

## 碳含量及连铸工艺参数对宽厚板坯结晶器热流的影响

王旭东<sup>1</sup> 尹少华<sup>1</sup> 孔令伟<sup>1</sup> 姚曼<sup>1</sup> 张晓兵<sup>2</sup> 陆洪周<sup>2</sup> 王雄<sup>2</sup> 倪涛<sup>2</sup>

(1 大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116024; 2 江苏沙钢集团, 张家港 215625)

**摘要** 对钢厂0.07%~0.18% C钢220~320 mm×1 800~2 700 mm宽厚板的连铸过程进行了一年的在线检测与统计,研究了不同碳含量的钢种的拉速(0.65~1.2 m/min),钢水过热度(13~35℃),结晶器进水温度(27~35℃)和结晶器液位(775~810 mm)等工艺参数对结晶器铜板热流的影响。结果表明,浇铸220 mm板坯的结晶器热流随拉速增加而上升,但拉速>1.05 m/min时热流不再增大;对具有包晶反应的钢种,宽面与窄面热流随钢液过热度的增加而增大,但进水温度升高,热流降低;受包晶相变收缩的影响,浇铸0.13% C钢时结晶器热流最低。

**关键词** 0.07%~0.18% C钢 宽厚板坯 碳含量 连铸工艺 结晶器热流 在线检测

## Effect of Carbon Content and Casting Parameters on Heat Flux of Mold for Wide-Thick Slab during Concasting Process

Wang Xudong<sup>1</sup>, Yin Shaohua<sup>1</sup>, Kong Lingwei<sup>1</sup>, Yao Man<sup>1</sup>, Zhang Xiaobing<sup>2</sup>, Lu Hongzhou<sup>2</sup>, Wang Xiong<sup>2</sup> and Ni Tao<sup>2</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

2 Jiangsu Shagang Group, Zhangjiagang 215625)

**Abstract** The in-line examination and statistics on casting process for 220~320 mm×1 800~2 700 mm wide-thick slab of 0.07%~0.18% C steel have been carried out for one year at steel work to study the effect of process parameters including casting rate (0.65~1.2 m/min), liquid superheating extent (13~35℃), mold inlet water temperature (27~35℃) and mold liquid level (775~810 mm) on heat flux of mold copper plate during casting process of steel grades containing different C%. Results show that with casting 220 mm slab with increasing casting rate the mold heat flux increases, but as casting rate more than 1.05 m/min, the heat flux doesn't increase again; for the steel grades with peritectic reaction, with increasing liquid superheating extent the heat flux of wide and narrow face of slab increases, but with increasing inlet water temperature the heat flux decreases; due to the effect of peritectic phase transformation, during casting 0.13% C steel the mold heat flux is lowest.

**Material Index** 0.07%~0.18% C Steels, Wide-Thick Slab, Carbon Content, Concasting Process, Mold Heat Flux, Inline Examination

作为连铸机的重要部件,结晶器内均匀稳定的传热条件,是保障铸机稳定运行、高效生产的前提。传热是连铸过程的基本特征,钢液自注入结晶器开始即接受来自铜板剧烈的强制换热,热流密度是衡量二者传热、凝固行为的重要指标和参考。将结晶器/铸坯热流控制在合理水平,维持坯壳在结晶器出口必要的安全厚度,同时促进初生坯壳的均匀化生长,以降低纵裂和表面裂纹发生几率,对于促进连铸过程顺行和铸坯质量的提高具有重要意义。

与常规板坯相比,宽厚板的浇铸工艺具有一定的特殊性。因铸坯断面宽大,铸坯凝固的不均匀性加剧,工艺设计和过程的难度增加;连铸宽厚板通常覆盖具有包晶特征的裂纹敏感性钢种,浇铸难度大,纵裂、角裂、横裂等问题突出。

