



胀断连杆用高碳微合金钢连铸大方坯的铸态组织

夏勇 李亮 王璞 铁占鹏 兰鹏 唐海燕 张家泉

Characteristics of the as-cast high-carbon microalloyed continuous casting bloom steel for expansion-break connecting rods

XIA Yong, LI Liang, WANG Pu, Tie Zhan-peng, LAN Peng, TANG Hai-yan, ZHANG Jia-quan

引用本文:

夏勇, 李亮, 王璞, 铁占鹏, 兰鹏, 唐海燕, 张家泉. 胀断连杆用高碳微合金钢连铸大方坯的铸态组织[J]. 工程科学学报, 2022, 44(2): 189–197. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2020.09.03.001

XIA Yong, LI Liang, WANG Pu, Tie Zhan-peng, LAN Peng, TANG Hai-yan, ZHANG Jia-quan. Characteristics of the as-cast high-carbon microalloyed continuous casting bloom steel for expansion-break connecting rods[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(2): 189–197. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2020.09.03.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.09.03.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

凝固末端电磁搅拌和轻压下复合技术对大方坯高碳钢偏析和中心缩孔的影响

Effect of combining F-EMS and MSR on the segregation and shrinkage cavity in continuously cast high-carbon steel blooms
工程科学学报. 2017, 39(7): 996 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.07.004>

ND钢连铸坯两相区内的微观偏析模型

A microsegregation model in the two-phase region of an ND steel continuous casting billet
工程科学学报. 2019, 41(4): 461 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.04.006>

基于极限学习机(ELM)的连铸坯质量预测

Quality prediction of the continuous casting bloom based on the extreme learning machine
工程科学学报. 2018, 40(7): 815 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.07.007>

连铸坯脱氢退火数值模拟

Numerical simulation of dehydrogenation annealing in bloom
工程科学学报. 2020, 42(7): 862 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.03.16.003>

低碳钢连铸板坯表层凝固钩的特征

Subsurface hooks in continuous casting slabs of low-carbon steel
工程科学学报. 2017, 39(2): 251 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.02.013>

超低碳钢连铸坯钩状坯壳的演变与夹杂物的捕集

Hook evolution and inclusion entrapment of ultralow-carbon steel slabs
工程科学学报. 2018, 40(9): 1065 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.09.007>

胀断连杆用高碳微合金钢连铸大方坯的铸态组织

夏 勇, 李 亮, 王 璞, 铁占鹏, 兰 鹏, 唐海燕, 张家泉[✉]

北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: jqzhang@metall.ustb.edu.cn

摘 要 胀断连杆是汽车精密传动用高端产品, 需具高强度高韧和裂解加工脆性解理断裂特性。连铸化生产高碳易切削胀断连杆用微合金非调质钢是当前的发展方向。基于大方坯连铸生产典型工艺及其铸态组织、成分均匀性分析, 研究了胀断连杆加工过程常见断口形貌不合的钢坯遗传性因素。以常用德系 C70S6 钢为例, 采用 250 mm×280 mm 断面弧形连铸机, 解析其在一定结晶器电磁搅拌条件下所浇铸大方坯的铸态低倍结构和枝晶形貌, 并分析其不同晶区的成分分布特点。结果表明, 当前连铸条件下大方坯中心缩孔和后续热轧棒材探伤合格率可控, 但铸坯初凝坯壳凝固前沿发生明显的 C、S 负偏析白亮带区及其柱状晶偏转现象。金相试样图像分析和相场法凝固模拟表明, 铸坯中柱状晶具有逆流生长特征, 其偏转角是一次枝晶尖端向旋流方向逆向生长的结果。自铸坯角部至宽、窄面中心, 实测柱状晶区的一次枝晶偏转角约在 -7° 到 27° 之间。利用 X 射线能谱分析(EDS)进一步检测了钢中主要合金元素 Si、Mn、Mo 在铸坯不同晶区的分布, 揭示了其铸态偏析特征与差异性。据此, 探讨了这种铸态组织和成分偏析对后续热轧棒材和连杆成品组织的遗传性, 以及对其胀断加工断口不合的影响, 可为源头铸态质量的控制提供依据。

关键词 高碳非调质钢; 大方坯连铸; 白亮带; 枝晶偏转; 宏观偏析

分类号 TF777.2

Characteristics of the as-cast high-carbon microalloyed continuous casting bloom steel for expansion-break connecting rods

XIA Yong, LI Liang, WANG Pu, Tie Zhan-peng, LAN Peng, TANG Hai-yan, ZHANG Jia-quan[✉]

School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: jqzhang@metall.ustb.edu.cn

