DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.04.013

PMO–EMS 组合调控在钢电磁连铸中的应用

李辉成[1],刘海宁[2],谢　有[1],豆乃远[1]
(1.常州中天钢铁集团有限公司,江苏 常州 213011;2.上海大学 先进凝固技术中心,上海 200072)

摘　要:利用 PMO-EMS 方坯均质化组合调控技术,通过二冷水比水量、E-EMS、F-EMS 以及 PMO 电磁参数优化,对比研究了提升连铸拉速,以期改善铸坯中心质量,实现提质增产。使用碳硫分析仪对铸坯横断面碳含量分布检测。结果表明,工艺参数优化后,铸坯中心偏析和中心偏析平均评级降低,同时低级别的占比比例提高(质量好),高级别的占比比例降低(质量差)。采用 PMO-EMS 组合调控均质化技术,在高拉速条件下仍可以使铸坯内弧到外弧的碳偏析指数控制在 1±0.05 内。

关键词:PMO-EMS 组合调控;工艺优化;连铸;电磁冶金

中图分类号:TF777　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2022)04-0303-04

Application of PMO–EMS Combined Control Technology in Steel Electromagnetic Continuous Casting

LI Huicheng[1], LIU Haining[2], XIE You[1], DOU Naiyuan[1]
(1. Changzhou Zenith Iron and Steel Group Co., Ltd., Changzhou 213011, China; 2. Center for Advanced Solidification Technology, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In order to improve the center quality of the billet and realize the quality and production increase, the improvement of continuous casting speed was comparatively studied by using the combined control technology of PMO-EMS homogenization, through the optimization of the specific water amount of secondary cold water, E-EMS, F-EMS and PMO electromagnetic parameters. Carbon and sulfur analyzer was used to detect the distribution of carbon content in cross section of billet. The results show that the average grade of center segregation and center segregation decrease after the optimization of process parameters, while the proportion of low grade is increased (good quality) and the proportion of high grade is decreased (bad quality). The carbon segregation index from inner arc to outer arc of billet can be controlled within 1 ±0.05 under the condition of high drawing speed by using PMO-EMS combined control homogenization technology.

Key words: PMO-EMS combined regulation technology; process optimization; continuous casting; electromagnetic metallurgy

提高拉速可以显著提高连铸机的生产效率,拉速增加后钢液/铸坯经过结晶器、二冷区的时间变短,铸坯内部钢液的过热散失变差,铸坯凝固组织中等轴晶区域变少,铸坯的中心偏析、宏观偏析加重[1-7]。脉冲磁致振荡技术(Pulsed magnetooscillations, PMO)可以通过增加初生晶核数量,抑制柱状晶生长,提高铸坯的等轴晶区域占比,改善铸坯中心质量,实现凝固匀质化[8-16]。该技术已在中天钢铁实现工业化应用,将PMO处理线圈安装在二冷区一区位置,与EMS(Electromagnetic Stirring,电磁搅拌)组合形成国际首创的PMO-EMS组合调控技术,并通过金属学会认证。

为了研究PMO-EMS组合调控在提高铸坯生产拉速中的应用潜能,进行了试验,以期扩大产能。

1　试验条件和设备

采用五机五流,铸坯断面尺寸为220 mm×260 mm,配有PMO-EMS组合调控均质化装置和二冷区自动配水冷却的连铸机进行增产提质试验,以扩大稳定性生产。根据试验设计工艺,比水量自动控制,试验工艺方案见表1,连铸装置如图1所示。在保证连铸坯和轧制棒材的质量前提下,通过优化工艺参数小批量试验以及扩大稳定性生产进行,实现提产增效目标,挖掘铸机产能潜力。

