

凝固组织对重轨钢铸坯中 MnS 的影响

李红光^{1,2}, 徐明丽¹, 何 为², 王章印²

(1. 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘 要:采用电化学腐蚀与 Aspex 扫描相结合, 检测了重轨钢铸坯不同位置的 MnS 尺寸形貌, 研究了凝固组织对 MnS 的影响。结果表明, 凝固组织由混晶转变为粗大等轴晶时, 3 ~ 5 μm 的 MnS 颗粒数量比例降低, 而 $\geq 10 \mu\text{m}$ 的颗粒数量比例则明显增大。从距离铸坯窄面 40 mm 推移至 100 mm, 凝固组织类型转变越明显则 $\geq 10 \mu\text{m}$ 的 MnS 颗粒数量比例增加越多; 凝固组织发生明显转变时, 其比例增加 48.02%, 凝固组织未发生类别转变时, 其比例增加 0.31%。通过连铸强化冷却等缩短局部凝固时间的工艺调控, 可以促进 MnS 细小化控制。

关键词:重轨钢; 连铸坯; 凝固组织; MnS

中图分类号: TF76, TG142

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)05-0151-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.05.020

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Effects of solidification structure on MnS in heavy rail steel bloom

Li Hongguang^{1,2}, Xu Mingli¹, He Wei², Wang Zhangyin²

(1. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 2. Panzhihua Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Pangang Group, State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resource Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: The sizes and microstructures of MnS at different positions of the heavy rail steel bloom were measured by electro-chemical etching and Aspex scanning, and the effect of solidification structure on MnS was studied. The results show that when the solidification structure transforms from mixed-crystal to coarse equiaxed grain, the quantitative proportion of MnS particles with the size range of 3-5 μm decreases, and the quantitative proportion of particles with sizes larger than 10 μm increases significantly. While the distance from the narrow surface of the bloom changed from 40 mm to 100 mm, the solidification structure transformed more obviously, and the larger increment of the quantitative proportion of MnS particles with sizes over 10 μm was obtained: if the solidification structure transformed obviously, the quantitative proportion was increased by 48.02%, and if the solidification structure did not transform, the quantitative proportion was increased by 0.31%. It means MnS particles can be refined by adopting processes to shorten the local solidification time, such as strengthening cooling during continuous casting.

Key words: heavy rail steel, continuous casting billet, solidification structure, MnS

0 引言

钢中的溶质元素偏析和非金属夹杂物会对钢的

性能产生影响^[1-3], 对钢的元素偏析和夹杂物控制一直是研究的热点^[4-6]。在重轨生产过程中, 连铸坯经过轧制变形后溶质元素偏析和非金属夹杂物会遗传

至钢轨并发生演变,进而对钢轨性能产生影响^[7-8]。因此,对重轨钢连铸坯进行溶质元素偏析和非金属夹杂物控制研究对钢轨质量具有重要基础意义。重轨钢中的 MnS 非金属夹杂物于凝固过程析出^[9],且析出于凝固过程的末期^[10-11],主要受凝固过程钢液温度的降低、溶质元素的相互作用及偏析聚集等因素综合影响。在连铸过程中,铸坯不同部位的凝固存在较大差异,其差异对 MnS 非金属夹杂物的析出产生影响,导致铸坯各凝固阶段产生的 MnS 非金属夹杂物尺寸形态不同。凝固进程的差异最直观地表现于凝固组织的差异,明确凝固组织与 MnS 的关系从而通过凝固进行 MnS 控制具有直观参考意义。因此,笔者对常规工艺生产的重轨钢连铸坯横截面不同位置的凝固组织特征及 MnS 非金属夹杂物形态尺寸特征进行检测对比,在此基础上进行铸坯凝固调控,对比了不同凝固组织构成的铸坯中 MnS 非金属夹杂物的尺寸分布差异,由此明确凝固调控对重轨钢中 MnS 非金属夹杂物控制的影响,为凝固过程 MnS 的析出控制提供参考。

1 研究条件及检测分析方法

1.1 铸机装备条件及钢种关键物性参数

基于国内某重轨钢生产企业的装备工艺技术条件开展研究。铸机为全弧形连铸机,生产铸坯横截面尺寸为 280 mm×380 mm,冶金长度为 35.6 m,结晶器铜管长度为 850 mm,凝固末端动态轻压下的压下总量为 8~12 mm,装配有结晶器电磁搅拌(M-EMS)即凝固末端电磁搅拌(F-EMS),连铸拉速为 0.62~0.75 m/min,二冷比水量为 0.24~0.40 L/kg 钢,浇铸过热度为 20~45 ℃。

