

· 形变与相变 ·



冷镦钢 SCM435 高速线材全线温度场与 相析出计算模型及演变规律

谭成楠^{1,3}, 古佐鸿², 周 民², 谭光耀², 白亚斌³

(1 中冶赛迪上海工程技术有限公司, 上海, 200940; 2 中冶赛迪技术研究中心有限公司, 金属材料研究所, 重庆, 401122; 3 中冶赛迪工程技术股份有限公司, 铸轧事业部, 重庆, 401122)

摘 要:冷镦钢 SCM435 高速线材在冷却阶段极易发生贝氏体转变, 探究其在斯太尔摩风冷线上温度场和相析出过程对于最终产品质量控制至关重要。通过建立温度场有限差分方程、换热系数模型和相析出方程, 搭建轧制生产工艺与轧件温度、组织关系之间的桥梁, 实现冷镦钢 SCM435 轧制全线温度场和相析出演变规律的计算。计算结果显示, 初始坯料以 900 °C 的温度进入轧线, 开轧表面温度为 854 °C, 进入吐丝机的表面温度为 710 °C, 芯表温差为 41 °C, 穿水最大温降为 234 °C。在风冷线冷却阶段, 通过调控保温罩的打开和关闭计算了两种不同冷却条件下的相析出曲线, 结果表明, 缓慢冷却能够显著促进铁素体、珠光体析出, 从而抑制贝氏体的析出过程。

关键词:高速线材; 温度场; 相析出; 有限差分方程; TTT 曲线

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2025-00016 中图分类号: TG335. 6

Calculation Model and Evolution Law of Temperature Field and Phase Precipitation along the Entire Line of Cold Heading Steel SCM435 High-Speed Wire Rod

Tan Chengnan^{1,3}, Gu Zuohong², Zhou Min², Tan Guangyao², Bai Yabin³

(1 Casting and Rolling Division, CISDI Shanghai Engineering Co., Ltd., Chongqing 200940, China;
2 Institute of Metal Materials, CISDI Research and Development Co., Ltd., Chongqing 401122, China;
3 Casting and Rolling Division, CISDI Engineering Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: Cold heading steel SCM435 high-speed wire is easy to undergo bainite transformation in the cooling stage. It is very important to explore the temperature field and phase precipitation process in the Stelmor air-cooling line for the quality control of the final product. By establishing the finite difference equation of temperature field, heat transfer coefficient model and phase precipitation equation, the bridge between the rolling production process and the rolling piece temperature and organization relationship is built, and the calculation of the temperature field and phase precipitation evolution law of SCM435 rolled cold heading steel is realized. The calculation results show that the initial billet enters the rolling line at a temperature of 900 °C, with an opening surface temperature of 854 °C and a surface temperature of 710 °C when entering the spinning machine. The temperature difference between the core and surface is 41 °C, and the maximum temperature drop through water is 234 °C. During the cooling stage of the air-cooled line, the phase precipitation curves under two different cooling conditions were calculated by adjusting the opening and closing of the insulation cover. The results showed that slow cooling can significantly promote the precipitation of ferrite and pearlite while suppressing the precipitation process of bainite.

Key Words: High-speed Wire; Temperature Field; Phase Precipitation; Finite Difference Equation; TTT Curve

在钢铁行业“高端化、智能化、绿色化”转型和高质量发展的背景下, 钢铁企业在保证高效批量化生产的同时不断追求优质、稳定可控的产品性能, 对降低生产成本、提高市场竞争力具有决定性影响^[1-3]。优特钢高速线材经过生产运输后, 采用不同下游制造生产工艺应用于汽车制造、机械结构、材料结构及其他终端应用等领域, 从物理冶金、生产

工艺、产品设计各角度朝着更优性能、更轻便、更低成本等方向努力^[4], 而线材产品的性能取决于其内部的微观组织, 最终的微观组织又取决于线材轧制及冷却工艺。近年来, 众多材料工作者致力于研究轧件温度场和相转变计算模型, 以实现基于轧制工艺的全线温度场和相析出演变, 用于指导生产工艺制定和新产品开发。温度是高速线材生产中的关

基金项目: 绿色高效高等级特殊钢生产关键技术研究及应用, 五矿科技基金, 90150879

作者简介: 谭成楠(1982—), 男, 硕士, 高级工程师; E-mail: Chengnan.Tan@cisdi.com.cn; 收稿日期: 2025-01-21

键因素,温度决定着组织演变,其控制准确与否与产品组织性能密切相关。实现高速线材温度场和相变的准确预测,关键在于建立准确的温度场模型和冷却相变模型。众多研究者^[5-9]致力于轧制生产线数字化研究工作,基于换热系数模型、物理冶金模型、相变模型和力学性能模型等数学模型,通过数值模拟、有限元分析、计算机语言编程等方式,实现了轧制全线温度场、组织演变、相转变量和力学性能的计算。但是少有研究风冷线冷却过程中的动态相析出过程。

