

# 重轨钢连铸大方坯V型偏析形成分析

李红光<sup>1,2</sup>, 徐明丽<sup>2</sup>, 冯元超<sup>1</sup>, 曾武<sup>3</sup>

(1. 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; 2. 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093; 3. 攀钢集团攀枝花钢铁有限公司, 四川 攀枝花 617000)

**摘要:**针对重轨钢连铸大方坯V型偏析, 检测了V型偏析的宏观形貌特征和凝固组织, 计算对比了理论收缩体积与实际V型体积。通过凝固末端压下工艺对比、钢种对比及凝固组织调控试验, 探究了V型偏析形成的影响因素。结果表明, 重轨钢大方坯V型偏析分两步形成, 首先是凝固前沿捕捉的晶核充分长大成粗大球化等轴晶组织后发生搭接, 搭接产生封闭的富集溶质微区而形成初始V型偏析, 进一步在钢液静压力和凝固收缩的负压抽吸等综合作用下发生组织滑移产生中心凹陷, 导致V型偏析的宏观形貌进一步改变(减小V型角)而形成最终的V型偏析。建立了协同改善重轨钢大方坯V型偏析和中心偏析的关键工艺, 实现了连铸坯V型偏析和中心偏析协同改善。

**关键词:**重轨钢; 凝固组织; V型偏析; 中心偏析

中图分类号: TF76

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)05-0180-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.05.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
聊科研  
与作者互动

## Analysis on the formation of V-shape segregation in rail steel bloom

Li Hongguang<sup>1,2</sup>, Xu Mingli<sup>2</sup>, Feng Yuanchao<sup>1</sup>, Zeng Wu<sup>3</sup>

(1. Pangang Group Research Institute Co., Ltd., State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resource Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 3. Pangang Group Steel and Vanadium Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

**Abstract:** In order to improve V-shape segregation in rail steel bloom, the feature of macro-profile and microstructure were tested and theoretical shrinkage value and actual volume of V-shape was compared. The influencing factors including dynamic soft reduction processes, grade of steel and technology of micro-structure control were experimentally investigated. Result shows the V-shape segregation of rail steel bloom tends to form from two steps. The first step is 'initial V-shape segregation formed' where the crystal nucleus caught by solidification front of bloom fully develops into coarse connected equiaxed crystals, this results into the closed micro-regions, the molten steel in micro-regions tend to be solute rich during the solidification process. And then the second step is V-shape changed, which is formed from the microstructure subside and slip by the effect of the static pressure and the negative pressure suction due to shrinkage. Based the results the key processes has been established to improve both V-shape segregation and central segregation of rail steel bloom.

**Key words:** rail steel, solidification structure, V-shape segregation, central segregation

收稿日期: 2022-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(52074076)。

作者简介: 李红光, 1989年出生, 男, 云南泸西人, 高级工程师, 研究方向为连铸关键装备及工艺技术研究, E-mail: 15983597859@163.com。

## 0 引言

一般而言, 由于铸坯中产生偏析在加热、轧制过程难以有效消除而遗传至轧材, 会对铸件、锻轧件的产品性能产生不同程度的影响。如偏析会使钢的韧性、塑性和抗腐蚀性能下降; 还会对产品组织调控、焊接及力学性能等产生消极影响<sup>[1-5]</sup>; 热轧管中 Mn 元素偏析会降低  $A_{r3}$ <sup>[6]</sup>, 降温过程中, 富集溶质元素的奥氏体的临界相变冷速发生改变, 相同冷速条件下组织不均匀甚至出现异常组织。重轨钢大方坯的偏析同样会对钢轨组织性能造成影响, 尤其高碳、高合金含量的高端重轨产品, 溶质偏析会造成热处理工艺窗口过窄、焊接接头出现异常组织等, 制约了高端重轨产品开发及重轨线路服役的安全性。因此, 全面提升重轨钢大方坯均质性, 改善偏析控制, 对高端重轨质量保障具有重要意义。

V 型偏析的尺度介于宏观与微观偏析之间 (300  $\mu\text{m}$  ~ 4 mm), 属于半宏观偏析, 已有研究认为, 浓化的钢液沿通道流向铸坯中心而形成 V 型偏析<sup>[7-15]</sup>, V 型偏析的控制技术暂无定论。为提升重轨

钢均质性, 改善偏析控制, 笔者以国内某厂方坯连铸机 280 mm×380 mm 断面生产的重轨钢大方坯为研究对象, 检测分析 V 型偏析特征, 探究 V 型偏析形成影响因素, 制定 V 型偏析控制工艺技术, 实现了重轨钢大方坯 V 型偏析与中心偏析的协同改善。