以该企业生产的 U75 V 重轨钢为研究对象,钢中的主要化学成分如表 1 所示。

表 1 U75 V 重轨钢主要化学成分
Table 1 Chemical composition of U75V heavy rail steel %

C	Si	Mn	P	S	V
0.76	0.65	0.90	0.015	0.010	0.08

1.2 检测分析方法

采用的检测分析方法具体包括:①铸坯凝固组织检验:采用 27%~37% 的 HCl 溶液在室温(25 ℃)进行腐蚀,腐蚀时间为 15~20 min;腐蚀结束后清水冲洗并采用碱性溶液洗刷去除试样表面的腐蚀沉积物,洗净的试样采用无水乙醇冲洗吹干;对完成腐

蚀的样品进行凝固组织拍照。②MnS 非金属夹杂物形态检验:采用弱碱性(pH 约为 8)非水溶液恒温电解原位浸出。③MnS 非金属夹杂物尺寸统计:采用 Aspex 扫描统计各目标区域内的 MnS 非金属夹杂物,统计夹杂物尺寸信息。

2 试验分析

2.1 铸坯凝固组织构成及对应位置区域的 MnS 形貌尺寸特征

1) 铸坯凝固组织构成

按图 1 所示位置(左图阴影部分)取样,对试样进行铸坯代表区域凝固组织检验,进一步于凝固组织检测试样上取非金属夹杂检测用金相试样,检测铸坯距离窄面 0~100 mm 区域的 MnS 非金属夹杂物。

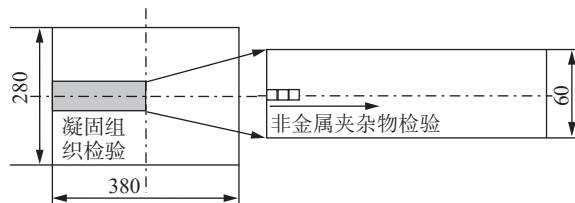


图 1 铸坯凝固组织检测区域及非金属夹杂物浸出试样取样示意(单位:mm)

Fig. 1 Sampling diagram for solidification structure and nonmetallic inclusion analysis in the bloom

典型工艺所得铸坯代表区域的凝固组织检验结果如图 2 所示。由图 2 可知,柱状晶区截止于距离铸坯表面(窄面)约 40 mm 处;距铸坯表面约 40 mm 至 80 mm 区域为混晶区,晶区内枝晶形貌特征明显,但一次枝晶干取向不一;从铸坯表面下约 80 mm 往中心的区域为等轴晶区,该区域内的晶粒组织枝晶特征不明显,更多呈粗化明显的颗粒状,晶粒簇间存在深黑色点状偏析区,且越靠近铸坯中心的点状偏析尺寸越大。

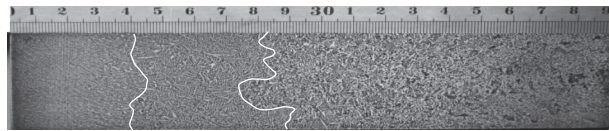


图 2 典型铸坯代表区域凝固组织照片

Fig. 2 Solidification structure photograph of the representative area in a typical bloom

2) 铸坯不同位置区域的 MnS 非金属夹杂物特征

对于重轨钢而言,钢轨轨头质量极为关键,其非金属夹杂评级检测区域位于踏面下 10~15 mm 区域,对应铸坯窄面下 40~60 mm 区域,因此对铸坯窄面下 0~60 mm 进行重点关注,同时延伸检测区域至窄面下 100 mm。

在铸坯上, 对距离窄面 0 ~ 100 mm 区域进行 MnS 非金属夹杂物原位浸出, 各 20 mm 区域内的 MnS 非金属夹杂物典型形态如图 3 所示。结合图 2 可知, 在铸坯柱状晶起始区域, MnS 多为球形, 柱状晶区中部至末端的 MnS 多呈长块状; 混晶区的前半

区域内的 MnS 呈长块状, 但其厚度尺寸的差异性较柱状晶区的 MnS 更为显著; 在混晶区的后半区域内, MnS 尺寸粗大化发展, 且长度方向发生弯转; 等轴晶区的典型 MnS 与混晶区后半区的 MnS 特征类似, 差别在于其长度方向弯转加剧, 形貌更加复杂。