冷镢钢 SCM435 相较于普碳钢具有更加复杂的相变过程,其盘条组织以铁素体、索氏体和贝氏体为主,并含有少量的珠光体和马氏体^[10]。在较低的冷却速率下就能够发生贝氏体相变过程,所以,对于冷镢钢 SCM435 冷却过程温度场演变和相析出过程的准确预测至关重要。通过建立轧线和斯太尔摩风冷线阶段的导热微分方程的有限差分求解,结合相变动力学方程,实现高速线材全线温度场和动态相析出计算,为高精度工艺控制提供理论基础。

1 数学模型

1.1 导热微分方程

导热微分方程是根据能量守恒定理与傅立叶定律来建立导热物体中的温度场满足的数学关系式,用来描述导热物体随时间的温度变化关系。将高速线材轧制过程轧件等效成截面面积相同的无限长圆柱,认为其只存在半径方向上的热传导过程。所以可将三维导热微分方程^[11]简化成一维数学模型如式(1):

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q_i \quad (1)$$

式中, c_p 为材料比热, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; ρ 为材料密度, kg/m^3 ; λ 为导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; q_i 为内热源的热流密度, W/m^2 。

圆形断面的线材其温度分布认为是轴对称的,对其在空间上进行环形分层离散。将极坐标原点定在线材横截面的中心位置,直径方向为线材横截面半径 R 方向,将线材半径方向等分成 m 分,半径步长记为 $\Delta r=R/m$,时间离散化后的时间步长记为 Δt 。通过有限差分求解,得到线材芯部和内部节点的有限差分方程:

内部节点有限差分方程:

$$T_i^{k+1} = (1 - 2f)T_i^k + (1 + \frac{1}{2i})fT_{i+1}^k + (1 - \frac{1}{2i})fT_{i-1}^k + \frac{\Delta t}{\rho c_p} q_i \quad (2)$$

芯部节点的有限差分方程:

$$T_1^{k+1} = (1 - 2f)T_1^k + 2fT_2^k + \frac{\Delta t}{\rho c_p} q_i \quad (3)$$

式中, $f = \frac{\lambda \Delta t}{\rho c_p (\Delta r)^2}$ 。

线材表面的热交换比较复杂,不仅与线材内部节点有热传导,而且还与周围环境存在对流和辐射换热。高速线材在轧线上存在与空气的辐射和对流换热、与轧辊的接触换热以及与冷却水的换热。所以可以得到综合边界条件:

$$\lambda \frac{T_{i+1}^k - T_i^k}{\Delta r} + \sum_j h_j (T_i^k - T_j) = 0 \quad (4)$$

在求解边界点时,可在线材表面外建立虚拟点 $m+1$,令 $i=m$,代入内部节点差分方程式(2),并与综合边界条件联立得:

$$T_m^{k+1} = (1 - (1 - \frac{1}{2m})f - \sum_j (1 + \frac{1}{2m})fb_j)T_m^k + (1 - \frac{1}{2m})fT_{m-1}^k + \sum_j (1 + \frac{1}{2m})fb_j T_j + \frac{\Delta t}{\rho c_p} q_i \quad (5)$$

式中, $b_j = \frac{h_j \Delta r}{\lambda}$

1.2 换热系数模型

完成导热微分方程的有限差分求解之后,还需要确认轧制全线过程中各个阶段的换热系数。根据轧制历程,将轧线上的换热情况分为,1)空冷阶段;2)轧制阶段;3)穿水冷却阶段;4)风冷阶段。

1)空冷阶段

当轧件位于设备之间的辊道时,轧件只与周围空气产生辐射和对流换热,将这一阶段称为空冷阶段。所以,此阶段的综合换热系数 h_{air} 为辐射换热 h_r 和空气对流换热 h_c 的加和。辐射换热系数可由文献^[12]中式(2)表示。当轧件在高速运动过程中,可认为轧件与周围空气发生强迫对流换热系数 h_c ,可由文献^[13]中的式(11-13)计算得到。

2)轧制阶段

轧制过程中,轧件首先与轧辊表面接触,将轧件表面热量传递给轧辊表面,发生接触热传导换热,此时与轧辊的换热系数 h_{roll} 跟轧制状态、界面介质和温度有关,可由文献^[14]式(2.53)计算得到。