### 1 试验设备和材料

宽厚板弧形板坯连铸机半径10.75 m,冶金长度28.8 m。结晶器铜板长900 mm,铸坯宽度

1 800~2 700 mm,主要生产220 mm和320 mm厚度的板坯,两种规格铸坯的最高拉速分别为1.2 m/min和0.75 m/min。结晶器铜板为组合式,长900 mm,目标液位控制在100 mm。试验过程中,分别检测4面铜板的冷却水量、进水温度和出水温度,根据冷却水密度、比热容和结晶器有效换热面积,在线计算出各面铜板的平均热流密度,数据采集和检测的频率为1 Hz。对该铸机累计1年的浇铸数据进行检测和记录,分别讨论拉速、过热度、进水温度等因素对结晶器热流的影响。为便于讨论并减少由随机因素引起的测量误差,本文分析所用到的数据,都是在包括拉速等主要工艺参数相对稳定条件下,选取正常工况一段时间内热流检测结果的平均值<sup>[1]</sup>,持续时间≥20 min。统计和分析过程中,遵循“参数对齐”原则,即在讨论某工艺参数对热流的作用时,仅允许该工艺参数在一定范围内变化,其余工艺参数则一律相同,以剔除其他工艺因素和变化对分析结

表1 试验钢种化学成分/%  
Table 1 Analysis of test steel grades/%

编号	C	Mn	Si	Nb	Al	Ti	V	Cr	P	As	Zn	Sn	S
A	0.07	1.50	0.25	0.030	0.030	0.015	0.050	0.05	0.010	-	-	-	0.003
B	0.15	1.20	0.25	0.040	0.030	0.015	0.006	0.05	0.018	0.01	0.005	0.01	0.003
C	0.15	0.78	0.20	0.008	0.015	0.005	0.005	0.05	0.018	0.01	0.005	0.01	0.012
D	0.16	0.65	0.25	0.008	0.030	0.005	0.005	0.05	0.018	0.01	0.005	0.01	0.016
E	0.17	1.50	0.30	0.025	0.030	0.015	0.006	0.20	0.010	0.01	0.005	0.01	0.003
F	0.18	1.20	0.20	0.008	0.030	0.015	0.005	0.05	0.020	0.01	0.005	0.01	0.018

果的影响。试验钢种的碳含量与成分如表1所示。

## 2 热流影响因素与讨论

### 2.1 拉速

结晶器热流密度随拉速的变化趋势如图1所示。铸坯宽度为1 835 ~ 2 699 mm,厚度为220 mm(拉速高于0.9 m/min)和320 mm(拉速低于0.7 m/min)两种。不同拉速下,宽面与窄面热流密度均随着拉速的升高呈现明显的上升趋势,特别是拉速从0.9 m/min变化至1.05 m/min,铜板热流大幅上升<sup>[2]</sup>。原因可归结为:(1)铸坯角度-拉速升高后坯壳厚度减薄,铸坯收缩减小,在同样钢水静压力的作用下坯壳被推向铜板,共同作用下导致气隙的厚度减小<sup>[3-4]</sup>;(2)结晶器角度-铜板温度随拉速增大而升高,在冷却水温度和水量不变的前提下,铜板与冷却水温差增大,引起热流升高<sup>[5]</sup>;(3)保护渣角度-铸坯表面温度升高后,液渣向固渣转变的区域下移,特别是对于高碱度、析晶能力较强的保护渣,通过结晶抵制传热的作用减弱,热流增大<sup>[6]</sup>;(4)综合传热角度-因坯壳的厚度及其收缩同步减小,凝固坯壳、保护渣、气隙各层的厚度均减薄,各层导热系数与层间界面的接触热阻不变,由钢液传向结晶器的总热阻降低。

从图1可以看出,在拉速高于1.05 m/min时,宽面与窄面热流随拉速升高的趋势不再明显,甚至略有降低趋势。在以往的研究中,通常认为水槽内“核沸腾”气泡的出现而导致冷却水传热效率下降,但其多见于薄板坯和高拉速下的常规板坯连铸<sup>[5]</sup>。除了该原因以外,拉速升高后铜板热面和冷面温度升高,铜板更长的宽度使得中心区域的应力和变形增大,增厚的气隙可能导致传热效率降低。另一方面,铸坯单位表面的保护渣消耗量随拉速的升高而降低,液渣填充气隙促进传热的作用逐渐下降,也是引起高拉速下热流减缓的主要因素。

