DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.11.003

特厚板坯凝固过程三维热模拟研究

帅　勇[1,2],孙乐飞[2],龚红根[2],操瑞宏[2]
(1. 钢铁研究总院,北京 100081;2. 新余钢铁股份有限公司,江西 新余 338001)

摘　要:连铸坯重压下技术是改善大断面铸坯中心偏析、缩孔,提升铸坯致密度的有效手段,但重压下位置的合理与否直接影响到重压下技术的应用效果。本文以断面 420 mm×2 390 mm 的 ES355 特厚板坯为研究对象,建立了温度场三维有限元分析模型,通过现场测温和射钉实验的凝固终点测试验证了模型的可靠性;利用模型研究了过热度、拉速和比水量对 ES355 凝固过程温度场和固相率的影响规律。结果表明,相比过热度和二冷比水量,拉速对 ES355 铸坯温度场、凝固终点和固相率的影响较大。

关键词:特厚板坯;重压下;三维热模拟;温度场;固相率

中图分类号:TG244　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)11-1144-05

3D Thermal Simulation of Extra Thick Slab in Continuous Casting Process

SHUAI Yong[1,2], SUN Lefei[2], GONG Honggen[2], CAO Ruihong[2]
(1. Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2. Xinyu Iron and Steel Co., Ltd., Xinyu 338001, China)

Abstract: Heavy reduction technology for continuous casting was an effective mean to reduce central segregation, shrinkage cavity and improve density of large section slab. However, the rationality of pressure position directly affected the application effect of heavy reduction technology. ES355 extra-thick slab with a section of 420 mm×2 390 mm was used as the research object to establish a three-dimensional finite element analysis model of temperature field. The reliability of the model was verified by field measurement and solidification end point test of nail shooting experiment. The effects of superheat, drawing speed and specific water on temperature field and solid phase ratio in ES355 solidification process were studied by using the model. The results show that compared with superheat and secondary cooling water, drawing speed has a great influence on the temperature field, solidification end point and solid phase ratio of ES355 casting billet.

Key words: extra-thick slab; heavy reduction; 3D thermal simulation; temperature field; solid fraction

随着国防军工、重型机械及海洋工程等行业向大型化、智能化方向发展,大断面、高质量特厚连铸坯的需求日益增加。由于内部冷却条件较差,大断面连铸坯往往存在明显中心偏析、疏松和缩孔等内部缺陷,直接影响了产品质量。为了解决这一难题,新日铁、住友金属等公司先后开发了凝固末端重压下技术[1,2],借助凝固末端高温、温度梯度大等有利条件,通过增大压下量,加速了两相区溶质浓度高的偏析钢液的排除,实现了凝固缩孔的焊合,有效提高了铸坯质量[3-5]。然而,连铸末端重压下对特厚板坯中心偏析及缩孔的作用效果与压下位置、压下量、压下道次等因素密切相关,其中压下位置是重压下技术的重要参数之一,其合理与否将直接影响到重压下技术的应用效果[6,7]。本文以断面 420 mm×2 390 mm 的 ES355 特厚板坯为研究对象,对其凝固过程进行三维传热模拟[8,9]及测温、射钉实验验证,同时研究过热度、拉速和比水量对其凝固过程温度场和固相率的影响规律,从而为特厚板坯重压下位置的确定及铸坯内部质量的有效改善提供理论依据。

1　研究方法

1.1　三维凝固传热模型的建立

铸坯连铸过程结晶器内传热受钢液流动方向及漩涡大小的影响较大,二冷区传热不仅受水温、水质和环境变化的影响,还受辊子导热性、喷嘴布置数量、角度和水流冲击力度的影响。为了简化三维凝固传热模拟,现进行如下合理假设[10,11]:①固定空间位置的传热条件不随时间改变;②忽略结晶器振动和流场对传热的影响;③采用等效导热系数方式处理两相区和液相区的对流传热过程,采用等效比热法处理凝固潜热;④整个铸坯的初始温度均匀且与浇铸温度相同;⑤特厚铸坯凝固过程的体积收缩忽略不计;⑥拉速为定值;⑦铸坯导热系数、密度和比热容各向同性,仅为温度函数,不随方向变化而变化。