ABSTRACT Expansion-break connecting rods are high-end products for automotive precision transmission. They need to have high strength, high toughness, and brittle cleavage fracture characteristics during cracking processing. Continuous casting production of nonquenched and tempered steel for high-carbon, sulfur-containing, free-cutting, and expanding connecting rods is the current trend for efficient production. Based on the typical bloom continuous casting process and analysis of the as-cast structure and composition uniformity, the common unqualified fracture morphology due to as-cast hereditary factors were studied. Taking the typical German C70S6 steel as an example, a 250 mm × 280 mm section-curved continuous caster was adopted to study the as-cast macrostructure and dendrite morphology of the bloom casting with popular mold electromagnetic stirring. Moreover, the chemical distribution at different crystal regions was studied. Results show that the common center shrinkage defects of high-carbon steel continuous casting blooms are under control, which are beneficial to improve the qualified rate of internal flaw detection for their subsequent hot-rolled bars. However, it is found that there are obvious negative segregation white bands of carbon and sulfur and the deflection of columnar crystals in the solidification front of the initial solidified shell. Both the image analysis of the metallographic sample and solidification simulation by a phase-field method show that this columnar crystal has countercurrent growth characteristics. In addition, its deflection angle is the result

收稿日期: 2020-09-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51874033, U1860111)

of the primary dendrite tip growing in the opposite direction to the swirling fluid flow. In the center of the narrow surface, the measured primary dendrite deflection angle of the columnar crystal region is between -7° and 27° . EDS was used to further detect the distribution of the main alloying elements Si, Mn, and Mo in the different crystal regions of the bloom casting, revealing the segregation characteristics of the as-cast product and differences of each solute element. Finally, the heredity of this as-cast structure and composition segregation on the structure of subsequent hot-rolled bars and connecting rods was discussed. Moreover, the influence of the fracture inconsistency of its expansion and fracture processing were explored. It is pointed out that the as-cast quality control from the very beginning of casting has special significance in meeting the requirement of both processing and service properties of these high-grade high strength low alloy steels.

KEY WORDS high carbon nonquenched and tempered steel; bloom casting; white band; columnar crystal deflection; macro-segregation

连杆是连接曲轴和活塞的重要传动部件,对承载能力、安装与工作精度均有较高的要求。胀断连杆是当前汽车行业先进的基于脆性胀断再连接、解决装配失圆问题的高精度连杆结构。为了获得严丝合缝的解理断口、避免塑性变形导致的连杆大头圆失真,对钢材的组织与均匀性有十分苛刻的要求^[1]。其中,非调质易切削高强度 C70S6 为德系连杆用近共析微合金钢,也是一种新型节能高效钢,具有高碳、微合金、硫含量较高以及窄成分控制等要求,连铸生产难度大。仅从成品的组织性能要求来看,一方面,高碳高硫钢连铸中心缩孔、缩裂倾向大、极易发生轧材探伤不合缺陷;另一方面,其成分偏析倾向大容易导致后续轧材组织与力学性能一致性差^[2]。可见,认识并深入研究其铸态组织与常见缺陷特征对于发展这类高等级特殊钢连铸技术具有十分重要的意义,也是近年来基于冶炼源头进一步提升优特钢加工与服役性能的热点问题^[3-4]。

大方坯连铸是当前特殊钢棒材生产的主流基础工序,其中涉及钢液流动、传热凝固、溶质再分配和凝固组织演变等复杂的物理过程^[5-6]。连铸电磁搅拌技术(EMS)对于控制连铸坯凝固组织、改善夹杂物分布并促进成分均匀化具有重要作用^[7],已经成为特殊钢连铸机的标配、得到广泛应用。

国内外冶金工作者就电磁搅拌对铸坯质量的影响做过大量研究。目前,低频率大电流结晶器电磁搅拌(M-EMS)已成为控制结晶器内钢水过热波动、稳定连浇坯等轴晶率,进而控制大方坯中心缩孔缺陷的重要措施^[8-10]。同时也发现,钢水在电磁搅拌作用下的强制流动将不同程度地影响铸坯凝固组织形貌,并可能对后续轧材带来不利影响^[11-12]。比如,这种流动在半径方向上的切向分量会将坯壳固/液界面上析出的溶质元素输送到液相中心,影响铸态组织生长形貌乃至断面偏析分布形态;同时还可能使铸坯皮下产生不同程度的负偏析带(白亮带/White band)^[13-15],研究结果显示结晶器电磁搅拌电流强度越大流速越大,负偏析带

程度越严重。也有研究发现,在凝固固液界面前存在液体流动的情况下,柱状枝晶会发生偏离正常方向生长的现象^[16-18]。认为其偏转角度是由于上游方向的溶质耗竭和下游柱状晶体尖端因对流导致溶质浓度升高造成的^[19-21]。可见,揭示结晶器电磁搅拌作用下的柱状晶偏转角和白亮带状况可以间接反映搅拌强度的合理性,对于优化连铸工艺改善铸态质量至关重要。

