



基于 ABAQUS 的 X70 管线钢连铸板坯 空冷的热力耦合分析

付成哲^{1,2}, 张 帅^{1,2}, 王 爽^{1,2}, 高 红^{1,2}, 王复越^{1,2}, 张哲睿^{1,2}

(1 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 鞍山 114009; 2 鞍钢集团钢铁研究院, 鞍山 114009)

摘 要:随着管线钢连铸板坯热送热装占比的升高,切割后的连铸板坯在相变、热应力以及温度的耦合作用下易形成质量缺陷,造成巨大的经济损失。以 X70 管线钢为研究对象,通过综合考虑材料热物性参数随温度的非线性变化及边界条件的设定,利用 ABAQUS 有限元分析软件对 X70 管线钢 4 500 mm×2 300 mm×300 mm 连铸板坯的单坯冷却过程进行热力耦合数值模拟分析。结果表明,铸坯重心平均散热速率为 0.076 °C/s,表面中心为 0.084 °C/s,表面与心部温差区间为 100~210 °C,并随着时间逐步减小。铸坯边部应力值为 25 MPa,边部 300 mm 以内热应力大致相同,在 200 MPa 以内。结合温度场变化情况应尽量缩短切割到加热炉的时间,或增加保温措施以防止因热应力过大形成质量缺陷。

关键词:连铸板坯; 热力耦合; 冷却; 温度场; 应力场; 数值模拟

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00027 中图分类号:TF02

Thermodynamic Coupling Analysis of Air Cooling for X70 Pipeline Steel Continuous Casting Slab Based on ABAQUS

Fu Chengzhe^{1,2}, Zhang Shuai^{1,2}, Wang Shuang^{1,2}, Gao Hong^{1,2}, Wang Fuyue^{1,2}, Zhang Zherui^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan 114009, China;

2 Ansteel Group Iron and Steel Research Institute, Anshan 114009, China)

Abstract: With the increase of the proportion of hot delivery and hot charging in pipeline steel continuous casting slab, the cut continuous casting slab are prone to quality defects due to the coupling effect of phase transformation, thermal stress, and temperature, resulting in huge economic losses. This article takes X70 pipeline steel as the research object, by comprehensively considering the nonlinear changes of material thermal properties parameters with temperature and the setting of boundary conditions, the ABAQUS finite element analysis software is used to conduct thermal coupling numerical simulation analysis on the cooling process of X70 pipeline steel 4 500 mm × 2 300 mm × 300 mm continuous casting slab. The conclusion shows that the average heat dissipation rate of the center of gravity of the slab is 0.076 °C/s, the surface center is 0.084 °C/s, and the temperature difference between the surface and the center is between 100 °C and 210 °C, which gradually decreases over time. The stress value at the edge of the slab is 25 MPa, and the thermal stress within 300 mm of the edge is roughly the same, within 200 MPa. Considering the changes in temperature field, the cutting time to the heating furnace should be shortened as much as possible, or insulation measures should be added to prevent quality defects caused by excessive thermal stress.

Key Words: Continuous Casting Slab; Thermo-Mechanical Coupling; Cooling; Temperature Field; Stress Field; Numerical Simulation

管线钢板的生产工艺过程始终追求着绿色、高效与经济。相比于传统的冷装工艺,热送热装可以缩短从室温重新加热至装炉温度的时间,提高生产效率并有效的降低能源损耗,然而,连铸板坯经切割后,经常会出现各种缺陷,这种缺陷除化学成分的影响外,多数是由于其在冷却和重新加热进行热装过程中存在热应力、相变以及温度三者的耦合作用,三者存在不同程度的相互作用^[1]。在诸多因素的影响下,将会导致铸坯在之后的热履历过程中存

在差异,对铸坯中微合金元素的固溶、析出以及相变等过程产生影响,进而影响最终成品的组织性能。在实际生产过程中,想要动态了解连铸板坯内部的温度场应力场随时间的变化很困难,需要诸多外置设备及人力来配合完成,这无疑降低了生产效率,提高了生产成本。因此,结合热装热送过程中连铸板坯容易形成的质量缺陷,本文利用 ABAQUS 有限元模拟软件,采用数值模拟的点追踪方法,选择切割完成的连铸板坯静置时刻分析铸坯的温度

场,热应力场和时间三者的非线性关系,得到连铸板坯在各时刻,各追踪点的表面及内部温度场应力场变化情况,为连铸板坯热装的实际生产过程提供理论支撑与参考。

1 有限元模型

对实际铸坯尺寸进行等比建模,在Abaqus菜单栏part中,建立连铸板坯尺寸为4 500 mm x 2 300 mm x 300 mm,定义铸坯名称为X70管线钢,在Load模块中建立铸坯底面与地面接触的约束,其余面与空气接触的设定,建立材料的三维瞬态传热与热应力耦合数学模型,为实现多节点多时刻的瞬态场量变化,简化计算步骤提高效率,采用完全热力耦合方式进行模拟计算^[2-3]。模拟计算前处理的等比几何模型如图1所示。

