \beta_n}{2 \beta_n + \sin(2 \beta_n)} \cos\left(\beta_n \frac{x}{\delta_0}\right) \exp\left(-\beta_n^2 \frac{at}{\delta_0^2}\right) \tag{12}$$

$$\beta_n \tan \beta_n = Bi = \frac{h_w \delta_0}{\lambda} \tag{13}$$

式中: T_w 为钢板表面温度, K ; T_0 为钢板初始温度, K ; θ 为过余温度, K ; β_n 为超越方程的特征根; Bi 为毕渥数; λ 为导热系数。

令系数 $C_n = \frac{4 \sin \beta_n}{2 \beta_n + \sin(2 \beta_n)}$, 则式(12)可以改写为

$$\frac{\theta(x, t)}{\theta_0} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\beta_n^2 Fo) \cos\left(\beta_n \frac{x}{\delta_0}\right) \tag{14}$$

式中: Fo 为傅里叶数。

轧后钢板的非稳态导热过程进入正规状况阶段时, 初始条件已不再对其内部温度场产生影响, 也不会影响其边界条件。

由分析解中反映时间影响的 $[\exp(-\beta_n^2 Fo)]$ 可以看出, 无穷级数中的每一项会因为 Fo 数的升高而快速减小。且由计算过程可以看出, 当 Fo 超过 0.2 时, 仅保留该无穷级数的首项而忽略其他各项, 此时误差值仅为 1%。引入系数值 C_n , 目的是让解析解符合初始条件的要求, 进而就可以忽略初始条件的影响。因此只需解得该无穷级数的第一项即可求出正规阶段温度场的解析解。

根据以上叙述, 可得正规状况阶段分析解的简

化表达式为

$$\frac{\theta(x,t)}{\theta_0} = \frac{4\sin\beta_1}{2\beta_1 + \sin(2\beta_1)} \cos\left(\beta_1 \frac{x}{\delta_0}\right) \exp(-\beta_1^2 Fo) \tag{15}$$

$$\cot\beta_1 = \frac{\beta_1}{Bi} \tag{16}$$

依据上式得出超越方程的根,如图 3 所示^[19]。

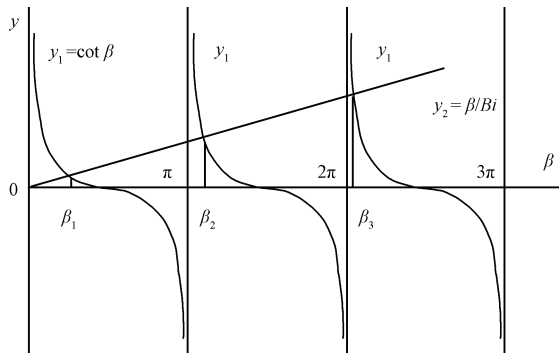


图 3 超越方程的根

Fig. 3 Root of transcendental equation

结合式(15)和式(16),然后根据钢板表面处的温度随着时间变化的曲线(表面处 $x/\delta_0 = 1$),就可以计算出等效换热系数 h_w 与冷却时间 t 的关系,即可建立起 h_w-t 的关系。

根据热轧钢板超快冷过程中某特定点的冷却曲线,通过离散解析法的模型求解出钢板的等效换热系数,为了使计算结果合理收敛,建立收敛条件即

$$Fo \leq \frac{1}{2} \tag{17}$$

在求取超快冷换热系数时,假设各离散区间段内的初始温度是一致的,并且在各个相互关联的离散区间段内可迭代求解,即将 C 点所处冷却曲线 T_C 的温度区间进行离散化,从而得到离散区间 $[0,\gamma]$ 内的温度 $T_\gamma(i)$ 。离散解析法反求换热系数流程图如图 4 所示,借助 MATLAB 软件,得到初始等效换热系数 h_0 。而后,借助初始等效换热系数 h_0 计算 C 点的温度值,用计算值与实测值进行对比,从而优化所选取的换热系数。