鉴于含硫易切削高碳非调质胀断连杆用大方坯铸态组织对后续棒材探伤合格率和胀断裂解组织一致性的重要影响,本研究基于该钢种连铸工艺生产开发试验结果,对当前浇铸条件下其大方坯凝固组织和成分偏析特征进行了系统的表征研究。通过铸态低倍形貌、成分分布与偏析特点研究,以及全断面柱状晶偏转生长的定量分析,以期揭示可能影响该钢种产品加工过程胀断解理断裂要求的铸态遗传缺陷,进而探讨优化连铸工艺、综合提升胀断连杆用大方坯铸态质量的工艺途径。

1 试验条件与方法

试验基于 250 mm×280 mm 大方坯弧形连铸机,生产工艺流程为:110 t 电弧炉→钢包精炼(LF)→真空脱气(VD)→3 流弧形大方坯连铸机。依据标准要求,试验炉次钢水主要成分(质量分数,%)为:C 0.70, Mn 0.57, Si 0.18, P 0.017, S 0.065, Cr 0.12, V 0.04, Mo 0.01 等;可见,满足其非调质处理的强化机制主要是固溶强化和微合金沉淀强化。此外,成分中保有的较高硫含量可以改善产品的加工性能,热锻成形过程也具有促进先共析铁素体形核细化共析组织的作用。为了保证后续产品裂解加工解理断裂、严格控制断口塑性变形,该钢种要求窄成分控制、并从浇铸源头控制钢坯中合金元素成分偏析和铸态组织致密性。

生产试验铸机参数与主要连铸工艺如表 1 所示。其中,基于结晶器搅拌和二冷弱冷工艺,获得

的连铸坯中心缩孔 1.0 级、气体质量分数小于 2×10^{-6} ，均满足标准及后续热轧棒材探伤要求。

表 1 大方坯连铸机及生产工艺基本参数

Table 1 Bloom continuous casting machine and its basic production parameters

Continuous casting machine parameters	Value
Number of castings	three streams
Cross section	250 mm × 280 mm
Radius of continuous caster	11 m
Mould length	780 mm
Maximum metallurgical length	23 m
Nozzle type	Immersion straight-through
Middle- electromagnetic stirring(M-EMS)	500 A, 3 Hz
First-electromagnetic stirring(F-EMS)	530 A, 8 Hz
Water flow rate at the mold	2750 L·min ⁻¹
Superheat	11 K–24 K
Casting speed	0.75 m·min ⁻¹
Second cooling specific water	0.224 L·kg ⁻¹

为了揭示大方坯铸态组织特征和成分偏析状况，锯切厚度 30 mm 的铸坯横断面试样。低倍试样观察面经铣床加工至表面粗糙度不大于 $1.6 \mu\text{m}$ 后用酒精清洗吹干，然后依据 GB/T226 低倍缺陷酸蚀方法的热酸法，将试样加工面浸入用水浴加热至 $60 \sim 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的酸蚀液中。浸蚀约 15 min 后取出试样用清水冲洗吹干拍摄。关于铸坯碳、硫等元素偏析信息，如图 1 所示，沿用该低倍切片试样，用直径 5 mm 合金钢钻头在铸坯横截面厚度方向取钻屑样，利用碳硫分析仪测定。此外，在试样自表至中心的激冷层、柱状晶区、中心疏松区切取 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 的金相试样进行铸态枝晶形貌观察。金相样经过粗磨、细磨、抛光后，进行枝晶浸蚀，其中腐蚀试剂选用苦味酸 6 g+洗涤剂 4 mL+ H_2O 500 mL 的 $75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温溶液。采用电子显微镜进行显微组织观察，用图像分析处理软件 ImageJ 测量枝晶偏转角度，并通过 EDS 对不同晶区试样进行 Mn、Mo、Si 等其他合金元素的线扫描分析。