1.1 铸坯的传热学定律

铸坯表面与外部的换热方式在高温段主要以热辐射为主,低温段时,热对流及热传导在热交换中则起主要作用。由傅里叶传热定律和能量守恒方程^[4-5],以计算铸坯空冷散热为数学模型, dx , dy , dz 分别代表截得的模型三个方向的尺寸,时间定义为微小区间段 dt ,依据能量守恒方程可得,对于各向同性体而言,其热传导瞬态温度场 $T(x, y, z, t)$ 符合式(1)。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中, T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为时间, s ; x 为板坯宽度坐标值, m ; y 为板坯厚度坐标值, m ; $\alpha=k/\rho c$ 为材料导热系数,其中, ρ 为材料密度, kg/m^3 ; c 为材料的比热容, $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$; k 为材料热导率, $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$; q 为凝固发生相变释放的潜热^[6-7]。

1.2 热应力场模型

在铸坯空冷阶段,连铸板坯无外力载荷作用,

热应力场主要由于铸坯表面及内部各部分温度场存在差异,导致在热膨胀的作用下,铸坯的表面受到拉应力,而心部则受到压应力,使得铸坯各部分存在表征量不同的热应力场,所以,分析考虑上述过程的应力应变,属于热弹塑性理论的范畴。若应力超出材料的屈服极限,其与应变将会形成非线性关系^[8-9]。

2 材料的物性参数

连铸板坯的化学成分对材料的各项物性参数起着决定性作用,研究所采用的X70管线钢的化学成分见表1;铸坯的散热过程中材料的各项热物性参数也起着决定性的作用,密度、比热容、导热系数、热膨胀系数、杨氏模量、泊松比等变量均与温度的变化相关,采用JMatPro软件依据材料的化学成分计算得出各项热物性参数随温度变化的曲线^[10],结果如图2所示。计算出连铸板坯的温度场,并依据温度场变化耦合求解出热应力场的变化。

表1 X70管线钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of X70 pipeline steel%									
C	Si	Mn	P	S	Als	Ni	Nb	Ti	Mo
0.05	0.25	1.71	0.013	0.001	0.042	0.09	0.05	0.014	0.08

2.1 预定义场和边界条件的设定

铸坯在空冷的状态下,起始时刻铸坯内部各部分之间以热传导的形式进行热传递,在Load模块中选择Creat predefined field和Temperature,在magnitude中设置预定义场铸坯在切割完成后整体温度。实际现场在切割完成至坯料场期间开始的温度为 700°C 左右,在此期间,由于铸坯已经经历了一段时间的散热,其表面及内部各部分之间温度并不均匀。因此,本文选用连铸板坯的出钢温度 $1\,000^{\circ}\text{C}$,

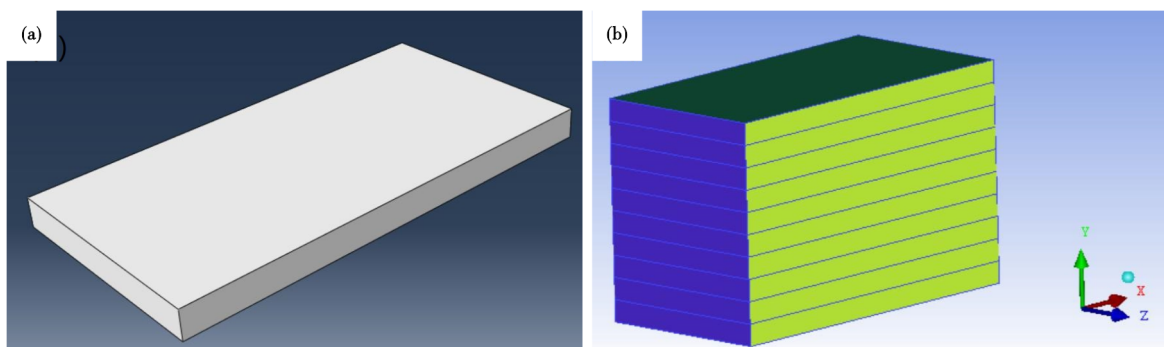


图1 连铸板坯的几何模型:(a)单坯,(b)堆垛

Fig. 1 Geometric model of continuous casting slab : (a)single slab, (b)stacking slab