分别统计内弧、外弧宽面铜板的热流,二者热流差值随拉速变化的趋势为:拉速低于0.7 m/min时,内、外弧热流大致相同,差值0.05 MW/m<sup>2</sup>。当拉速

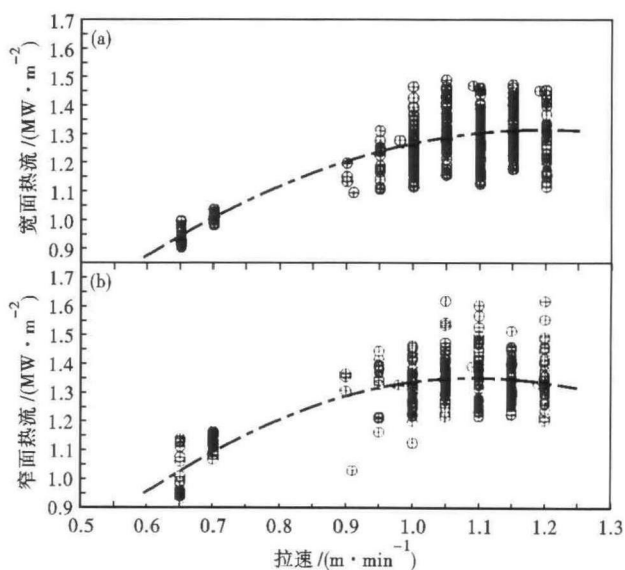


图1 拉速对结晶器铜板热流的影响:(a)宽面;(b)窄面  
Fig.1 Effect of casting rate on heat flux of mold copper plate:  
(a) wide face; (b) narrow face

高于0.9 m/min时,热流差值显著增大,最高时相差近20%,约0.3 MW/m<sup>2</sup>。内弧和外弧铜板具有热流较大的差异,但规律并不明显。总体上看,较高拉速下两宽面传热与凝固的对称性显著下降。

### 2.2 过热度

统计过热度对热流的影响,三类钢种热流随过热度的变化如图2所示。浇铸的断面和拉速分别为,钢A:2 294 mm × 220 mm,1.1 m/min;钢B:2 693 mm × 220 mm,1.0 m/min;钢F:2 287 mm × 220 mm,1.2 m/min。对于碳含量相对较低的钢A,过热度由18 °C变化至31 °C时,宽面与窄面热流几乎维持恒定,变化幅度在0.05 MW/m<sup>2</sup>以内。对于B和F两类钢种,热流随过热度的增大呈现出显著的上升趋势。以钢F为例,过热度由19 °C提高至30 °C时,宽面热流增加约0.2 MW/m<sup>2</sup>,窄面热流的变化幅度约0.1 MW/m<sup>2</sup>。钢B和F均为具有包晶特征的裂纹敏感性钢种,过热度提高后,坯壳在结晶器内初始凝固位置下移,坯壳相应减薄,由包晶相变和凝固引起的收缩均减小,较小的气隙厚度使得传热加快。另一方面,浇铸两类钢种时采用了高碱度、强析晶能力

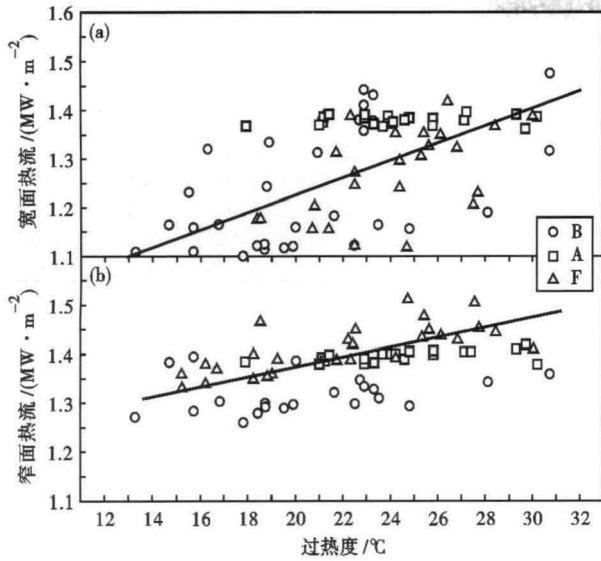


图2 钢水过热度对结晶器铜板热流的影响:(a)宽面;(b)窄面  
Fig.2 Effect of liquid superheating extent on heat flux of mold copper plate: (a) wide face; (b) narrow face