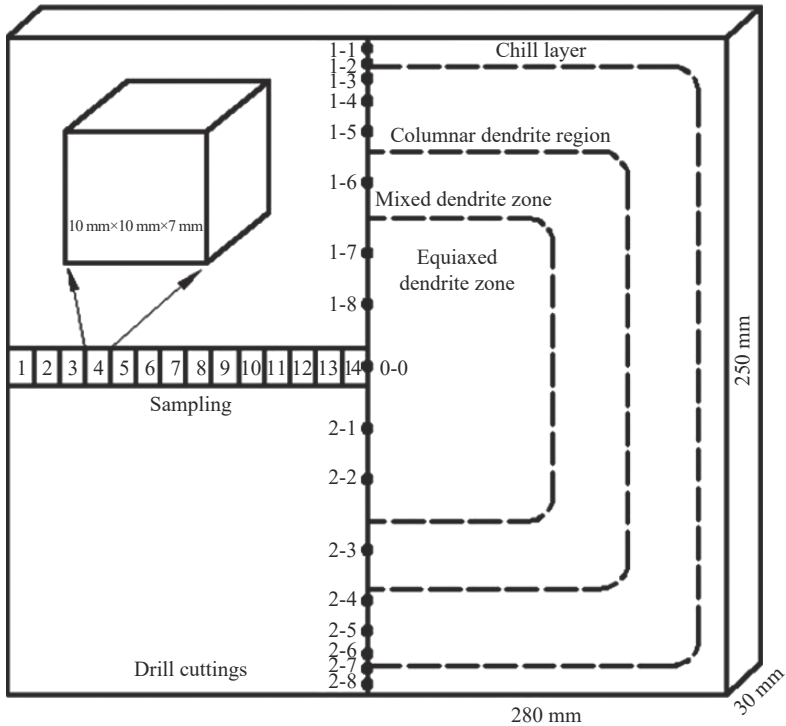


图 1 铸坯横截面晶区特征及钻屑与金相试样切取示意图

Fig.1 Schematic of the as-cast bloom structure and sampling for chemistry and metallographic analysis

2 实验结果分析讨论

2.1 铸坯低倍形貌

铸坯横截面酸浸后低倍形貌如图 2 所示。可见，当前连铸工艺条件下，大方坯中心缩孔级别不超过 1.0 级，能得到较好的控制并满足后续轧制要

求。然而，在距离铸坯四面表皮下 $15 \sim 20 \text{ mm}$ 处发现有明显的皮下白亮带组织，如图 2(c) 所示。这种白亮带一般与结晶器搅拌强度过大有关系，为偏离共析点的溶质贫乏负偏析组织，也将成为后续轧材当地铁素体比例超标的主要原因。在负偏析带与中心疏松区之间为粗大的柱状晶区，如图 2(b)

所示. 不难发现, 包括铸坯角部区域, 铸态组织中柱状晶均发生了不同程度的一次枝晶偏转现象.

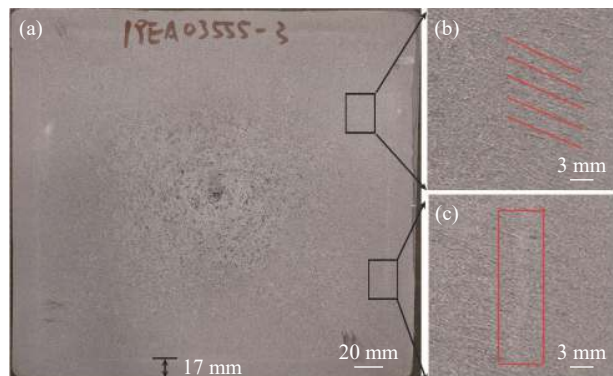


图2 大方坯低倍试样. (a)全断面低倍形貌; (b)柱状晶偏转; (c)皮下白亮带

Fig.2 Low-magnification specimens of blooms: (a) full-section morphology; (b) columnar crystal deflection; (c) subsurface white bright band

铸坯断面不同晶区枝晶浸蚀结果如图3所示, 其中1#样为激冷层、3#样为皮下白亮带所在晶区、6#样为柱状-等轴晶转变(CET)混晶区、12#样为中心等轴晶区. 关于这些典型晶区的形成机理已很清楚, 主要与过冷度和凝固前沿成分过冷有关, 在此不再赘述. 但需要指出的是, 晶区过渡区域以及中心斑点状疏松区往往是成分偏析波动较大的区域, 影响钢材热处理性能的碳极差超标往往与此有关^[22]. 从3#样枝晶形貌可见, 在M-EMS作用下, 此区域柱状晶已经明显地偏离了垂直表面的最大温度梯度方向, 偏转方向基本一致、偏转角大约在 $20^{\circ} \sim 28^{\circ}$ 之间.

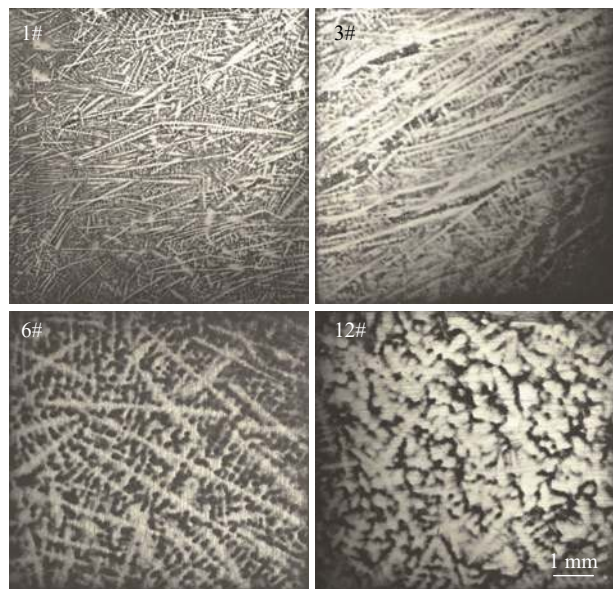


图3 铸坯断面自表及里不同晶区铸态枝晶形貌(1#, 3#, 6#, 12#)