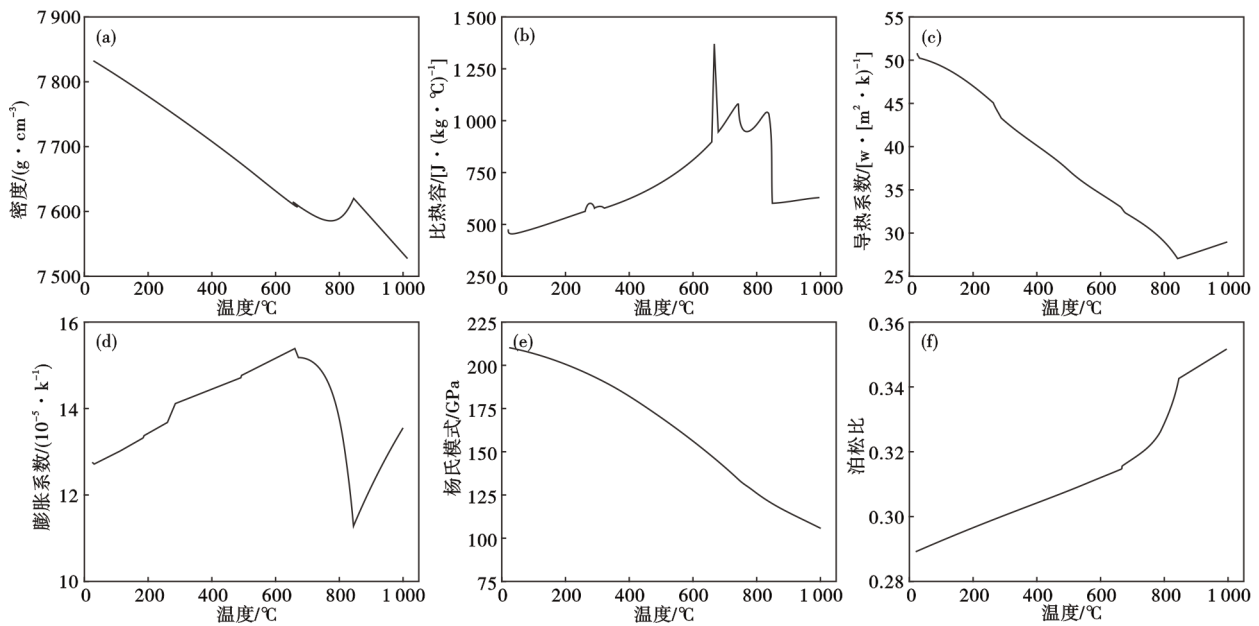


图2 X70管线钢的物性参数随温度变化曲线:(a)密度ρ,(b)比热容Cp,(c)导热系数λ,(d)热膨胀系数α,(e)杨氏模量E,(f)泊松比μ

Fig. 2 Temperature dependent curve of physical parameters of X70 pipeline steel : (a) density ρ, (b) specific heat capacity Cp, (c) thermal conductivity λ, (d) expansion coefficient α, (e) Young module E, (f) Poisson ratio μ

使其散热至 700 °C 左右,更易接近之后铸坯散热过程的真实情况。以此温度为计算初值,取 t=0 时刻,以式(2)表征初始的边界条件。

$$T(x,y,z) = T_0 \quad (2)$$

材料的综合换热系数可以用 stefan-boltzmannlaw 确定,综合换热系数表达式(3)。

$$H = H_k + H_s \quad (3)$$

式中, H_k 为热对流换热系数, H_s 为辐射换热系数,其中高温段的辐射换热系数表达式(4)。

$$H_s = \sigma \varepsilon (T_w^2 + T_c^2) + (T_w + T_c) \quad (4)$$

式中, σ 为 stefan-boltzmann 常数, $\sigma = 5.768 \times 10^{-8} \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε 为实际物体的辐射率或黑度,当黑度 ε 为 1 时称物体为黑体,当处于 0 ~ 1 时称为灰体,自然界中的绝大多数物质都是灰体,一般情况下氧化铁皮较多时,取 ε 为 0.8 ~ 0.85,表面较为光洁时 ε 为 0.6 ~ 0.65^[11],经实验测得 ε 值为 0.8; T_w 与 T_c 为环境温度与材料温度。经过多次计算后的到材料的综合换热系数见表 2。

2.2 模拟计算的质量缩放系数选取与迭代方式的设定

在 Abaqus 中质量缩放的作用是可以提高计算效率,减少计算机的负荷。质量缩放系数的选取与模型中网格的质量相关,即选取大的质量缩放系数会缩短计算时间,但相应的会放大模型中网格质量较低的部分,从而产生较大的计算误差,选取较小的系数会延长计算时间,但相应的会提高计算的精度^[12]。因此,计算时间与结果精度的匹配是选取质量缩放系数的重要考虑项。研究内容中模型的网格均为正六面体,在 ICEM CFD 中模型的网格越接近正六面体,其质量越接近于 1,即质量越高,整体模拟过程时长为 3 ~ 4 h,计算结果与实测值较为吻合,经综合考虑计算时长与计算精度的结果,质量缩放系数选取为默认。

