



连铸工艺对不同碳含量钢铸坯碳偏析的影响

任红娃, 娄香杰, 何斌强, 赵 骏, 周志梭

(成都冶金实验厂有限公司, 成都 611330)

摘 要:连铸坯碳偏析源于凝固过程碳在固液两相分配不均,先凝固固相(晶体)碳含量较低,导致过剩碳富集于固液界面前沿液相,形成局部高碳区。该缺陷贯穿热轧至产品服役全流程,严重恶化材料加工性能、诱发带状组织与热处理缺陷,并显著降低最终产品的力学性能和服役寿命。本研究系统考察了低碳合金钢(20CrMo、3130)、中碳合金钢(4142、45)及高碳合金钢(GCr15)在不同连铸工艺参数(过热度、拉速、结晶器电磁搅拌)下的碳偏析规律。研究明确了典型钢种的优化工艺窗口,对于 170 mm×170 mm 规格连铸坯,低碳钢 20CrMo 推荐过热度 20~25 °C、拉速 ≤1.60 m/min、M-EMS 电流 195~205 A;中碳钢 4142SR 推荐过热度 20~28 °C、拉速 1.58~1.62 m/min、M-EMS 电流 200~208 A;高碳钢 GCr15 推荐过热度 18~25 °C、拉速 ≤1.16 m/min、M-EMS 电流 195~202A。主要结果表明,1)碳含量影响为随钢种碳含量增加,铸坯中心至 1/2 半径区域的负偏析占比从 45% 降至 28%,且内弧/外弧负偏析比值由 1.5 降至 1.24;2)过热度影响为在拉速与电磁搅拌强度相同时,中间包钢水过热度处于 20~30 °C 区间可获得最优(最低)碳偏析指数;3)电磁搅拌影响为在特定磁场强度范围内,增强结晶器电磁搅拌可有效降低碳偏析指数的波动范围;4)拉速影响为提高拉速会导致铸坯碳偏析指数显著上升。本研究定量揭示了关键连铸工艺参数对不同碳含量合金钢碳偏析的影响规律,为工业生产中通过优化过热度、电磁搅拌强度及拉速等参数,实现碳偏析的有效控制提供了直接依据,尤其强调需根据钢种碳含量进行针对性工艺优化。

关键词:碳偏析;电磁搅拌;连铸拉速;过热度

DOI:10.20057/j.1003-8620.N250564 **中图分类号:**TF03

Influence of Continuous Casting Process on Carbon Segregation in Steel Billets with Different Carbon Contents

Ren Hongwa, Lou Xiangjie, He Binqiang, Zhao Jun, Zhou Zhisuo
(Chengdu Metallurgical Experimental Factory Co., Ltd., Chengdu 611330, China)

Abstract: Carbon macrosegregation in continuous casting strands originates from the uneven distribution of carbon between the solid and liquid phases during solidification. The initially solidified solid phase (dendrites) has a lower carbon content, causing excess carbon to enrich the liquid phase at the solid-liquid interface front and form localized high-carbon zones. This defect persists throughout the entire process from hot rolling to product service, severely deteriorating material processability, inducing banded structures and heat treatment defects, and significantly reducing the mechanical properties and service life of the final product. This study systematically investigates the carbon macrosegregation behavior of low-carbon alloy steels (20CrMo, 3130), medium-carbon alloy steels (4142, 45), and high-carbon alloy steel (GCr15) under different continuous casting process parameters (superheat, casting speed, mold electromagnetic stirring (M-EMS)). The research defines optimized process windows for typical steel grades: for low-carbon steel 20CrMo, a superheat of 20 °C–25 °C, casting speed ≤1.60 m/min, and M-EMS current of 195A–205 A are recommended; for medium-carbon steel 4142SR, a superheat of 20 °C–28 °C, casting speed of 1.58m/min–1.62 m/min, and M-EMS current of 200A–208 A are recommended; for high-carbon steel GCr15, a superheat of 18 °C–25 °C, casting speed ≤1.16 m/min, and M-EMS current of 195A–202 A are recommended. The main results are as follows: 1) Effect of carbon content: As the carbon content of the steel grade increases, the proportion of negative segregation from the strand center to the 1/2 radius region decreases from 45% to 28%, and the inner arc/outer arc negative segregation ratio decreases from 1.5 to 1.24. 2) Effect of superheat: With constant casting speed and electromagnetic stirring intensity, the tundish superheat within the range of 20 °C–30 °C yields the optimal (lowest) carbon segregation index. 3) Effect of electromagnetic stirring: Within a specific magnetic field intensity range, enhancing M-EMS effectively reduces the fluctuation range of the carbon segregation index. 4) Effect of casting speed: Increasing the casting speed leads to a significant rise in the carbon segregation index of the strand. This study quantitatively reveals the influence of key continuous casting parameters on carbon macrosegregation in alloy steels with different carbon contents. It provides a direct basis for effectively controlling carbon macrosegregation in industrial production by optimizing parameters such as superheat, electromagnetic stirring intensity, and casting speed, with particular emphasis on the need for targeted process optimization based on the steel grade's carbon content.