水冷段的等效换热系数大小将直接影响到钢板超快速温度场模型精度。图 5 所示为离散解析法求得的钢板等效换热系数随着冷却时间而变化的曲线。

从上述曲线中可以看出,离散解析法计算所得到的等效换热系数与钢板冷却时间有直接关系,等效换热系数 h_w 的峰值约为 $12\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,冷

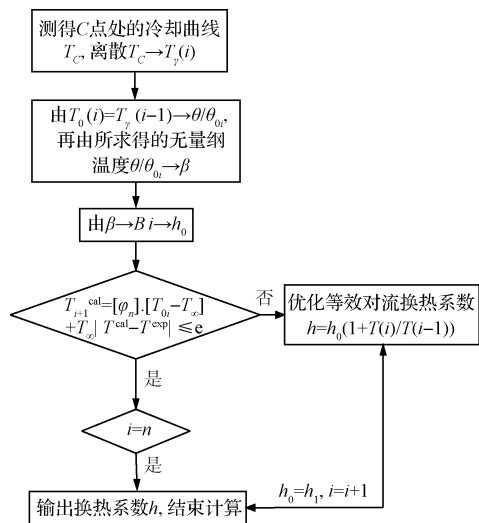


图 4 离散解析法反求换热系数流程图

Fig. 4 Flow chart of inverse heat transfer coefficient by discrete analytical method

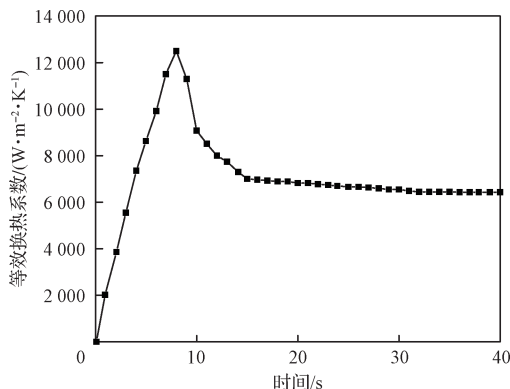


图 5 等效换热系数随着时间变化的关系曲线

Fig. 5 Relation curve of surface heat transfer coefficient with time

却时间为 8 s,其等效换热系数值随着时间的变化呈现先增后减的趋势,最后趋于平稳状态。

引起等效对流换热系数变动趋势的主要原因是冷却介质与钢板表层接触时,会形成不同的换热过程^[23]。一般选择钢板心表温度最高值作为超快速冷却的起始温度。但此时钢板的温度比较高,远远超过了水的沸点,冷却水与钢板表面接触的瞬时,水汽化形成气泡保护层,这些蒸汽膜保护层使得钢板内部热量无法及时排出,从而影响了传热。因此在高温阶段,换热系数很小,此时钢板换热可以认为是与周围冷却空气介质换热。伴随着温度的下降,冷却水会不断被新的冷却水取代,换热能力逐渐提高,钢板温度急剧下降。随着表面温度下降到一定温度时,此时的冷却水已不具备足够的冷却能力,从而使得钢板等

效换热系数降低。基于材料的热物性参数能力,由于冷却水不断冲击着钢板表面,热量将在表面进行传导,在 8 s 时刻发生返红现象,最终趋于稳定状态。

2 温度场模型建立与结果分析

2.1 温度场模型工况建立

基于上述假设,建立有限元模型。其中单元选取 PLANAR39,初始温度为 1 000 ℃,并将离散解析法求出的等效换热系数作为边界条件。材料选择

Q345 热轧钢板,密度取 $7.85\times10^3\text{ kg/m}^3$,其他热物性参数见表 2 和表 3。

2.2 温度场模型验证

现对 18.6 mm 厚的 Q345 钢板进行超快速冷却过程的温度场模拟,对比试验曲线和模拟曲线,以便验证离散解析法求取等效换热系数的可行性。超快速冷却条件为持续冷却 8 s 后再空冷 32 s。模型初始温度为 800 ℃,冷却水温度为 25 ℃,系数取图 5 钢板换热数据,进而得到冷却曲线,如图 6 所示。