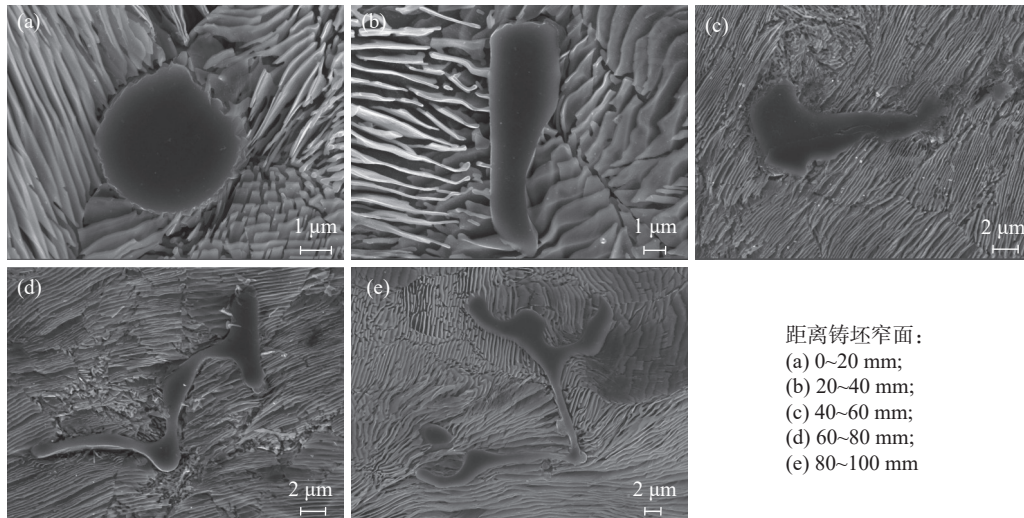


图 3 铸坯各区域内的 MnS 典型形貌特征照片

Fig. 3 Photographs of MnS in the different areas of the bloom

检测多组 ($n=4$) 铸坯试样, 距表面不同距离的区域内 MnS 非金属夹杂物尺寸及数量比例分布结果如图 4 所示。

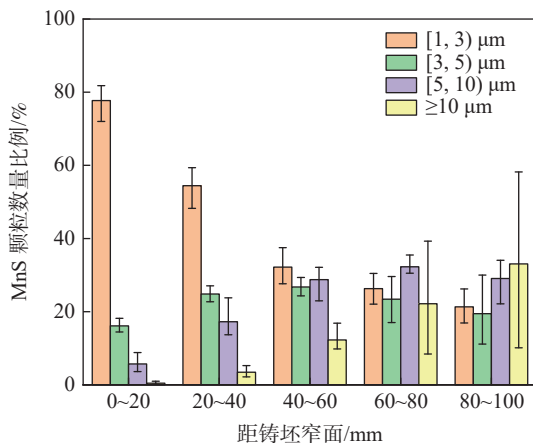


图 4 铸坯不同位置区域的 MnS 非金属夹杂物颗粒尺寸分布
Fig. 4 MnS particle size distributions in the different areas of the bloom

由图 4 可知, 1 ~ 3 μm 的极小尺寸 MnS 非金属夹杂物颗粒数量比例从铸坯表面向铸坯中心推移而降低, 具体从柱状晶起始区的 77.72% 降低至混晶区的 32.19%, 再进一步降低至等轴晶区的 21.33%; 3 ~ 5 μm 尺寸范围的颗粒数量比例则呈现先升高后降低的变化趋势分布; 5 ~ 10 μm 尺寸范围的颗粒数量比例在距离表面 0 ~ 60 mm 范围内升高, 继续靠

近中心则表现为趋平; ≥10 μm 的大尺寸颗粒数量比例随位置从表面靠近铸坯中心而由 0.45% 升高至 33.07%。

由上述结果可知, 在典型工艺所得的重轨钢铸坯中, 随位置从表面向中心推移, 对应凝固组织由柱状晶向等轴晶转变, 同时 1~3 μm 的极小尺寸 MnS 非金属夹杂物占比明显降低, 而 ≥10 μm 的大尺寸 MnS 夹杂物占比明显升高。