试验过程中在钢包浇铸中间时段取连铸坯样,

收稿日期:2021-12-01
基金项目:江苏省科技成果转化项目(高品质轴承钢、齿轮钢等特殊钢研发及产业化(BA2016087);中央引导地方专项(20192ZDD01002)
作者简介:李辉成(1987—),博士,工程师.主要从事连铸凝固均质化技术及应用.电话:15026986181,E-mail:536464178@163.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 试验方案
Tab.1 Experimental scheme

	E-EMS (v)	PMO (v/ 频率)	F-EMS (v)	二冷比水量 (l/kg)	拉速 (m/min)
工艺 1	200	138 中频	50	0.30	1.05
工艺 2	300	100 高频	200	0.35	1.15

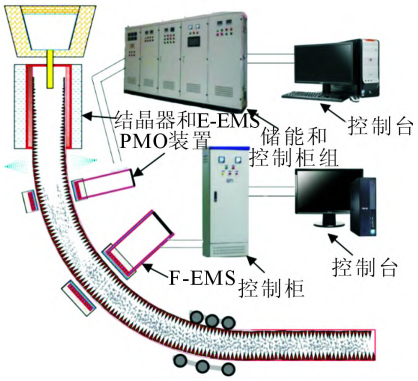


图 1 PMO-EMS 组合调控装置示意图
Fig.1 Schematic of PMO-EMS combined control

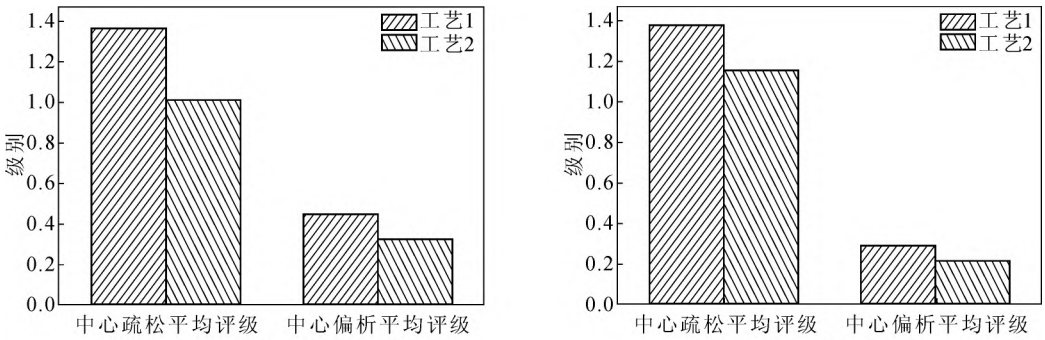
后续加工取横断面试样，分别进行低倍腐蚀和横断面碳成分分布情况检测。

将试验炉次的取样铸坯采用锯床切割，铣床加工平面，磨床精磨表面后获得待酸洗横断面的低倍样品，低倍样品在温度为70 ℃的盐酸：水的体积比为1:1的盐酸水溶液中腐蚀15 min，获得低倍组织，根据标准《优质结构钢连铸坯低倍组织缺陷评级图》(YB/T 153-2015) 进行铸坯横向低倍组织进行评级。为了避免统计的偶然性，每个工艺试验统计的低倍样本不少于200个。根据统计结果分别计算两种工艺条件下45钢和40Cr的中心疏松和偏析的评级平均值，并统计各个级别的百分比占比情况，以此对比评价两种工艺下铸坯质量。