模拟计算过程中,迭代求解方式的选取同样影响着整个计算过程的效率。迭代求解方式有顺序耦合和完全耦合两种方式,其中,顺序耦合是先计

表 2 铸坯的综合换热系数

Table 2 Comprehensive heat transfer coefficient of cast slab

T/°C	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
H/[W·(m ² ·K) ⁻¹]	8	11	13	16	19	23	27	31	36	41
T/°C	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1 000
H/[W·(m ² ·K) ⁻¹]	47	54	60	69	77	86	96	107	119	131

算出算例的温度场变化,再将计算后的数据文件重新导入软件的前处理过程,设定应力场计算的相关边界条件,这种计算方式增加了计算时间,且在步进增量迭代的过程中,无法保证温度场与应力场的瞬时刻刻对应性。故本研究中采用的是完全热力耦合计算方式,优点是缩短计算时长,且可以保证温度与应力场的瞬时刻刻对应性,便于对结果的分析过程。

3 模拟计算结果与分析

3.1 温度场模拟计算结果分析

经过模拟计算所得如图 3 所示为 300 mm×2 300 mm 尺寸的管线钢连铸板坯沿长度方向的中心断面温度场分布云图,其中,图 3(a)为冷却时间 360 s,图 3(b)为冷却时间 1 800 s。从图 3 中可以看出,经过 360 s 的冷却时间,铸坯的散热方式为向四周均匀传热,铸坯表层与心部存在 130 °C 的温差,当冷却时间增大至 1 800 s 时,由于表面以热辐射和对流的形式散热,其速率远大于铸坯内部各部分之间热传导的散热形式,使得表面与心部存在 200 °C 的温差。

图 4 展示了 300 mm 厚度的铸坯经过 3 600 s 空

冷和 10 块厚度为 300 mm 的铸坯堆垛而成的铸坯经 7 200 s 空冷后沿长度方向中心线切割的温度场分布云图。其中,单板表面温度大面积为 560 °C,心部温度为 680 °C,随着冷却时间的延长,表面与心部的温差逐渐缩小。而堆垛的铸坯由于厚度方向的尺寸与长宽接近,故而表面散热较快,内部较慢,经 7 200 s 后表面在热辐射和热对流的散热方式下降至 500 °C,而中间约 4 块的铸坯心部仍维持在 900 °C 左右。10 块堆垛的铸坯从上表面到心部的温度变化曲线如图 5 所示。

图 6(a)为铸坯表层沿宽度方向时间与温度场分布的关系曲线,其中,(1)(2)(3)(4)分别为空冷 300、900、1 800、3 600 s,通过分析可知,铸坯 900 s 之前的降温较快,这主要是由于铸坯的热辐射散热方式作用更强,随着时间逐渐增加,热辐射的作用逐渐下降,铸坯边缘 230 mm 区域降温较快,与中间部位存在约为 100 °C 的温差,中间区域温度场相对均匀;由图 6(b)可知,(1)(2)(3)曲线分别为铸坯整体重心,表层中心点和表层边部的温度随时间的变化曲线,其中铸坯重心部位主要以热传导的形式将热量传递至表面之后以热对流及热辐射的形式散热,故散热较慢,经 7 200 s 后重心温度降至 458 °C 得出

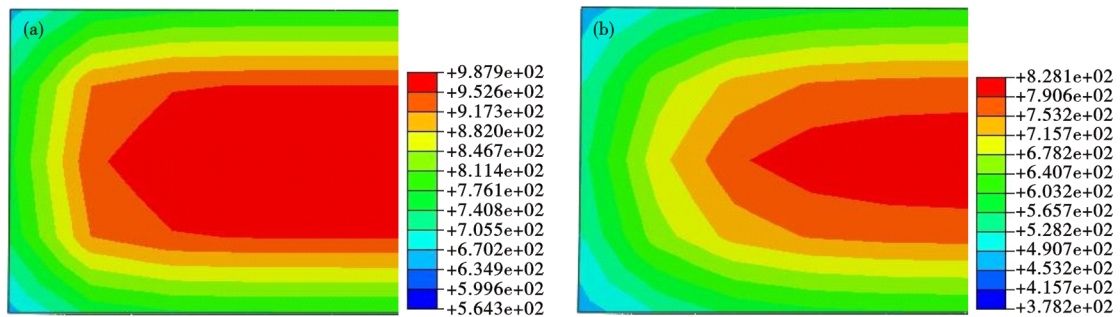


图 3 X70 管线钢 300 mm×2 300 mm 铸坯断面空冷温度场:(a)360 s,(b)1 800 s

Fig. 3 Air cooling temperature field of X70 pipeline steel 300 mm×2 300 mm casting slab section : (a) 360 s , (b) 1 800 s

