



## EH420 海工钢 80 mm 特厚板堆垛缓冷数值模拟

鲍雪君<sup>1</sup>, 姜东滨<sup>2</sup>, 刘朝霞<sup>1</sup>, 刘俊<sup>3</sup>, 孙宪进<sup>3</sup>, 尹青<sup>3</sup>, 吴小林<sup>3</sup>, 任英<sup>2</sup>, 张立峰<sup>4</sup>

(1 中信泰富集团用户技术研究院, 江阴 214429; 2 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083;

3 江阴兴澄特种钢铁有限公司, 江阴 214429; 4 北方工业大学机械与材料工程学院, 北京 100144)

**摘要:** 海工钢特厚板在海洋工程中广泛使用, 其通过微合金化和热处理工艺生产。特厚板需在 380 ~ 420 °C 缓冷, 控制奥氏体向针状铁素体和贝氏体转变, 以获得优异的力学性能。根据 EH420 海工钢 80 mm 特厚板堆垛工艺建立数学模型, 通过实际测温验证了模型准确性, 研究了堆垛参数对海工钢特厚板在组织转变区停留时间的影响。特厚板堆垛之后, 表层温度快速降低, 而中部和底部降温速率明显减缓。堆垛速率对特厚板冷却影响较小, 而堆垛初始温度影响较大。特厚板堆垛初始温度从 400 °C 增加至 500 °C, 堆垛中心在组织转变区停留时间从 35.6 h 降低至 15.1 h。随着特厚板堆垛高度增加, 冷却时间延长。堆垛高度从 2.0 m 增加至 3.0 m 时, 堆垛中部在组织转变区停留时间从 17.1 h 增至 20.8 h, 主要是堆垛表面积减小和冷却速率降低造成。

**关键词:** 特厚板; 堆垛; 缓冷; 数值模拟

**DOI:** 10. 20057/j. 1003-8620. 2025-00078 **中图分类号:** TG142. 1

## Numerical Simulation of 80 mm Extra-thick Plate Stacking Slow Cooling for EH420 Marine Steel

Bao Xuejun<sup>1</sup>, Jiang Dongbin<sup>2</sup>, Liu Zhaoxia<sup>1</sup>, Liu Jun<sup>3</sup>, Sun Xianjin<sup>3</sup>, Yi Qing<sup>3</sup>,  
Wu Xiaolin<sup>3</sup>, Ren Ying<sup>2</sup>, Zhang Lifeng<sup>4</sup>

(1 User Application Technology Research Institute, Citic Pacific Special Special Steel Group Co., Ltd., Jiangyin 214429, China; 2 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3 Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Jiangyin 214429, China; 4 School of Mechanical and Material Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

**Abstract:** Extra-thick plates of marine steel are widely used in marine engineering and are produced by microalloying and heat treatment process. The extra-thick plate needs to be slowly cooled at 380 °C - 420 °C to control the transformation form the austenite to acicular ferrite and bainite, which can obtain excellent mechanical properties. A mathematical model is established for the stacking process of 80 mm extra-thick plates of EH420 marine steel, and the accuracy of the model was verified by actual temperature measurement. The influence of stacking parameters on the residence time of extra-thick plates of marine steel in the transformation zone is studied. It is found that the temperature of the surface layer of plate stacking gradually decreases, while the decrease rate of temperature in the middle and bottom of the stacking are significantly lower. The stacking rate has little effect on the cooling rate, while the initial temperature of the plate has a great impact on the cooling rate. With the initial temperature of the extra-thick plates stacking increasing from 400 °C to 500 °C, the residence time of the stacking center in the phase transformation zone decreases from 35.6 h to 15.1 h. As the height of extra-thick plates stacking increases, the time required for cooling time rises. When the stacking height increases from 2.0 m to 3.0 m, the residence time in the structure transformation zone in the middle of the stacking increases from 17.1 h to 20.8 h, which is caused by the decrease of the stacking surface and the cooling rate.

**Key Words:** Extra-thick Plates; Stack; Slow Cooling; Numerical Simulation

海洋资源丰富辽阔, 长久以来人类不断开采。21 世纪后, 资源开采逐渐从浅海向深海发展, 海洋工程装备的服役环境日益复杂, 因此, 对海工钢的强度、低温韧性、屈强比、耐腐蚀性及焊接性等提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。低合金钢因具有优异的力学性能、良好的焊接性和较低的生产成本, 被广泛用于海洋工程装备。当前海工钢板材主要有两种生

产工艺, 一是采用控轧控冷技术, 实现薄规格板材生产; 二是采用微合金化和热处理工艺, 实现厚规格板材的工业化生产。在厚规格板材生产过程中, 普遍通过堆垛冷却, 降低冷却速率, 控制组织转变。此外, 堆垛缓冷工艺还具有均匀偏析溶质, 消除热应力, 降低裂纹发生率的作用<sup>[2-4]</sup>。由于堆垛工艺具有操作简单和生产成本低等优势, 被广

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(No. 2023YFB3709900), 国家自然科学基金项目(No. 52374318)