2 结果与分析

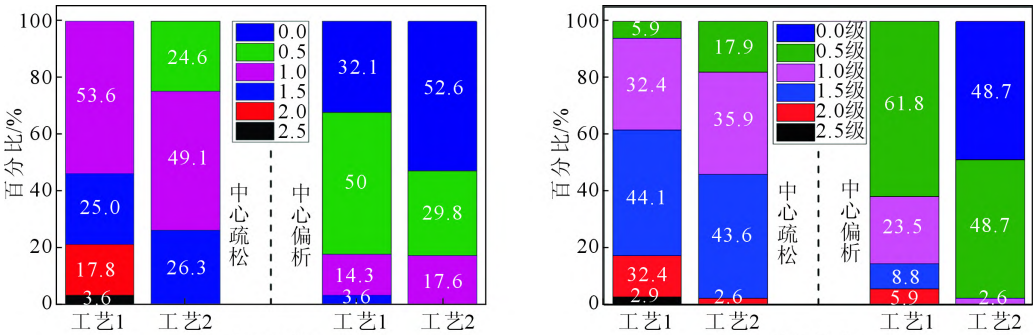
图2为不同工艺下铸锭质量分析图，可以看出，在工艺2中1.15 m/min拉速下45钢和40Cr的铸坯低倍中心疏松评级平均值均有下降，45钢中心偏析评级平均值明显下降，40Cr中心偏析评级平均值略有下降。

由图3(a)中两个工艺下的45钢铸坯中心疏松评级级数比例对比可见，工艺1中拉速为1.05 m/min，铸坯中心疏松评级≤1.0级的占比为53.6%，均为1.0级，≥2.0级的占21.4%；工艺2中拉速为1.15 m/min，铸坯中心疏松评级≤1.0级的占比为63.7%，提高10%，且0.5级的占比为24.6%，≥2.0级的消失，仅有26.3%的1.5级。铸坯中心偏析评级≤0.5级的占比为72.4%，基本不变，但是攻关后0.0级的提高了20%，同时占比3.6%的1.5级的消失，取代为了1.0级。由图3(b)中两个工艺下的40Cr铸坯中心疏松评级级数比例对比可见，工艺1中拉速为1.05 m/min，铸坯中心



(a) 45钢 (b) 40Cr

图 2 45 钢和 40Cr 工艺参数优化前后中心质量平均评级对比
Fig.2 Comparison of average quality rating between 45 steel and 40Cr before and after process parameter optimization



(a) 45钢 (b) 40Cr

图 3 45 钢和 40Cr 工艺参数优化前后中心质量评级占比对比
Fig.3 Comparison of proportion of quality rating between 45 steel and 40Cr before and after process parameter optimization

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

疏松评级≥2.0级的占35.3%，由2.9%为2.5级，工艺2中拉速为1.15 m/min，铸坯中心疏松评级≥2.0级的占2.6%，且未出现2.5级的，降低了32.7%。工艺1中0.5级占比5.9%，工艺2中提高了12%，占比为17.9%。由此可见，1.0级和1.5级占比两个工艺下相差不大。工艺1中拉速为1.05 m/min，40Cr铸坯中心偏析评级≤0.5级的占比为61.8%，工艺2中拉速为1.15 m/min，铸坯中心偏析评级≤0.5级的占比为97.4%，且48.7%为0.0级。工艺1下的铸坯低倍组织中心偏析评级38.2%的≥1.0级，包含8.8%的1.5级，5.9%的2.0级改善为了工艺2下2.6%的1.0级，中心偏析得到大幅改善。

采用碳硫分析仪检测碳含量，对两种工艺下45钢铸坯横断面从内弧到外弧钻屑取样进行碳成分检测，并计算偏析指数。钻屑取样位置如图4所示，碳偏析指数分布如图5所示。由图5可以看出，两种工艺下，连铸坯横断面从内弧到外弧的碳分布偏析指数基本在1±0.05范围内，从整体波动综合看，工艺2下碳偏析指数分布更优一些。

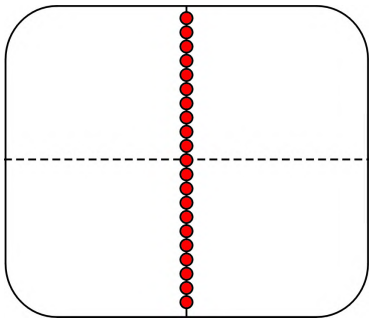


图 4　铸坯横剖面碳偏析分析取样位置示意图

Fig.4　Schematic diagram of sampling location for carbon segregation analysis in cross section of cast billet