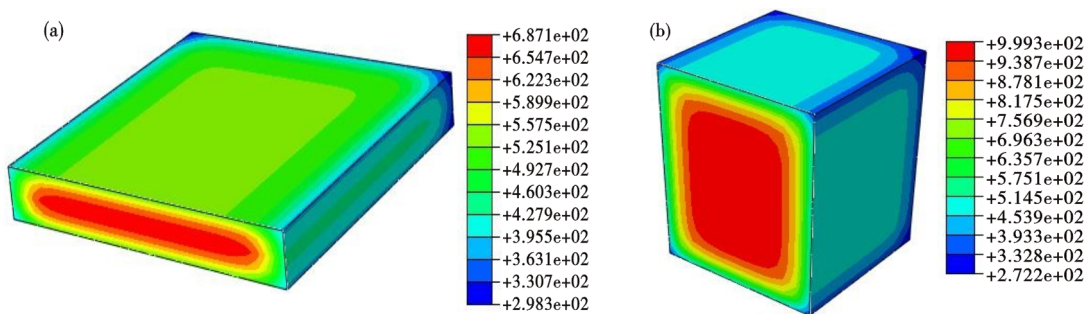


图 4 X70 管线钢 300 mm 铸坯单板及堆垛在不同时刻的温度场分布云图:(a)单坯冷却 3 600 s,(b)10 块铸坯堆垛冷却 7 200 s
Fig. 4 X70 Temperature field distribution cloud map of 300 mm cast slab single plate and stacking of pipeline steel at different times : (a) single slab cooling for 3 600 s , (b) cooling of 10 slab stacks for 7 200 s

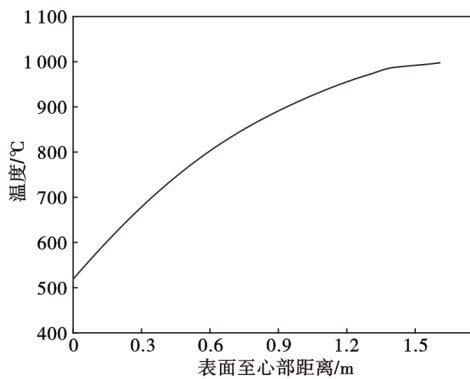


图5 堆垛铸坯表面至心部温度变化曲线

Fig. 5 Temperature variation curve from the surface to the center of the stacked slab

整体平均温降速率为0.076 °C/s,铸坯表层中心点和边部主要以热辐射和热对流形式传热,因此,起始温降速率较快,1 000 s之内均以0.3 °C/s的速率温降,随着时间的延长,热辐射作用显著减弱,中心点以平均0.04 °C/s的速率进行温降,边部以0.06 °C/s的平均速率进行温降,经7 200 s后表层中心及表层边部温降至391、322 °C得出表层中心点的整体平均温降速率为0.084 °C/s,表层边部的整体平均温降速率为0.094 °C/s;由于传热形式的不同致使心部与表面的温差由起始的1 000 s内逐渐增大至210 °C,之后之间减小至100 °C,直至随着冷却时间的延长,表面与心部的温差逐步缩小,最后至相同。

由于现场连铸板坯生产过程中经过切割,运送至坯料场静置空冷期间会大量散热,导致实际测量温度起始点为700 °C左右,现场连铸板坯经切割完成后静置空冷的单坯与堆垛实际情况如图7所示。利用testo 835-T2测温枪测量单坯空冷的实际情况,

采用 origin 数据处理软件对单坯空冷的表层中心,边棱及边角处的散热规律进行非线性拟合,在 origin 中采用式(5)进行迭代修正,直至求解值收敛,得到铸坯以上各部分3 600 s内的散热公式且R平方相关性值分别为0.97,0.98,数值模拟的温度场计算结果值与现场实测值经拟合修正见表3。