## 1 试验材料、研究方法的关键工艺条件

### 1.1 试验材料

目前, 连铸坯 V 型偏析属于共性问题, 笔者重点以 PG4 (U78CrV) 重轨钢为研究对象, 同时以 PB2 贝氏体重轨钢作为对比钢种进行研究。

### 1.2 研究方法

主要采用的检测方法为酸洗腐蚀 (腐蚀试剂均为盐酸溶液, 试样均按低倍检测标准加工), 文中涉及低倍及凝固组织检测; 通过 Procast 数值模拟软件进行凝固收缩计算 (计算模型通过铸坯温度进行校验)。

### 1.3 关键装备工艺条件

试验铸机关键装备技术条件如表 1 所示。

表 1 试验铸机关键装备技术条件

Table 1 The key equipment and technical parameters of continuous casting machine for experiment

连铸机机型	铸机流数	铸坯规格/mm	基本半径/m	冶金长度/m	结晶器电磁搅拌	轻压下	凝固末端电搅
全弧形	6机6流	280×380	12	35.60	有	有	有

由于矩形坯在凝固过程中宽窄面冷却及本身尺寸的差异, 凝固中后期的熔池截面演变为椭圆状。以铸坯厚度方向的 V 型形貌计算 V 型收缩产生的凹陷体积, 用该体积与数值模拟计算的疏松体积进行比较。

铸坯连铸生产及计算的关键工艺条件 (参数) 为: 弱二冷 (比水量 0.26 ~ 0.27 L/kg), 拉速 0.67 m/min, 过热度 25 ~ 27  $^{\circ}\text{C}$ , 结晶器电磁搅拌电流强度 300 A, 电流频率 2.4 Hz。

## 2 重轨钢大方坯 V 型偏析形成原因分析

### 2.1 重轨钢大方坯 V 型偏析特征分析

#### 2.1.1 V 型偏析的宏观形貌及凝固组织检测分析

##### 1) V 型偏析的宏观形貌

按图 1(a) 所示进行取样, 对试样横断面及纵向中心面代表区域进行酸洗腐蚀低倍检验。检测结果

如图 1(b) 所示, 由图 1(b) 可知, V 型偏析是半宏观偏析在拉坯方向的一种表现形式, 很多学者将横截面上的半宏观偏析分布描述为“同心圆结构”<sup>[12-13]</sup>。

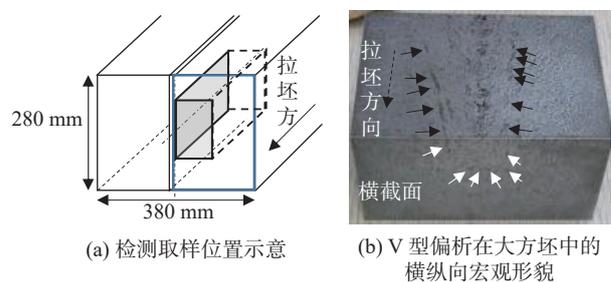


图 1 V 型偏析在大方坯上的横纵向宏观形貌关系

Fig. 1 The macro-profile relationship between horizontal and vertical of V-shape segregation in bloom

##### 2) V 型偏析的凝固组织特征

对同一块铸坯分别取平行于窄面 (280 mm 方向) 的纵向中心及横向半边 (380 mm 方向的 1/2) 进行酸洗腐蚀低倍检验, 取样位置如图 2 所示, 结果如

图3所示。由图3可知,V型偏析主要出现于铸坯的等轴晶区;V型偏析以铸坯中心线基本呈对称分布;铸坯腐蚀后,构成V型的深色偏析微区断续分布且伴随“疏松”存在。

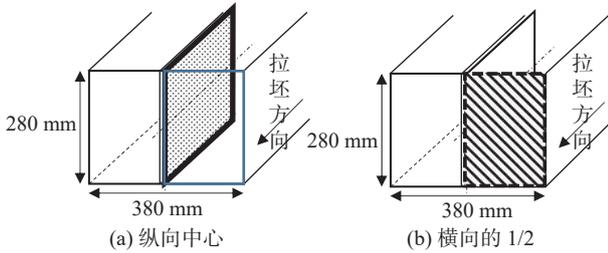
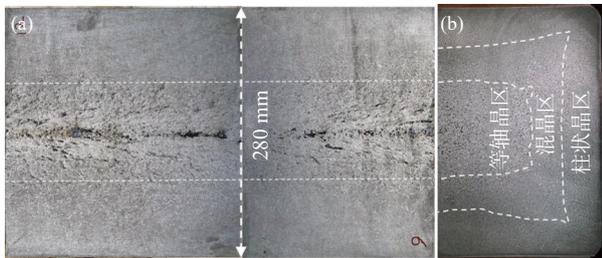


图2 V型偏析检验取样位置

Fig. 2 The diagram of sampling position for V-shape segregation testing



(a) V型偏析;(b) 横向晶区 (380 mm 方向的1/2)