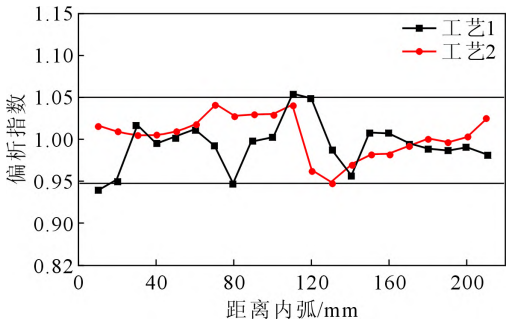


图 5　铸坯横截面从内弧到外弧碳偏析指数对比

Fig.5　Comparison of carbon segregation index from inner arc to outer arc in the cross section of cast billet

综上可以看出，连铸机拉速由工艺1中的1.05 m/min提升到了工艺2中的1.15 m/min。采用PMO-EMS组合调控均质化技术，优化二冷参数、结晶器电搅电压参数、PMO峰值电压以及末搅电压参数，45钢和40Cr的铸坯低倍中心质量都得到了保证，中心疏松和中心偏析可以得到显著改善。

连铸生产拉速提高，结晶器内的钢液过热量散失需要的时间增加，延缓中心等轴晶的生成。同时，拉速提高会增加液穴深度，扩大固液两相区，促进“凝固桥”的形成，加剧中心偏析和缩松缩孔。提高结晶器电磁搅拌电压可以增大结晶器内电磁力，增加的钢水流动，促进过热散失，打碎树枝晶，增加等轴晶核心。加大二冷区的比水量可以加快钢液过热的散失，形成稳定坯壳厚度，避免漏钢风险，同时增大凝固前沿温度梯度，抑制柱状晶粗大。

二冷区对钢液进行PMO处理过程中，可以在固液界面附近以及凝固前沿产生振荡作用，在磁致过冷作用下大量初始晶核在凝固前沿产生，并在振荡作用下从凝固前沿脱落成为自由晶核，晶核脱落、游离、增殖，形成“结晶雨”效应，增加初生晶核和细小等轴晶数量[17-19]。在PMO引起的强制对流的作用下，温度分布更加均匀，有利于初生晶核的存活和长大，促进等轴晶区的扩大，同时垂直于拉坯方向的梯度降低，抑制柱状晶生长，增大中心组织致密的等轴晶区域，有利于改善中心偏析和缩松缩孔[20-22]。PMO脉冲频率的提高，可以增加单位时间内的初生晶核数量，有利于促进晶粒等轴晶化减轻枝晶搭桥对补缩的影响，在提高拉速下可以保证单位时间内对钢液施加的脉冲能量，维持对钢液的处理次数，保持处理效果，减轻铸坯心部缺陷。

末端电磁搅拌作用在凝固末端糊状枝晶两相区，破坏和阻碍粗大柱状晶的长大，使心部富集溶质的糊状液体分散趋于均匀，同时产生较多的晶核，扩大等轴晶区，实现晶粒细化。增大末端电磁搅拌电压可以增大电磁力，打断铸坯心部搭桥，可以改善凝固补缩效果，均匀富集溶质，显著减轻中心偏析、中心疏松缺陷。

3　结论

(1)采用PMO-EMS组合调控均质化技术，优化连铸E-EMS、PMO、F-EMS电磁参数以及二冷区冷却比水量，提高结晶器电搅强度，保证单位内PMO处理次数和施加的能量。

(2)增大末端电磁力实现糊状区富集溶质均匀化，打断搭桥，改善补缩，通过工艺参数优化，可以实现提质增产目标。

参考文献：

[1]　王涛，张炯明，赵新凯. 150 mm×150 mm方坯连铸机末端电磁搅拌及拉速对铸坯内部质量的影响[J]. 连铸，2014(6): 50-55.