Key Words: Carbon Segregation; Electromagnetic Stirring (EMS); Casting Speed; Superheat

作者简介:任红娃(1990—),男,本科,工程师; **E-mail:**749902686@qq.com; **收稿日期:**2025-10-25

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

连铸坯碳偏析的本质源于钢液凝固过程中溶质元素在固液两相的不平衡分配。当凝固发生时,先形成的固相(枝晶或晶体)碳溶解度较低,导致过剩碳原子被排挤至固液界面前沿液相区,形成局部高碳富集带^[1-2]。这一缺陷在后续热轧、热处理及产品服役全流程中持续存在,严重恶化材料加工成型性能,诱发带状组织与淬火变形等热处理缺陷,并显著降低齿轮、轴承、轴类等关键零部件最终的强度、韧性和疲劳寿命^[3-5]。因此,控制碳偏析是提升合金钢产品质量可靠性的核心挑战。尽管过热度、拉速及结晶器电磁搅拌(M-EMS)被公认为影响连铸偏析的关键工艺参数^[6-8],现有研究仍存在显著局限,其一,多数成果集中于单一钢种,缺乏对不同碳含量合金钢的对比研究;其二,参数交互作用机制尚不明确,尤其缺乏对偏析空间分布(如径向位置、内外弧差异性)的定量描述;其三,工业生产中亟须的“碳含量-工艺参数”匹配关系尚未系统建立,导致优化措施普适性不足。为突破上述瓶颈,本研究选取典型低碳合金钢(20CrMo、3130)、中碳合金钢(4142、45)及高碳合金钢(GCr15)为对象,系统探究关键连铸参数对其碳偏析行为的影响规律,重点解决以下问题:1)碳含量效应,量化钢种名义碳含量对铸坯负偏析空间分布(中心至1/2半径区域占比、内外弧比例)的影响;2)过热度窗口,确定特定拉速与M-EMS条件下最优过热度控制区间;3)电磁搅拌机制,揭示磁场强度对碳偏析指数波动范围的调控作用;4)拉速敏感性,阐明拉速变化与偏析严重程度的定量关联。通过建立多钢种-多参数的定量映射模型,本研究为工业连铸生产提供了碳偏析控制的直接依据,核心创新在于提出基于碳含量的定制化工艺优化路径,突破传统经验化调控的局限性。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

为研究连铸工艺参数对不同碳含量合金钢碳偏析规律的影响,试验选取具有代表性的低碳合金钢(20CrMo、3130)、中碳合金钢(4142、45)及高碳合金钢(GCr15)为研究对象,试验材料制备流程为:100 t Costeel 电弧炉→100 tLF 精炼→5机5流连铸机→170 mm×170 mm 规格连铸坯。

1.2 试验方法

为系统性揭示钢水过热度、拉坯速度及结晶器电磁搅拌(M-EMS)强度等核心工艺参数对不同碳含量合金钢铸坯碳偏析指数及其空间分布特征(中

心至1/2半径区域占比、内外弧差异)的影响规律,本研究分别从不同碳含量合金钢各流间碳偏析情况,以及连铸关键参数对不同碳含量合金钢碳偏析影响等方面进行研究^[4-9]。为了对比不同连铸数据对偏析的影响作用,切取最具有代表性的连铸坯试样,取样位置如图1所示。