图3 V型偏析所处晶区

Fig. 3 The solidification structure zone of V-shape segregation appeared

对铸坯V型偏析试样进行凝固组织检测,结果如图4所示。由图4可知,V型偏析的偏析微区相较周围组织的颜色更深,深色偏析微区内部的凝固组织更为细小,断续分布在粗大的等轴晶(球化)区内部。即V型偏析的“通道”并不连通,而是在V型方向上取向相近的偏析微区断续分布而成。此外,根据铃木试验方程式(1)及凝固组织特征可知,偏析微区内部的局部温降速率更大,即偏析微区内的局部凝固速率明显高于周围基体。

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

式中, $\lambda_2$ 为二次枝晶臂间距, $\mu\text{m}$ ;  $R$ 为温降速率, $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

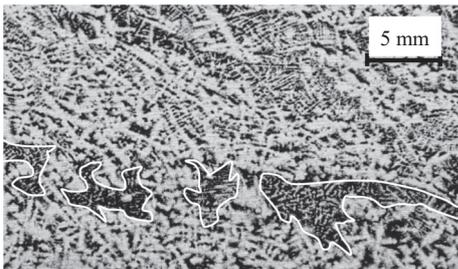


图4 V型偏析典型局部凝固组织形貌

Fig. 4 Solidification structure morphology of V-shape segregation

## 2.1.2 凝固补缩计算分析

### 1) V型偏析单元实际体积测算

以平行于窄面(厚度方向)的纵向低倍试样为例,如图5中阴影部分所示。按式(2)计算V型偏析单元体积,计算获得V型偏析单元的体积为 $133\ 169.4\ \text{mm}^3$ ,即由于凝固收缩导致等轴晶区凹陷的体积为 $133\ 169.4\ \text{mm}^3$ 。

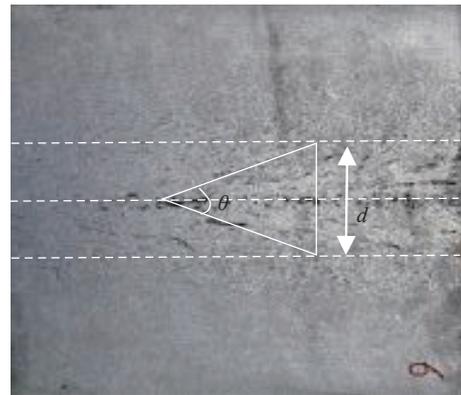


图5 V型偏析的V型单元体积测算

Fig. 5 Diagram of measurement and calculation for the V-shape segregation element volume

$$V_V = \frac{\pi \cdot d^3}{24 \tan(\theta/2)} \quad (2)$$

其中, $V_V$ 为V型偏析单元体积, $\text{mm}^3$ ;  $d$ 为V型偏析锥体单元的锥底直径(测定结果为 $73.36\ \text{mm}$ ),  $\text{mm}$ ;  $\theta$ 为V型偏析锥度角,测定结果为 $41.8^{\circ} \sim 43.1^{\circ}$ ,取 $42.4^{\circ}$ 。

### 2) 凝固理论收缩体积计算

采用Procast数值模拟软件,通过完成凝固传热校验的数值模型进行铸坯凝固收缩的理论体积计算,同时,实际测定铸坯表观密度,进一步转换为空隙体积比例,铸坯凝固收缩模拟计算与实测分布对比如图6所示。由图6可知,铸坯中心疏松区域的长半轴长度约为 $7.3\ \text{mm}$ ,区域收缩比例为 $0 \sim 35\%$ ,平均约 $20\%$ ,铸坯凝固收缩主要发生在中心半径 $20\ \text{mm}$ 以内范围,即计算结果可靠。

理论上V型偏析单元在拉坯方向的锥体高度区域内钢液均发生了凝固收缩,即如图6(a)所示区域均发生 $20\%$ 体积收缩。其中, $r$ 为凝固收缩区域半轴,取 $7.3\ \text{mm}$ 。计算圆柱体内收缩体积为 $3\ 164.8\ \text{mm}^3$ 。

按图7所示进行铸坯测算V型偏析单元体积与凝固模拟计算收缩体积比较,凝固收缩理论补缩体积仅为实物测算的V型单元体积的 $2.38\%$ 。即铸坯纯凝固补缩发生的凹陷体积与V型偏析单元实际测算体积相差较大。