除了与轧辊的接触换热以外,由于轧件在轧制

过程中会产生塑性变形,而塑性变形功会转化成内能使得轧件温度升高,所以,需计算内热源的热源强度 $q_v(\text{W}/\text{m}^3)$,其计算公式如式(6)^[15, 16]:

$$q_v = \eta \frac{\bar{\sigma} \dot{\varepsilon}}{\beta} \quad (6)$$

式中, η 为功热转换系数,(取0.5~0.95); $\bar{\sigma}$ 为流变应力,MPa; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; β 为热功当量,取4.184 J/卡。

3) 穿水冷却阶段

当轧件进入水箱进行强制水冷过程中,冷却水会带走轧件表面大量的热量,迫使轧件表面产生大温降,水冷换热理论模型如式(7)、式(8)^[17]:

$$h_{\text{water}} = \frac{C \left(\frac{v_w D_h}{v} \right)^n (v/a)^{1/3} \lambda_w}{D} (1 - 0.0075 T_w) (1 - 10^{m T_s}) \quad (7)$$

$$v_w = (0.3651 + 0.0822 F_w) 1.223 P_w^{0.4565} \quad (8)$$

式中, λ_w 为水的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,取0.6; T_w 和 T_s 分别为冷却水温度和线材表面温度, $^\circ\text{C}$; v_w 为冷却水流速, m/s ; D_h 为冷却管的水力直径, m ; D 为线材直径, m ; v 为流体的运动黏度, m^2/s ,取 0.9055×10^{-6} ; a 为水导温系数, m^2/s ,取 0.14×10^{-6} ; F_w 为水流量, m^3/h ; P_w 为水压,MPa; C 、 n 、 m 分别取0.0522、0.598、-0.0015。

4) 风冷阶段

斯太尔摩风冷线上设有风机和保温罩,保温罩起到缓慢冷却的效果。由于冷镦钢SCM435在冷速较低的情况下即可发生贝氏体相变,为了尽可能抑制贝氏体析出,计算过程中默认关闭风机,只调控保温罩的打开和关闭。当保温罩打开时,此时的换热条件可看作与空气的自然对流和辐射。当关闭保温罩之后,此时轧件与外部空气依然发生自然对流和辐射,但是由于保温罩的保温作用,轧件与空气的换热系数将会有削减。经过生产现场验证并考虑到风冷线辊道速度的影响,关闭保温罩后的换热系数相比于空冷阶段换热系数综合削减约40%。

1.3 相析出模型

在高速线材风冷线冷却过程中,轧件会发生相变。随冷却速度变大,过冷奥氏体将分别转变为铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体。在相变过程中,轧件会释放相变潜热,相变潜热会影响冷却过程。如果相变潜热足够大,冷却速率会降低,温度也会升高。

采用Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK)方程对相变的体积分数进行了预测。公式

如式(9)^[18, 19]:

$$X = 1 - \exp(-bt^n) \quad (9)$$

式中, X 为转变相的体积分数, t 为从相变开始经过的时间, n 和 b 可从TTT图中得到。

值得注意的是,TTT曲线只适用于等温过程,正好契合将连续温度离散成在 Δt 时间内等温过程的温度场有限差分的计算过程。对于扩散型相变在计算相变析出过程中,孕育期是必需要考虑的因素。当轧件温度降低到相变开始温度后,要经过相变孕育期才会开始发生相变。在变温冷却过程中,通常采用Shcheil可加性法则计算相变孕育时间,可由文献^[20]式(42)表示。

当 $f(t)$ 等于1时,认为开始发生相变过程。相变过程会产生相变潜热 q ,会使得线材温度升高,所以,相变过程需要和温度场进行耦合计算。相变潜热 q 可通过文献^[21]式(5)计算得到。

2 计算结果和分析

1) 工艺参数及计算流程

采用某高线厂生产的 $\phi 14$ mm冷镦钢SCM435进行温度场及相变计算。其化学成分见表1。

表1 冷镦钢SCM435化学成分(质量分数)

| Table 1 Chemical composition of cold heading steel SCM435 | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| | | | | | | | | % |
| C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | Cu |
| 0.36 | 0.19 | 0.77 | 0.007 | 0.005 | 0.02 | 1.02 | 0.17 | 0.03 |

轧件初始尺寸为 $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 9\,000 \text{ mm}$,加热炉出炉温度为 $900 \text{ }^\circ\text{C}$,经20道次轧制后终轧速度为 $27.98 \text{ m}/\text{s}$ 。表2为各道次轧机及工艺参数。吐丝后的斯太尔摩冷却线长度为 133.4 m ,风冷线共设有14段辊道,其中,Z1到Z7设有风机,Z1到Z13段设有保温罩,Z1到Z13每段长度为 9.25 m ,Z14为长度为 13.15 m 。辊道速度为 $6 \sim 120 \text{ m}/\text{min}$ 。