表 2 Q345 钢的导热系数和比热容

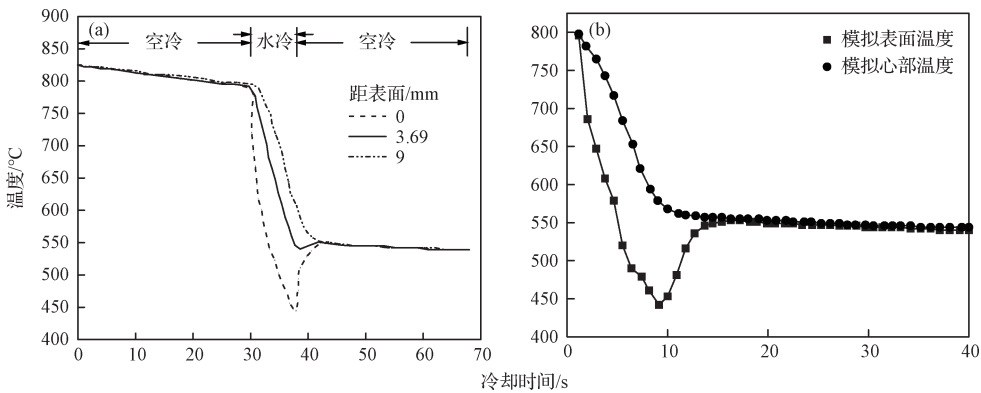
Table 2 Thermal conductivity and specific heat capacity of Q345 steel

项目	温度/℃											
	20	100	200	300	400	500	600	700	765	800	900	1 000
导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	44.55	42.95	41.02	38.23	35.74	33.20	30.81	29.39	38.38	25.39	26.13	25.57
比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	4.62×10^8	4.81×10^8	5.08×10^8	5.30×10^8	5.60×10^8	6.05×10^8	6.80×10^8	8.24×10^8	13.60×10^8	7.18×10^8	6.15×10^8	6.04×10^8

表 3 Q345 钢的热膨胀系数和杨氏模量

Table 3 Thermal expansion coefficient and Young's modulus of Q345 steel

项目	温度/℃										
	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
线膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	8.31×10^{-6}	1.10×10^{-5}	1.23×10^{-5}	1.32×10^{-5}	1.37×10^{-5}	1.39×10^{-5}	1.40×10^{-5}	1.41×10^{-5}	1.42×10^{-5}	1.43×10^{-5}	
杨氏模量/MPa	2.12×10^5	2.06×10^5	1.95×10^5	1.87×10^5	1.81×10^5	1.75×10^5	1.59×10^5	1.39×10^5	1.14×10^5	1.08×10^5	1.02×10^5



(a) 试验冷却曲线; (b) 模拟冷却曲线。

图 6 试验冷却曲线与模拟冷却曲线对比

Fig. 6 Comparison of experimental cooling curve and simulated cooling curve

对比上述结果,可以看出离散解析法计算的冷却曲线实际效果与试验曲线一致,相对误差基本呈现先增大后减小再增大的趋势,总体误差较小且平均误差低于 5%,吻合较好。

2.3 20 mm 钢板仿真结果与分析

选用厚度为 20 mm 的钢板进行一次超快冷却 5 s,然后空冷 35 s,总体冷却时间为 40 s,初始温度

为 1 000 ℃,冷却水的温度为 25 ℃,采用比例缩放法进行优化处理,图 7~图 9 所示为钢板断面温度分布云图。

图 7 结果表明,厚度为 20 mm 的钢板在上述超快速冷却 5 s 后,表面温度由 1 000 骤降至 490 ℃。在空冷阶段起始时刻,钢板芯部温度为 873 ℃,与表面温度相差 383 ℃。在空冷阶段,钢板心表温差将