**作者简介:** 鲍雪君(1982—), 男, 硕士, 高级工程师; **E-mail:** baosuejun@citicsteel.com; **收稿日期:** 2025-03-26

泛应用于特厚板生产过程。长期以来,国内外众多学者对堆垛缓冷工艺开展广泛研究,分析堆垛参数对特厚板的溶质扩散、组织转变、力学性能的影响。

袁少威等<sup>[5]</sup>研究发现Q345D钢连铸坯存在大尺寸MnS,轧后冷却速率较快导致了应力集中,板材芯部形成贝氏体组织,造成裂纹产生和探伤不合。通过优化堆垛工艺,将钢板冷却速度降低至3~5 °C/s,使得厚度不大于30 mm的钢板探伤检验合格率达99.32%。王卫华等<sup>[6]</sup>研究堆垛缓冷工艺对钢板表面爪裂纹的影响,认为连铸坯热装入炉温度在650~700 °C时,奥氏体晶界析出的AlN,显著降低晶粒间结合力。若连铸坯在400~500 °C进行保温,奥氏体向铁素体转变时,包裹AlN形成珠光体组织,显著弱化碳氮化物的脆化作用。在生产实践中,厚度为320 mm的连铸坯堆垛24 h,连铸坯温度小于600 °C时,可消除钢板表面爪裂纹缺陷。王卫华等<sup>[6]</sup>等采用有限元软件对高合金钢堆垛冷却过程进行模拟,通过现场测温验证了数学模型的准确性,优化了高合金钢堆垛冷却生产工艺,将连铸坯表层裂纹发生率从10%降低至0%,显著提升板材质量。郝鑫等<sup>[7]</sup>针对中厚钢板探伤不合格原因进行分析,认为钢中氢分压超过钢板的临界强度时,在夹杂物附近的钢基体处产生裂纹,并沿贝氏体硬化组织扩展。将铸坯经过48 h堆垛缓冷处理,降低裂纹产生率,提升轧材力学的性能。姜东滨等<sup>[8]</sup>研究堆垛缓冷工艺对钢轨钢脱氢的影响,分析不同参数条件下的连铸坯的脱氢效果,认为退火后期连铸坯中心氢含量开始降低,并随着温度的升高,连铸坯脱氢起始点明显提前,脱氢速率显著增加。通过优化脱氢退火工艺参数,钢中氢降低至 $0.6 \times 10^{-6}$ ,脱氢效果显著。郝宾宾<sup>[9]</sup>研究不同堆垛缓冷时间对板坯中心溶质偏析的影响,认为堆垛缓冷36 h以上,中心温度控制在370 °C,中心偏析现象得到大幅度的改善,轧材层状断口现象得到控制。若堆垛缓冷时间过短,板坯中心偏析无法得到明显改善;若堆垛时间过长,中心偏析改善效果减小。沈世雕等<sup>[10]</sup>实验研究了堆垛缓冷对连铸坯中心偏析的影响,发现堆垛缓冷48 h后连铸坯中心偏析由C类2.0级降低至1.5级,缓冷36 h的连铸坯轧后钢板带状组织明显减轻,并未发现连续的珠光体带状组织。刘海波<sup>[11]</sup>分析研究堆垛缓冷工艺对低碳合金贝氏体Q550D-Z钢组织性能的影响,经过24 h缓冷处理,促进钢板

中Mn元素扩散,枝晶间溶质偏析显著减轻,提高钢板内部组织均匀性,显著减少珠光体带状组织,板材性能提升。于银俊<sup>[12]</sup>研究了缓冷工艺对汽车大梁钢510L组织性能的影响,分析了不同轧后冷却工艺钢材的显微组织与力学性能,发现空冷条件下钢板卷头、卷中和卷尾晶粒尺寸相差较大,造成热轧卷性能波动大。采用缓冷工艺可均匀卷头、卷中和卷尾的冷却速率,提高组织均匀性和力学性能的稳定。陈伟等<sup>[13]</sup>研究了堆垛缓冷过程中Al对过共析钢奥氏体组织转变的影响,认为Al元素抑制了晶界网状渗碳体形成,阻碍渗碳体的粗化,促进晶界铁素体形成,推迟珠光体转变,细化渗碳体颗粒和铁素体晶粒尺寸。

众多学者对堆垛缓冷过程中晶间裂纹<sup>[5-7]</sup>、元素扩散<sup>[8-11]</sup>、组织转变<sup>[11-13]</sup>进行了广泛研究。在EH420海工钢特厚板生产过程中,需控制特厚板在380~400 °C进行长时间保温<sup>[14]</sup>,控制奥氏体向针状铁素体和贝氏体转变。在特厚板堆垛过程中,温度随时间连续变化,而当前开展特厚板堆垛在组织转变区停留时间的研究相对较少。根据堆垛缓冷工艺,采用数值模拟方法,详细研究特厚板堆垛速率、堆垛初始温度、堆垛高度对特厚板在组织转变区停留时间的影响,以优化堆垛工艺参数,控制组织转变,提高EH420海工钢的力学性能。

## 1 堆垛保温模型建立

连铸坯经过加热炉加热和轧制后,采用堆垛冷却的方式,降低特厚板冷却速率,控制奥氏体转变为针状铁素体和贝氏体。堆垛过程中,特厚板进行逐层叠加,降低表面积以实现特厚板缓冷。通过建立传热模型,计算堆垛钢板的温度场分布,其中传热方程如式(1)所示<sup>[15-17]</sup>。

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot [k(\nabla \cdot T)] \quad (1)$$

式中, $\rho$ 为特厚板密度,数值为7850 kg/m<sup>3</sup>;  $T$ 为温度,°C;  $t$ 为计算时间,s;  $C_p$ 为特厚板定压热容, J/(kg·°C);  $k$ 为特厚板导热系数, W/(m·°C),热容和导热系数选取如图1所示。

在传热计算过程中,由于高温特厚板通过辐射和对流方式向周围空间散热,堆垛上表层和侧边采用边界条件如式(2)所示<sup>[18]</sup>。

$$q = \sigma \varepsilon ((T_{\text{surf}} + 273)^4 - (T_{\text{amd}} + 273)^4) + \alpha (T_{\text{surf}} - T_{\text{amd}}) \quad (2)$$