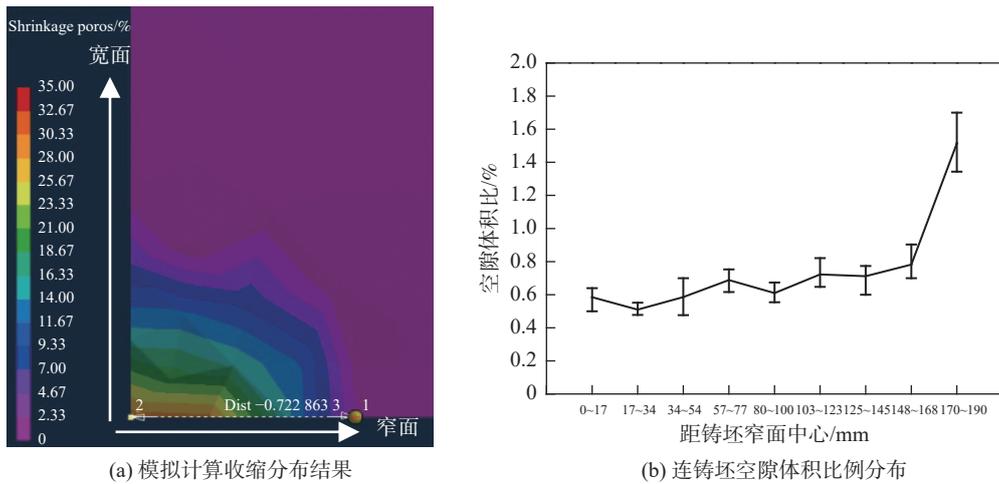


图 6 铸坯凝固收缩模拟计算与实测分布对比

Fig. 6 Comparison between the numerical simulation and actual measure results for shrinkage porosity

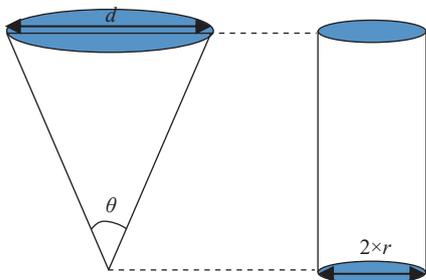


图 7 V 型偏析单元实际体积测算与收缩单元理论体积计算示意

Fig. 7 Diagram for the measurement and calculation of actual V-shape segregation and shrinkage porosity volume

### 2.1.3 V 型偏析内部富集溶质钢液流动分析

V 型偏析分布于铸坯等轴晶区, 结合攀钢重轨大方坯凝固组织分布(图 3)可知, 等轴晶区在铸坯厚度方向起始于距离铸坯表面约 100 mm 处, 由固液面模拟计算结果结合铸机装备条件可知, V 型偏析发生起始于距离结晶器液面约 9.0~10 m 的位置, 如图 8 所示。根据铸机半径 12 m 可知, 由该位置远离结晶器液面方向推移过程中铸坯逐渐趋于水平, 对应连铸区域内的富集溶质钢液的流动方向在内外弧应存在明显差异, 即外弧侧富集溶质理应该不会呈 V 型流向铸坯中心, 由此所得铸坯的 V 型偏析将不会呈明显对称形貌。

通过 V 型偏析宏观形貌、凝固组织特征检测, 结合 V 型偏析区的凝固收缩、补缩计算与溶质富集方向分析可知, 重轨钢大方坯 V 型偏析未形成 V 型通道, V 型偏析单元测算体积远大于凝固收缩体积, 全弧形连铸条件下铸坯 V 型偏析仍表现为对称形貌。

考虑到 V 型偏析可能受凝固收缩(补缩)、钢种

及凝固组织影响, 开展工艺对比试验进行 V 型偏析形成影响因素研究。

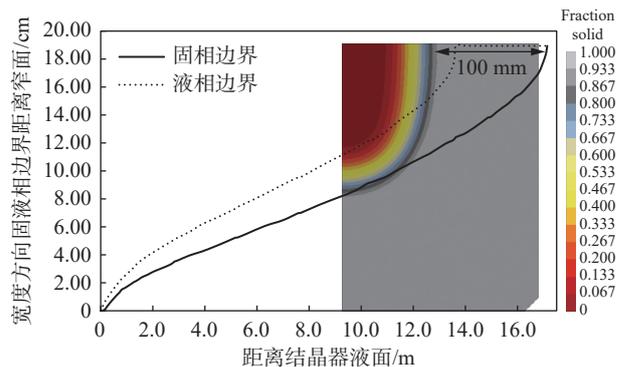


图 8 V 型偏析区域对应连铸过程的凝固区间

Fig. 8 The corresponding zone in solidification process of V-shape segregation

## 2.2 V 型偏析形成影响因素研究

### 2.2.1 V 型偏析控制验证试验

#### 1) 凝固末端压下对比试验

由于凝固末端压下能够通过压下量传导改善中心缩孔, 即中心缩孔的改善在一定程度上将减少凝固收缩抽吸进而削弱钢液在拉坯方向的补缩趋势。因此, 开展压下工艺对比试验, 考察缩孔对 V 型偏析的影响。

试验过程中, 在其他连铸工艺保持一致的条件下, 对比总压下量 9.6 mm 与无压下两种工艺模式。实施压下工艺时, 凝固完全结束前阶段的总压下量为 7.1 mm, 即该部分压下量能够减少凝固收缩抽吸, 还会焊合 V 型通道而阻断富集溶质钢液向中心流动。换言之, 若 V 型偏析是凝固抽吸导致富集溶质钢液流向铸坯中心, 那么本试验实施端压下工艺铸