Fig.3 Morphology of as-cast dendrites in different crystal regions from surface inward (1#, 3#, 6#, 12#)

2.2 柱状枝晶偏转及其特征

如图2(b)所示, 大方坯柱状晶发生有明显的偏转生长现象. 说明在当前较强的结晶器电磁搅拌作用下(500 A、3 Hz)坯壳凝固前沿发生切向流动, 且水口出流钢水电磁旋流在轴线方向上的有效作用距离较长. 采用相场法, 以Fe-0.6%C二元合金为例模拟获得这种横向流动对柱状枝晶生长及溶质分布的影响, 如图4所示(其中 V 表示流速; C 表示碳质量分数). 可见, 在所设计的较小流速下(如铸坯角部区域), 凝固柱状晶均表现出向旋流方向逆向倾斜生长的特性, 且偏转角度随流速而增加. 这种现象与前人关于柱状晶上游(根部)溶质因切向流动而耗竭、导致柱状晶体尖端溶质浓度升高而造成的枝晶偏转特征是一致的^[23]. 其中, Wang等^[17]及Takahashi等^[19]研究报道, 随着流速从 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 偏转角从 0° 增加到 30° . Esaka等^[24]研究了碳含量的影响, 发现碳质量分数从0.01%增加到0.1%, 偏转角从 15° 增加到 20° , 在此浓度以上保持 22° 左右不再变化. Wang等^[17]报道了高碳钢小方坯连铸在450 A、2.5 Hz结晶器电磁搅拌下, 其柱状晶偏转角达 18° 到 23° .

如图5所示, 对于这种含硫高碳非调质胀断连杆用钢, 测量其大方坯横截面上距离铸坯四周边缘处相同距离的柱状晶区枝晶偏转角, 结果如图6所示. 图中表明, 其柱状晶偏斜角度在铸坯宽、窄面中部最大, 约在 $23^{\circ} \sim 26^{\circ}$ 之间; 铸坯角部柱状晶偏转角最小, 且在宽窄面过渡区域发生反向偏转, 这显然与角部二维传热且传热方向正交有关. 受钢液电磁旋流强度黏滞性衰减影响, 铸坯窄面左侧和外弧面柱状晶偏转角度均略大于其相对面上柱状晶的偏转量. 其中, 基于数据拟合可获得窄面侧柱状晶偏转角的如下回归式.

$$\theta = 26.3 - 53.26e^{-0.0546d} \quad (1)$$

其中: θ 为柱状晶体偏转角, ($^{\circ}$); d 为离窄面左侧边缘距离, mm; 该结果与文献^[17]中报道高碳钢小方坯相近. 宽面侧柱状晶偏转角分布规律与大小基本类似.

2.3 皮下负偏析白亮带

连铸坯低倍中出现的白亮带现象属于负偏析区铁素体比例高耐酸蚀较强的表现. 图2(a)可见, 铸坯横断面上白亮带具有侧面较重、而角部不明显的特点, 可能与当地凝固前沿的流动性差异有关. 由凝固前沿溶质冲刷机理^[15], 可知白亮带一般均与凝固前沿钢水流动对枝晶间偏析溶质的冲刷有关, 白亮带位置与搅拌器安装位置或当地的凝

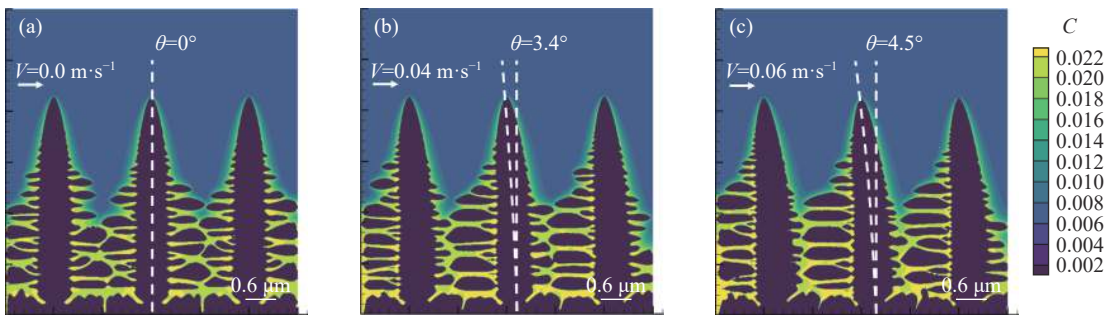


图4 相场模拟横向流动下的枝晶逆流偏转及其溶质分布特征。(a)0 m·s⁻¹; (b)0.04 m·s⁻¹; (c)0.06 m·s⁻¹

Fig.4 Phase-field simulation of dendrite countercurrent deflection and its solute distribution characteristics: (a) the velocity is 0 m·s⁻¹; (b) the velocity is 0.04 m·s⁻¹; (c) the velocity is 0.06 m·s⁻¹

