板坯连铸过程热收缩变形行为研究

吴晨辉*, 吴国荣, 张　敏, 谢　鑫, 李　阳, 曾建华

（攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司, 四川 攀枝花 617000）

摘　要: 连铸过程铸坯已凝固坯壳因冷却降温发生热收缩变形, 该变形是制定连铸机基础收缩辊缝的重要依据。以板坯连铸过程为对象, 建立了三维热-力耦合有限元模型, 揭示了板坯连铸过程已凝固坯壳沿厚度方向热收缩变形规律。结果表明, 浇铸过程中坯壳热收缩变形不断增大, 在凝固终点位置热收缩出现短时加速增大趋势, 铸机末端位置坯壳宽向中心位置热收缩约 8 mm; 板坯宽向不同位置热收缩变形存在较明显差异, 由宽向中心至铸坯角部方向, 已凝固坯壳厚度方向热收缩变形呈先减小后增大趋势。随着拉速增加, 相同铸流位置热收缩变形减小, 拉速增加 0.1 m/min, 铸机末端位置的坯壳宽向中心与宽向 1/8 位置热收缩减小约 1.2 mm。研究结果为优化铸机基础收缩辊缝, 改善因不合理基础辊缝导致的铸坯内部质量问题提供了数据支撑。

关键词: 连铸; 板坯; 三维热-力耦合; 有限元; 热收缩

中图分类号: TF777　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1004−7638(2023)02−0141−06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.02.020　　**开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID) :**

听语音 聊科研 与作者互动

Investigation on thermal shrinkage deformation of the continuously cast slab

Wu Chenhui*, Wu Guorong, Zhang Min, Xie Xin, Li Yang, Zeng Jianhua

(Pangang Group Panzhihua Research Institute of Iron and Steel Co. Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: In the continuous casting process, thermal shrinkage deformation of the solidified shell occurs due to the temperature decrease during the cooling process, and this thermal shrinkage deformation is the important basis for designing basic shrinkage gap of the continuous casting machine. In the present work, a 3D thermal-mechanical coupling model was developed, and the thermal shrinkage deformation of the continuous casting slab was investigated. The results indicate that the thermal shrinkage deformation continuously increased during the continuous casting process and a rapidly increasing trend was observed at the solidification end of the strand. The total shrinkage of the wide surface center was ~ 8 mm at the exit of the continuous casting machine. The difference of the thermal shrinkage deformation along the slab width direction was obvious, and the shrinkage deformation showed a decreasing trend first and then an increasing trend from the slab surface center to its corner. The thermal shrinkage at the same strand position decreased with increasing the casting speed, and the total thermal shrinkage of the wide surface center and 1/8 width decreased ~ 1.2 mm with increasing the casting speed by 0.1 m/min. The present work provided data support for optimizing the basic shrinkage gap of the continuous casting machine and thus alleviating the internal quality of the continuous casting steel.

Key words: continuously cast, slab, 3D thermal-mechanical coupling, finite element, thermal shrinkage

收稿日期: 2022−01−25

作者简介: 吴晨辉, 1985 年出生, 男, 河北石家庄人, 博士, 工程师, 通讯作者, 主要从事钢铁冶金过程精炼、连铸方向研究, E-mail: wch_neu@126.com。

0 引言

浇铸过程中连铸坯已凝固坯壳因冷却降温产生热收缩变形，准确揭示连铸全程铸坯沿厚度方向的热收缩变形规律是制定铸机合理基础辊缝的重要依据，而连铸机合理的基础收缩辊缝有助于抑制坯壳鼓肚变形，保障连铸过程顺行与设备使用安全，减轻铸坯中心偏析及内裂纹等内部质量问题等。