2.2 分析讨论

从 MnS 析出热力学可知^[12], 偏析越严重越有利于 MnS 夹杂物析出, 在连铸过程中, 凝固组织的二次枝晶臂间距间接地反映了晶间偏析的严重程度, 而钢液的局部凝固时间则与二次枝晶臂间距存在如(式 1)所示的对应关系, 即局部凝固时间越长则局部温降速率越小, 对应的二次枝晶臂间距越大, 晶间偏析越严重^[13]。

$$\lambda_2 = 709R^{-0.3} \quad (1)$$

式中, λ_2 为二次枝晶臂间距, μm; R 为温降速率, °C/min。

根据钢中的化学成分, 采用 Procast 软件计算获得其液相线温度为 1 464 °C, 固相线温度为 1 349 °C, 钢从液相线温度降低至固相线温度所持续的时间为局部凝固时间, 液固相线间的温度差与局部凝固时

间的比值即为局部凝固过程的平均温降速率。模拟计算获得铸坯连铸过程中的横截面代表区域局部凝固时间,结果如图 5(a)所示。进一步计算获得从铸坯表面至中心的二次枝晶臂间距如图 5(b)所示。由图 5 可知,从铸坯表面至中心,钢液的局部凝固时

间增加,二次枝晶臂间距增大,尤其在距铸坯表面 0~60 mm 区域变化较为显著,随着位置继续向铸坯中心推移,二次枝晶臂间距保持在高值并缓慢增大。与铸坯中细小 MnS 的颗粒数量比例降低及粗大 MnS 颗粒比例增加相对应。

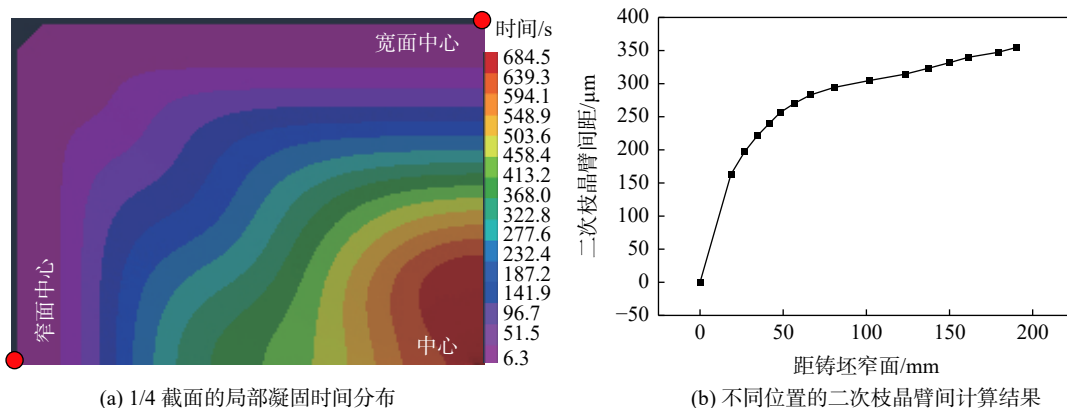


图 5 铸坯不同位置凝固时间及二次枝晶臂间距分布

Fig. 5 Distribution of solidification time and secondary dendrite arm spacing in the difference position of bloom

此外,凝固组织类型的转变往往伴随凝固传热行为的明显变化,周向均匀传热促进晶核各向较为均匀地生长进而形成等轴晶组织。在靠近铸坯中心的区域,因结晶器电磁搅拌冲刷产生的晶核在低过热度熔池中长时缓慢长大,凝固组织粗大,晶间偏析严重,会促进大尺寸的 MnS 非金属夹杂物形成。

综上所述,通过强化冷却促进凝固速率提升、延迟凝固晶核形成,能够缩短局部凝固持续时间,有利于减小二次枝晶臂间距,从而改善晶间偏析,促进 MnS 细小析出。

3 工业试验验证

根据上述结果,进行连铸坯凝固组织差异化调控并对比 MnS 非金属夹杂尺寸形貌特征。广大学者对连铸坯凝固组织调控进行了研究,连铸电磁搅拌^[14-15]、浇铸钢液过热度^[16-18]、二冷强度及拉速对连铸坯凝固组织均有影响^[19-20]。综合表现为:结晶器电磁搅拌强度升高、过热度降低、二冷强度降低及拉速降低有利于提高等轴晶率,抑制柱状晶生长。