的保护渣,浇铸温度的升高使弯月面区域保护渣的熔化和流入加快,液渣层厚度增大,较高的铸坯表面温度又使得液渣向结晶态渣膜转变的区域滞后<sup>[7]</sup>。在几方面因素的共同作用下,结晶器传热加快,宽面与窄面热流均呈现出上升趋势。

2.3 进水温度

生产现场的结晶器冷却水无加热处理,冬季(12月~2月)时进水温度偏低,在28℃左右,夏季(5月~9月)水温较高,一般在33℃以上。在累计一年的监测过程中,进水温度的变化幅度约7℃。从图3可以看出,宽面与窄面热流都随着进水温度的升高而出现降低趋势。铜板冷面温度提高后,由

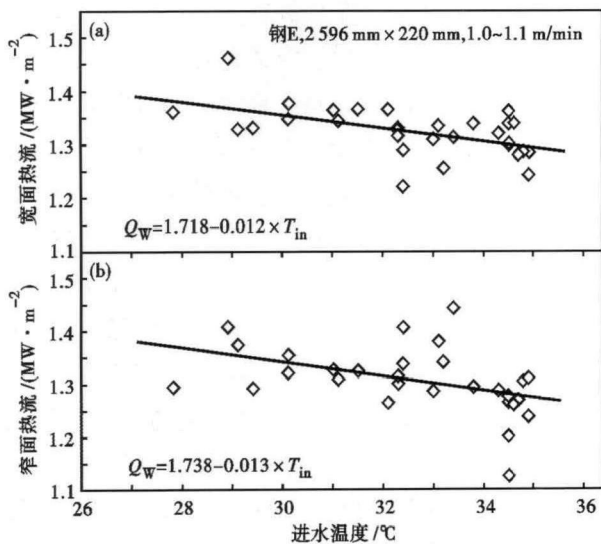


图3 进水温度对结晶器铜板热流的影响:(a)宽面;(b)窄面  
Fig.3 Effect of inlet water temperature on heat flux of mold copper plate: (a) wide face; (b) narrow face

钢液至铜板的温度跨度降低,传热有所减缓。进水温度每升高1℃,铜板热流降低0.01 MW/m<sup>2</sup>。根据这一趋势,对于季节温差大的北方地区,浇铸需缓冷的包晶钢时,应防止冬季铜板的进水温度过低。

2.4 结晶器液位

钢B和D在不同液位高度下的结晶器热流如图4所示。其中,钢B断面2693 mm × 220 mm,拉速1.0 m/min。钢D的尺寸为2280 mm × 220 mm、2686 mm × 220 mm,拉速1.0~1.15 m/min。由图4可以看出,两类钢种下,宽面和窄面热流均随着液位的升高而呈现明显的降低趋势。以钢B为例,结晶器液位在785 mm附近,宽面与窄面热流均值分别为1.28 MW/m<sup>2</sup>和1.33 MW/m<sup>2</sup>,当液位在800 mm以上时,热流分别降至1.16 MW/m<sup>2</sup>和1.29 MW/m<sup>2</sup>。不同液位高度下,4面铜板的进出水温差近乎不变,低的液位使结晶器与铸坯间的接触面积减小,相同的水量冷却接触面积和质量都相对较少的钢液,是造成单面表面热流密度升高的主要原因。