目前，许多研究者围绕连铸过程铸坯热收缩变形行为已开展广泛研究，其多采用数值计算手段[1−3]。连铸过程中，因结晶器冷却强度较高，相应的铸坯热收缩变形速度较快，准确揭示该区域内坯壳热收缩变形规律是制定合理结晶器冷却工艺的关键依据。鉴于此，已有的与连铸坯热收缩变形相关研究多集中于结晶器阶段[4−7]。然而，连铸坯出结晶器后，在二冷区冷却过程中仍不断发生热收缩变形，且该阶段的铸坯热收缩变形是制定铸机二冷区扇形段辊缝开口度的关键依据。因此，部分学者通过建立铸坯横断面热-力耦合模型，定量研究了板坯或方坯连铸全程的热收缩变形规律[8−12]。其中，钱宏智等[8] 揭示了连铸不同凝固阶段板坯自由热收缩在整个铸流上的分布规律。陈洪智等[9] 研究了不同拉速、过热度及厚度的 304 不锈钢板坯浇铸全程热收缩变形行为。孙立根等[11] 基于 65Mn 板坯连铸过程热收缩变形行为研究优化了连铸机辊缝开口度，有效降低了铸坯三角区裂纹及中心裂纹风险。林启勇等[12] 揭示了冷却回路、二冷能力及拉速对连铸过程板坯热收缩变形影响规律。

在上述既有研究中，多以铸坯横断面为对象建立二维热-力耦合模型，研究连铸过程铸坯热收缩变形行为。然而，铸坯在发生横断面内热收缩变形的同时，其拉坯方向同时会发生一定热收缩变形，并与铸坯横断面的热收缩变形相互耦合影响，而二维模型无法考虑此相互耦合影响过程。此外，连铸板坯受宽向水流密度分布不均匀影响，其宽向冷却亦存在不均性，进而影响铸坯的热收缩变形过程，而既有研究多忽略此宽向冷却不均匀性，一定程度上影响计算准确性。鉴于既有研究存在的不足，笔者以某厂板坯连铸机为研究对象，以拉坯方向一定长度铸坯为对象，建立了连铸全程三维热-力耦合有限元模型，并基于二冷区实测铸坯宽向水流密度分布计算确定模型的冷却边界条件，系统计算分析了浇铸全程板坯热收缩变形行为，以期为优化制定合理的连铸机辊缝制度，改善铸坯质量提供理论指导。

1 三维热收缩变形模型

1.1 模型建立

以某厂宽厚板坯连铸机为对象，其二冷分区情况如表 1 所示，忽略浇铸过程弯曲、矫直对铸坯热收缩变形影响及铸坯内外弧表面冷却差异，选取沿拉坯方向长度为 800 mm 的一段 1/4 横截面 Q345E 板坯建立了三维热收缩变形有限元模型，如图 1 所示，其它相关参数列于表 2。

表 1 冷却分区参数

Table 1 Parameters of the cooling zones

冷却分区	起始铸流位置/m	结束铸流位置/m
结晶器	0	0.80
二冷1区	0.80	1.04
二冷2区	1.04	1.60
二冷3区	1.60	2.71
二冷4区	2.71	4.26
二冷5区	4.26	6.18
二冷6区	6.18	10.02
二冷7区	10.02	13.86
二冷8区	13.86	20.49
二冷9区	20.49	30.33

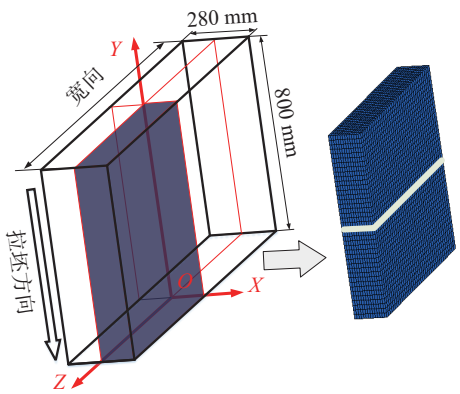

图 1 宽厚板坯热收缩三维热/力耦合有限元模型

Fig. 1 3D thermal-mechenical coupled model for thermal shrinkage of the wide-thick slab

模型的热收缩变形行为采用热-弹-塑性本构方程描述[13]：

$$\begin{cases}\{\Delta\varepsilon\} = \{\Delta\varepsilon_e\} + \{\Delta\varepsilon_p\} + \{\Delta\varepsilon_{th}\} \\ \{\Delta\varepsilon_{th}\} = \bar{\alpha}\Delta(T - T_{ref})\end{cases} \quad (1)$$

式中, $\{\Delta\varepsilon\}$、$\{\Delta\varepsilon_e\}$、$\{\Delta\varepsilon_p\}$及$\{\Delta\varepsilon_{th}\}$分别为总应变增量、弹性应变增量、塑性应变增量及热应变增量; $\bar{\alpha}$为平均线膨胀系数; T 为铸坯当前温度, ℃; T_{ref} 为基准参考温度, ℃, 以 Kim 等[14] 提出的固相率 $f_s = 0.9$ 对应的温度作为钢的零补缩温度 (LIT)。