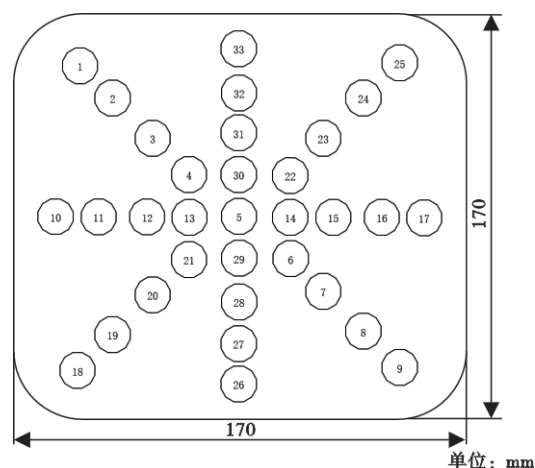


图1 连铸坯取样位置示意图

Fig. 1 Sampling position indication for continuous casting billets

2 试验结果与分析

2.1 碳含量对合金钢碳偏析的影响

2.1.1 低碳钢

20CrMo 钢第1流连铸坯按图1所示的不同位置取样检测的碳含量如图2所示,由于低碳钢凝固区间窄,糊状区短且渗透性低,柱状晶发达,中心等轴晶区小,溶质易在中心富集。同时,外弧侧冷却快,易形成负偏析。

取20CrMo、3130钢内外弧碳含量最大值与最小值做比较结果见表1。低碳钢(20CrMo、3130)铸坯内弧 $w[C]/\%$ 在4流偏高,3130钢4流内弧最大0.274最小0.224极差0.05,20CrMo钢4流内弧最大0.209最小0.175极差0.034;低碳钢(20CrMo、3130)铸坯外弧碳含量4流偏高,3130钢4流内弧最大0.269最小0.213极差0.056,20CrMo钢4流内弧最大0.213最小0.168极差0.045。统计低碳钢负偏析分布区域数据见表2,低碳钢负偏析主要分布在中心到1/2处占比45%,外弧占比30%。

2.1.2 中碳钢

45钢第1流连铸坯按图1所示的不同位置取样检测的碳含量如图3所示,中碳钢凝固区间适中,柱

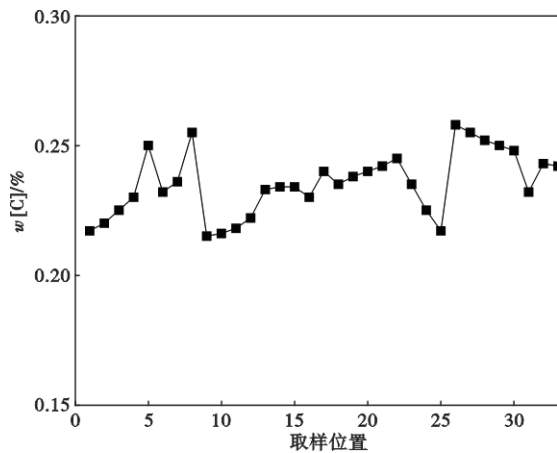


图 2 20CrMo 第 1 流连铸坯不同位置碳含量实测图

Fig. 2 Measured Carbon Content at Different Positions of the First Strand Continuous Casting Billet of 20CrMo

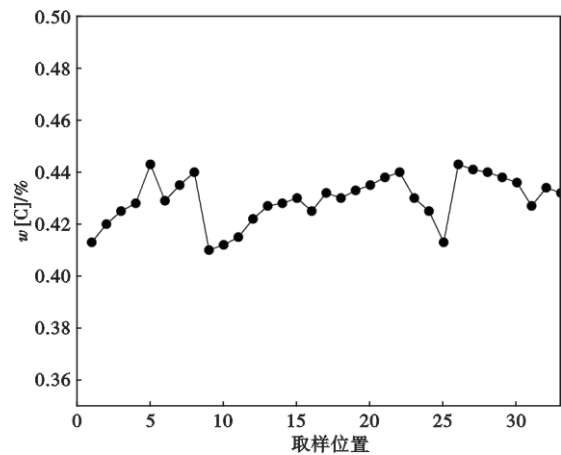


图 3 45 钢第 1 流连铸坯不同位置碳含量实测图

Fig. 3 Measured Carbon Content at Different Positions of the First Strand Continuous Casting Billet of 45

表 1 20CrMo、3130 钢碳含量(质量分数)