收稿日期:2019-08-27
作者简介:帅　勇(1983-),江西新干人,博士研究生.主要从事炼钢工艺控制及管理方面的工作.
电话:15107903100,E-mail:slf@xinsteel.com.cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

经过以上假设，铸坯凝固的三维非稳态导热微分方程如式(1)所示。

$$\rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau}=\lambda\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right)+q_v \qquad (1)$$

式中，x，y 和 z 为笛卡尔坐标系，m；t 为温度，℃；ρ 为密度，kg/m^3；c_p 为比热容，J/(kg·℃)；q_v 为内热源项，W/m^3；τ 为时间，s，λ 为导热系数，W/(m·℃)。

初始条件为结晶器弯月面处钢液温度等于浇铸温度。结晶器内铸坯传热采用结晶器各面平均热流密度作为边界条件，结晶器各面平均热流密度分别为：窄面北侧 1.26 MW/m^2、窄面南侧 1.18 MW/m^2、宽面内弧 0.97 MW/m^2 和宽面外弧 0.97 MW/m^2。二冷区采用第三类传热边界条件，无喷水区采用空冷辐射换热条件。

本文 ES355 钢的化学成分如表 1 所示，其连铸机为直弧形连铸机，弧形半径 13 m，有效结晶器长度 0.9 m，垂直段长度 3.74 m，连铸机各段长度和冷却方式如表 2 所示。ES355 钢的液相线和固相线温度根据凝固过程微观偏析计算模型给出，其密度为分段温度常数，导热系数与温度呈函数关系，在本文中取常数。考虑液相区钢液流动对传热带来的影响，液相区采用等效导热系数。采用等效比热容法处理凝固潜热。在确保模型计算精度的前提下，本文的固相温度和液相温度均采用常数，以提高温度场计算速度。以上热模拟过程的热物性参数如表 3 所示。ES355 铸坯三维几何模型从结晶器液面位置开始到二冷十三段结束，计算区域铸坯长度为 37.248 m。采用 ANSYS 有限元软件建立三维铸坯的几何模型，采用 SOLID70 八节点三维实体热单元划分网格(如图 1 所示)，采用牛顿-拉普森法(Newton-Raphson)进行瞬态铸坯温度场的非线性分析计算。

1.2　三维凝固传热模型的验证

为了验证并修正断面尺寸为 420 mm×2 390 mm 的 ES355 钢三维凝固传热数学模型，对实际工况(拉速 0.55 m/min、过热度 24 ℃、二冷水量 0.317 L/kg)的连铸坯进行三维温度场模拟，采用红外测温仪测量实际铸坯在二冷七段末、八段末、九段末和十段末去氧化铁皮后的窄面中心温度，通过射钉实验测量实际铸坯在二冷八段末、九段末和十段末的铸坯厚度，以此验证三维凝固传热模型的准确性并进行修正。

表1 ES355钢的化学成分 w(%)

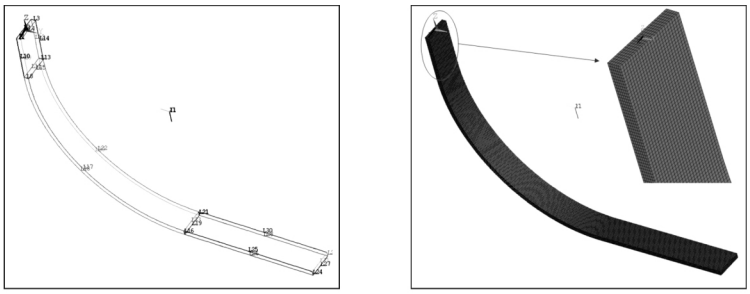
Tab.1 Chemical composition of ES355 steel

C	Si	Mn	P	S	Als	Cr	V	Nb	Ti
0.17	0.36	1.53	0.015	0.002	0.041	0.060	0.047	0.017	0.016