[2]　张兴中，倪满森. 连铸技术的发展状况及高效连铸 [J]. 中国冶

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

金,2003(3): 45-52.

[3] 张爱民,李殿明. 高拉速方坯低倍缺陷的成因及分析[J]. 钢铁技术,1999(5): 10-13.

[4] 胡文豪,朱施利. 连铸工艺参数对GCr15钢碳偏析的影响[J]. 钢铁,2010, 45(11): 48-52.

[5] 童为硕,李晶,闫威. 连铸工艺参数对SWRH82B钢160 mm×160 mm 坯中心碳偏析的影响[J]. 特殊钢,2018, 39(4): 38-42.

[6] 朱富强,任振海,陈占领,等. 采用脉冲磁致振荡技术提高矩形AM2锚链钢连铸坯的均匀性[J]. 上海金属,2019, 41(3): 96-100.

[7] 仲红刚,刘海宁,徐智帅,等. 脉冲磁致振荡凝固均质化技术及装备[J]. 钢铁,2019, 54(8): 174-180.

[8] 龚永勇,程书敏,钟玉义,等. 脉冲磁致振荡凝固均质化技术[J]. 金属学报,2018, 54(5): 757-765.

[9] 王海洋,滕力宏,赵阳,等. PMO作用对连铸轴承钢凝固组织及碳化物的影响[J]. 连铸,2019, 43(6): 32-35.

[10] 何西,刘宇,滕力宏,等. 应用PMO技术提高齿轮钢铸坯拉速的可行性研究[J]. 连铸,2019, 43(6): 28-31.

[11] 程勇,徐智帅,周湛,等. PMO凝固均质化技术在连铸GCr15轴承钢生产中的应用[J]. 上海金属,2016(4): 54-57.

[12] 曹同友,翟启杰,李仁兴,等. 磁致振荡对65Mn钢铸锭内部组织的影响[J]. 钢铁研究,2014, 42(6): 35-36.

[13] 李莉娟,王郢,翟启杰. 脉冲磁致振荡(PMO)凝固均质化技术在特殊钢中的应用[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(10): 1018-1030.

[14] 邵楠男,邹富康,仲红刚,等. PMO和冷却速率对5CrNiMoV热作模具钢凝固组织的影响[J]. 中国冶金,2021, 31(10): 23-29.

[15] 李辉成,刘海宁,邓向阳,等. 应用PMO提高连铸坯生产拉速及成分均匀性[J]. 连铸,2020(4): 7-11.

[16] 刘海宁,王郢,李仁兴,等. PMO凝固均质化技术在20CrMnTi齿轮钢上的应用[J]. 钢铁,2019, 54(6): 69-78.

[17] 郝军利,赵静,仲红刚,等. PMO作用下连铸二冷区电磁场-流场-温度场的数值模拟[J]. 上海大学学报(自然科学版),2018, 24(3): 412-421.

[18] 张云虎,仲红刚,翟启杰. 脉冲电磁场凝固组织细化和均质化技术研究与应用进展[J]. 钢铁研究学报,2017, 29(4): 249-260.

[19] GONG Y Y, LUO J, JING J X, et al. Structure refinement of pure aluminum by pulse magneto-oscillation[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 497(1-2): 147-152.

[20] LIAO X L, ZHAI Q J, LUO J, et al. Refining mechanism of the electric current pulse on the solidification structure of pure aluminum[J]. Acta Materialia, 2007, 55(9): 3103-3109.

[21] GONG Y Y, CHENG S M, ZHONG Y Y, et al. Influence of electromagnetic parameters on solidification structureof pure Al in the case of identical power[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2018, 25(8): 854-861.

[22] LI H C, LIU Y X, ZHANG Y H, et al. Effects of hot top pulsed magneto oscillation on solidified structure steel ingot[J]. China Foundry, 2018, 15(2):110-116.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net