表 2　模拟参数
Table 2　Simulation paraeters

Q345主要成分(w/ %)					液相线温度/℃	固相线温度/℃	板坯厚度/mm	板坯宽度/mm	过热度/℃	拉速/(m.min^{-1})
C	Si	Mn	P	S						
0.17	0.31	1.5	0.014	0.011	1 517.7	1 467.5	280	1 600,1 800,2000	30	0.7,0.8,0.9

线性热膨胀系数是影响热收缩变形计算准确性的关键物性参数之一, 而建立热收缩有限元模型时, 通常需将不同温度时的线膨胀系数转化成瞬时线膨胀系数, 计算方法[15]:

$$\begin{cases} \alpha = \dfrac{\mathrm{d}\bar{\alpha}}{\mathrm{d}T} \\ \bar{\alpha} = \sqrt[3]{\dfrac{\rho(T_{ref})}{\rho(T)}} - 1 \end{cases} \tag{2}$$

式中, α 为瞬时线膨胀系数, ℃$^{-1}$; ρ 为不同温度时钢的密度, kg/m^3, 计算得到的线性膨胀系数与瞬时线膨胀系数如图 2 所示。

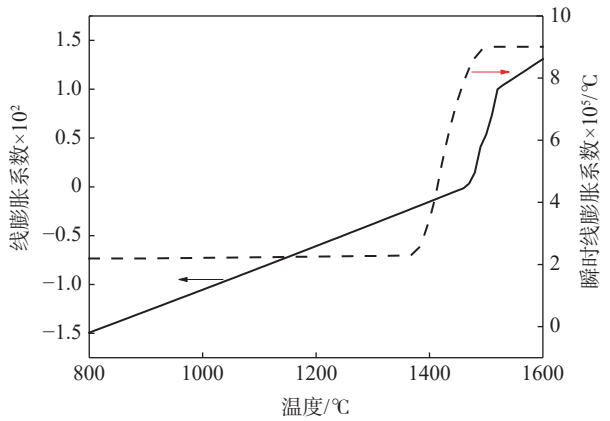

图 2　不同温度钢的线性膨胀系数及瞬时线性膨胀系数
Fig. 2　The theoretically calculated thermal linear expansion coefficient and transient thermal linear expansion coefficient

模型中与凝固传热相关物性参数及冷却边界条件计算方法参见文献 [16]。其中, 在计算二冷区边界条件时, 为准确考虑板坯宽向水流密度分布不均匀性, 基于如图 3 所示二冷区喷嘴布置参数, 实测确定了铸坯宽向冷却水水流密度分布规律。由图 4 可知, 水流密度沿铸坯宽向分布差异显著, 且由铸坯宽向中心向两侧方向呈现减小趋势, 进而增加铸坯宽向冷却凝固均匀性。

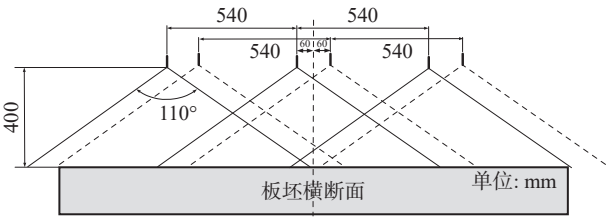

图 3　二冷 5 区至 8 区喷嘴布置参数
Fig. 3　The nozzles layout in Zone 5～8

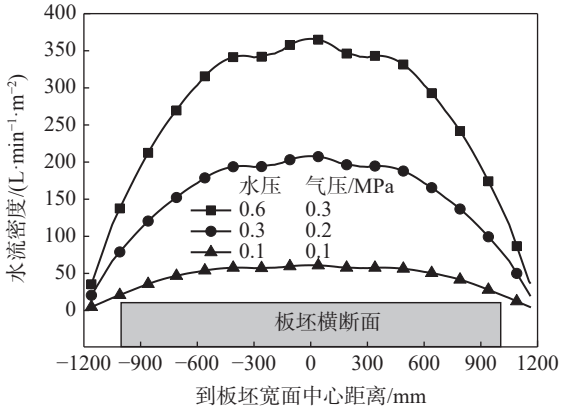

图 4　二冷 5 区至 8 区范围内实测宽向水流密度
Fig. 4　The measured water flux distribution along the slab width direction in Zone 5～8