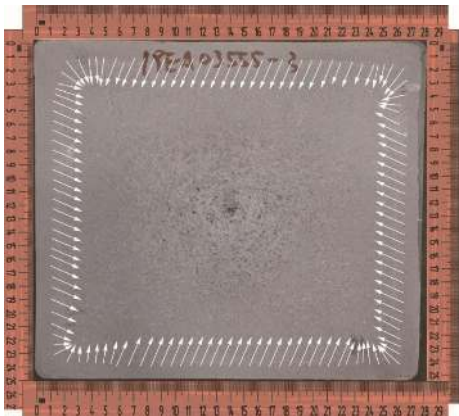


图5 铸坯横断面中柱状晶偏转生长形貌

Fig.5 Morphology of the columnar crystal defective growth in bloom casting

固坯壳厚度有关;负偏析带宽度则与拉速、搅拌器有效长度等有关。在本实验工况 500 A、3 Hz 的结晶器电磁搅拌作用下,较强的电磁力旋流对初凝坯壳的冲刷应该是这种皮下白亮带的主要成因^[25]。表2所示钻屑样碳、硫元素分析结果也表明其为负偏析带。如图7所示,结晶器区域的电磁搅拌,不仅造成凝固前沿的负偏析带,枝晶间浓化钢水向内部迁移也推高了柱状晶区域成分,铸坯中间(Mid-way)呈现出C元素正偏析区。鉴于宏观偏析在后续热加工中难以去除、在轧材和产品中具有遗传效应,为了保证组织的一致性,一般希望铸坯断面碳、硫极差越小越好。也就是说铸坯皮下白亮带或其程度与存在范围应该加以控制。

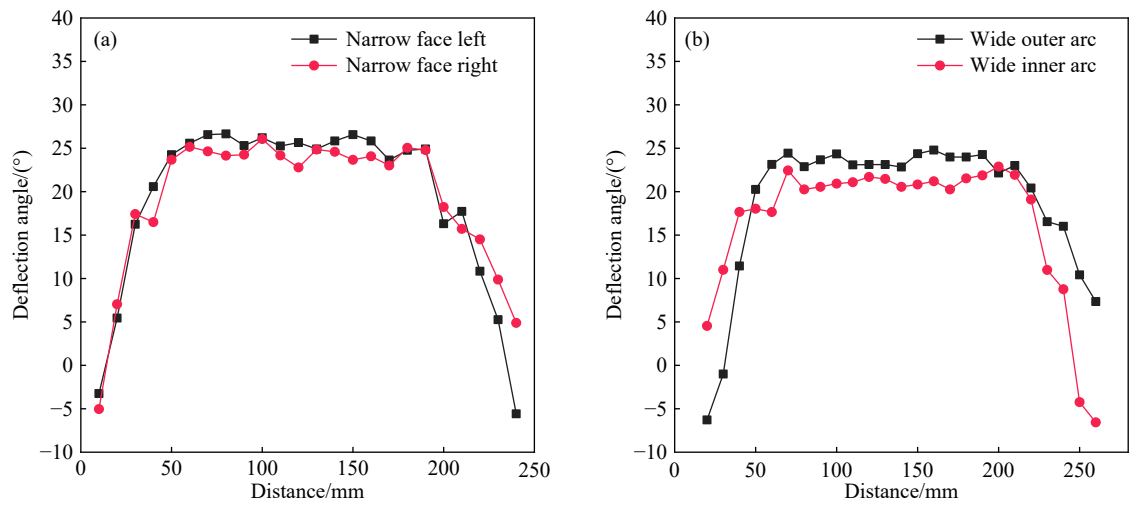


图6 铸坯宽窄面柱状晶偏转角曲线。(a)窄面柱状晶偏转角分布;(b)宽面柱状晶偏转角分布

Fig.6 Deflection angle curve of the wide and narrow side columnar crystals: (a) narrow side of the bloom casting; (b) wide side of the bloom casting

应该提出的是,在同样浇铸工况生产试验中,发现铸坯试样中心也有负偏析的结果,以及内外弧铸态结构或成分偏析不对称现象,这很可能与低过热浇铸或结晶器强电磁搅拌条件下的高碳钢发达枝晶的游离沉降有关。

2.4 铸态不同晶区合金元素 EDS 分析

选取不同铸态晶区位置金相试样(1#、3#、12#),在试样中间部位进行合金元素 Mn、Mo、Si 线扫描 EDS 分析,结果如图8所示。可见,以上三种元素在铸坯不同位置分布特征基本相同。激

表 2 铸坯断面钻屑点碳硫成分(质量分数)

Table 2 Carbon and sulfur concentration in the cross section of the bloom casting %