因此,设置不同工艺获得不同凝固组织的铸坯,按图 1 所示位置进行检测对比分析,各工艺设置如表 2 所示。

3.1 铸坯凝固组织构成对比

典型铸坯的代表区域凝固组织检测结果照片如图 6 所示。由图 6 可知,铸坯的代表区域凝固组织差异明显。其中,铸坯试样 1 从表面向中心依次为倾斜明显且角度一致的柱状晶组织,以及混晶

组织和等轴晶组织;铸坯试样 2 从表面向中心的凝固组织则依次分别为一致倾斜且角度较小的柱状晶,以及混晶组织和等轴晶组织;而铸坯试样 3 从表面向中心的凝固组织则依次分别为无倾斜角度的等柱状晶组织,以及混晶组织。

表 2 连铸关键工艺对比

Table 2 Comparison of the key continuous casting parameters

项目	M-EMS	F-EMS	过热度/ ℃	二冷比水量/ (L·kg ⁻¹)	拉速/ (m·min ⁻¹)
试样 1 (典型工艺)	强	无	20~25	0.23~0.24	0.64~0.65
试样 2	中	中		0.26~0.27	
试样 3	弱	中	30~35	0.30~0.31	0.68~0.70

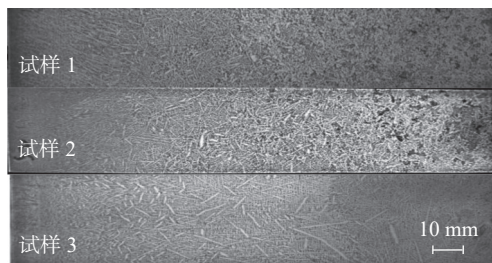


图 6 典型铸坯的代表区域凝固组织检测结果照片

Fig. 6 Photographs of solidification structure in the representative areas of a typical bloom

测定各电磁搅拌工艺所得铸坯试样中的柱状晶偏转角可知,随结晶器电磁搅拌强度降低,依次对应铸坯试样 1、试样 2 和试样 3 的柱状晶一致偏转角由 21.0°~27.6°降低至 12.0°~18.5°和 0°。测定相应铸坯代表试样中各类凝固组织的区域位置分布如

图7所示。由图7可知, 铸坯试样1的等轴晶最发达, 其区域距离铸坯表面(试样左侧)约71 mm, 柱状晶区则截止于距铸坯表面35 mm; 铸坯试样2中存在一定等轴晶组织, 柱状晶截止于距离窄面53 mm, 等轴晶区起始于距离窄面约90 mm处; 铸坯试样3中无典型等轴晶组织, 其柱状晶截止于距离窄面约114 mm, 随位置向中心推移而转变为混晶组织。

3.2 MnS 尺寸分布对比

检测对比三个铸坯试样中不同尺寸的 MnS 非金属夹杂物颗粒数量比例随检测位置的变化, 结果如图8所示。由图8可知, 1~3 μm 的颗粒数量比例分布无明显差异。3~5 μm 的颗粒数量比例从铸坯表面下40~60 mm 开始出现差异: 铸坯试样1中, 其颗粒数量比例从距表面40~60 mm 向中心推移而明显减小; 在铸坯试样2中, 其颗粒数量比例趋于水平至距表面60~80 mm, 随位置继续向中心推移, 其数量比例则减小; 而铸坯试样3中, 其颗粒数量比例平缓增大。5~10 μm 的较大尺寸 MnS 非金属夹杂物颗粒数量比例则呈增加趋势变化, 各试样间无

明显差异。差别较为明显的为 $\geq 10 \mu\text{m}$ 的大尺寸颗粒数量比例: 从表面下40~60 mm 区域向中心方向推移, 颗粒数量的比例试样1增加48.02%; 试样2增加14.03%; 而试样3增加0.31%。