$$T = A_0 + A_1 \exp\left(-\frac{t_0}{A_3}\right) \tag{5}$$

式中,T为温度,°C;A₀、A₂、A₃均为迭代收敛后的常数;t₀为时间,s。

经迭代收敛后得到单坯散热表层中心,边棱及边角部的散热公式分别如式(6)、式(7)、式(8)。

$$T_1 = 750.09 - 113.07 \exp\left(\frac{t_0}{6\,576.67}\right) \tag{6}$$

$$T_2 = 457.29 + 104.78 \exp\left(-\frac{t_0}{2\,105.67}\right) \tag{7}$$

$$T_3 = 383.06 + 110.08 \exp\left(-\frac{t_0}{1\,477.91}\right) \tag{8}$$

经对比现场实测数据与计算结果可知,连铸板坯的散热方式均为由中心向三维方向的四周均匀传热,由于实际生产过程中连铸板坯表面会随着时间的递增而产生氧化铁皮,这对坯料的散热起到阻碍作用,致使部分实测值要略高于模拟计算的结果,另外,模拟计算过程中质量缩放系数的选取和迭代方式也会产生计算误差,经拟合对比,实测值与计算值基本吻合,模拟计算的结果有较高参考意义。

3.2 应力场模拟计算结果分析

铸坯在空冷阶段由于传热形式的不同导致铸坯内部各部分温度也不同,温度改变时,物体由于外在约束以及内部各部分之间的相互约束,使其不

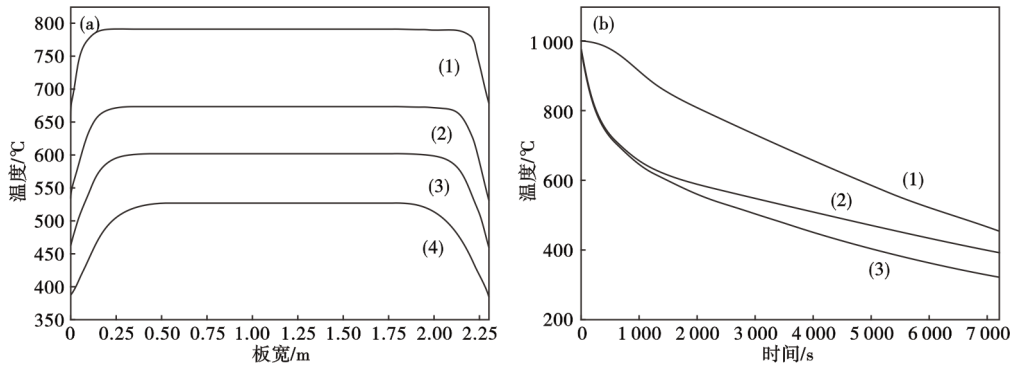


图6 板宽及各追踪点温度随时间的变化曲线:(a)空冷至300 s(1),900 s(2),1 800 s(3),3 600 s(4)时刻铸坯表层温度沿板宽分布;(b)铸坯重心(1),表层中心(2),表层边部(3)温度场随时间的变化

Fig. 6 Variation curcurve of temperature of plate width and each tracking point over time: (a) air cooling to 300 s (1), 900 s (2), 1 800 s (3), 3 600 s (4) time casting surface temperature along plate width; (b) casting center of gravity (1), surface center (2), surface edge (3) the variation of temperature field over time

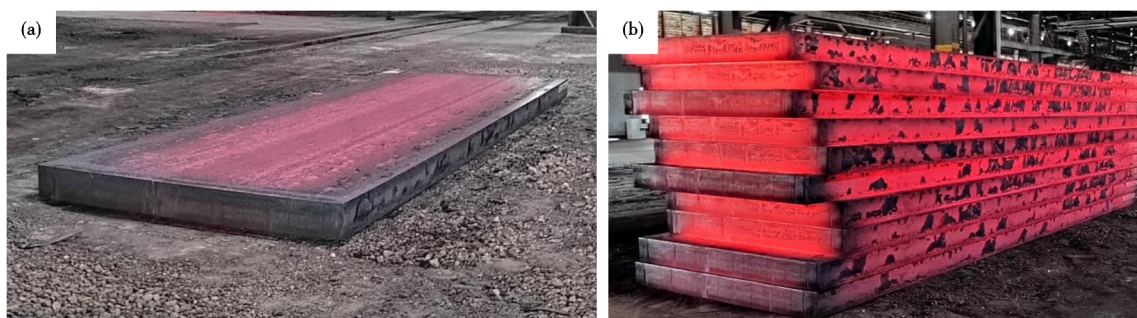


图 7 坯料场的空冷连铸板坯:(a)单坯,(b)10块堆垛

Fig. 7 Air cooled continuous casting billets in the slabs yard : (a)single slab, (b)10 stacking slabs

表 3 X70 管线钢连铸板坯单坯表层中心、边棱和边角的模拟与实测值对比

Table 3 Comparison between simulated and measured values of surface center, edge and corner of X70 pipeline steel continuous casting single slab