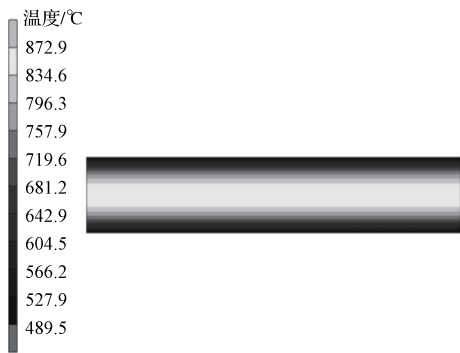


图 7 超快冷 5 s 后的温度云图

Fig. 7 Temperature contour after 5 s ultra-fast cooling

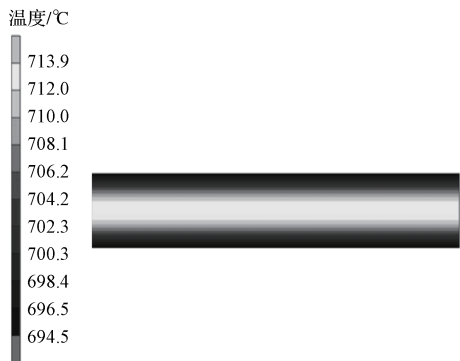


图 8 空冷 10 s 后的温度云图

Fig. 8 Temperature contour after 10 s air cooling

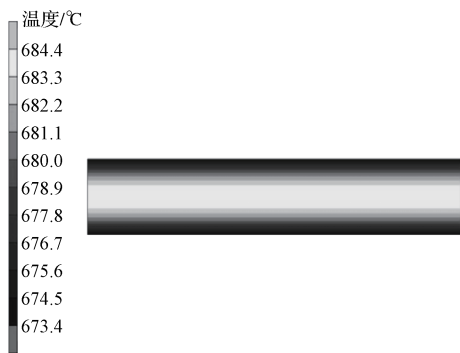


图 9 空冷 35 s 后的温度云图

Fig. 9 Temperature contour after 35 s air cooling

会使钢板内部热量向表面扩散,继而钢板返红、心部温度降低。从图 8 所示的结果可以看出,这种钢板返红状态下表面温度为 695 °C,而心部温度下降至 714 °C。至图 9 所示的空冷后 35 s 时刻,表面温度、心部温度分别为 673 和 684 °C,钢板温度呈现均匀分布。在上述冷却过程中,热轧钢板各个横断面上不同位置的温度随时间变化的曲线如图 10 所示。

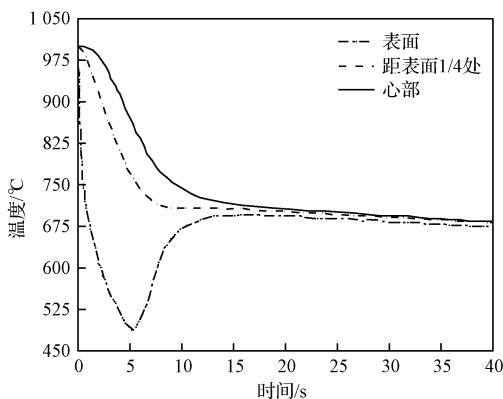


图 10 厚度为 20 mm 钢板一次超快冷过程的温度-时间变化曲线

Fig. 10 Temperature-time curves of a 20 mm thick steel plate during a super-fast cooling process

由图 10 可知,超快速冷却的前 5 s 中,钢板表面的平均冷却速率为 102 °C/s,5 s 时刻钢板表面冷却至 490 °C;超快速冷却终止时刻,表面温度为 695 °C,并以 0.86 °C/s 的冷却速率进行空冷。

因超快速冷却技术所具有的冷却机能,除表面外其他断面层也会具有较大的冷却速率。其中,钢板距表面 1/4 处的温度变化曲线以 45 °C/s 的平均冷却速率冷却到 774 °C,过程中的瞬时冷却速率随时间逐渐降低,且随着断面层与钢板表面距离的增加,钢板心部冷却愈发困难。钢板心部的温度变化曲线,前 2 s 心部温降较小,随后,该断面层将以 39 °C/s 的平均冷却速率冷却到 797 °C,此过程中心表温差不断减小,当心表温差减小至一定数值后,心部冷却速率开始降低,此后钢板将以 16 °C/s 的平均冷却速率冷却到 733 °C,最终心表温度趋于稳定。