式中, $q$ 为热流密度, W/m<sup>2</sup>;  $\sigma$ 为史蒂芬-玻尔兹曼常

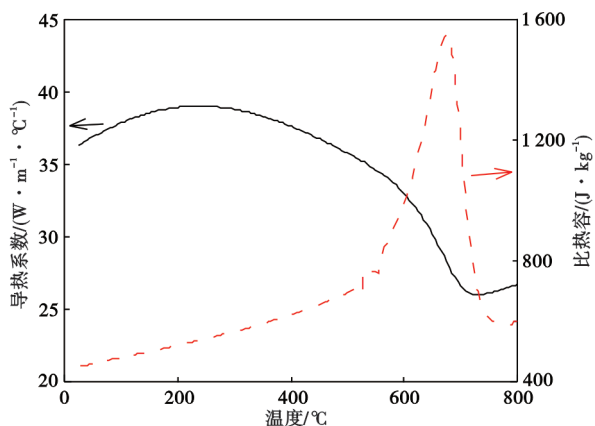


图 1 钢的导热系数和定压热容

Fig. 1 Thermal conductivity and heat capacity at constant pressure of steel

数,数值为  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C}^4)$ ;  $T_{\text{surf}}$  为特厚板表面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\varepsilon$  为钢板辐射率,数值为 0.85;  $T_{\text{amb}}$  为周围环境温度,数值为  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha$  为对流换热系数<sup>[19]</sup>,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。

EH420 海工钢特厚板轧制完成后,特厚板温度为  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,通过冷床逐渐冷却至  $400 \sim 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,开始进行堆垛缓冷。特厚板堆垛高度在  $2 \sim 3 \text{ m}$ ,堆垛速率  $0.33 \sim 0.20 \text{ min}^{-1}$  特厚板厚度为  $80 \text{ mm}$ ,宽度为  $3 \text{ m}$ 。特厚板轧制完成后,分析特厚板堆垛的温度场分布,研究特厚板在组织转变区停留时间,其中, EH420 海工钢成分的质量分数见表 1。在模型建立过程中,研究工艺参数见表 2。

表 1 EH420 海工钢化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of EH420 marine steel %									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Nb	Ti	V
0.04~0.08	0.10~0.40	1.30~1.60	$\leq 0.015$	$\leq 0.003$	0.6~1.2	0.10~0.50	0.02~0.06	0.005~0.030	0.01~0.06

表 2 特厚板堆垛冷却工艺参数

Table 2 Stacking process parameters of extra-thickness plate

序号	堆垛温度/ ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ )	堆垛高度/ m	堆垛速率/ $\text{min}^{-1}$	特厚板厚 度/mm
1	400	2.5	0.25	80
2	450	2.5	0.25	80
3	500	2.5	0.25	80
4	450	2.0	0.25	80
5	450	3.0	0.25	80
6	450	2.5	0.33	80
7	450	2.5	0.20	80

## 2 特厚板堆垛缓冷研究

海工钢特厚板经轧制完成后温度在  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$  附近,随后特厚板推入冷床进行空冷冷却,当表面温度冷却至  $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,特厚板进行堆垛缓冷降温。在特厚板堆垛之前,温度分布如图 2 所示,可以看出,特厚板芯部温度相对较高,而表面温度相对较低。

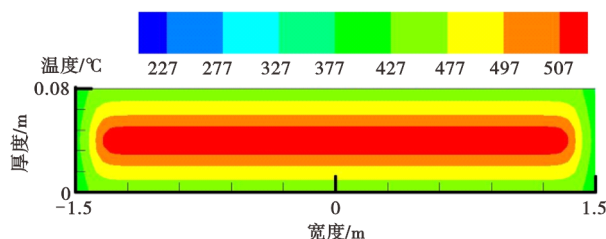


图 2 堆垛前特厚板的温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of extra-thick plates before stacking

特厚板表层冷却至  $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时,特厚板开始堆垛缓冷降温,特厚板堆垛速率为  $0.25 \text{ min}^{-1}$ ,堆垛高度为  $2.5 \text{ m}$ ,温度场分布如图 3 所示。随着堆垛时间延长,堆垛高度逐渐增加,逐渐完成堆垛过程。特厚板通过辐射和对流换热方式降温,特厚板上方温度开始增加,特厚板内部的温度逐渐均匀。随着堆垛的进行,堆垛中部温度逐渐增加,特厚板冷却速率降低。由于特厚板相互接触,间距相对较小,特厚板之间的温度分布相对均匀。特厚板通过堆垛后,表面积减小,温度降低速率明显减小。

特厚板堆垛后进行缓冷降温,不同缓冷时间条件下的温度分布如图 4 所示。堆垛缓冷  $24 \text{ h}$  时,堆垛中心温度仍存较高,而堆垛边部的温度明显降低。随着时间的推移,堆垛中心的温度明显降低。由于堆垛是通过多层的特厚板叠加而成,在冷却过程中,堆垛顶部和边部通过辐射和对流方式向周围空间散失热量,温度降低最快。堆垛中部和底部,主要是通过侧边的冷却降温,温度降低速度相对较慢。

图 5 是不同堆垛时间条件下,堆垛顶部、中部、底部的中间位置温度变化特征。由于堆垛通过堆垛表层辐射和对流进行散热,堆垛上层的热量快速散失,温度明显降低。堆垛中部和底部温度降低相对较慢。为了控制奥氏体向针状铁素体和珠光体组织转变,分析堆垛中部在  $380 \sim 420 \text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下的停留时间。