由图4能够看出,在同样的液位高度下,宽面热流的波动高于窄面。其原因为(1)液位降低后水口浸入深度减小,经水口侧孔吐出钢液形成的上环流区,对弯月面和钢液波动幅度的扰动增强,与窄面相比,宽面铜板受此影响更大;(2)液位较高时,窄面锥度的存在使热流波动较大,随液位降低,窄面弯月面钢液逐渐远离热流波动较大的目标液位(800 mm)区域,窄面热流的波动因此下降。

值得注意的是,目标液位处的宽、窄面热流数值及其波动幅度都较低。统计液位在775~800 mm

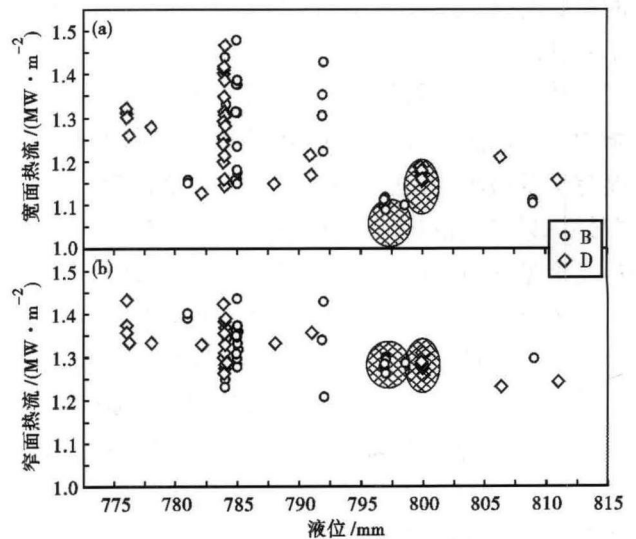


图4 结晶器液位对结晶器铜板热流的影响(钢B、D):(a)宽面;(b)窄面  
Fig.4 Effect of mold liquid level on heat flux of mold copper plate (steel B and D): (a) wide face; (b) narrow face

的变化, 800 mm 附近热流的波动最小, 在  $0.1 \text{ MW/m}^2$  以内; 而液位降至 790 mm 以下后热流波动强烈, 液位在 775 mm 附近时宽面热流的波动在  $0.3 \sim 0.4 \text{ MW/m}^2$ 。试验结果证实, 铜板和镀层的厚度以及水槽尺寸、布置方案是合理的, 能够将目标液位附近的热流波动控制在较低程度。

### 2.5 钢种碳含量

从图 5 可以看出, 不同碳含量下结晶器热流呈现出较大差异。在所讨论的碳含量范围内, 宽面、窄面热流随 [C] 的变化呈“U”型分布。以宽面热流为例, 碳含量为 0.07% 时, 宽面热流明显较高, 均值约  $1.34 \text{ MW/m}^2$ ; 碳含量为 0.18% 时, 热流也维持在较高水平, 宽面热流为  $1.35 \text{ MW/m}^2$ ; 在碳含量从 0.13% 升高至 0.18% 的过程中, 宽面和窄面热流显著升高, 热流随碳含量升高的趋势十分明显; 在所讨论钢种的范围内, 碳含量 0.13% 处的热流最低, 约  $1.15 \text{ MW/m}^2$ 。制定工艺时通常将碳含量在 0.08% ~ 0.17% 的钢种划归为包晶钢范围, 钢液凝固过程中的包晶相变会导致 0.38% 的体积收缩, 铸坯脱离结晶器而产生较厚的气隙, 致使传热减缓。受钢液冷却速度及钢液中能够扩大奥氏体区元素的影响, 包晶成分向相图的左下方移动, 导致碳含量在 0.10% ~ 0.12% 附近的钢种热流最低, 检测结果与理论推测基本吻合<sup>[5,8-9]</sup>。浇铸此成分附近的钢种时, 应优先考虑结晶器的冷却工艺和保护渣性能要求, 以促进弱冷, 减少由不均匀收缩导致的纵裂和其他裂纹。