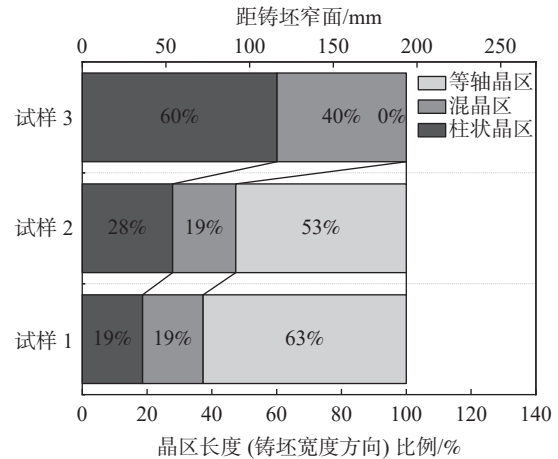
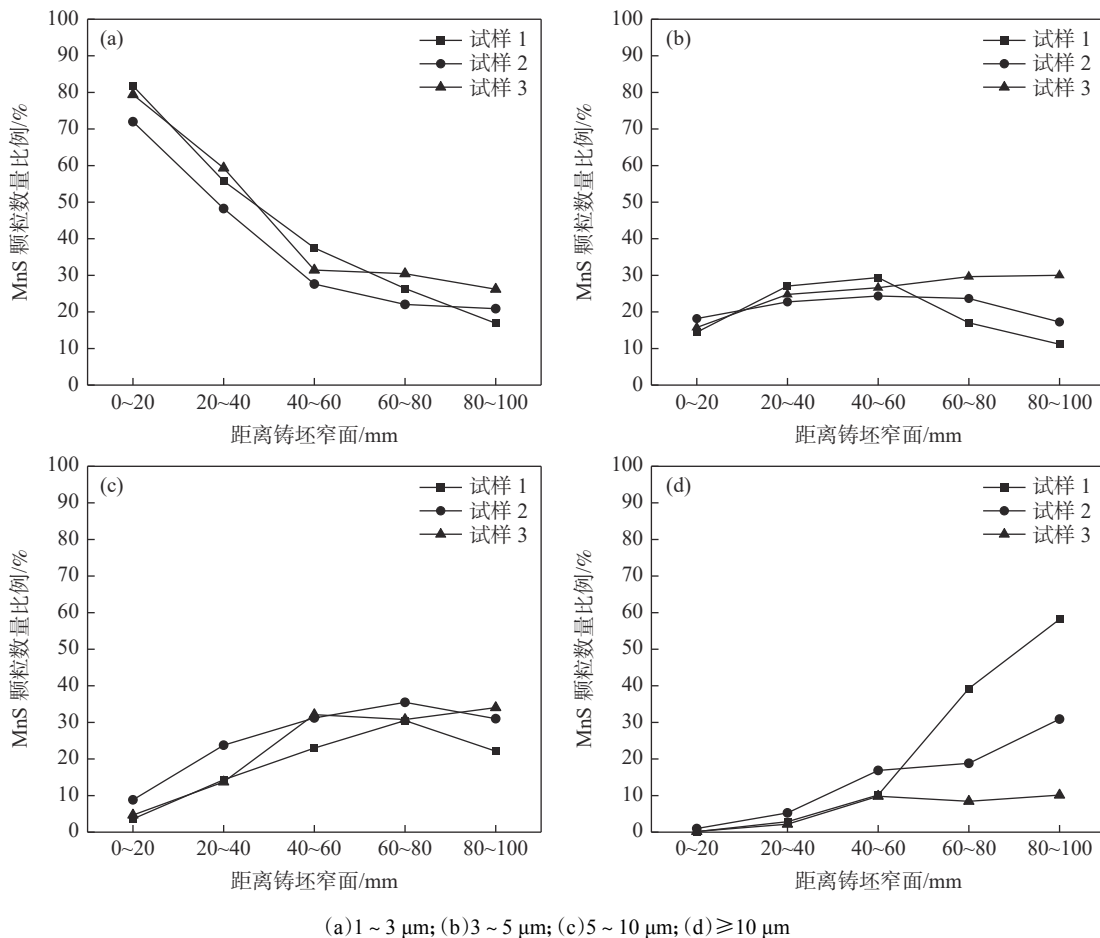


图7 铸坯代表区域的凝固组织构成对比
Fig. 7 Comparison of solidification structure constituents of the representative areas in the bloom



(a) 1~3 μm ; (b) 3~5 μm ; (c) 5~10 μm ; (d) $\geq 10 \mu\text{m}$

图8 铸坯不同位置区域内的 MnS 尺寸分布对比

Fig. 8 Comparison of MnS particle size distribution in the different areas of the bloom

结合铸坯凝固组织区域构成可看出,在试样1中,从铸坯表面下60 mm往中心推移,凝固组织由混晶组织转变为等轴晶组织,对应3~5 μm 的MnS非金属夹杂物颗粒数量比例明显减小,而 $\geq 10 \mu\text{m}$ 的大尺寸MnS非金属夹杂物颗粒数量比例明显增大;在试样2中,从铸坯表面下80 mm往中心推移,凝固组织由混晶组织转变为等轴晶组织,同样对应3~5 μm 的MnS非金属夹杂物颗粒数量比例减小,而 $\geq 10 \mu\text{m}$ 的大尺寸MnS非金属夹杂物颗粒数量比例有所增大;在试样3中,其检测区域内的凝固组织为单一的柱状晶,对应3~5 μm 的MnS非金属夹杂物颗粒数量比例无明显下降, $\geq 10 \mu\text{m}$ 的大尺寸MnS非金属夹杂物颗粒数量比例也无明显升高。