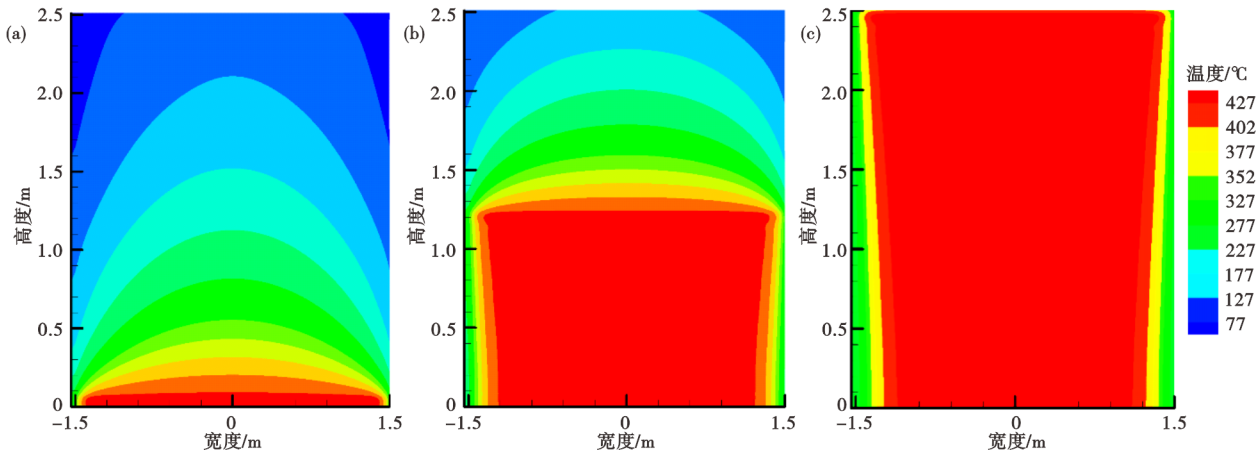


图 3 特厚板堆垛过程中温度分布:(a)第 1 层,(b)第 14 层,(c)第 28 层

Fig. 3 Temperature distribution of stacking process of extra-thick plates: (a) layer 1, (b) layer 14, (c) layer 28

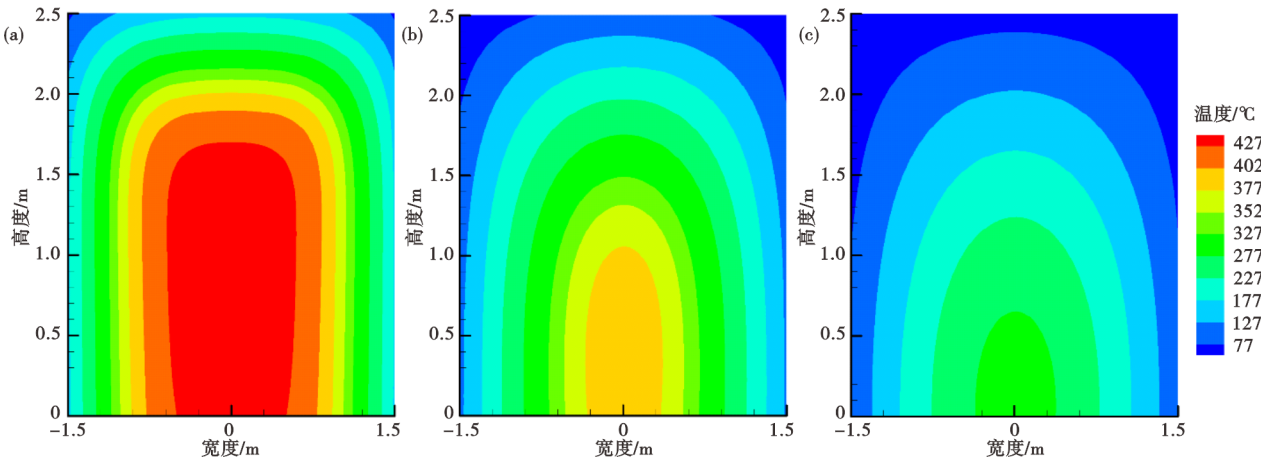


图 4 不同缓冷时间条件下堆垛温度场分布:(a) 24 h,(b) 72 h,(c) 120 h

Fig. 4 Distribution of temperature field with different cooling times: (a) 24 h, (b) 72 h, (c) 120 h

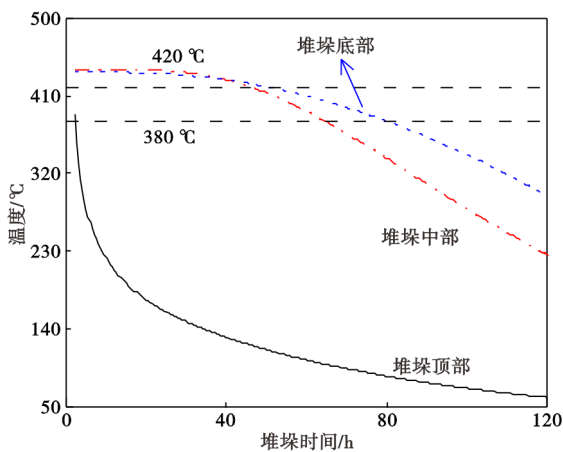


图 5 堆垛不同位置处的温度随时间的变化

Fig. 5 The variation of temperature at different positions in the stack over time

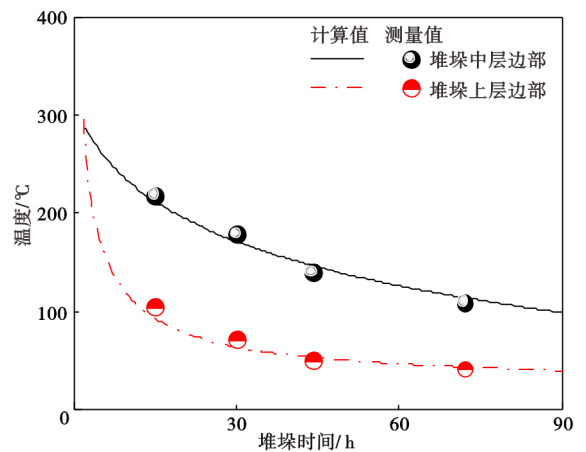


图 6 堆垛上层边部和中层边部温度模拟值与计算值

Fig. 6 Simulated and calculated values of the temperature on the stack top and middle part surface