为评价冷却工艺下钢板心表温度差异状态,现提取心表最大温差值随时间的变化作曲线,结果如图 11 所示。结果表明,超快速冷却阶段的温度差是整个冷却过程中的最大温差,其最高数值为 395 °C;相比之下,空冷阶段的温度差最小;在整个冷却后期,心表温差逐渐趋近于零。

综上所述,针对 20 mm 厚钢板的超快冷温度场模型分析结果可知,钢板心部及距表面 1/4 位置处均冷却到珠光体转变区,且超快速冷却后钢板表面的温度均高于马氏体转变温度(400 °C),而表面返红后的最高温度均低于 770 °C,使得过冷奥氏体完全发生珠光体转变,达到了钢板进行超快速冷却的目的。

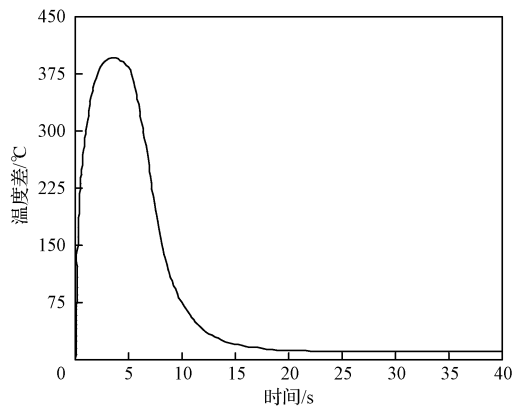


图 11 钢板心表最大温度差随时间的变化曲线
Fig. 11 Variation of maximum temperature difference of steel plate core surface with time

3 结 论

(1)采用离散解析法建立热轧钢板超快速冷却表面系数换热模型,利用现场勘测的试验数据冷却曲线,建立温度场导热微分方程,并依托钢板冷却对称特性及正规阶段状态特性,进行温度场反求解,得到热轧钢板的等效换热系数。同时,将所求得的等效换热系数与现场测得的温度冷却曲线进行曲线拟合并得到了较强的精度,证明等效换热系数求取方法的准确性。

(2)通过 20 mm 热轧钢板轧后的“超快速冷却+空气缓慢冷却”工艺研究,结果表明,适当增加延长超快速冷却时间,要求钢板表面的温度高于马氏体转变温度 400 ℃且表面返红最高温度低于珠光体转变温度 770 ℃,从而使得钢板不同断面层处的过冷奥氏体发生转变,达到超快速冷却的目的。

(3)采用离散解析法反求的曲线具有较强的实用性,可通过改变超快冷阶段冷却时间及空气冷却时间建立合适的工艺时间策略,最大限度地保持材料组织结构的完全转变,从而获得预期的理想组织。

参考文献:

[1] 刘旭辉,李光辉,刘振宇. 冷却路径对 V-Ti 微合金钢组织性能的影响[J]. 钢铁, 2019, 54(7): 77. (LIU Xu-hui, LI Guang-hui, LIU Zhen-yu. Effects of cooling process on microstructure and mechanical properties in a V-Ti bearing steel[J]. Iron and Steel, 2019, 54(7): 77.)

[2] 李成良,黄远坚,温志红. Q620D 钢板连续冷却相变行为和回火工艺[J]. 钢铁, 2018, 53(4): 78. (LI Cheng-liang, HUANG Yuan-jian, WEN Zhi-hong. Continuous cooling transformation behavior and tempering process of Q620D steel plate[J]. Iron and Steel, 2018, 53(4): 78.)

[3] 侯晓英,毕永杰,郝亮. 热轧 TRIP980 钢微观组织及强化机制分析[J]. 钢铁, 2019, 54(4): 63. (HOU Xiao-ying, BI Yong-jie, HAO Liang. Analysis on microstructure and strengthening mechanisms of hot-rolled TRIP980 steel[J]. Iron and Steel, 2019, 54(4): 63.)