图1所示为轧线温度场计算流程,其中,图1(a)为轧制段的温度场计算流程。在轧制阶段,轧件温度较高,该过程不会发生相转变,所以,此阶段关键在于确定轧件在不同环境下(空冷、轧辊接触冷却、穿水冷却)的换热系数以及轧制阶段的内热源。首先是初始参数的输入,包括轧机参数、水箱参数、风冷线参数、坯料参数等;之后进行不同阶段的划分,以轧件所经历的设备作为先后顺序,将设备(除鳞箱、轧机、水箱)和设备后的辊道作为一个完整的阶段,计算各个阶段的轧制速度、开始时间点和结束

表 2 轧机设备及工艺参数

Table 2 Rolling mill equipment and process parameters

| 机组 | 伸长率/% | 辊环直径/mm | 轧制速度/ ($m \cdot s^{-1}$) |
|-----|--------|---------|-------------------------------|
| 1H | 129.03 | 650 | 0.217 |
| 2V | 130.01 | 650 | 0.283 |
| 3H | 139.08 | 650 | 0.393 |
| 4V | 137.97 | 650 | 0.542 |
| 5H | 136.68 | 650 | 0.741 |
| 6V | 135.33 | 515 | 1.003 |
| 7H | 134.07 | 515 | 1.345 |
| 8V | 129.14 | 515 | 1.736 |
| 9H | 135.81 | 435 | 2.358 |
| 10V | 132.45 | 435 | 3.124 |
| 11H | 133.73 | 435 | 4.177 |
| 12V | 127.87 | 435 | 5.341 |
| 13H | 126.98 | 435 | 6.782 |
| 14V | 125.94 | 435 | 8.542 |
| 15# | 120.89 | 247.37 | 10.327 |
| 16# | 121.56 | 247.37 | 12.553 |
| 17# | 120.81 | 247.37 | 15.165 |
| 18# | 121.48 | 247.37 | 18.423 |
| 19# | 123.00 | 247.37 | 22.659 |
| 20# | 123.48 | 247.37 | 27.980 |

时间点,依据时间点来定位计算时刻点;最后是各个阶段依次求解,在求解一个阶段时,首先通过差分方程稳定性条件确定该阶段的时间步长 Δt 和空间步长 Δr ,从 0 时刻开始计算,先判断该时刻位于哪

个阶段,然后计算该阶段的换热系数,之后代入有限差分方程从芯部向表面依次进行不同空间步长和时间步长的温度求解。以下一时刻温度作为初始温度,继续以上述步骤求解下一时刻的温度,直至求解完整个轧制阶段。轧制阶段的最后时刻的温度条件作为初始条件进行风冷线温度场和相变耦合计算,如图 1(b) 所示。在计算之前,首先要确定轧件的铁素体、珠光体和贝氏体的开始相变温度,依次判断在计算温度下是否发生相变。当到达相变温度后,先判断是否达到相变孕育期,紧接着计算相转变量、相变潜热以及温度场,依次计算所有时刻直至离开风冷线。

2) 温度场计算

图 2 为冷镦钢 SCM435 轧线段和斯太尔摩风冷线温度场预测结果。从图 2 中可以看出,出炉温度为 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的坯料进入轧线,经除鳞后粗轧第一道次表面温度为 $854\text{ }^{\circ}\text{C}$,中轧第一道次表面温度为 $822\text{ }^{\circ}\text{C}$,预精轧第一道次表面温度为 $744\text{ }^{\circ}\text{C}$,精轧第一道次表面温度为 $710\text{ }^{\circ}\text{C}$,吐丝温度为 $707\text{ }^{\circ}\text{C}$,芯表温差为 $41\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从表面温度变化曲线(绿色曲线)可以看出,当轧件经过轧辊和水箱过程中,线材的表面温度会快速下降,其中,水箱穿水冷最快,最大温降可达 $234\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图中放大图出现的小台阶则由轧制过程中与轧辊的接触换热以及变形内热源共同