由验证试验结果可知,铸坯凝固组织类型的转变对低温析出的MnS非金属夹杂物颗粒尺寸有影响。通过冷却强度提升、降低结晶器电磁搅拌延迟凝固形核等工艺手段的实施,可以抑制大尺寸MnS析出以促进其细小化控制。

参考文献

- [1] Li Bo, Zhang Zhonghua, Liu Huasong, *et al.* Characteristics and evolution of the spot segregations and banded defects in high strength corrosion resistant tube steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2019, 55(6): 762-772.
(李博, 张忠铎, 刘华松, 等. 高强耐蚀管钢点状偏析及带状缺陷的特征与演变[J]. *金属学报*, 2019, 55(6): 762-772.)
- [2] Cai Zhaozhen, Zhu Miaoyong. Microsegregation of solute elements in solidifying mushy zone of steel and its effect on longitudinal surface crack of continuous casting strand[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2009, 45(8): 949-955.
(蔡兆镇, 朱苗勇. 钢凝固两相区溶质元素的微观偏析及其对连铸坯表面纵裂纹的影响[J]. *金属学报*, 2009, 45(8): 949-955.)
- [3] Li Ping, Wang Lei, Zhou Qingfeng. Formation reasons and countermeasures of cementite network in the center of 82B wire rods[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2014, 26(9): 33-36.
(李平, 王雷, 周青峰. 82B中心网状渗碳体产生原因及改善方法[J]. *钢铁研究学报*, 2014, 26(9): 33-36.)
- [4] Ji Yuan. Segregation of billet castings and its heredity effect on the hot-rolled products[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
(纪元. 连铸坯偏析及其铸轧遗传性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.)
- [5] Fang Qing. Numerical analysis of flow, heat transfer, solute transport behavior and solidification structure in continuously cast bloom[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018.
(方庆. 大方坯连铸过程流动、传热、传质行为及凝固组织的模拟研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018.)
- [6] An Hanghang. Solidification mechanism and key control technology of macro segregation in continuously cast high-carbon steel blooms[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
(安航航. 高碳钢大方坯凝固机理与宏观偏析关键控制技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.)
- [7] Hu Jie. Failure cause analysis of s-shaped fracture of thermit welded joint in heavy haul railway[J]. *Railway Engineering*, 2017(3): 125-128.
(胡杰. 重载铁路钢轨铝热焊接头S形断裂失效原因分析[J]. *铁道建筑*, 2017(3): 125-128.)
- [8] Ding Wei, Zhang Xianliang, Zhao Guo, *et al.* Formation mechanism and prevention methods of defects in overheat area at rail

4 结论

1)在典型工艺生产的铸坯中,从柱状晶起始区至等轴晶区,MnS由球状向不规则长块状转变,1.00~3.00 μm 的MnS颗粒数量比例由77.72%减小至21.33%,而 $\geq 10 \mu\text{m}$ 的MnS颗粒数量比例则由0.45%增大至33.07%。

2)典型工艺连铸过程中,随位置从表面至中心的局部凝固速率降低,在电磁搅拌等工艺综合作用下凝固组织发生转变,析出的MnS尺寸分布也发生相应变化。

3)从铸坯表面下40 mm推移至100 mm的区域内,凝固组织类别未发生转变时 $\geq 10 \mu\text{m}$ 的MnS颗粒数量比例仅增大0.31%,而凝固组织由混晶转变为等轴晶时,其比例增大48.02%。

4)典型工艺及凝固组织调控验证试验的铸坯中MnS尺寸分布检测结果表明,通过强化冷却等缩短局部凝固时间的工艺调控,可以抑制大尺寸MnS析出以促进其细小化控制。

flash-butt welding joint[J]. Railway Engineering, 2015(11): 96-99.

(丁韦, 张宪良, 赵国, 等. 钢轨闪光焊接头过热区缺陷的形成机理及预防方法 [J]. 铁道建筑, 2015(11): 96-99.)