在实际堆垛过程中,在不同缓冷时间条件下对堆垛上层边部和中层边部进行表面测温,如图 6 所

示。随着特厚板堆垛时间的延长,温度逐渐降低。通过不同时间条件下的测温数据,与模拟计算值对

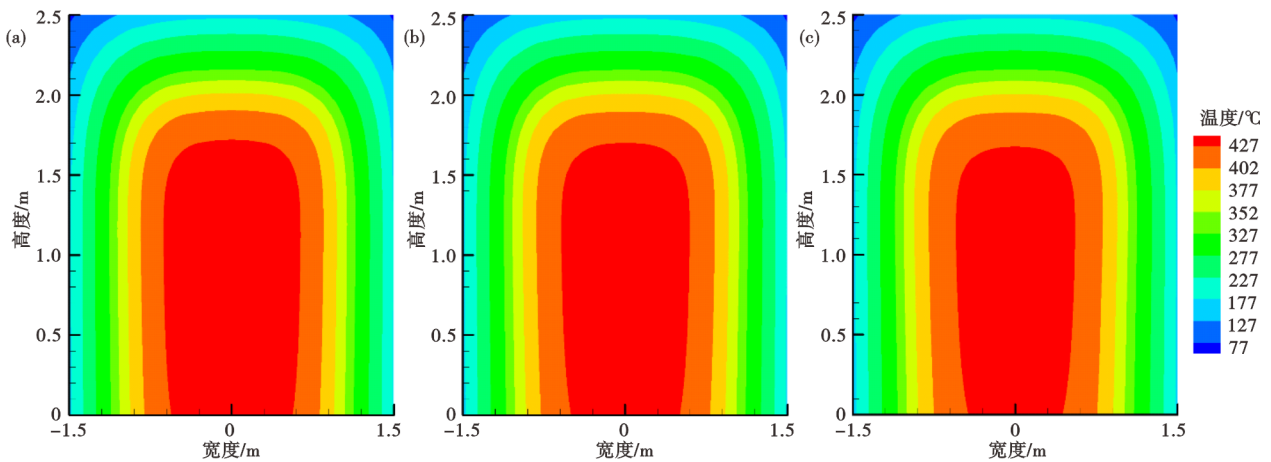


图 7 不同堆垛速率条件下缓冷 24 h 后温度分布: (a)  $0.33 \text{ min}^{-1}$ , (b)  $0.25 \text{ min}^{-1}$ , (c)  $0.2 \text{ min}^{-1}$

Fig. 7 Temperature distribution after 24 hours with different stacking speed: (a)  $0.33 \text{ min}^{-1}$ , (b)  $0.25 \text{ min}^{-1}$ , (c)  $0.2 \text{ min}^{-1}$

比,最大温度偏差控制在 2.9% 以内,可以说明建立的堆垛缓冷模型是相对准确。

### 2.1 堆垛速率的影响

堆垛速率影响特厚板的热量散失,因此,可能影响温度场分布和冷却行为。本部分研究 80 mm 特厚板在温度  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下,堆垛速率对堆垛中部冷却的影响。图 7 是不同堆垛速率条件下的温度场分布,可以看出 24 h 后,堆垛芯部温度较高,而顶部和边部的温度相对较低。在不同堆垛速率条件下,温度场分布差异性相对很小。

图 8 为不同堆垛速率条件下堆垛中部温度随时间的变化曲线,从图 8 中可以看出,随着每层堆垛时间的增加,中部温度略微的降低,但对  $380 \sim 420 \text{ }^\circ\text{C}$  间的停留时间影响相对较小。堆垛速率从  $0.33 \text{ min}^{-1}$  增加至  $0.20 \text{ min}^{-1}$ ,堆垛中部在组织转变区停留时间为 18.5 h 增加到 19.5 h,认为堆垛速率对特厚板组织转变的影响很小。

### 2.2 堆垛温度的影响

连铸坯经轧制后冷却至不同温度进行堆垛缓冷,本部分研究特厚板在冷床冷却至  $400, 450, 500 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下进行堆垛,温度场分布如图 9 所示。可以看出堆垛芯部温度相对较高,而边部温度相对较低,堆垛受到特厚板冷却初始温度的影响很大。

图 10 为缓冷 72 h 后的堆垛的温度场分布,可以看出堆垛芯部温度较高,而边部和顶部温度较低,这主要是热量通过堆垛表层辐射和对流散热的影响。在较高的初始温度条件下,堆垛芯部仍处于高温水平,需要较长的时间冷却。

为了控制奥氏体向针状铁素体和贝氏体转变,

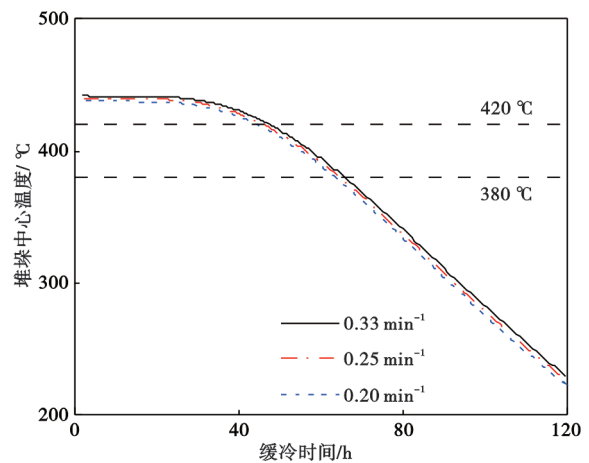


图 8 堆垛中心温度随时间的变化

Fig. 8 Temperature variation in the center of the stack with different times

堆垛需要在  $380 \sim 420 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下长时间保温,其中堆垛芯部的温度如图 11 所示。初始温度为  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下,堆垛中心在组织转变区停留时间为 35.6 h。初始温度为  $450, 500 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下,堆垛中心在组织转变区停留时间为 18.5、15.1 h。特厚板初始堆垛应控制在  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,延长特厚板在转变区停留时间。