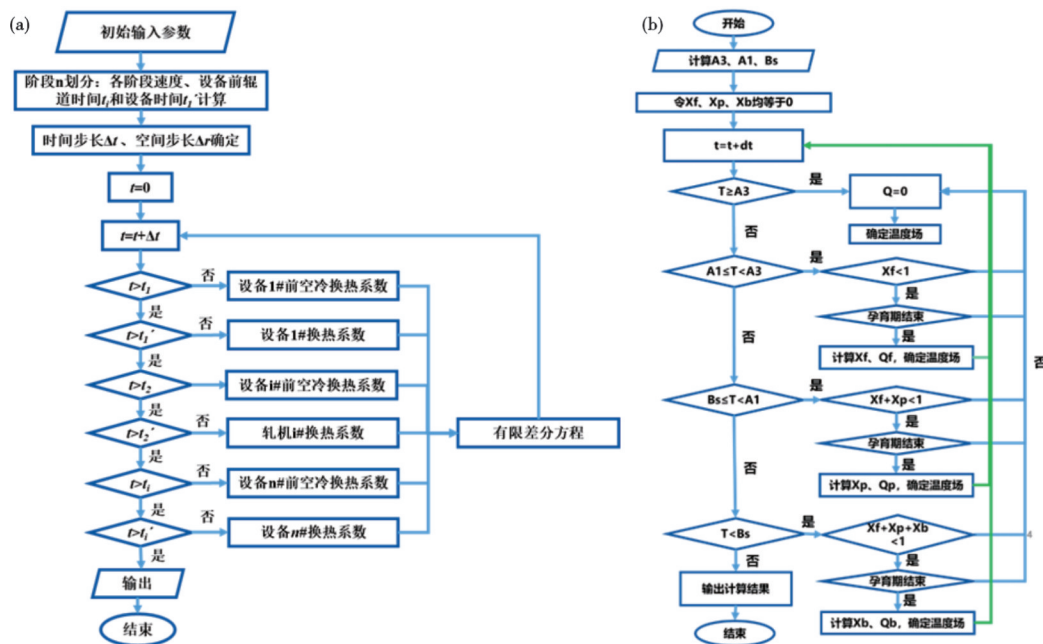


图 1 温度场计算流程:(a)轧制段温度断面计算流程,(b)冷却段温度场和相变耦合计算流程

Fig. 1 The calculation flow of temperature field : (a) the calculation flow of temperature section of rolling section , (b) the coupling calculation flow of temperature field and phase change of cooling section

作用决定的,单道次最高温升达到 9 °C。为了分析其中原因,计算软件经过各个设备时的换热系数和内热源。图 2(b)为不同道次下在辊道运行过程中的空冷换热系数和对应的轧制速度,从图 2 中可以看出,随着轧制速度的增加,空冷对流换热系数也随之增加,从最开始的 5.3 W/(m²·°C)到增加到 235.0 W/(m²·°C),与轧制速度增长趋势一致。如图 2(c)为主轧线核心设备换热系数柱状图,只要是轧件经过轧机机组和水箱时的换热系数,轧件与轧辊的换热系数在 1 413.7~2 026.2 W/(m²·°C)之间,而在穿水冷却过程中,换热系数急剧增大,最高达到 4 919.6 W/(m²·°C),导致轧件表面温度在经过水箱后急剧下降,符合计算结果和实际轧件穿水温度变化规律。图 2(d)给出了轧件在不同轧机道次下的变形内热源。变形内热源随着变形道次,即变形速度的增加而急剧增加,可以解释温度场曲线中的温升台阶随着轧制速度的增大而逐渐增大的现象。

3)相析出计算

除了进行温度场计算之外,相变的预测同样至关重要。图 3 为通过 JMatPro 计算得到的冷镢钢 SCM435 TTT 曲线,图中描述了铁素体、珠光体、贝氏体在不同温度下的开始转变时间和转变完成时间,从 TTT 图可以看出,该钢种在 350~550 °C 区间内很容易发生贝氏体相变,而珠光体即使在转变最优温度下依然需要较长的时间才能转变完成。通过相开始转变时间可以拟合出不同温度下的孕育期,通过结合结束转变时间可以确定 JMAK 方程(式 9)中的 b 和 n 参数,得到相析出方程。

轧件在完成最后一道次轧制之后,会经过吐丝机吐丝成圈后进入到斯太尔摩风冷线上。计算两种冷却工况下的温度场和相变过程,分别为保温罩全开和保温罩全关,计算结果如图 4 所示,其中,图 4(a,b)为保温罩全开的温度场和相析出曲线,图 4(c,d)为保温罩全关时的温度场和相析出曲线。