Table 1 Test Data of 20CrMo and 3130 steel Carbon Content

钢种	流次	内弧最大值	内弧最小值	外弧最大值	外弧最小值
3130	一流	0.258	0.215	0.242	0.217
	二流	0.254	0.222	0.256	0.229
	三流	0.248	0.222	0.244	0.226
	四流	0.274	0.224	0.269	0.213
	五流	0.239	0.214	0.251	0.211
20CrMo	一流	0.203	0.176	0.194	0.174
	二流	0.200	0.174	0.205	0.174
	三流	0.202	0.175	0.196	0.181
	四流	0.209	0.175	0.213	0.168
	五流	0.193	0.174	0.193	0.178

状晶与等轴晶比例相当,糊状区渗透性增强,溶质可向内外弧侧扩散,故负偏析分布更分散,但中心仍因凝固收缩和溶质富集而偏析较重。

取 4142SR 钢,45 钢内外弧最大与最小值做比较结果见表 3,从表 3 可知,中碳钢(4142SR,45)铸坯内弧 $w[C]/\%$ 在 2、3 流偏高;45 钢 2 流内弧最大 0.452 最小 0.437 极差 0.015,3 流内弧最大 0.451 最小 0.415 极差 0.036,4142SR 钢 2 流内弧最大 0.45 最小

0.407 极差 0.043,3 流内弧最大 0.45 最小 0.42 极差 0.03;中碳钢(4142SR,45)铸坯外弧碳含量在 3 流偏高:4142SR 钢 3 流外弧最大 0.458 最小 0.41 极差 0.048,45 钢 3 流外弧最大 0.454 最小 0.412 极差 0.042。统计中碳钢(4142,45)负偏析分布区域数据见表 4,中碳钢负偏析主要分布在中心到 1/2 处占比 37%,外弧占比 37%。

2. 1. 3 高碳钢

GCr15 钢第 1 流连铸坯按图 1 所示的不同位置取样检测的碳含量如图 4 所示,高碳钢凝固区间宽,糊状区厚且渗透性强,富碳液相可长距离流动,使偏析扩散至更大范围。过热度升高会促进柱状晶生长,加剧中心偏析,但宽糊状区也允许溶质横向再分配,因此偏析分布均匀但局部浓度高。

取 GCr15 钢内外弧最大与最小值做比较结果见表 5,高碳钢(GCr15)铸坯内外弧 $w[C]/\%$ 在 4 流偏高:GCr15 钢 4 流外弧最大 1.117 最小 0.975 极差 0.142,GCr15 钢 4 流内弧最大 1.07 最小 0.963 极差 0.107。统计高碳钢负偏析分布区域数据见表 6,高碳钢负偏析主要分布在内外弧和中心到 1/2 处,外弧占比 36%,内弧占比 29%,中心到 1/2 占比 28%。

表 2 低碳钢负偏析发生区域统计表

Table 2 Statistics of Negative Segregation Zones in Low Carbon Steel

20CrMo 钢流次	中心	1/2	内弧	外弧	3130 钢流次	中心	1/2	内弧	外弧
一流			√	√	一流		√		√
二流	√	√			二流		√		
三流	√	√			三流		√		√
四流	√	√			四流		√		√
五流		√	√	√	五流		√		√

表3 4142SR、45钢碳含量(质量分数)

Table 3 Test Data of 4142SR and 45 steel Carbon Content

钢种	流次	内弧最大值	内弧最小值	外弧最大值	外弧最小值
4142SR	一流	0.442	0.413	0.438	0.405
	二流	0.450	0.407	0.456	0.419
	三流	0.450	0.420	0.458	0.410
	四流	0.444	0.404	0.447	0.405
	五流	0.444	0.420	0.434	0.407
45	一流	0.448	0.413	0.443	0.410
	二流	0.452	0.437	0.454	0.418
	三流	0.451	0.415	0.454	0.412
	四流	0.446	0.416	0.453	0.413
	五流	0.448	0.424	0.451	0.413