### 2.3 堆垛高度的影响

堆垛冷却的过程,特厚板堆垛高度也是影响冷却的主要原因。随着堆垛高度增加,冷却表面积减小,散热速率降低,如图 12 初始堆垛温度为  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ ,堆垛高度分别为 2、2.5、3 m 条件下的温度场分布。特厚板堆垛表层温度较低,而芯部温度相对较高。

图 13 是缓冷 72 h 后的特厚板堆垛温度场分布,堆垛仍然表现出芯部温度高,而边部温度低的趋势,这主要是堆垛通过表面热量散失,表层温度降

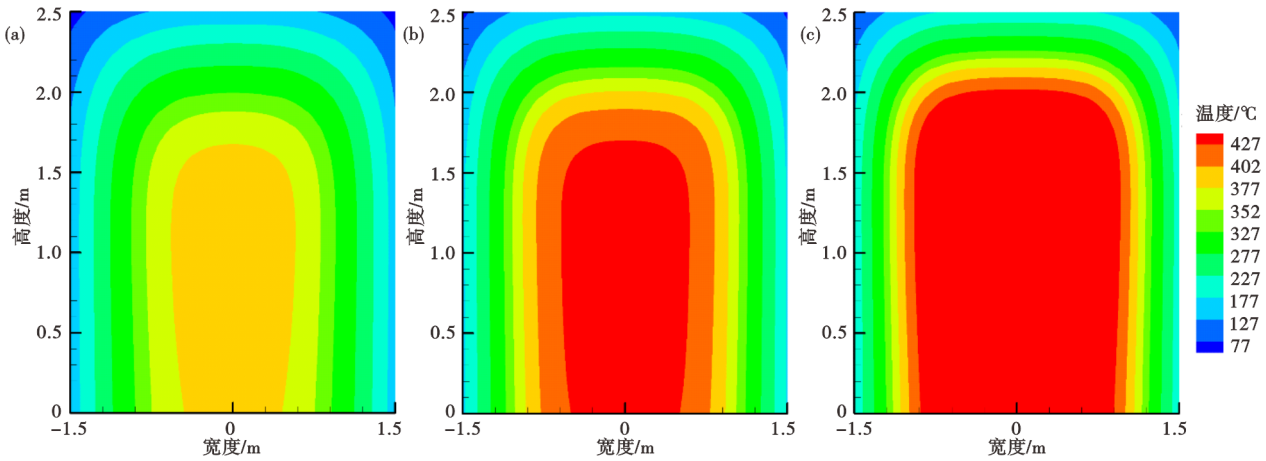


图 9 不同堆垛温度条件下缓冷 24 h 后温度分布:(a) 400 °C, (b) 450 °C, (c) 500 °C  
 Fig. 9 Temperature distribution after stacking cooling for 24 h: (a) 400 °C, (b) 450 °C, (c) 500 °C

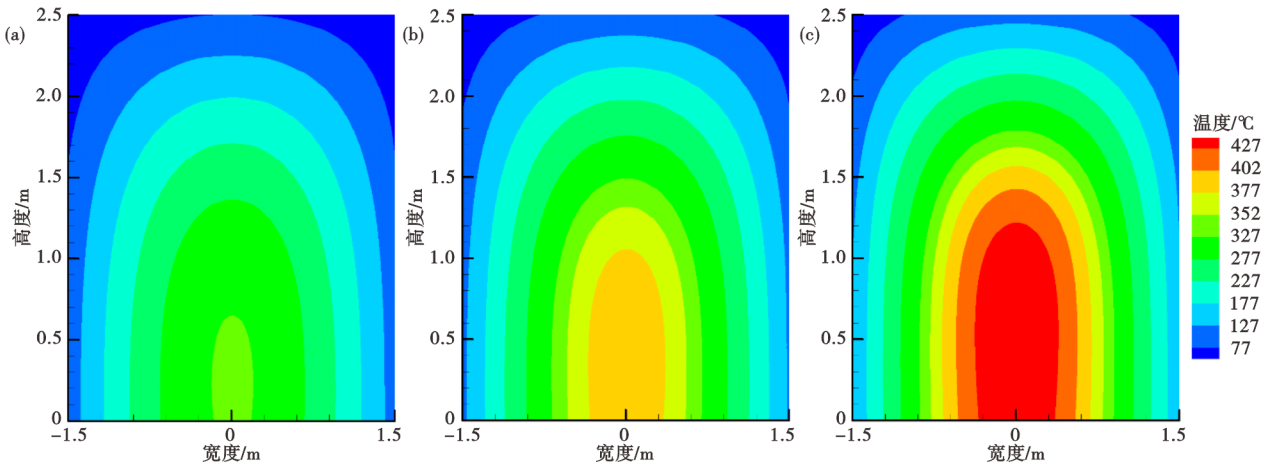


图 10 不同堆垛温度条件下缓冷 72 h 后温度分布:(a) 400 °C, (b) 450 °C, (c) 500 °C  
 Fig. 10 Temperature distribution after cooling for 72 h with different stacking temperature conditions: (a) 400 °C, (b) 450 °C, (c) 500 °C