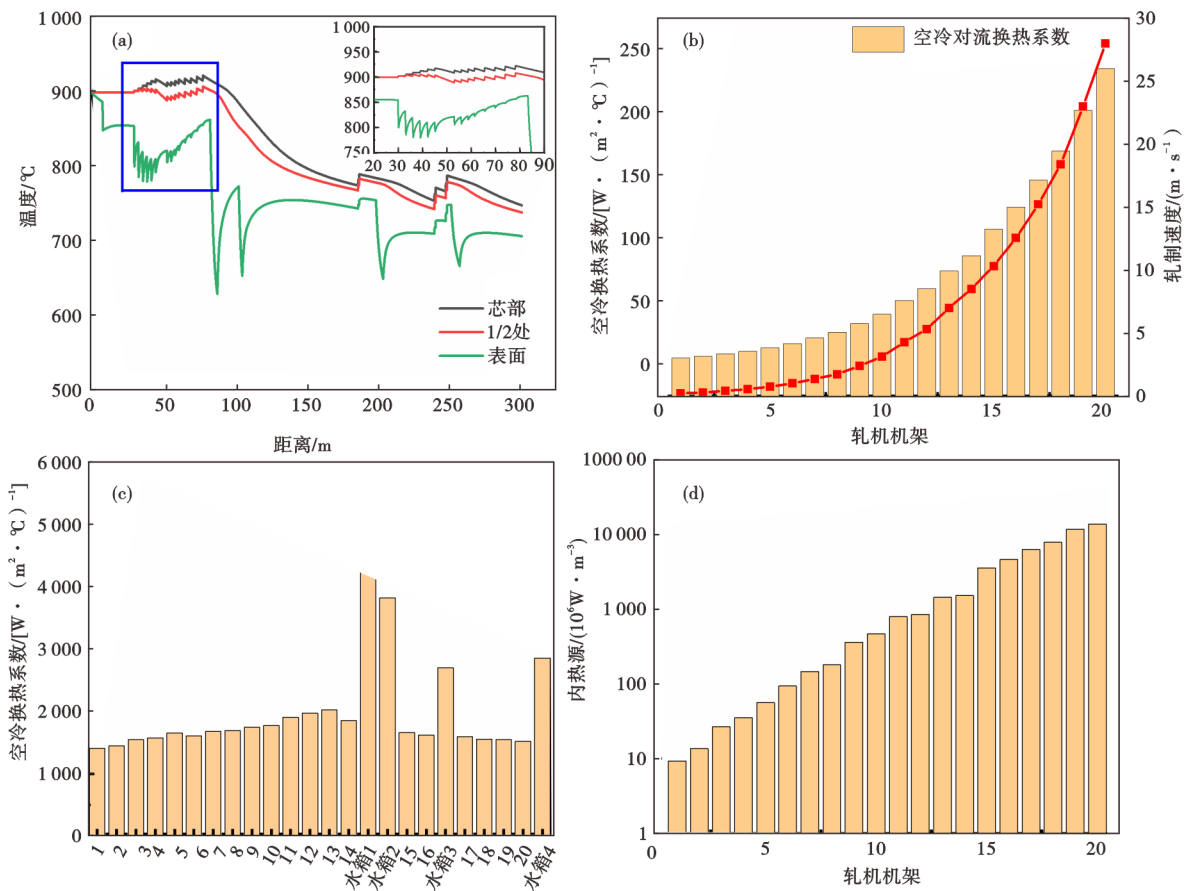


图 2 温度场计算结果:(a)冷镢钢 SCM435 轧线段温度场曲线,(b)空冷对流换热系数和轧制速度,(c)主轧线核心设备换热系数柱状图,(d)各个轧机变形内热源柱状图

Fig. 2 The results of temperature field : (a) temperature field curve of rolling section of SCM435 cold heading steel, (b) air cooled convection heat transfer coefficient and rolling speed, (c) bar chart of heat transfer coefficient of core equipment of main rolling line, (d) bar chart of internal heat source of deformation of each rolling mill

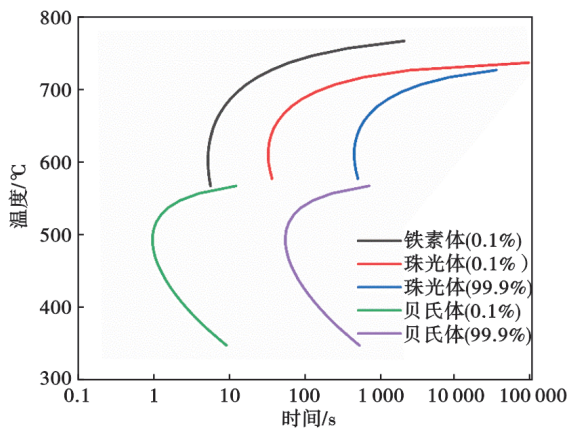


图3 冷镦钢SCM435 TTT曲线
Fig. 3 Cold heading steel SCM435 TTT curve

从温度场曲线可以看出,由于风冷线辊道速度是逐渐增加的,在风冷线前半段经历的时间较长,后半段随着辊道速度增加之后经历时间较短,所以,轧件在前半段冷却速度较快,随后逐渐减缓,最