1.2　模型验证

连铸过程中, 铸坯热收缩变形较小, 且受到铸机辊列支撑、约束作用难以直接准确测量。然而, 铸坯热收缩变形由冷却降温引起, 因此, 可通过验证评价铸坯凝固传热计算准确性, 间接验证热收缩变形计算准确性。图 5 对比了连铸坯不同位置点温度的模型计算结果与采用热成像仪实测结果, 模型计算温度与实测温度间吻合较好, 两者间相对误差小于 2.3%, 说明所建立的三维热收缩模型可较准确的计算铸坯的凝固传热及由其导致的铸坯热收缩变形。

2　计算结果与分析

铸坯完全凝固前, 其横断面内的凝固形貌如

图 6 所示，受宽向冷却不均匀影响，铸坯心部未凝固区域形貌不规则，且在铸坯宽向约 1/8 位置附近为凝固区域，厚度较厚。结合铸坯横断面凝固形貌特征，以铸坯宽面中心 (A 点)、宽面 1/8(B 点) 及角部 (C 点) 为特征位置，计算分析了铸坯特征点位置的厚度方向热收缩变形规律。

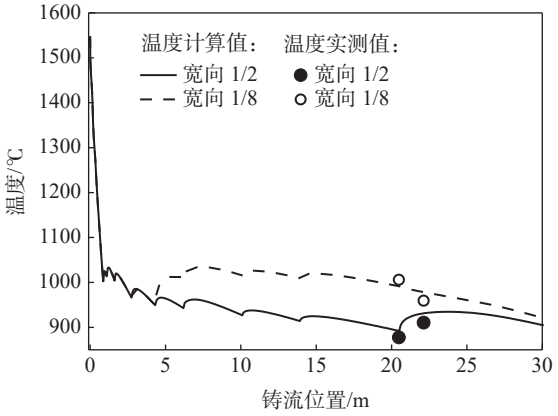

图 5　温度计算值与实测值对比

Fig. 5　Comparison between the measured and the predicted temperatures

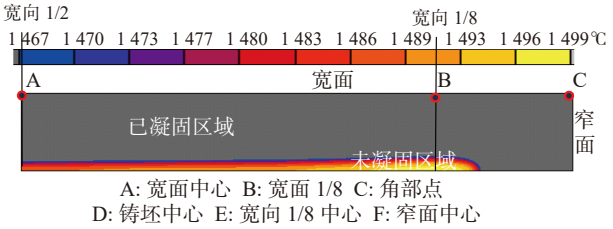

图 6　二冷 8 区末铸坯横断面两相区形貌及不同特征点位置

Fig. 6　Profile of the unsolidified region at the end of zone 8 and the distribution of the typical points

2.1　热收缩变形规律

浇铸过程中，铸坯宽面中心 (A 点)、宽面 1/8 (B 点) 与铸坯角部 (C 点) 的热收缩趋势如图 7 所示。在浇铸第一阶段 (凝固终点前)，由于铸坯内外弧表面冷却强度不断变弱，各特征点位置的热收缩量增大速度也逐渐放缓。然而，在浇铸第二阶段 (凝固终点后)，铸坯宽面中心 (A 点) 与宽面 1/8 位置 (B 点) 的热收缩量在两者对应的凝固终点位置后出现加速增大的趋势，这主要是由完全凝固后两位置对应的铸坯厚度方向整体温度快速降低所引起。

对于铸坯角部 (C 点) 而言，在结晶器及足辊区内同时受到宽面与窄面强冷作用，其降温速度明显快于宽面上其他位置，因此铸坯角部 (C 点) 热收缩量增加速度最快。然而，出结晶器窄面足辊冷却区后，铸坯角部 (C 点) 出现回温，此时热收缩量也相应呈现降低趋势，甚至小于铸坯宽面中心 (A 点) 与宽面 1/8 位置 (B 点) 的热收缩量。随后，铸坯窄面仅依靠辐射方式冷却，冷却强度远低于铸坯内外弧宽面的气雾冷却强度，因此铸坯角部 (C 点) 热收缩量在该阶段一直小于铸坯宽面中心 (A 点) 与宽面 1/8 位置 (B 点)。