Numbering	C	S	Numbering	C	S
1-1	0.728	0.0657	2-1	0.698	0.0565
1-2	0.690	0.0625	2-2	0.763	0.0700
1-3	0.689	0.0624	2-3	0.754	0.0705
1-4	0.719	0.0650	2-4	0.763	0.0727
1-5	0.750	0.0678	2-5	0.736	0.0692
1-6	0.751	0.0696	2-6	0.700	0.0628
1-7	0.764	0.0745	2-7	0.690	0.0669
1-8	0.729	0.0604	2-8	0.706	0.0673
0-0	0.891	0.0824			

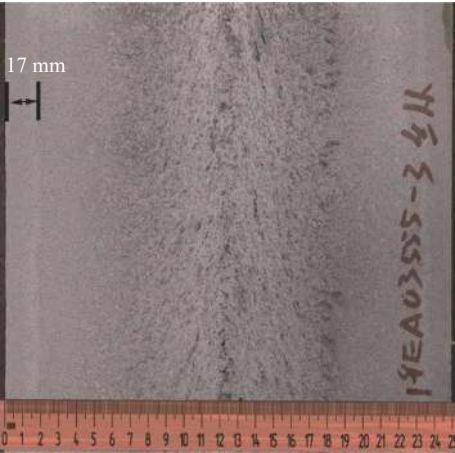
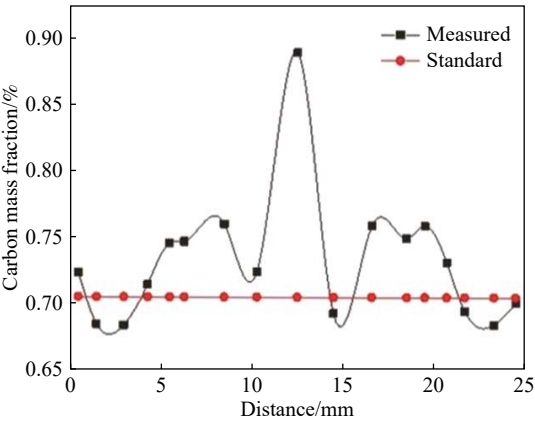


图 7 铸坯纵剖低倍及其不同区域碳偏析特征

Fig.7 As-cast macrostructure at the longitudinal section of the bloom casting and its cross-sectional carbon segregation

冷层 1#样溶质元素含量适中、中心等轴晶区 12#样中溶质元素相对富集, 而白亮带所在晶区的 3#样溶质元素含量均明显比较贫乏. 也就是说, 合金元素的分布与前述碳、硫分布特征是一致的. 但同时可见, 白亮带区域合金元素 Mn、Mo 贫乏更为突出, 其在不同位置分布不均匀程度明显大于

Si 元素, 如表 3 所示. 无论是 C、S, 还是其它合金元素, 其宏观偏析程度越大, 后续热加工产品组织与性能的差异性也将越大.

3 分析讨论

用户调研表明, 对于大方坯连铸含硫高碳非调质胀断连杆钢, 其后一般要求以热轧棒材的形式供货, 终端用户再通过热模锻控制成形、控制组织. 若要保证零件裂解加工过程塑性变形小、发生理想解理断裂(断口平整, 无凸起和掉渣等), 一般要求产品要有 90% 以上的珠光体、不连续分布小于 10% 甚至 5% 的铁素体组织, 且无异常组织^[1, 26].

可见, 为了以铸代锻, 在开发胀断连杆钢大方坯连铸生产工艺时采用结晶器强电磁搅拌确实可以增加中间等轴晶区、控制中心缩孔缺陷, 然而搅拌工艺不当也会导致铸坯断面宏观偏析差异程度较大的问题. 其中不仅包括皮下白亮带、中心线偏析, 还包括粗大等轴晶区的斑点状半宏观偏析. 众所周知, 如上所述的这种宏观尺度成分不均匀性, 在后续热加工环节是难以消除的, 很容易发生产品异常组织, 进而导致裂解断口不合. 有研究表明^[27-28], C 与 Mn 等合金元素宏观偏析程度大, 连杆锻造空冷后可能出现贝氏体与马氏体组织, 不仅造成材料硬度波动大, 也会恶化切削加工性能; 而碳负偏析白亮带, 则会产生较多的铁素体组织, 会降低材料拉伸强度、导致局部韧窝型凸起, 从而不利于裂解加工解理断口的保障. 此外, 含硫钢目的是改善可加工性, 但 S 偏析程度大, 容易引发后续产品模锻加工热脆.

综上所述, 含硫高碳非调质胀断连杆钢连铸工艺的开发中, 窄成分控制的关键是连铸宏观偏析的控制. 当前工艺条件下常见的皮下白亮带、铸坯中心线偏析或粗大等轴晶区的点状半宏观偏析将会对轧材组织有遗传性影响, 应该从连铸源头加以控制. 依据所揭示的柱状晶偏转角反映的电磁搅拌强度, 进而通过弱化结晶器搅拌、恒温恒拉速稳定凝固终点, 再实施凝固末端轻压下等措施, 可望综合提升其铸态质量、保障后续连杆锻材裂解性能.