终保温罩全开时的风冷线出口表面温度为277℃,芯表温差小于1℃,而保温罩全关时的风冷线出口表面温度为454℃,芯表温差约为1℃,两种状态最终温差为177℃。从相析出曲线可以看出,随着冷却的进行,最开始析出的组织为铁素体,随后是珠光体和贝氏体。在达到相转变条件后,贝氏体的析出速率最快,而珠光体的析出速率最慢,符合TTT曲线的相析出规律。由于保温罩全开时的冷却速度更快,其相析出完成时间明显早于保温罩全关时的相析出完成时间。同时,保温罩关闭之后,轧件冷却较慢,在铁素体和珠光体析出温度区间的经历时间更长,所有铁素体和珠光体的相变量显著高于保温罩全开时的相变量。最终保温罩全开时的铁素体含量最高,占58.0%,其次是贝氏体,占30.0%,珠光体含量最少,只占12.0%。而保温罩全关时的铁素体含量最高,占65.5%,其次是珠光体,占34.5%,无贝氏体析出。冷镦钢SCM435的缓慢冷却能够促

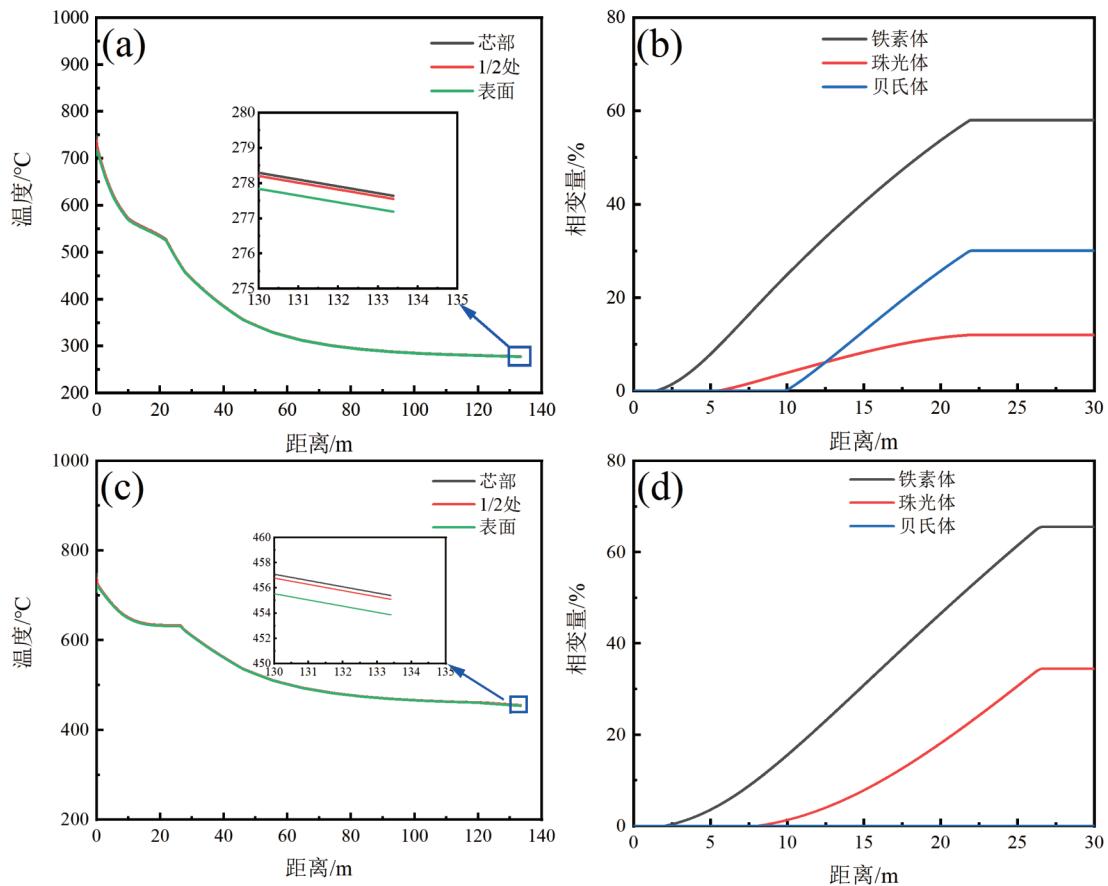


图4 风冷线温度场和相变曲线:(a)保温罩全开风冷线温度场曲线,(b)保温罩全开风冷线相析出曲线,(c)保温罩全关风冷线温度场曲线,(d)保温罩全关风冷线相析出曲线
Fig. 4 Temperature field and phase transition curve of air-cooled line : (a) temperature field curve of fully open air cooling line of insulation cover, (b) phase precipitation curve of fully open air cooling line of insulation cover, (c) temperature field curve of the air cooling line of the insulation cover, (d) precipitation curve of the air cooling line of the insulation cover