坯的V型偏析理应较无压下工艺铸坯有改善。

铸坯代表试样检测结果如图9所示。由图9(a)可知,压下工艺对应的铸坯厚度方向尺寸较无压下的铸坯小约9.5 mm,无压下工艺所得铸坯中心存在缩孔,表明压下辊的压下量有效实施;铸坯凝固组织构成一致,表明冷却凝固过程一致。由图9(b)可知,压下实施以后,铸坯中心缩孔较无压下工艺得到明显改善,但铸坯中心区域的V型偏析无改善。

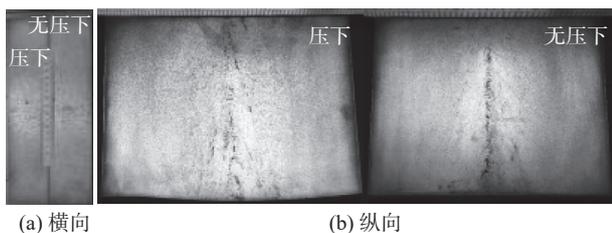


图9 铸坯腐蚀低倍照片

Fig. 9 Macro-photograph of bloom by corrosion detection

对铸坯中心线沿拉坯方向取不同位置点进行中心C偏析化学检测,结果如图10所示。由图10可知,压下工艺明显改善了铸坯中心偏析,具体为中心C含量波动更小且整体较低,由此可知,凝固末端压下促进了中心富集溶质钢液的溶质再分配。

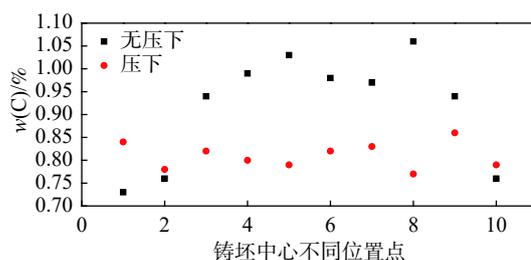


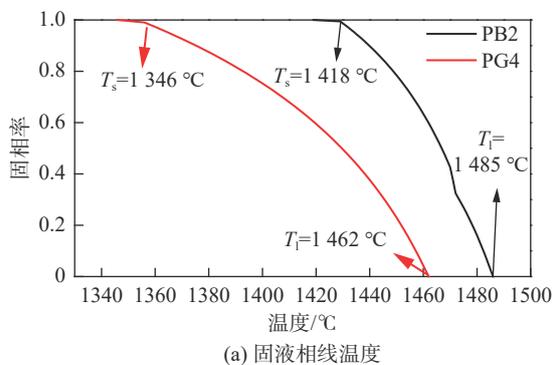
图10 铸坯中心C含量检测结果

Fig. 10 Testing results of C content in bloom center

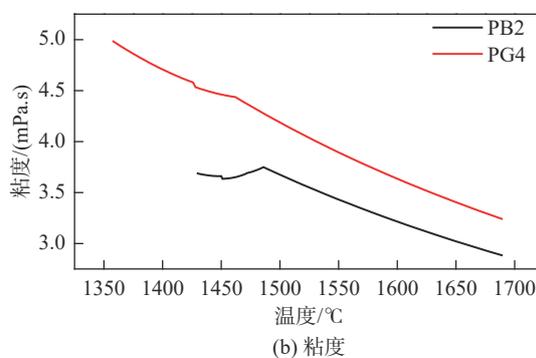
由上述分析可知,凝固末端压下有效减小铸坯中心缩孔并明显改善中心偏析,但其V型偏析无明显变化。笔者认为,凝固末端压下减少凝固收缩抽吸的富集溶质钢液来自铸坯中心,压下过程中V型偏析可能已经形成。

## 2) 钢种对比试验

PB2 贝氏体重轨钢与 PG4 重轨钢化学成分差别明显,钢种关键物性参数差别较大,具体对比如图11所示。由图11可知,PB2 固液相线温差为 67 °C,显著低于 PG4 的 116 °C,而相同温度条件下,PB2 贝氏体重轨钢的钢液粘度明显低于 PG4 重轨。因此,选择 PB2 贝氏体重轨钢与 PG4 重轨钢进行对比研究。



(a) 固液相线温度



(b) 粘度

图11 典型钢种关键物性参数对比

Fig. 11 Comparison of the key physical property parameters of representative grade steel

PB2 与 PG4 重轨钢纵向中心低倍检测结果如图12所示。由图12可知,PB2 贝氏体重轨钢铸坯中心致密性明显高于 PG4 重轨钢;PB2 重轨钢的V型偏析V型角为 18.2° ~ 23.2°,明显小于 PG4 重轨钢的 39.0° ~ 53.6°。