表2 直弧形连铸机各段长度和冷却方式

Tab.2 The length and cooling mode of straight-arc type continuous caster

各段名称	长度 /m	冷却方式	各段名称	长度 /m	冷却方式
结晶器	0.8	纯水冷却	二冷五段	2.351	气水冷却
足辊窄面	1.003 5	纯水冷却	二冷六段	2.351	气水冷却
足辊宽面	0.29	纯水冷却	二冷七段	2.351	气水冷却
垂直段	1.68	气水冷却	二冷八段	2.58	气水冷却
弯曲段上部	1.77	气水冷却	二冷九段	2.585	气水冷却
弯曲段下部	1.564	气水冷却	二冷十段	2.555	气水冷却
二冷一段	2.117	气水冷却	二冷十一段	2.555	气水冷却
二冷二段	2.128	气水冷却	二冷十二段	2.555	气水冷却
二冷三段	2.128	气水冷却	二冷十三段	2.555	气水冷却
二冷四段	2.333	气水冷却	-	-	-



(a)几何模型　　(b)网格划分

图 1 ES355 铸坯温度场模拟

Fig.1 Temperature field simulation of ES355 slab

表 3 ES355 钢的热物性参数

Tab.3 Thermophysical parameters of ES355 steel

参数	数值
液相线温度 /℃	1 514
固相线温度 /℃	1 475
液相密度 /kg·m^{-3}	7 020
固相密度 /kg·m^{-3}	7 400
液相比热容 /J·kg^{-1}·℃$^{-1}$	841
固相比热容 /J·kg^{-1}·℃$^{-1}$	690
固相导热系数 /W·m^{-1}·℃$^{-1}$	33
凝固潜热 /kJ·kg^{-1}	270

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.3 三维凝固传热模型的应用

采用修正后的三维凝固传热模型模拟断面尺寸为 420 mm×2 390 mm 的 ES355 钢在不同过热度、拉速和比水量下的铸坯温度和厚度变化规律，为后续重压下区间及压下位置的选择提供理论依据。

表4 计算方案
Tab.4 Calculation scheme

方案	过热度 /℃	拉速 /m·min^{-1}	比水量 /L·kg^{-1}
1-1	14	0.55	0.317 0
1-2	24	0.55	0.317 0
1-3	34	0.55	0.317 0
2-1	24	0.50	0.317 0
2-2	24	0.55	0.317 0
2-3	24	0.60	0.317 0
3-1	24	0.55	0.285 3
3-2	24	0.55	0.317 0
3-3	24	0.55	0.348 7

2 结果分析及讨论

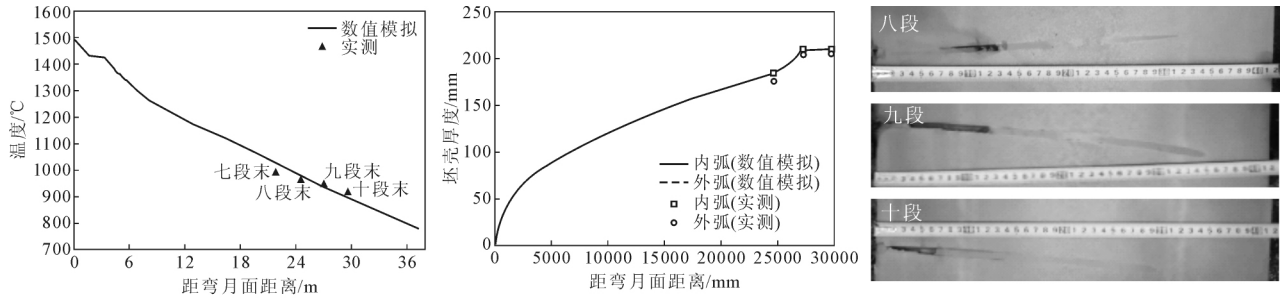
2.1 三维凝固传热模型的验证

图 2 为 ES355 铸坯窄面中心温度结果以及 ES355 坯壳厚度模拟和射钉实验结果。可以看出，ES355 铸坯窄面中心温度数值模拟结果与实测结果差值较小（≤30 ℃），相对误差在 5%以内，且趋势基本相同。通过三维凝固传热模型计算 ES355 在实际工况（拉速 0.55 m/min、过热度 24 ℃、二冷水量 0.317 L/kg）下的凝固终点距弯月面距离 28.6 m 左右，与现场射钉实验测量的凝固终点位置靠近十段末基本吻合，因此可以利用该模型对 ES355 生产过程的凝固规律进行分析预测，为生产提供可靠依据。