[4] 田勇,王丙兴,袁国. 基于超快冷技术的新一代中厚板轧后冷却工艺[J]. 中国冶金, 2013, 23(4): 17. (TIAN Yong, WANG Bing-xing, YUAN Guo. New generation TMCP for plate mill based on ultra-fast cooling technology[J]. China Metallurgy, 2013, 23(4): 17.)

[5] 张阔斌,侯蕾,王俊,等. 超快冷技术在唐钢中厚板生产线上的应用[J]. 轧钢, 2018, 35(5): 67. (ZHANG Kuo-bin, HOU Lei, WANG Jun, et al. Application of ultra-fast cooling technology on medium plate production line of Tangsteel[J]. Steel Rolling, 2018, 35(5): 67.)

[6] 任树洋,尹绍江,李行,等. 新一代中厚板制造关键技术在唐钢的应用[J]. 中国冶金, 2019, 29(9): 60. (REN Shu-yang, YIN Shao-jiang, LI Hang, et al. Application of new generation key technology of medium and heavy plate manufacturing in Tangsteel[J]. China Metallurgy, 2019, 29(9): 60.)

[7] 王国栋. 新一代控制轧制和控制冷却技术与创新的热轧过程[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2009, 30(7): 913. (WANG Guo-dong. New Generation TMCP and innovative hot rolling process[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2009, 30(7): 913.)

[8] 王国栋. 新一代 TMCP 技术的发展[J]. 轧钢, 2012, 29(1): 1. (WANG Guo-dong. Development of a new generation TMCP Technology[J]. Steel Rolling, 2012, 29(1): 1.)

[9] 孙电强,李玉谦,成慧梅,等. 冷却工艺对 Q550D 钢组织性能的影响[J]. 轧钢, 2019, 36(1): 41. (SUN Dian-qiang, LI Yu-qian, CHENG Hui-mei, et al. Effect of cooling process on microstructure and properties of Q550D steel[J]. Steel Rolling, 2019, 36(1): 41.)

[10] 黄卫国,张子豪,张田. 沙钢 3 500 mm 宽厚板线控冷系统的应用[J]. 轧钢, 2019, 36(5): 14. (HUANG Wei-guo, ZHANG Zi-hao, ZHANG Tian. Application of controlled cooling system of 3 500 mm heavy plate production line in Shagang[J]. Steel Rolling, 2019, 36(5): 14.)

[11] 袁国,于明,王国栋. 热轧带钢超快速冷却过程的换热分析[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2006, 27(4): 406. (YUAN Guo, YU Ming, WANG Guo-dong. Heat transfer of hot strip during ultra fast cooling[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2006, 27(4): 406.)

[12] Prieto M M, Ruiz L S, Menendez J A. Thermal performance of numerical model of hot strip mill runout table[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2001, 28(6): 474.

[13] Cox S D, Hardy S J, Parker D J. Influence of runout table operation setup on hot strip quality, subject to initial strip condition; Heat transfer issues[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2001, 28(5): 363.

[14] 温旭,姜华,曹进. 高炉炉缸凝铁层导热系数测定及传热模型修正[J]. 钢铁研究学报, 2019, 31(4): 347. (WEN Xu,

JIANG Hua,CAO Jin. Measurement of thermal conductivity for iron skull of blast furnace hearth and modification of heat transfer model[J]. Journal of Iron and Steel Research,2019,31(4):347.)

[15] 付天亮,邓想涛,韩钧,等. 钢板超快速冷却条件下换热实验研究[J]. 东北大学学报:自然科学版,2017,38(10):1399.(FU Tian-liang,DENG Xiang-tao,HAN Jun,et al. Experimental studies on heat transfer of ultra fast cooling for steel plate[J]. Journal of Northeastern University:Natural Science,2017,38(10):1399.)

[16] 汪贺模,蔡庆伍,余伟,等. 水流量对热轧钢板层流冷却过程对流换热系数的影响[J]. 北京科技大学学报,2012,34(12):1421.(WANG He-mo,CAI Qing-wu,YU Wei,et al. Effect of water flow rate on the heat transfer coefficient of a hot steel plate during laminar flow cooling[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2012,34(12):1421.)