分析认为,由于固液相线温差大则糊状区更宽,相同坯壳厚度时,熔池液相边界的V型角更大,即PG4 重轨钢较 PB2 贝氏体的液相线V型角会更大;此外,PB2 较窄的固液相温度区间将有利于凝固枝晶组织细化,V型偏析的偏析点尺寸会更小;再者,

PB2 重轨钢钢液粘度较低,凝固补缩更优,凝固抽吸后的V型偏析V型角减小的趋势大于 PG4 重轨钢。

## 3) 凝固组织调控对比

由于V型偏析主要存在于等轴晶区,因此,控制中心区域凝固组织形貌应该对V型偏析控制具有一定影响。

连铸工艺研究表明,连铸电磁搅拌对铸坯凝固组织具有显著影响,尤其结晶器电磁搅拌能有效促进铸坯中心区域凝固组织转变为等轴晶,且结晶器

电磁搅拌强度越大, 等轴晶越发达。采用如表 2 所示的工艺开展凝固组织调控对比试验, 考察凝固组织差异对 V 型偏析的影响。

铸坯横纵向酸洗腐蚀低倍照片如图 13 所示。由图 13 可知, 工艺二的铸坯中心无球化明显的粗大等轴晶组织, 铸坯 V 型偏析改善明显。

对铸坯拉坯方向的中心偏析进行检验, 检验结果如图 14 所示。由图 14 所示结果可看出, 试验工艺实施后, 铸坯中心偏析得到明显改善, 一方面偏析度整体降低, 其次, 拉坯方向偏析度波动减小。统计结果如表 3 所示, 由表 3 可知, 改善后铸坯中心 C

偏析极大值由 1.34 降低至 1.12, 平均值由 1.15 降低至 1.06。

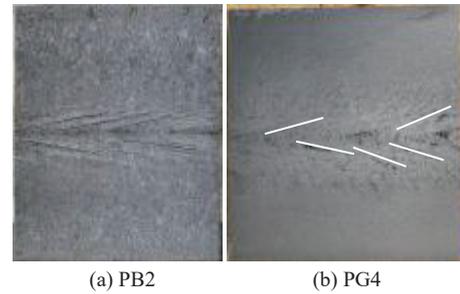


图 12 钢种典型纵向中心低倍照片  
Fig. 12 Representative macro-photograph of bloom center in lengthways

表 2 凝固组织调控试验的关键工艺  
Table 2 The key processes of experiment for solidification structure control

项目	电磁搅拌				二冷(弱冷)/(L·kg <sup>-1</sup> )	拉速/(m·min <sup>-1</sup> )
	M-EMS		F-EMS			
	电流/A	频率/Hz	电流/A	频率/Hz		
工艺一	200 ~ 300	2.0 ~ 2.5			0.25 ~ 0.28	0.67
工艺二	50 ~ 100	2.0 ~ 2.5	300 ~ 400	5.5 ~ 7.0	0.30 ~ 0.34	0.65

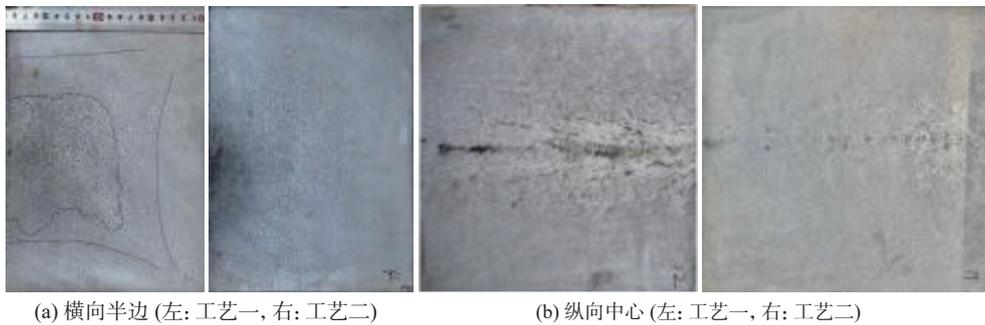


图 13 铸坯横纵向实物低倍照片  
Fig. 13 Macro-photograph of bloom for the cross section and lengthways center

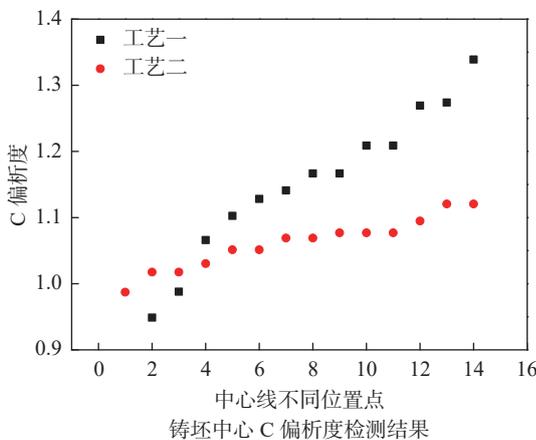


图 14 铸坯中心 C 偏析度检测结果  
Fig. 14 Testing result of C segregation degree of bloom central line