进铁素体与珠光体转变,抑制贝氏体转变,本数据结果和文献^[10]实验结果一致。

3 结论

基于温度场有限差分方程和相析出方程,建立轧线全线温度场和相变计算模型,并结合现场工艺参数,实现SCM435冷镢钢全线温度场计算和相析出预测。

1)加热保温温度为900℃的坯料经高压水除鳞进入轧线后,开轧温度为854℃,吐丝温度为710℃,芯表温差为41℃,穿水最大温降为234℃。

2)轧制过程中,轧件与轧辊的换热系数在

1 413.7~2 026.2 W/(m²·℃),穿水冷却过程换热系数最高达到4 919.6 W/(m²·℃)。内热源随着轧制速度的增加而急剧增长,单道次最大温升达9℃。

3)通过TTT曲线建立了冷镢钢SCM435相析出模型,结合温度场模型计算了保温罩全开和全关两种工况下的风冷段温度场和相析出曲线,两种状态最终温差为177℃。在相析出过程中,贝氏体在相变温度区间内析出速度最快,珠光体的析出速度最慢。保温罩全开时,铁素体含量最多,珠光体最少,铁素体、贝氏体与珠光体的含量比例分别为58.0%、30.0%、12.0%;冷镢钢SCM435的缓慢冷却能够显著促进铁素体、珠光体而抑制贝氏体的析出过程。

参考文献

- [1] 马新江,牛强,白亚斌,等.我国棒线材生产流程短捷化的进步与展望[J].轧钢,2024,41(5):133-143.
- [2] 杨勇强,吕鹏,王莉,等.长材生产线技术革新与进步[J].轧钢,2023,40(6):11-17.
- [3] 王蕾,唐荻,宋勇.热轧带钢组织性能预报模型及应用[J].钢铁,2016,51(11):73-78.
- [4] Ryuichi N, Takashi F, Osamu K, et al. Development of solution technology for parts production using steel bar and wire rod [J]. NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL TECHNICAL REPORT, 2017, 116(9): 25-31.
- [5] 赵千龙,苏福永,李斌,等.线材斯太尔摩风冷过程相变动力学研究及温度场预测[J].轧钢,2024,41(2):59-68.
- [6] 谭光耀,周民,池晨,等.高速棒材组织性能预报系统的开发及应用[J].轧钢,2023,40(6):51-57.
- [7] Li F, Zhang L W, Zhang C, et al. Numerical simulation on recrystallization behavior and microstructure evolution during hot continuous rolling process of 38CrMoAl steel rod [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29(10): 1633-1645.
- [8] Cao Y, Cao J G, Gao Y Q, et al. Prediction and analysis of temperature distribution, during the multi-pass hot rolling of nuclear power zirconium alloy under different rolling schedules [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(7): 5573-5585.
- [9] 増田智一,土田武広,千葉政道.冷間鍛造時の変形抵抗に及ぼすひずみ速度の影響 [J]. 神戸制鋼技報, 2011, 61(1): 52-56.
- [10] 彭进明,柯鹏,赵宜娜,等.相变温度及时间对SCM435钢盘条组织和性能的影响[J].轧钢,2021,38(4):60-63.
- [11] 郭志强,杨杰,任学平.轧制参数对板带热轧温度分布的影响[J].特殊钢,2019,40(5):1-6.
- [12] 孙佳怡,董龙沛,赵云松,等.镍基单晶涡轮叶片定向凝固过程温度场数值模拟研究进展[J].特殊钢,2024,45(4):34-40.
- [13] 邸全康,王福明,王晓晨,等.高速线材轧制全程温度曲线有限元模拟[J].工程科学学报,2016,38(2):276-282.
- [14] 陈忠轩.棒线材轧制过程温度场数值模拟及其预测系统开发[D].马鞍山:安徽工业大学,2016.
- [15] 刘相华,胡贤磊,杜林秀,等.轧制参数计算模型及其应用[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [16] 李子正,刘芦轩,尹宝良,等.热连轧机组轧辊温度场及热辊型[J].钢铁,2024,59(2):111-118.
- [17] 胡彬彬,严政.带钢层流冷却过程中冲击穿透深度的数值模拟[J].中国冶金,2017,27(5):33-38.
- [18] 徐纳,秦国华,林锋,等.基于7075铝合金时效强化机理分析的工艺优化[J].中国有色金属学报,2024,34(8):2571-2582.
- [19] Huang J K, Wang B, Xue F, et al. Effect of controlled cold air distribution on temperature profile and phase transformation of wire loops in the Stelmor air-cooling process [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 143: 340-349.
- [20] Feujofack Kemda B V, Barka N, Jahazi M, et al. Modeling of phase transformation kinetics in resistance spot welding and investigation of effect of post weld heat treatment on weld microstructure [J]. Metals and Materials International, 2021, 27(5): 1205-1223.
- [21] 徐乐天,刘良勇,李云龙,等.步进式加热炉内管材温度场模拟试验与有限元模拟[J].特殊钢,2023,44(6):89-95.