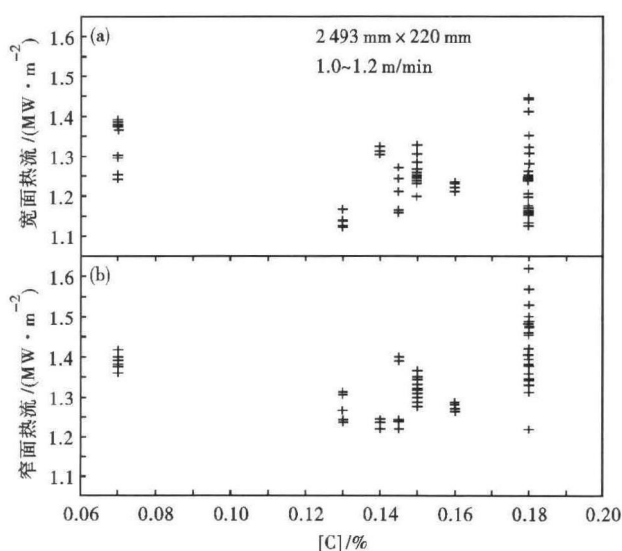


图 5 钢中碳含量对结晶器铜板热流的影响: (a) 宽面; (b) 窄面  
Fig. 5 Effect of carbon content in steel on heat flux of mold copper plate: (a) wide face; (b) narrow face

## 4 结论

(1) 浇铸 220 mm 厚度的板坯, 结晶器热流随拉速的升高而上升, 但在拉速提高至  $1.05 \text{ m/min}$  以上时热流不再增大, 推测由铜板变形与渣耗降低导致的热阻增大是其主要原因。

(2) 对于具有包晶特征的钢种, 结晶器宽面与窄面热流随过热度的提高而增大; 与之相反, 进水温度升高后铜板热流相应降低, 进水温度每升高  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ , 热流降低约  $0.01 \text{ MW/m}^2$ 。

(3) 热流及其波动水平随结晶器液位的降低呈上升趋势, 良好的铜板、水槽与镀层设计能够将目标液位处的热流波动控制在较低水平, 初生坯壳的形成位置应与铜板设计参数相互匹配, 浇铸过程中液位高度的控制也应予以充分重视。

(4) 浇铸不同碳含量的钢种时, 受包晶相变收缩的影响, 碳含量在 0.13% 时的结晶器热流最低, 需要合理设计结晶器一冷工艺和保护渣, 形成缓冷以防止纵裂和其他缺陷。

国家自然科学基金项目(51004012)、国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA04Z134)和中国博士后科学基金项目(2012M520621/2013T60511)资助

### 参考文献

- [1] 刘启龙, 范鼎东, 史怀方, 等. 板坯结晶器平均热流的研究[J]. 连铸, 2003(6): 15-18.
- [2] Toshihiko Emi, Hasse Fredriksson. High-Speed Continuous Casting of Peritectic Carbon Steels[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 413-414: 2-9.
- [3] 王建新. 小方坯连铸机结晶器平均热流影响因素的分析[J]. 钢铁研究, 2008, 36(2): 30-34.
- [4] 王宝峰, Samarasekera I V. 不锈钢高速连铸结晶器热流分布[J]. 连铸, 2001(3): 15-18.
- [5] 张立, 王俊, 孙宝德. 宝钢板坯连铸结晶器平均热流[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(12): 1891-1896.
- [6] 成则伟, 陈庆伟, 李联生, 等. 保护渣性能对结晶器内传热的影响[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(6): 524-528.
- [7] 郑伟栋, 盖领军, 张春杰. 保护渣对结晶器热流的影响[J]. 连铸, 2007(2): 40-46.
- [8] 朱志远, 王新华, 王万军, 等. 板坯连铸结晶器平均热流影响因素及控制范围研究[C]. 北京: 中国钢铁年会论文集, 2001: 709-714.
- [9] 朱志远, 王新华, 张立, 等. 碳含量对宝钢结晶器平均热流影响[J]. 北京科技大学学报, 2000, 22(5): 447-452.

王旭东(1979-), 男, 博士(大连理工大学), 副教授, 2001年大连理工大学(本科)毕业, 连铸结晶器热、力联合检测、模拟及其应用的研究。E-mail: hler@dlut.edu.cn

收稿日期: 2014-02-24