表 3 铸坯中心 C 偏析度统计  
Table 3 Statistical result of C segregation degree for bloom center

项目	原工艺(n=30)	试验工艺(n=30)
MAX	1.34	1.12
MIN	0.95	0.99
平均	1.15	1.06

试验结果表明, 降低结晶器电磁搅拌强度, 抑制铸坯中心区域过早产生游离晶核, 进一步通过凝固末端电磁搅拌调控中心区域钢液形核时机, 同步配合以强化冷却以强化中心区域凝固速率提升, 实现了铸坯中心凝固组织形态明显改变, 消除了球化明

显的粗大等轴晶组织,实现了铸坯V型偏析及中心C偏析协同改善。

### 2.2.2 V型偏析形成原因探讨分析

上述试验结果表明,凝固末端压下可有效改善铸坯中心致密性,但对重轨钢连铸大方坯V型偏析影响不明显;重轨钢连铸大方坯V型偏析宏观形貌与熔池液相边界的宏观分布关系密切,主要受钢的固液相温差影响;铸坯凝固组织改变后,V型偏析明显变化,通过连铸电磁搅拌调控并配套以强化冷却,铸坯V型偏析及中心C偏析协同改善。

由于V型偏析与横断面的半宏观偏析本质一致,而半宏观偏析是连铸过程中发达的晶粒组织搭接形成的封闭微区内富集溶质钢液重新形核结晶凝固形成<sup>[16]</sup>,等轴晶区愈大则半宏观偏析愈严重。因此,综合分析认为,V型偏析的V型分布应该是建立在凝固前沿的V型演变的基础上发生的,即无凝固补缩发生的情况下,V型的形成已经开始,此时产生的初始V型偏析的V型角为 $\alpha$ ;V型偏析的偏析是形成于粗大的晶粒搭接产生封闭微区内富集溶质钢液凝固产生,由于成分过冷而呈细晶组织,不连续的封闭微区分布在凝固前沿而呈断续分布的V型偏析;在凝固收缩及钢液静压力等综合作用下,球化的粗大等轴晶组织发生滑移塌陷,该过程进一步改变了V型偏析的V型角 $\alpha$ 至 $\theta$ ,具体过程示意如图15所示。

### 参考文献

- [1] Li Ping, Wang Lei, Zhou Qingfeng. Formation reasons of 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.)
- [2] Ji Yuan. Segregation of billet castings and its heredity effect on the hot-rolled products[D]. Beijing: University of Science and Technology, 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.)
- [3] Zong Nanfu, Zhang Hui, Liu Yang, et al. Causes and harms of defects in solidification structure and segregation of continuous casting bearing steel[J]. Bearing, 2018, (6): 62-67.  
(宗男夫, 张慧, 刘洋, 等. 连铸轴承钢偏析和凝固组织缺陷的成因及其危害[J]. 轴承, 2018, (6): 62-67.)
- [4] Song Yancheng, Liu Jigang. Analysis of the effects of segregation on the porosity of slab[J]. Modern Metallurgy, 2019, 47(2): 7-10.  
(宋延成, 刘吉刚. 偏析对于连铸坯性能的影响分析[J]. 现代冶金, 2019, 47(2): 7-10.)
- [5] Chen Yuhui, Song Yancheng. Analysis of the effects of segregation of slab on the mechanical property of steel plate[J]. Modern Metallurgy, 2018, 46(5): 13-15.  
(陈玉辉, 宋延成. 连铸坯偏析对钢板机械性能的影响分析[J]. 现代冶金, 2018, 46(5): 13-15.)
- [6] 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.

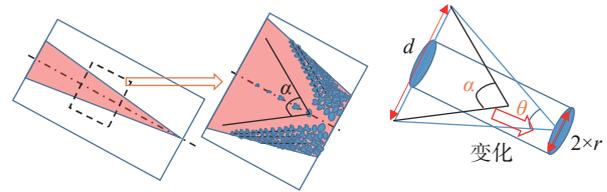


图15 V型偏析形成过程示意

Fig. 15 Schematic diagram of formation process for V-shape segregation

## 3 结论

1)重轨钢连铸大方坯V型偏析是半宏观偏析受凝固组织类型影响,钢的固液相温差和粘度对V型偏析宏观形貌有明显影响。

2)重轨钢大方坯V型偏析形成于凝固前沿捕捉游离晶核后,晶核充分长大形成粗大(球化)等轴晶而发生搭接形成封闭微区,微区内富集溶质的钢液结晶凝固形成初始V型偏析;初始V型偏析在钢液静压力和凝固收缩抽吸综合作用下发生滑移凹陷,进一步改变V型偏析的宏观形貌(减小V型角)而形成最终的V型偏析。