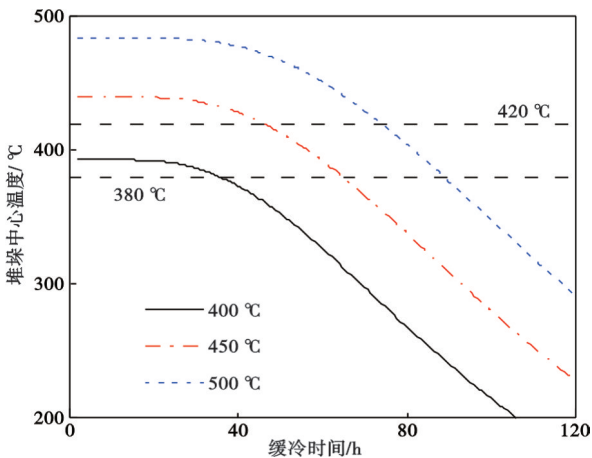


图 11 堆垛中心温度变化  
 Fig. 11 Temperature variation in the center of stacking

区较大,因此,需要较长时间的冷却降温。

图 14 为不同堆垛高度时中心温度随时间变化的影响。从图 14 中可以看出,堆垛高度增加,冷却时间延长。当堆垛高度为 2.0 m 时,堆垛中部在组织转变区停留时间为 17.1 h。堆垛高度增加到 2.5、3.0 m 时,堆垛在组织转变区停留时间为 18.5、20.8 h。因此,随着堆垛高度的增加,冷却速率降低,堆垛中部在组织转变区停留时间延长。

### 3 结论

通过建立海工钢特厚板堆垛冷却数学模型,根据测温数据验证了模型的准确性,分析了不同条件下堆垛温度场变化特征,主要得到如下结论:

1) 海工钢特厚板堆垛后,随着冷却时间延长,表层温度逐渐降低,而中部和底部温度降低速率明

低较快。随着特厚板堆垛高度增加,其内部的高温

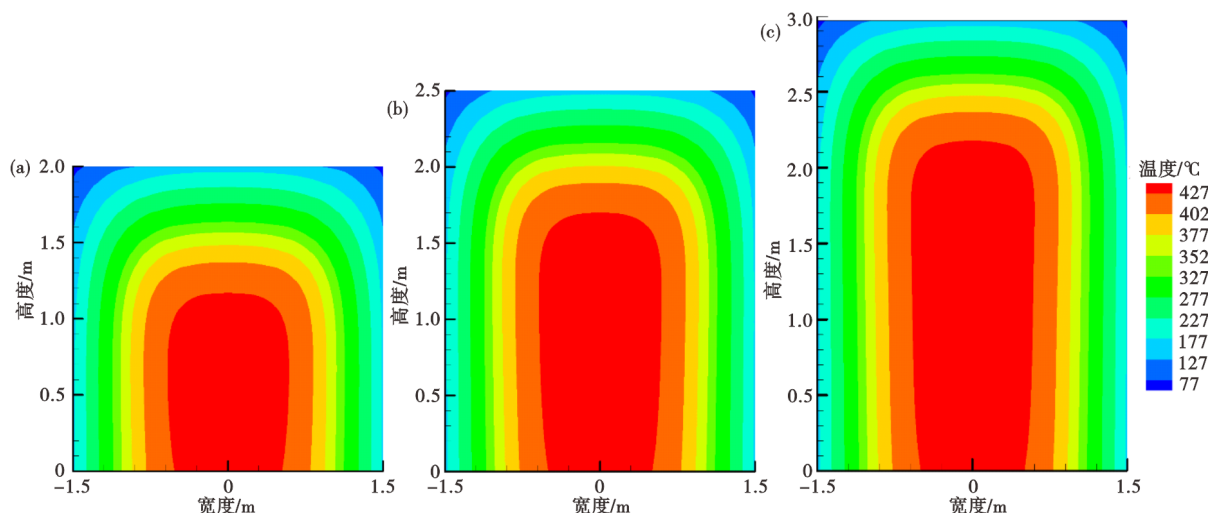


图 12 不同堆垛高度条件下缓冷 24 h 温度场分布: (a) 2 m, (b) 2.5 m, (c) 3.0 m

Fig. 12 Temperature field distribution with different stacking height conditions at 24 h: (a) 2 m, (b) 2.5 m, (c) 3.0 m

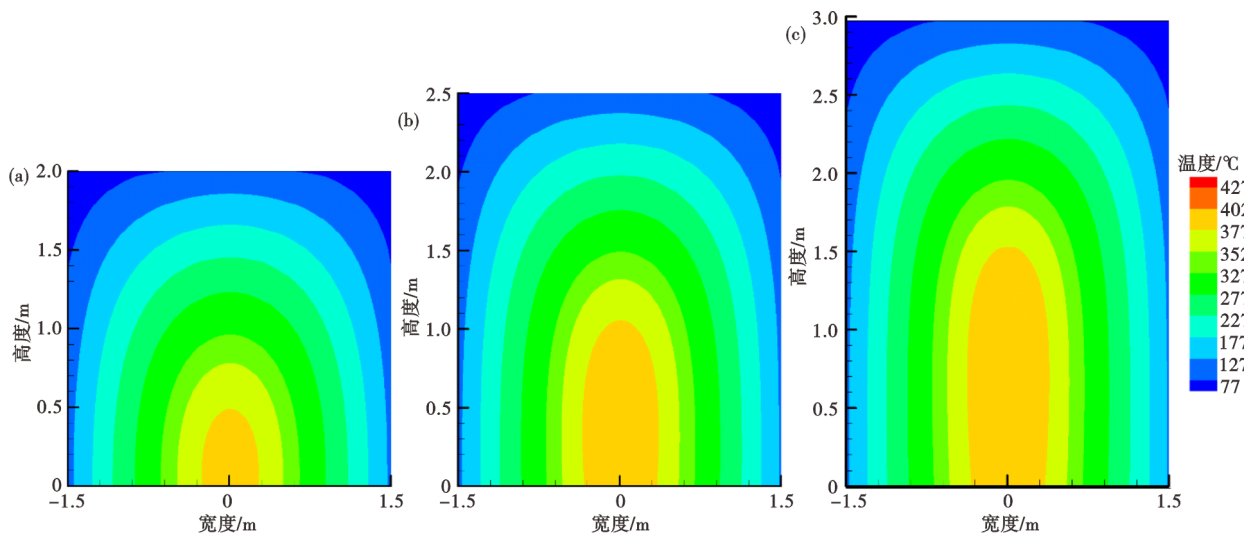


图 13 不同堆垛高度条件下缓冷 72 h 温度场分布: (a) 2 m, (b) 2.5 m, (c) 3.0 m

Fig. 13 Temperature field distribution with different stacking height conditions at 72 h: (a) 2 m, (b) 2.5 m, (c) 3.0 m