通过以上数据可以看出,碳含量是决定钢液凝

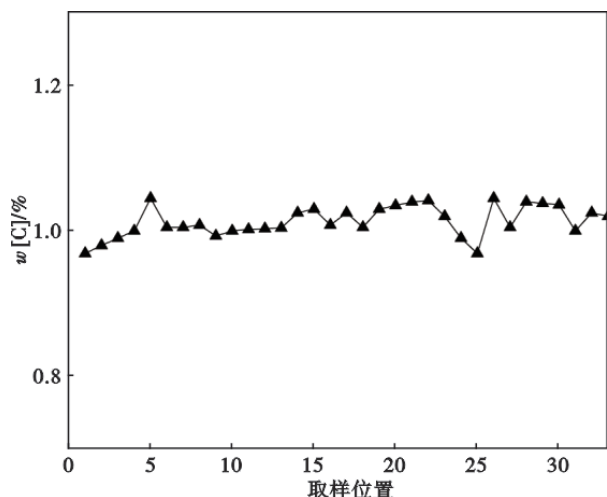


图4 GCr15第1流连铸坯不同位置碳含量实测图

Fig. 4 Measured Carbon Content at Different Positions of the First Strand Continuous Casting Billet of GCr15

固行为与溶质再分配的关键因素,对铸坯最终的偏析分布形态具有决定性影响。在低碳钢中,负偏析主要集中于铸坯中心至1/2半径区域,占比高达45%。随着碳含量增加至中碳钢,该区域占比下降至37%。对于高碳钢GCr15,中心至1/2半径区域的

负偏析占比进一步降至28%,而内外弧侧的负偏析现象则显著加剧(外弧36%,内弧29%)^[5-10]。内弧与外弧的负偏析比值由低碳钢的1.5降至高碳钢的1.24,表明高碳钢内外弧的碳分布趋于均衡。

2.2 连铸参数对碳偏析的影响

2.2.1 钢水过热度对碳偏析指数的影响

连铸中间包浇铸温度对钢结晶过程的成分偏析有很大的影响,浇铸过热度提高,铸坯凝固散热量增大且坯壳厚度减少,铸坯断面温度梯度增大,易偏析元素CS等按照选分结晶的方式扩散凝固。从而形成明显的偏析缺陷。在相同的拉速和电磁搅拌的前提下,分析过热度对铸坯碳偏析的影响分析结果如下。

为明确过热度对碳偏析的影响,选取20CrMo钢在拉速1.61 m/min、M-EMS电流200A条件下,对比其在不同过热度(18、23、28℃)下的碳偏析指数,结果见表7。试验表明,随着过热度从18℃升高至28℃,20CrMo钢碳偏析指数平均值由0.993升至1.010,说明过高过热度显著加剧正偏析,验证了20~25℃为最优控制区间。这是因为过高的过热度会增大铸坯断面的温度梯度,促使柱状晶迅猛生长,形成发达的柱状晶区^[6-11]。

2.2.2 电磁搅拌对连铸坯碳偏析的影响

在相同浇铸过热度 and 拉速的前提下进行拉速对碳偏析的影响研究。

1) 低碳钢20CrMo

通过表8可以看出,在其他因素相同的条件下,在一定的磁场范围内随着电磁搅拌的提高碳偏析极差下降。当磁场过小时对钢液搅拌没有效果,当磁场过大时铸坯易产生负偏析。浇铸低碳钢时4流碳偏析变化率较大。

2) 中碳钢4142SR

通过表9可以看出,在其它因素相同的条件下,在一定的磁场范围内随着电磁搅拌的提高碳偏析极差下降。当磁场过小时对钢液搅拌没有效果,当磁场过大时铸坯易产生负偏析。浇铸中碳钢时3流

表4 中碳钢负偏析分布区域统计表

Table 4 Statistical table of negative segregation distribution zones in medium-carbon steel

4142流次	中心	1/2	内弧	外弧	45流次	中心	1/2	内弧	外弧
一流	√			1	一流		√	√	√
二流	√		√	1	二流		√		√
三流	√			1	三流	√			
四流		√			四流	√	√		
五流		√		1	五流	√	√		

表 5 GCr15 高碳钢碳含量(质量分数)

Table 5 Test Data of GCr15 High Carbon Steel Carbon Content %

流次	内弧最大值	内弧最小值	外弧最大值	外弧最小值
一流	1.060	0.969	1.045	0.993
二流	1.080	0.976	1.072	0.998
三流	1.017	0.956	1.015	0.940
四流	1.070	0.963	1.117	0.975
五流	1.038	0.954	1.044	0.977