3)通过连铸电磁搅拌调控,同时配套以强化冷却工艺,改变铸坯凝固组织构成和凝固组织形态,重轨钢连铸大方坯V型偏析明显改善,同时铸坯中心C偏析度极大值由1.34降低至1.12,平均值由1.15降低至1.06。

4)重轨钢连铸大方坯V型偏析的改善对钢轨组织性能的具体影响有待进一步探究。

- (李博, 张忠铎, 刘华松, 等. 高强耐蚀管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.)
- [ 7 ] Wang Shengqian. Study on formation mechanism and control of pits during inspection process in GCr15 bearing steel[D]. Beijing: University of Science and Technology, 2016.  
(王升千. GCr15轴承钢低倍检验孔洞的形成机理及控制研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.)
- [ 8 ] Ji Y, Lan P, Geng H, *et al.* Behavior of spot segregation in continuously cast blooms and the resulting segregated band in oil pipe steels[J]. *Steel Research International*, 2018, 89(3): 1700331.
- [ 9 ] Lu Zhifang, Zhang Zhiguang, Zhao Zhengzheng, *et al.* Influence of superheat on internal structure of the bearing steel[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2016, 38(S1): 45.  
(逯志方, 张治广, 赵铮铮, 等. 过热度对轴承钢内部组织的影响[J]. 工程科学学报, 2016, 38(S1): 45.)
- [ 10 ] Pikkarainen T, Vuorenmaa V, Rentola I, *et al.* Effect of superheat on macrostructure and macro-segregation in continuous cast low-alloy steel slabs[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing, 2016: 012064.
- [ 11 ] Zeng Zhi, Ji Chenxi, Zhang Hongyan, *et al.* Optimization experiment of soft reduction for continuous casting slab[J]. *Continuous Casting*, 2018, 43(4): 23.  
(曾智, 季晨曦, 张宏艳, 等. 板坯连铸轻压下工艺参数优化试验研究[J]. 连铸, 2018, 43(4): 23.)
- [ 12 ] Huang Tuo, Ren Jinzhao, Ma Zhongwei, *et al.* An analysis on morphology of macro and micro structure of V-segregation in Ø380 mm continuous casting bloom of bearing steel GCr15[J]. *Special Steel*, 2014, 35(4): 48-51.  
(黄拓, 任金朝, 马忠伟, 等. GCr15轴承钢Ø380 mm连铸圆坯V-偏析的宏观与微观形貌分析[J]. 特殊钢, 2014, 35(4): 48-51.)
- [ 13 ] Huang Tuo, Ma Zhongwei, Ren Jinzhao, *et al.* Phenomenon and control measurements of V-shape segregation in 82B steel billet[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2014, 35(6): 108-112.  
(黄拓, 马忠伟, 任金朝, 等. 82B连铸坯V型偏析现象及控制[J]. 钢铁钒钛, 2014, 35(6): 108-112.)
- [ 14 ] McDonald R J, Hunt J D. Fluid motion through the partially solid regions of a casting and its importance in a-type segregation[J]. *Trans. Metal. Soc. Aime*, 1969, 245: 1993-1997.
- [ 15 ] Suzuki K, Miyamoto T. Study on the formation of a segregation in steel ingot[J]. *Trans. ISIJ*, 1978, 18: 80-89.
- [ 16 ] Li Hongguang, Ji Cheng, Jiang Dongbin, *et al.* Research on the 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. 重载钢轨连铸大方坯半宏观偏析形成机制与控制研究[J]. 钢铁, 2021, 56(6): 59-66.)

编辑 邓淑惠

## 《上海金属》2024 年征订启事

《上海金属》创刊于 1979 年, 曾多次评为上海市优秀期刊, 属中国科技核心期刊、冶金工程技术领域高质量科技期刊分级目录期刊, 也是 MA、CA、CSA、PK 等国际检索系统收录期刊。主要介绍和反映国内外冶金和金属材料业界的科研开发和技术进步, 刊登国内先进的、有实用推广意义的冶金、金属材料及其应用等方面的新技术、新成果, 为促进国内冶金和金属材料工业的现代化及国际间的科技交往服务。主要栏目有综述、理论与研究、金属材料及其应用、钢铁冶炼、压力加工、检测及自动化控制、经济管理、耐火材料、冶金辅助技术、计算机应用、生产经验等。

《上海金属》系双月刊, 单月末出版, 每年 6 期, 2024 年每期定价 20 元, 全年订费共 120 元, 欢迎国内外广大读者向各地邮局或中国国际图书贸易集团有限公司(北京 399 信箱) 订阅。国内邮局订阅代号 4-833, 国外订阅代号 BM4155, 凡因邮局订阅有困难和其他原因漏订或需增订的读者, 可随时向上海市宝山区上大路 99 号 157#信箱(邮政编码 200444)《上海金属》编辑部订阅。

本刊投稿网址: <https://shji.cbpt.cnki.net/>