- [9] Zhang Xuwei, Zhang Lifeng, Yang Wen, *et al.* Nucleation and growth dynamics analysis of MnS particles during solidification process in heavy rail steels[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2017, 29(9): 724-731.

(张学伟, 张立峰, 杨文, 等. 凝固过程重轨钢中 MnS 粒子形核与长大动力学分析 [J]. 钢铁研究学报, 2017, 29(9): 724-731.)

- [10] Qi Jianghua, Wu Jie, Suo Jinping, *et al.* Formation reason of large MnS in hectometer high speed heavy rail steel[J]. Research on Iron and Steel, 2011, 39(3): 22-24.

(齐江华, 吴杰, 索进平, 等. 百米高速重轨钢中大型 MnS 夹杂的形成原因 [J]. 钢铁研究, 2011, 39(3): 22-24.)

- [11] Zhang Xuwei, Zhang Lifeng, Yang Wen, *et al.* Thermodynamics and dynamics of MnS inclusions precipitation during solidification process in heavy rail steels[J]. Iron & Steel, 2016, 51(9): 30-39.

(张学伟, 张立峰, 杨文, 等. 重轨钢中 MnS 析出热力学和动力学分析 [J]. 钢铁, 2016, 51(9): 30-39.)

- [12] Li Hongguang, Chen Tianming, Chen Liang, *et al.* Analysis and research on the segregation of A-type inclusion in rail steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2017, 38(2): 143-149.

(李红光, 陈天明, 陈亮, 等. 钢轨 A 类非金属夹杂的析出分析研究 [J]. 钢铁钒钛, 2017, 38(2): 143-149.)

- [13] Li Hongguang, Ji Cheng, Jiang Dongbin, *et al.* Formation mechanism and control of semi-macro-segregation in rail steel bloom[J]. Iron and Steel, 2021, 56(6): 59-66.

(李红光, 祭程, 姜东滨, 等. 重载钢轨钢连铸大方坯半宏观偏析形成机制与控制 [J]. 钢铁, 2021, 56(6): 59-66.)

- [14] Liu Yang, Wang Xinhua. Effect of electromagnetic stirring at secondary cooling area on central segregation of a continuously cast slab[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007(6): 582-585, 590.

(刘洋, 王新华. 二冷区电磁搅拌对连铸板坯中心偏析的影响 [J]. 北京科技大学学报, 2007(6): 582-585, 590.)

- [15] Wang Biao, Xie Zhi, Jia Guanglin, *et al.* Parameter determination and effects on center segregation of F-EMS[J]. Iron & Steel, 2007(3): 18-21.

(王彪, 谢植, 贾光霖, 等. 凝固末端电磁搅拌参数确定及其对中心偏析的影响 [J]. 钢铁, 2007(3): 18-21.)

- [16] Lu Lu, Lu Kaiyi. Influence of controlling molten steel superheat on technology of concasting and quality of billet[J]. Special Steel, 2008(5): 50-51.

(鲁路, 鲁开崴. 钢液过热度控制对连铸工艺和铸坯质量的影响 [J]. 特殊钢, 2008(5): 50-51.)

- [17] Yang Wu, Qiu Shengtao, Tao Hongbiao, *et al.* Effect of decreasing superheat temperature on solidification structure of billet[J]. Iron & Steel, 2010, 45(2): 45-48.

(杨武, 仇圣桃, 陶红标, 等. 降低过热度对方坯凝固组织的影响 [J]. 钢铁, 2010, 45(2): 45-48.)

- [18] Yi Bo. Control superheat of molten steel and promote quality and output of continuously cast slab[J]. China Metallurgy, 2008(10): 43-45.

(依波. 控制钢液过热度提高连铸坯质量与产量 [J]. 中国冶金, 2008(10): 43-45.)

- [19] Xia Yunjin, Fan Dingdong, Li Jie. Mathematical simulation on the heat transfer and solidification process of secondary cooling in bloom steel continuous casting[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2014, 14(2): 217-222.

(夏云进, 范鼎东, 李杰. 大方钢坯连铸二冷区传热与凝固过程数值模拟 [J]. 过程工程学报, 2014, 14(2): 217-222.)

- [20] Luo Sen. Study and application of on-line solidification and heat transfer model for 360 mm×450 mm bloom continuous casting[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.

(罗森. 360 mm×450 mm 大方坯连铸在线凝固传热模型的研究与应用 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.)

编辑 邓淑惠