时间/s	表层中心		边棱		边角	
	计算值/°C	实测值/°C	计算值/°C	实测值/°C	计算值/°C	实测值/°C
0	650	650	562	570	493	490
180	634	640	553	560	480	480
360	628	630	545	550	469	470
900	617	610	525	528	442	446
1 500	608	601	508	516	422	433
2 100	594	593	495	508	409	421
2 700	579	582	486	496	400	409
3 600	554	560	476	477	392	388

能完全自由胀缩进而产生各部分不同的热应力。在起始冷却阶段,由于铸坯心部温度较高,其内部呈现为压应力状态,而表面散热较快,温度较低,其区域呈现拉应力状态。

图 8(a)为铸坯经过 1 800 s 的热应力场分布云图,此时的铸坯由于边角部位散热较快,其热应力对应的值也相对较小,热应力介于 10 ~ 62 MPa,心部冷却较慢,其热应力在 88 ~ 114 MPa;图 8(b)为冷却至 7 200 s 时刻的热应力场分布,分析得知铸坯的边角

部位温度的变化量相对不大,使得热应力的变化也相对较小,依旧处于 10 ~ 61 MPa,仅是对应的区域逐渐缩小,心部由于温度的改变量较大,其热应力的变化也相对较大,处于 162 ~ 213 MPa。

图 9(a)为铸坯表层的中心(1),1/4 处(2)和边部(3)的应力场随时间的变化情况,由分析曲线图可知铸坯的中心和 1/4 处由于温度变化量相对较大,热应力呈逐渐上升趋势,在 1 200 s 之前由于中心点和 1/4 处的温度基本相一致,所以呈现热应力也基本重合,随着温降速率的不同,慢慢热应力也出现不同的分布,随着温度变化量的逐渐降低,曲线的斜率也逐渐趋于平缓,而边部在 1 200 s 之前温降较大,其热应力也在迅速增大,随着 1 200 s 后温度变量的减少,其热应力变化量也逐渐趋于平稳,斜率逐渐降低。图 9(b)为 7 200 s(1)、3 600 s(2)、1 800 s(3)、900 s(4)时刻铸坯长度方向中心线的应力场分布情况,分析曲线可知,随着时间的递增,铸坯的温度改变量逐渐增大,使其热应力逐渐升高,由起始的平均 55 MPa 逐渐增大至 155 MPa;由于铸坯厚度方向与长宽的尺寸差异较大,且散热的方式由中心向四周散热,使得铸坯边部的热量得到上层及厚度方向表层的补偿,呈现热应力沿宽度方向先减小再逐渐升高的形式,整体的热应力分布为轴对称

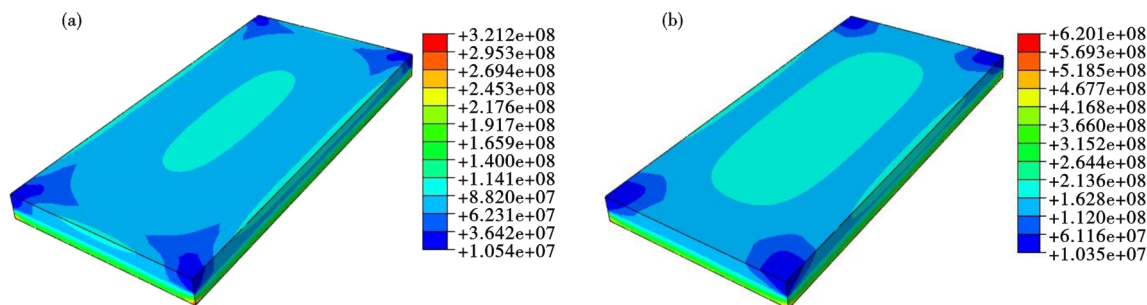


图 8 X70 管线钢铸坯空冷应力场:(a)1 800 s,(b)7 200 s

Fig. 8 Air cooling stress field of X70 pipeline steel casting slab : (a) 1 800 s, (b) 7 200 s