表 6 GCr15 高碳钢负偏析分布区域统计表

Table 6 Statistical Table of Negative Segregation Distribution Areas of GCr15 High Carbon Steel

流次	中心	1/2	内弧	外弧
一流	√	√		√
二流		√	√	√
三流		√	√	√
四流			√	√
五流		√	√	√

碳偏析变化率较大。说明适度的电磁搅拌能够增强钢液在糊状区的对流,一方面破碎初生枝晶作为等轴晶核,扩大中心等轴晶区;另一方面加速了凝固前沿富集溶质向熔体内部的扩散,避免了局部严重富集^[7-12]。

2.2.3 拉速对连铸坯碳偏析的影响

在过热度 22 °C、M-EMS 电流 200A 条件下,研究 GCr15 钢在三种拉速(1.13、1.16、1.19 m/min)下的偏析极差变化见表 12。拉速从 1.13 m/min 提高至 1.19 m/min,偏析极差增大约 52%,说明高碳钢对拉速极为敏感,推荐拉速控制在 ≤1.16 m/min。但结合生产拉速不能过低的情况,铸坯进入拉矫机时表面温度不小于 700 °C 否则会产生应力裂纹。

2.3 碳偏析形成的理论机制分析

通过研究不同碳含量的合金钢在不同的连铸工艺参数下碳偏析的变化规律。试验数据显示:所有钢种在铸坯中心至 1/2 半径区域均观察到显著负偏析,而该区域正是凝固末端富集溶质液相的最后凝固位置,实际形成宏观正偏析带。

随着钢种碳含量增加,中心负偏析占比从 45% 降至 28%,此现象与糊状区特性变化密切相关。高碳钢(如 GCr15)凝固区间宽,糊状区更为疏松且渗透性增强,为富碳液相在更广范围内(如内外弧侧)的流动与重新分配创造了条件,导致偏析分布更为分散但局部浓度更高。过热度的影响体现在其对温度梯度的调控上,表 7 数据显示过热度从 18 °C 升至 23 °C 时,碳偏析指数显著上升。较高过热度促进

表 7 钢水过热度与碳偏析指数数据表

Table 7 Data Table of Superheat of Molten Steel and Carbon Segregation Index

过热度 /°C	1 流	2 流	3 流	4 流	5 流	平均值
18	0.992	0.995	0.998	0.988	0.994	0.993
23	1.002	1.010	1.006	1	1	1.004
28	1.008	1.015	1.012	1.006	1.009	1.010

表 8 20CrMo 电磁搅拌与碳偏析数据表

Table 8 20CrMo Electromagnetic Stirring and Carbon Segregation Data Sheet

流次	中间包过热度/°C	拉速/(m·min ⁻¹)	电磁搅拌/A	偏析极差
2 流	23	1.61	194	0.031
1 流	23	1.61	196	0.029
4 流	23	1.61	201	0.047
3 流	23	1.61	202	0.027
5 流	23	1.61	204	0.019

表 9 4142SR 电磁搅拌与偏析指数数据表

Table 9 4142SR Electromagnetic Stirring and Segregation Index Data Sheet

流次	过热度/°C	拉速/(m·min ⁻¹)	电磁搅拌/A	偏析极差
2 流	18	1.61	198	0.049
4 流	18	1.61	201	0.043
3 流	18	1.61	202	0.048
1 流	18	1.61	202	0.042
5 流	18	1.61	205	0.038

表10 拉速与碳偏析指数极差数据表

Table 10 Data Table of Casting Speed and Carbon Segregation Index Range

拉速/(m·min ⁻¹)	偏析极差
1.13	0.092
1.16	0.117
1.19	0.140

柱状晶迅猛生长,形成发达的定向结晶结构,阻碍糊状区内液相的横向混合,使溶质更易沿晶间通道向中心汇集,加剧中心正偏析。

电磁搅拌通过诱导强制对流对凝固组织产生双重影响:在特定电流范围内(195~205 A),搅拌增强可破碎初生枝晶、促进等轴晶形成(如表8、表9中偏析极差降低所示),同时加速溶质扩散,避免局部严重富集。然而,磁场强度过高则会导致过度冲刷,反而诱发负偏析。拉速的影响最为直接,表10表明,拉速从1.13 m/min提高至1.19 m/min时,GCr15钢偏析极差增大52%。这源于拉速提高导致凝固壳减薄、糊状区延长,为碳元素在液相中的富集与迁移提供了更宽的时间窗口和更稳定的通道,尤其对高碳钢而言,其本身较宽的凝固区间使其对拉速变化极为敏感。