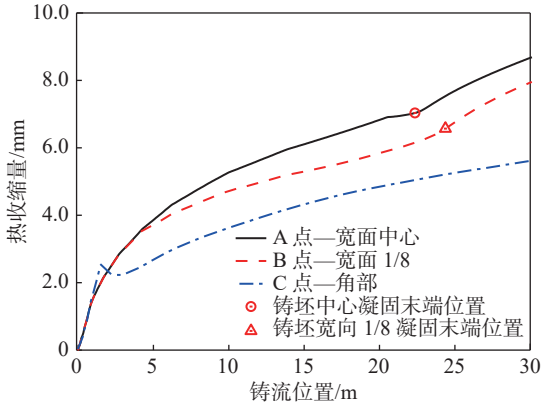

图 7　特征点位置热收缩

Fig. 7　Thermal shrinkage distribution of the typical points

图 8(a) 为二冷 8 区末与铸机末端位置铸坯宽面不同位置的热收缩分布，图 8(b) 为对应铸流位置处铸坯横断面温度场云图。根据热收缩沿铸坯宽向的变化趋势，图 8(a) 中的宽向热收缩分布曲线可划分成三部分。第 I 部分区域内，受不断减小的冷却水流密度影响 (对应的冷却强度不断减小)，该区域内的热收缩沿宽向呈持续减小趋势。随着不断接近铸坯窄面，铸坯窄面冷却对宽面区域的凝固过程影响愈加明显，增强宽面相应区域的整体冷却降温过程。因此，铸坯厚度方向的温度梯度 (如图 8(b) 所示) 随着不断接近铸坯窄面而明显增大。受上述窄面冷却影响，虽然第 II 部分区域内的冷却水流密度沿铸坯宽向不断减小，但该区域热收缩呈现出逐渐增加趋势。对于第 III 部分，铸坯在该区域内的宽向及厚度方向的温度梯度均比较大，如图 8(b) 所示。意味着该区域沿铸坯宽向将发生比较明显的热收缩变形，并对铸坯内外弧表面沿铸坯厚度方向的热收缩变形产生一定的抑制、约束效应。受此影响，图 8(a) 中的第三部分热收缩沿宽向分布呈现不断减小趋势。此外，进入空冷区后，铸坯窄面的增强冷却效应向铸坯宽向中心方向进一步扩展。因此，相比于二冷 8 区末端的铸坯宽面热收缩分布，图 8(a) 中铸机末端位置宽面热收缩分布的第二及三部分区域均有所扩大。

2.2　拉速对热收缩变形影响

图 9 对比分析了不同拉速条件下铸坯表面各位置的热收缩规律。随拉速增加, 铸机各冷却区配水相应增强, 但由于铸坯在各冷却区的有效驻留时间减少, 铸坯整体温度随拉速上升而增加。因此, 随拉速增大, 铸坯热收缩整体呈减小趋势, 其中宽面中心 (A 点, 如图 9(a) 所示) 与宽面 1/8 位置 (B 点, 如图 9(b) 所示) 的热收缩减小趋势最为明显, 拉速每增加 0.1 m/min, 铸机出口位置特征点宽面中心 (A 点) 与宽面 1/8 位置 (B 点) 的热收缩量减小约 1.2 mm。

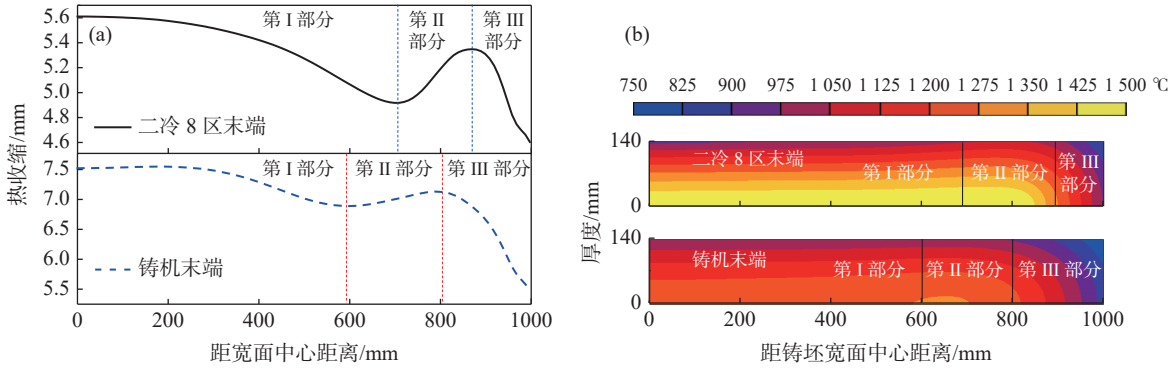

图 8　(a) 铸坯热收缩沿宽向分布与 (b) 横断面温度场云图

Fig. 8　(a) Thermal shrinkage distribution along the slab width direction and (b) the corresponding temperature field of the slab transverse section at the end of zone 8 and the caster