2.2 三维凝固传热模型的应用及分析

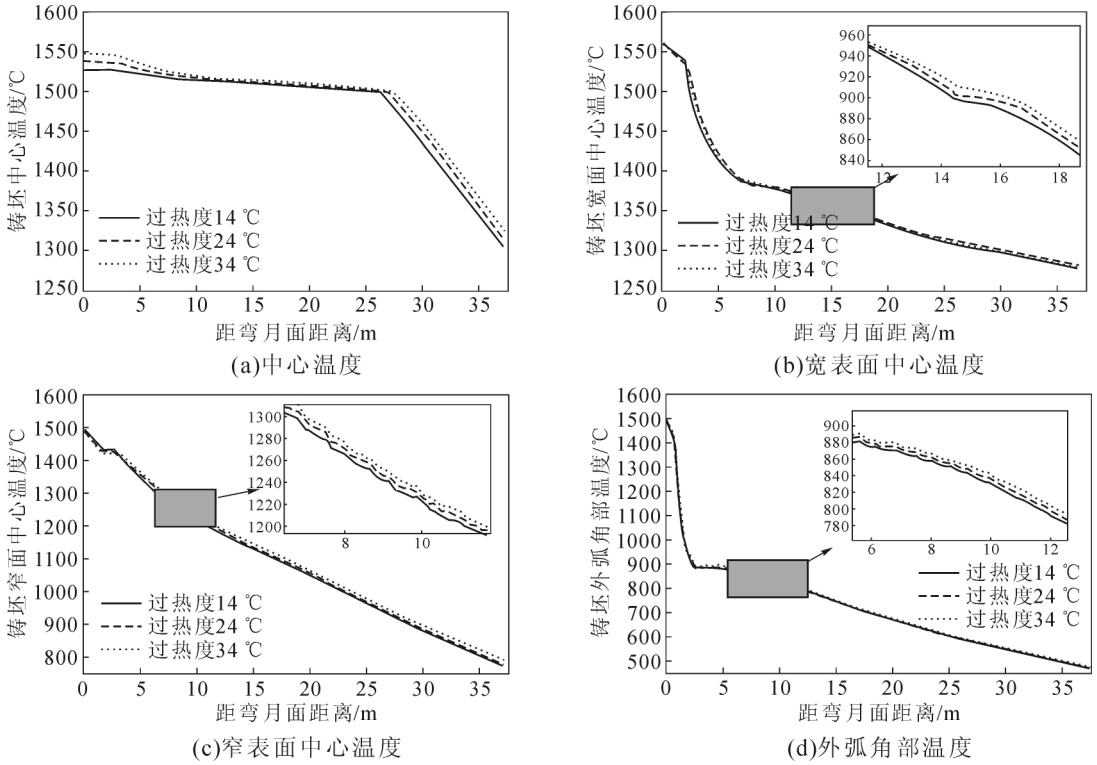
2.2.1 过热度对 ES355 铸坯温度场及固相率的影响

图 3 为不同过热度下 ES355 铸坯的温度场。可



(a)窄面中心温度数值模拟和实测结果　(b)坯壳厚度模拟结果　(c)坯壳厚度射钉实验结果

图 2 ES355 铸坯窄面中心温度结果及坯壳厚度结果
Fig.2 The narrow surface temperature results at the center and shell thickness results of ES355 slab



(a)中心温度　(b)宽表面中心温度
(c)窄表面中心温度　(d)外弧角部温度

图 3 过热度对距弯月面不同距离的 ES355 铸坯温度的影响
Fig.3 The influence of superheat on the slab temperature of ES355 slab at different distances from the meniscus