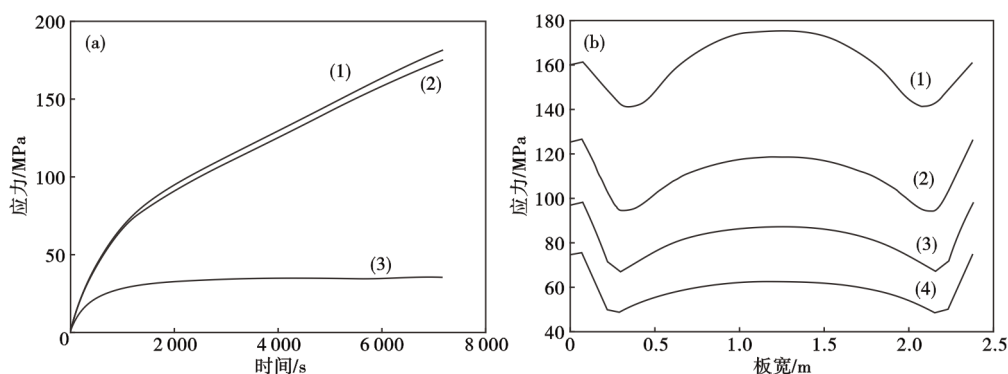


图9 铸坯应力场变化曲线:(a)铸坯表层的中心(1),1/4处(2)和边部(3)热应力随时间变化曲线;(b)空冷7 200 s(1),3 600 s(2),1 800 s(3),900 s(4)时刻铸坯表层热应力沿板宽的变化曲线

Fig. 9 Stress field variation curve of the slab: (a) thermal stress over time at the center (1), 1/4 (2), and edges (3) of the surface layer of the billet; (b) the variation of thermal stress on the surface of the billet along the plate width during air cooling at 7 200 s (1), 3 600 s (2), 1 800 s (3), and 900 s (4)

形式。

由分析数值模拟计算的结果可知,若提高冷却速度,铸坯表面的温降会更大,从而产生更大的热应力,进而更容易造成表面的缺陷。因此,在铸坯冷却的过程中应尽量减少铸坯各部分的温度差异化,使其均匀的降温很有必要,采用热送热装的形式既能减少能耗,又能尽可能的减少材料因应力分布不均而引起的缺陷,同时,采用适当的保温措施降低冷速,可以防止由于铸件各部分温度场分布不均而引起热应力增大。

4 结论

(1)通过数值模拟方法建立了X70管线钢连铸

板坯单板的空冷状态下温度场与热应力场分布,与现场实际测得数据基本吻合,具有较高的参考意义。结果表明,单坯铸坯重心的散热速率约为 $0.076\text{ }^{\circ}\text{C/s}$,表面中心为 $0.084\text{ }^{\circ}\text{C/s}$,边部为 $0.094\text{ }^{\circ}\text{C/s}$,表面中心点与心部温差为 $100\sim 210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2)10块堆垛的铸坯散热速率更加缓慢,经7 200 s后表面在热辐射和热对流的散热方式下降至 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$,而中间约4块的铸坯心部仍维持在约为 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3)随着冷却时长的增加,铸坯各部分的温降程度不同引起了各部分的热应力值不同,铸坯边部的应力值为 25 MPa ,铸坯边部300 mm以内的区域热应力大致相同,应力值 $\leq 200\text{ MPa}$ 。

参考文献

- [1] 李 谦, 田 鹏, 房立峰. 连铸坯表面缺陷形成机理及预防措施研究[J]. 冶金管理, 2023(14): 92-96.
- [2] 皇甫瑞云, 贺占蜀. 42CrMo钢板移动感应加热温度场数值模拟[J]. 机械设计与制造, 2023(2): 101-105+111.
- [3] 余昌莲, 苏开浪, 张春侠, 等. 钢板焊接温度场与应力应变场有限元数值模拟[J]. 焊接技术, 2021, 50(4): 16-20.
- [4] Li S G, Khan M I, Ali F, et al. Mathematical modeling of mixed convective MHD Falkner-Skan squeezed Sutterby multiphase flow with non-Fourier heat flux theory and porosity[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2023, 44(11): 2005-2018.
- [5] Pili U B, Violanda R R. Tracker-assisted modelling: Simultaneous validation of the conservation law of energy and the work-energy theorem[J]. Physics Education, 2022, 57(1): 015012.
- [6] 蔡大为, 陆靖洲, 窦 坤, 等. 微合金钢连铸方坯凝固传热过程数值模拟[J]. 连铸, 2023, 48(5): 51-56.
- [7] 郭龙龙, 曹嘉晨, 徐斌荣. 基于Abaqus二次开发的天然气管道在役焊接热力耦合模拟[J]. 精密成形工程, 2023, 15(6): 76-85.
- [8] 卢 琦, 姜依志, 赵山杉, 等. 基于弹塑性理论的舱体连接件计算分析[J]. 机械工程师, 2017(7): 40-41+44.
- [9] 卢 磊. 基于ABAQUS钢-混凝土组合梁温度应力研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [10] 郭居魁, 宋建丽, 付 甲, 等. 基于ProCAST的改性中锰钢衬板的温度场模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(10): 1050-1053.
- [11] 杨 松, 李文强, 黄 旭, 等. 基于对流换热系数修正的钢箱梁温度场研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 47-58+64.
- [12] 赵益兴. Abaqus质量缩放及其结果准确性的评估[J]. 建模与仿真, 2023, 12(2): 7