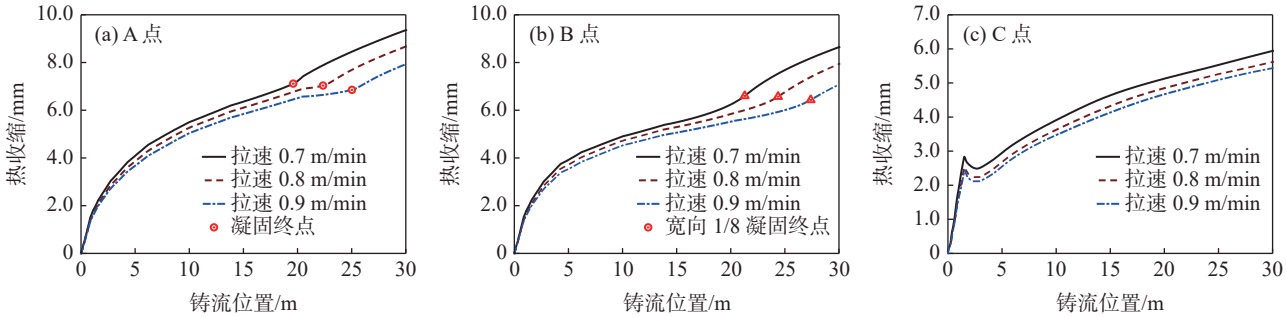

图 9　不同拉速下铸坯各特征点热收缩规律

Fig. 9　Thermal shrinkage variation with different casting speeds at the typical points

2.3　讨论

在以往关于连铸坯热收缩变形研究中, 研究者多将铸坯热收缩沿宽度方向分布视为均匀, 仅讨论分析铸坯一个特征点位置的热收缩变形规律, 并据此制定铸机基础辊缝制度。然而, 本研究结果表明, 当同时考虑铸坯拉坯方向热收缩变形与铸坯宽度方向冷却不均匀两方面因素时, 计算得到的铸坯热收缩沿宽度方向分布具有明显的非均匀性, 在铸坯宽向中心附近区域, 及偏离角部一定距离的区域内, 铸坯热收缩较大, 而其它区域热收缩明显较小, 且随着拉速增加, 这两个区域内的热收缩变形会发生较明显减小趋势。鉴于此, 下一步将研究可综合考虑铸坯宽向热收缩分布不均匀性及拉速影响的基础辊缝制定工艺, 以优化铸机基础辊缝制度, 改善铸坯内裂纹、中心偏析等内部质量问题。

3　结论与展望

建立了考虑连铸板坯宽向不均匀冷却的三维热收缩变形模型, 计算研究了其热收缩变形规律, 得到如下结论:

1) 铸坯完全凝固前, 板坯宽面中心与宽面 1/8 位置热收缩增加速度逐渐减慢, 而完全凝固后出现加速增大趋势, 且宽面中心热收缩大于宽面 1/8 位置。铸坯角部热收缩在窄面足辊冷却结束前大于宽面中心及宽面 1/8 位置, 出足辊冷却区后, 铸坯角部热收缩显著降低, 且在随后浇铸过程中小于宽面中心及宽面 1/8 位置。

2) 板坯宽面的厚度方向热收缩沿其宽向分布差异明显, 且按变化趋势可分为三部分, 第 I 部分及第 III 部分热收缩沿铸坯宽向呈减小趋势, 而第 II 部分热收缩不断增大。

3) 随着拉速增加，相同铸流位置处的热收缩变形量减小，拉速每增加 0.1 m/min，铸机出口位置的铸坯宽面中心与宽向 1/8 位置总热收缩量减小 1.2 mm。

鉴于连铸板坯热收缩变形沿宽度方向的不均匀性，下一步将研究可充分考虑该不均匀分布特征及拉速影响的板坯连铸机基础辊缝制定方法，以优化板坯连铸基础辊缝制度，改善因不合理基础辊缝导致的铸坯内裂纹、中心偏析等内部质量问题。

参考文献

[1] Li C S, Thomas B G. Thermomechanical finite-element model of shell behavior in continuous casting of steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2004, 35(6): 1151−1172.