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

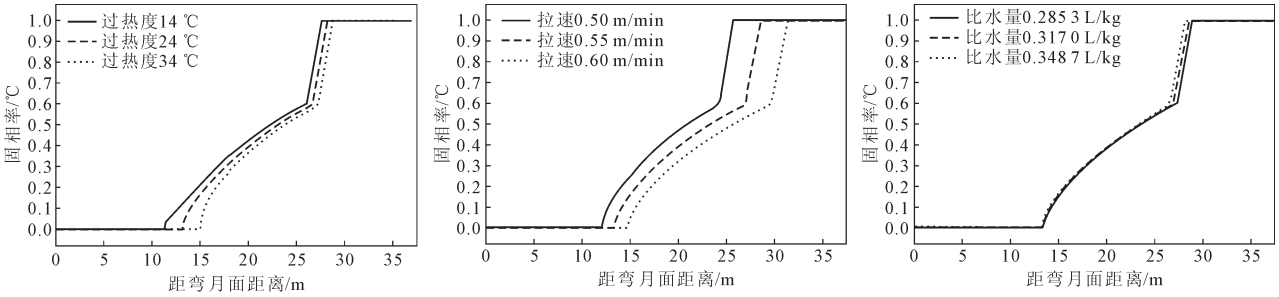
以看出，过热度由 14 ℃提高到 34 ℃，铸坯开始时的中心温度明显升高，由 1 528 ℃提高到 1 548 ℃，即过热度提高了温度初始值，但过热度在凝固前期逐渐消散。因此，不同过热度下的 ES355 铸坯中心温度、宽、窄表面温度及角部温度均随着凝固进行而逐渐接近。图 4 为过热度、拉速、比水量对距弯月面不同距离的 ES355 铸坯固相率的影响。由图 4(a)可以看出，过热度由 14 ℃提高到 34 ℃，距弯月面相同距离的 ES355 铸坯固相率逐渐减小，凝固终点后移，过热度分别为 14、24 和 34 ℃时的 ES355 凝固终点位置分别为 27.96、28.60 和 29.03 m。

2.2.2　拉速对 ES355 铸坯温度场及固相率的影响

图 5 为不同拉速下 ES355 铸坯温度场模拟结果。可以看出，拉速由 0.5 m/min 提高到 0.6 m/min，ES355 铸坯相同位置处的表面温度明显升高，其主要原因是拉速增加导致铸坯在铸机各段停留时间缩短，带走的热量也随之降低。然而，不同拉速下的铸坯中心温度在距离弯月面很长一段距离内的温差都很小，其主要原因是两相区凝固时释放的潜热阻碍了中心钢液的热量向外传递。从图 4(b)可以看出，拉速由 0.5 m/min 提高到 0.6 m/min，距弯月面相同距离的 ES355 铸坯固相率逐渐减小，凝固终点后移，液相穴深度拉长，且越接近凝固终点，拉速的变化对铸坯固相率影响越明显。拉速分别为 0.50、0.55 和 0.60 m/min 时的 ES355 凝固终点位置分别为 25.66、28.60 和 31.28 m，即拉速提高 10%，凝固终点位置平均后移 2.81 m。