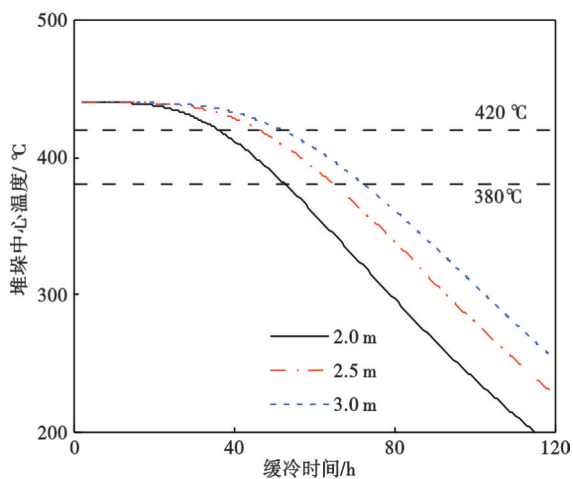


图 14 堆垛高度对中心温度随时间变化

Fig. 14 Center temperature variation with different heights

显减缓。堆垛速率对特厚板冷却影响较小,堆垛速率从 $0.33 \text{ min}^{-1}$ 增加至 $0.20 \text{ min}^{-1}$ ,堆垛中部在组织转变区停留时间为 18.5 h 增加到 19.5 h。

2) 随着特厚板初始堆垛温度增加,堆垛后冷却时间明显延长。初始温度  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下,堆垛中心在组织转变区停留时间为 35.6 h。初始温度为 450、 $500 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下,堆垛中心在组织转变区停留时间为 18.5、15.1 h。因此,将初始堆垛温度控制在  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,最大程度控制组织转变。

3) 随着堆垛高度的增加,冷却速率降低,在组织转变区停留时间延长。当堆垛高度从 2.0 m 增加至 3.0 m 时,堆垛中部在组织转变区停留时间为 17.1 h 增加到 20.8 h。

## 参考文献

- [1] 孙宪进. 高性能海洋工程用钢的研究与开发[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [2] 张建国, 黄 军, 怀建峰, 等. AISI4140合金结构钢厚板的研发[J]. 宽厚板, 2022, 28(2): 43-45.
- [3] 李 欣, 黄 波. 中板生产中除氢工艺的合理应用[J]. 轧钢, 2005, 22(5): 36-37.
- [4] 殷 懿, 张海军, 付振坡, 等. P355GH超厚钢板超声波探伤不合格原因分析[J]. 宽厚板, 2019, 25(2): 25-27.
- [5] 袁少斌, 许少普, 张 强, 等. 缓冷工艺对钢板探伤检验合格率的影响[J]. 钢铁研究, 2015, 43(3): 60-62.
- [6] 王卫华, 李战军, 初仁生, 等. 厚规格高合金钢坯堆垛缓冷工艺开发[J]. 炼钢, 2019, 35(5): 57-62.
- [7] 郝 鑫, 臧 淼, 尹绍江, 等. 提高探伤板材堆垛缓冷厚度的研究[J]. 宽厚板, 2017, 23(6): 30-32.
- [8] 姜东滨, 智建国, 宋 海, 等. 连铸坯脱氢退火数值模拟[J]. 工程科学学报, 2020, 42(7): 862-868.
- [9] 郝宾宾. 大板坯堆垛缓冷对中层层状断口的影响[C]. 2018年全国轧钢生产技术会议论文集. 2018: 218-222.
- [10] 沈世雕, 黄福祥, 陈书浩, 等. 堆垛缓冷对连铸坯中心偏析的影响[J]. 钢铁, 2010, 45(10): 47-51.
- [11] 刘海波. 堆垛缓冷对Q550D-Z钢板组织性能的影响[J]. 中国冶金, 2014, 24(3): 31-33.
- [12] 于银俊. 缓冷工艺对510L组织性能的影响[J]. 河南冶金, 2021, 29(4): 3-4+27.
- [13] 陈 伟, 李龙飞, 杨王玥, 等. Al对过共析钢缓冷相变和过冷奥氏体动态相变组织的影响[J]. 金属学报, 2008, 44(9): 1069-1075.
- [14] 刘朝霞, 刘 俊, 徐光琴, 等. EH47止裂钢奥氏体连续冷却转变行为[J]. 特殊钢, 2020, 41(4): 68-70.
- [15] Sun H B, Zhang J Q. Study on the macrosegregation behavior for the bloom continuous casting: Model development and validation [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, 45(3): 1133-1149.
- [16] Li X D, Li C N, Yuan G, et al. Effects of cooling paths on through-thickness microstructure and mechanical properties of heavy gauge X80 pipeline steel [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2017, 30(5): 483-492.
- [17] Jiang D B, Zhu M Y, Zhang L F. Roll-gap deviation on centerline segregation evolution in continuous casting slab [J]. Steel Research International, 2023, 94(5): 2200708.
- [18] Huang Z Y, Shi Q, Chen F Q, et al. FEM simulation of the hydrogen diffusion in X80 pipeline steel during stacking for slow cooling[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2014, 27(3): 416-421.
- [19] 吴 铿. 冶金传输原理[M]. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 2016.