综上,碳偏析是凝固热力学与流体动力学共同作用的结果。通过将过热度控制在20~30℃、优化

电磁搅拌强度(195~208 A)并合理限制拉速(如GCr15≤1.16 m/min),可有效抑制柱状晶生长、扩大等轴晶区、促进溶质均匀扩散,从而实现碳偏析的系统性控制。

3 结论

综合有关试验研究结果,可以得出以下结论:

1)碳含量对碳偏析空间分布具有显著影响。随着钢中碳含量的增加,铸坯中心至1/2半径区域的负偏析占比由45%下降至28%,内弧/外弧负偏析比值由1.5降至1.24,表明高碳钢的偏析行为更趋于均匀化,但局部偏析程度加剧。

2)过热度是影响碳偏析的关键参数。针对不同钢种,存在特定的优化窗口:20CrMo为20~25℃,4142SR为20~28℃,GCr15为18~25℃。在此范围内碳偏析指数最低,超出该范围易导致正偏析加剧。

3)电磁搅拌对碳偏析具有调控作用。典型钢种的最佳M-EMS电流范围为:20CrMo(195~205 A)、4142SR(200~208 A)、GCr15(195~202 A)。在该范围内增强搅拌可有效降低偏析波动。

4)拉速与碳偏析呈正相关。推荐拉速控制范围为:20CrMo≤1.60 m/min,4142SR为1.58~1.62 m/min,GCr15≤1.16 m/min。在保证生产效率的同时,需合理控制拉速以抑制偏析缺陷。

参考文献

- [1] 温宏权,吴存有,周月明. 碳钢连铸坯凝固过程溶质再分配及宏观偏析的研究[J]. 宝钢技术,2019,(4):45-49.
- [2] 宋冬民. 连铸坯中心偏析成因及控制策略分析[J]. 冶金与材料,2022,42(6):89-91.
- [3] 侯自兵,郭东伟,曹江海,等. 过热度对82B帘线钢连铸方坯碳偏析程度的影响及机理研究[C]//中国金属学会. 第十一届中国钢铁年会论文集——S02. 炼钢与连铸. 重庆大学材料学院冶金系;2017:628-633.
- [4] 任兵芝. 电磁搅拌大方坯连铸结晶器内电磁场与流场及温度场耦合过程数值模拟[D]. 沈阳:东北大学,2008.
- [5] 陈华标. 铁基多元合金凝固溶质再分配与连铸板坯中心偏析研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.
- [6] 李双江,肖国华,师艳秋,等. 连铸拉速和加热炉制度对GCr15轴承钢碳偏析的影响[C]//中国金属学会(The Chinese Society for Metals),宝钢集团有限公司(Baosteel Group Coporation). “第十届中国钢铁年会”暨“第六届宝钢学术年会”论文集. 河北钢铁技术研究总院;河北钢铁集团邯钢公司;2015:1497-1501.
- [7] 牛亮. 38CrMoAl钢连铸大圆坯凝固结构及碳元素偏析行为研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2020.
- [8] 王朝辉. 高碳钢连铸方坯凝固组织演变行为及控制研究[D]. 沈阳:东北大学,2023.
- [9] 张衬新. 电磁搅拌技术在铜管连铸生产中的应用进展[J]. 有色冶金设计与研究,2016,37(2):31-33.
- [10] 宋铁鹏,卢秉军,王德勇,等. GCr15轴承钢大方坯连铸均质化工艺与实践[J]. 连铸,2025,44(4):96-103.
- [11] 刘国梁,李海波,唐德池,等. 板坯二冷电磁搅拌技术在高碳钢生产上应用研究[C]//中国金属学会电磁冶金与强磁场材料科学分会,东北大学. 第五届全国电磁冶金与强磁场材料科学年会论文集. 首钢集团有限公司技术研究院;北京科技大学;北京首钢股份有限公司;2020:76-81.
- [12] 罗衍昭,季晨曦,赵长亮,等. 连铸结晶器内非对称流动的机理、控制策略及展望[J/OL]. 中国冶金,1-13[2025-10-25].