2.2.3　二冷比水量对 ES355 铸坯温度场及固相率的影响

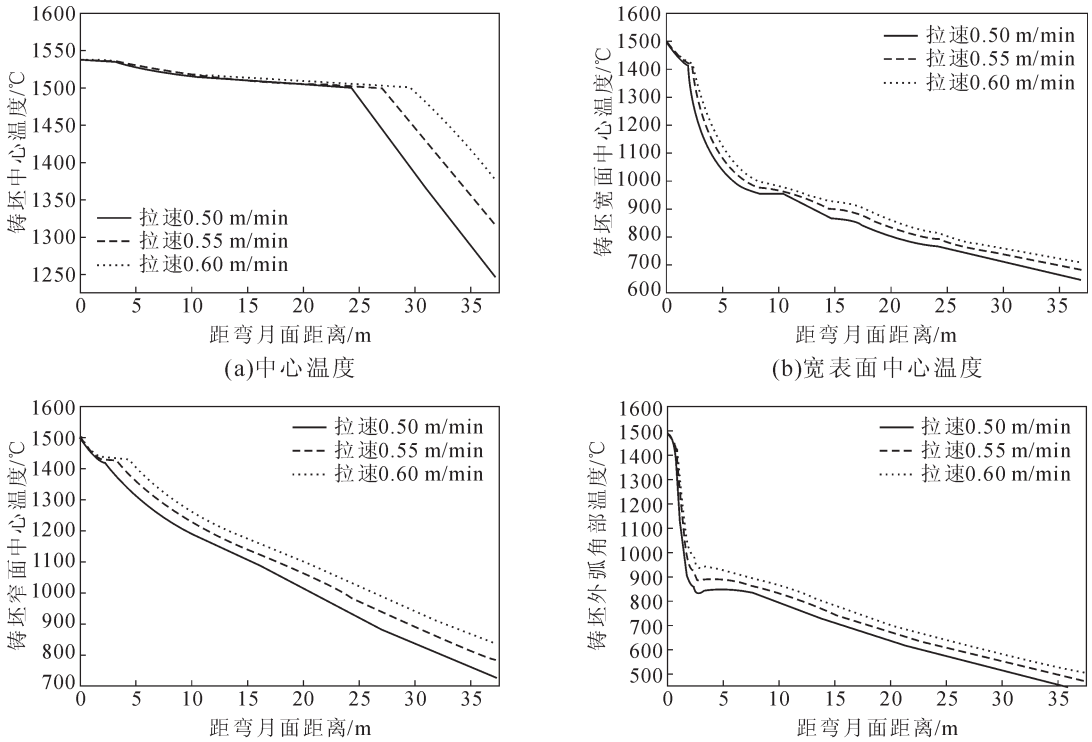
图 6 为不同比水量下 ES355 铸坯温度场模拟



(a)过热度　　(b)拉速　　(c)比水量

图 4　不同因素对距弯月面不同距离的 ES355 铸坯固相率的影响

Fig.4　The influence of different factors on the solid fraction of ES355 slab at different distances from the meniscus



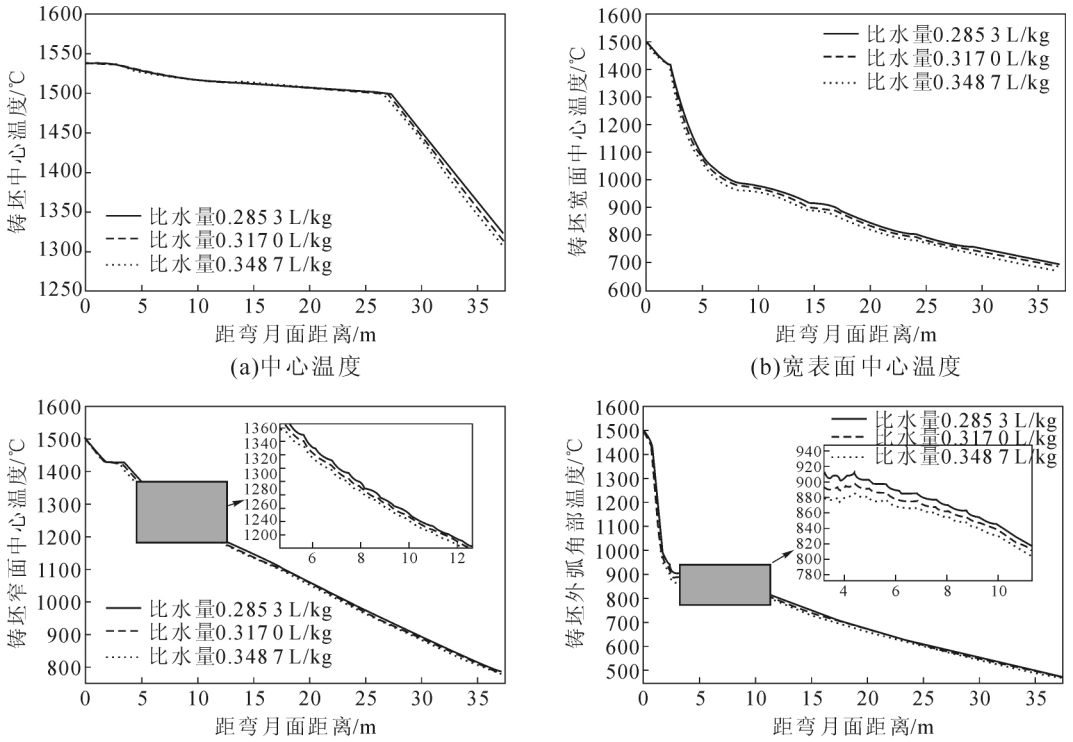
(a)中心温度　　(b)宽表面中心温度

(c)窄表面中心温度　　(d)外弧角部温度

图 5　拉速对距弯月面不同距离的 ES355 铸坯温度的影响

Fig.5　The influence of casting speed on the slab temperature of ES355 at different distances from the meniscus