[17] 童朝南,高宇德. 钢板水冷过程换热系数建模的一种实用方法[J]. 钢铁,2011,46(7):50.(TONG Chao-nan,GAO Yu-de. A useful method of building the heat transfer coefficient model in steel cooling process[J]. Iron and Steel,2011,46(7):50.)

[18] 陈小林,王国栋. 中厚板超快速冷却条件下的温度模型[J]. 钢铁,2013,48(10):46.(CHEN Xiao-lin,WANG Guo-dong. Temperature model under the plate ultra fast cooling condition[J]. Iron and Steel,2013,48(10):46.)

[19] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2006.(YANG Shi-ming,TAO Wen-quan. Heat Transfer[M]. 4th Ed. Beijing:Higher Education Press,2006.)

[20] 赵镇南. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.(ZHAO Zhen-nan. Heat Transfer[M]. Beijing:Higher Education Press,2002.)

[21] 张靖周,常海萍. 传热学[M]. 北京:科学出版社,2009.(ZHANG Jing-zhou,CHANG Hai-ping. Heat Transfer[M]. Beijing:China Science Publishing and Media Ltd,2009.)

[22] Kim H K,Oh S I. Evaluation of heat transfer coefficient during heat treatment by inverse analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology,2001,112(2):157.

[23] 盖格,波里尔,魏季和. 冶金中的传热传质现象[M]. 北京:冶金工业出版社,1981.(GAI Ge,BO Li-er,WEI Ji-he. Heat and Mass Transfer in Metallurgy[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,1981.)



达涅利动态

EVRAZ 钢厂从达涅利订购创新性 QSP-DUE(多功能无头轧制)生产线,新产线位于俄罗斯 Kemerovo 区的 Novokuznetsk,建成后将使其新工厂具备高附加值产品的生产能力。

新订单是继全球第一条 DUE 产线于 2019 年在中国首钢京唐成功投产后,达涅利获得的全球第二条 QSP-DUE 产线。

达涅利 QSP-DUE 获得专利的创新工艺布置,在一条薄板坯连铸连轧生产线上实现了在其他轧线上迄今为止通过单块、半无头及全无头开发的所有优势,并消除了其各自的劣势,进而可以通过不同钢种和产品采用最佳的工艺模式来生产板带市场上所有的高附加值产品。

EVRAZ 的 QSP-DUE 产线总设计产能是 250 万 t/a 的热轧卷,厚度 0.8~16 mm,宽度 950~1 700 mm。直弧式铸机弧半径 5.5 m,设计的铸坯厚度范围 100~123 mm,由于采用动态轻压下技术取决于不同钢种,最大拉速可达 6 m/min。

达涅利 DCC 提供的隧道炉为连铸到轧机之间提供了重要的缓冲功能,进而提升了产线的灵活性,同时使工作辊换

辊不会对炼钢和连铸环节产生任何影响,使其成为常规背景任务。

QSP-DUE 采用成熟的粗轧和精轧分离式布置,采用两步轧制。为保证最终产品精准的几何尺寸,轧机配备了当今最先进的带钢凸度和板型控制手段,这些控制功能在无头模式下必须是带载动作。配备的层流冷区系统采用强力和常规冷却单元,卷取区包括用于无头轧制时分卷的高速飞剪、夹送辊和地下卷取机。

对于此新的综合项目,达涅利不仅提供工艺设备,同时包括设备详细设计、设备安装方案设计、主厂房及公辅设施建设。

此外,达涅利还将提供双工位 LF 炉(310 t)、双真空罐脱气装置(310 t)及相应的公辅设施,包括整个工厂的烟气处理和水处理厂。

达涅利自动化对整个系统采用其技术诀窍,开发并提供从钢水到钢卷的整个工艺控制,包括在线仪表、中低压传动及辅助设施的控制。

(本刊讯)