[2] Song J X, Cai Z Z, Piao F Y, *et al*. Heat transfer and deformation behavior of shell solidification in wide and thick slab continuous casting mold[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2014, 21(S1): 1−9.

[3] Wang T M, Cai S W, Xu J, *et al*. Continous casting mould for square billet optimized by solidification shrinkage simulation[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2010, 37(5): 341−346.

[4] Cai Z Z, Zhu M Y. Thermo-mechanical behavior of peritectic steel solidifying in slab continuous casting mold and a new mold taper design[J]. ISIJ International, 2013, 53(10): 1818−1827.

[5] Zhu L G, Kumar R V. Modelling of steel shrinkage and optimisation of mould taper for high speed continuous casting[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2007, 34(1): 76−82.

[6] Wang B, Walker B N, Samarasekera I V. Shell growth, surface quality and mould taper design for high-speed casting of stainless steel billets[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2000, 39(4): 441−454.

[7] Wang Weihua, Liu Yang, Wang Wenjun, *et al*. Numerical simulation of slab shell solidification shrinkage in continuous casting mould[J]. Research on Iron & Steel, 2014, 42(6): 26−29.
(王卫华, 刘洋, 王文军, 等. 板坯连铸结晶器内坯壳凝固收缩的数值模拟[J]. 钢铁研究, 2014, 42(6): 26−29.)

[8] Qian Hongzhi, Du Chenwei, Hu Pijun, *et al*. Free thermal shrinkage behavior during the solidification process in slab casters[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(8): 27−32.
(钱宏智, 杜辰伟, 胡丕俊, 等. 板坯连铸凝固过程中的自由热收缩行为[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(8): 27−32.)

[9] Chen Hongzhi, Chang Yunhe, Zhang Jiaquan, *et al*. Linear contraction and the related basic roller gap for stainless slab casting[J]. China Metallurgy, 2012, 22(2): 25−30.
(陈洪智, 常运合, 张家泉, 等. 不锈钢板坯连铸自由线收缩与辊缝研究[J]. 中国冶金, 2012, 22(2): 25−30.)

[10] Ma Changwen, Chen Songlin, Zheng Tianran, *et al*. Study on roll gap of slab caster based on solidification shrinkage[J]. Iron and Steel, 2008, 43(3): 44−50.
(马长文, 陈松林, 郑天然, 等. 基于凝固收缩的板坯铸机辊缝研究[J]. 钢铁, 2008, 43(3): 44−50.)

[11] Sun Ligen, Li Xiaofei, Zhu Liguang, *et al*. Optimized design of roll gap for 65Mn slab caster based on solidification shrinkage[J]. Foundry Technology, 2017, 38(5): 1150−1154.
(孙立根, 李晓斐, 朱立光, 等. 基于凝固收缩的65Mn板坯铸机辊缝优化设计[J]. 铸造技术, 2017, 38(5): 1150−1154.)

[12] Lin Qiyong, Zhu Miaoyong. Finite element modeling of nature thermal shrinkage for continuous casting slab[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2006, 27(S2): 8−10.
(林启勇, 朱苗勇. 连铸板坯自然热收缩行为有限元模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(S2): 8−10.)

[13] Hebi Y, Man Y, Huiying Z, *et al*. 3D stress model with friction in and of mould for round billet continuous casting[J]. ISIJ International, 2006, 46(4): 546−552.

[14] Kim K, Yeo T J, Oh K H, *et al*. Effect of carbon and sulfur in continuously cast strand on longitudinal surface cracks[J]. ISIJ International, 1996, 36(3): 284−289.

[15] Cai Zhaozhen. Thermal and mechanical behavior of solidifying shell in slab continuous casting mold[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
(蔡兆镇. 板坯连铸结晶器内凝固坯壳的热/力学行为研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.)

[16] Wu C H, Ji C, Zhu M Y. Numerical simulation of bulging deformation for wide-thick slab under uneven cooling conditions[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 39(3): 1346−1359.

编辑 杨冬梅