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)中心温度 (b)宽表面中心温度

(c)窄表面中心温度 (d)外弧角部温度

图 6 比水量对距离弯月面不同距离的 ES355 铸坯温度的影响

Fig.6 The influence of water ratio in secondary cooling on the slab temperature of ES355 at different distances from the meniscus

结果。可以看出，相比过热度和拉速，比水量对 ES355 铸坯温度场的影响较小。对比 ES355 铸坯中心温度、宽、窄表面温度及角部温度发现，比水量对其宽表面中心温度影响更大。比水量由 0.285 3 L/kg 提高到 0.348 7 L/kg，距弯月面相同距离的 ES355 铸坯宽面中心温度有所降低，且大比水量下的铸坯中心温度先降低，小比水量下的铸坯中心最后完成凝固。从图 4 (c) 可以看出，比水量分别为 0.285 3、0.317 0 和 0.348 7 L/kg 时凝固终点位置分别为 28.89、28.60 和 28.16 m，比水量的增加对 ES355 铸坯凝固过程坯壳厚度的变化影响较小。

3 结论

(1)三维凝固传热模型计算 ES355 在实际工况下的凝固终点距弯月面距离 28.6 m 左右，与射钉实验测量的凝固终点位置靠近十段末基本吻合，两者误差小于 5%，可以利用该模型对 ES355 生产过程的凝固规律进行分析预测。

(2)相比过热度和二冷比水量，拉速对 ES355 铸坯温度场、凝固终点和固相率的影响较大。

(3)拉速由 0.5 m/min 提高到 0.6 m/min，距弯月面相同距离的 ES355 铸坯固相率逐渐减小、且越接近凝固终点，拉速的变化对铸坯固相率影响越明显。拉速分别为 0.50、0.55 和 0.60 m/min 时的 ES355 凝固终点位置分别为 25.66、28.60 和 31.28 m，拉速提高 10%，凝固终点位置平均后移 2.81m。

参考文献:

[1] Takubo M, Matsuoka Y, Miura Y, et al. NSENGI's new developed bloom continuous casting technology for improving internal quality of special bar quality (NS bloom large reduction) [C]//2015 连铸装备的技术创新和精细化生产技术交流会. 2015.

[2] Kawamoto M. Recent development of steelmaking process in sumitomo metals [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, 18 (S2): 28-35.

[3] 于赋志，廖相巍，许孟春，等. 重压下对高碳钢碳偏析的影响研究 //第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集 III[C]. 北京：中国金属学会，2015.

[4] 朱苗勇，祭程. 连铸大方坯凝固末端重压下技术及其应用[C]//第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集 III. 2015.

[5] 卫广运，李双江，董廷亮，等. 板坯重压下对改善铸坯内部质量的研究[J]. 炼钢，2018，34(3): 56-61.

[6] 沈轶奇，谭希华，徐荣军. 宝钢三号厚板坯连铸机重压下试验研究[J]. 重型机械，2019(3):16-21.

[7] 钱亮，陈志凌，李泽林，等. 小方坯重压下技术的工程实践[J]. 连铸，2016，41(1): 48-55.

[8] 陈永，罗歆，沈厚发，等. 连铸坯凝固过程热力耦合有限元模拟[J]. 钢铁，2009，44(3): 36-39.

[9] 罗伟，严波，熊跃兴，等. 异型坯结晶器与铸坯热力耦合数值模拟[J]. 材料科学与工艺，2012，20(1): 31-37.

[10] 王胜东，钱宏智，詹美珠，等. 高拉速下凝固进程的试验测量与模型预测[J]. 钢铁，2016，51(3): 49-53.

[11] 成日金，王志衡，倪红卫，等. Q345 钢宽板坯连铸凝固末端位置的研究[J]. 炼钢，2013，29(2): 66-70.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net