4 结论

基于典型大方坯连铸生产工艺及其铸态组织、成分均匀性分析, 研究了连铸工艺开发胀断连杆用钢后续加工过程常见断口形貌不合的钢坯遗传性因素. 通过对德系 C70S6 钢 250 mm×280 mm

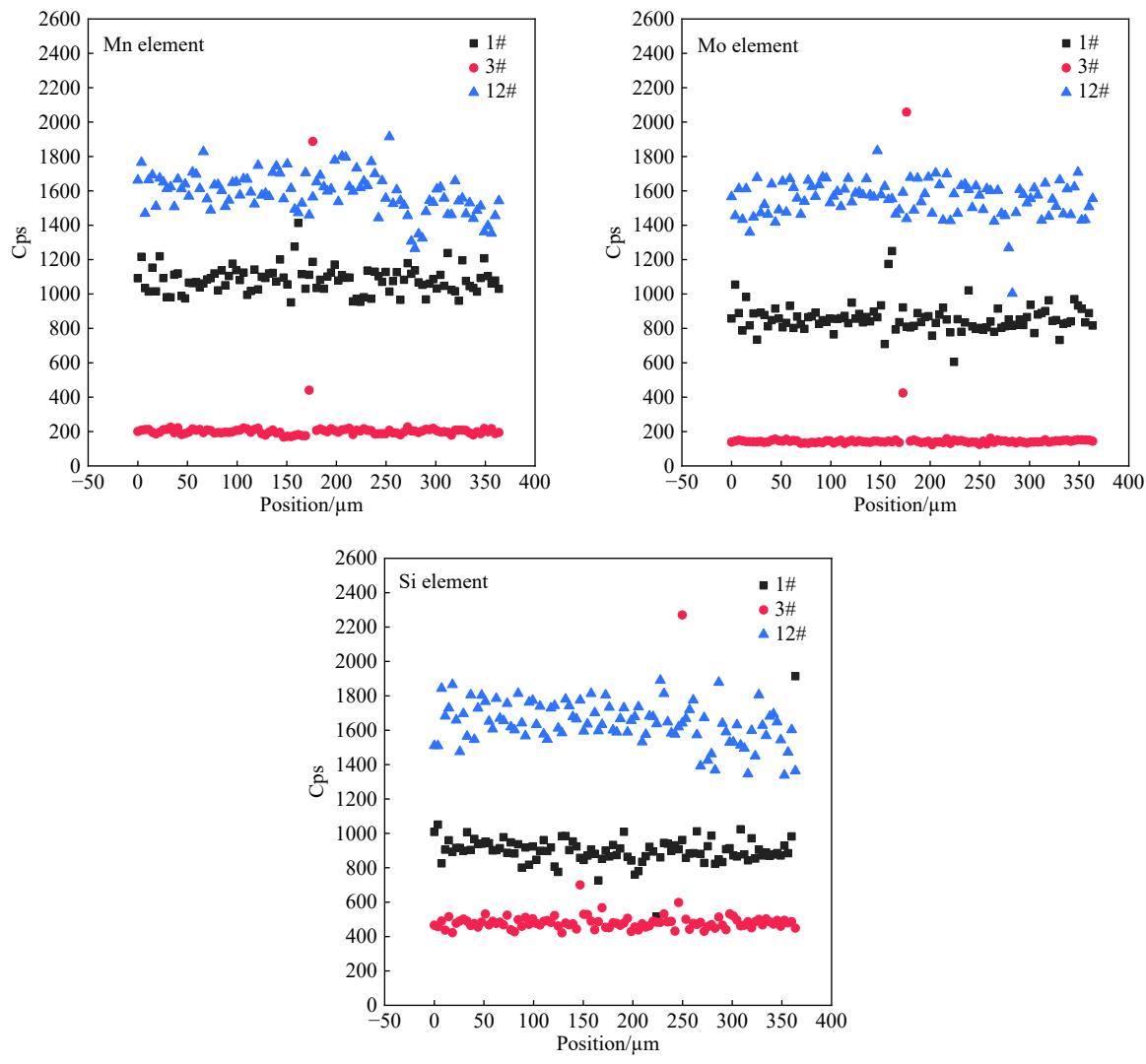


图8 不同晶区合金元素 EDS 分析值(1#激冷层、3#白亮带区域、12#等轴晶区)

Fig.8 EDS values of the solute elements in different crystal regions (1# quench layer, 3# white bright band area, 12# equiaxed crystal region)

表3 铸坯不同位置合金元素含量差异度比值

Table 3 Distribution ratio of the solute elements in different crystal regions

Element	1#/3#	12#/3#	12#/1#
Mn	5.5	8	1.45
Mo	6.43	11.43	1.78
Si	2.2	3.78	1.89

断面大方坯铸态低倍结构、枝晶形貌与成分偏析特征的实验研究, 结论如下:

(1)大方坯连铸在常用结晶器电磁搅拌工艺条件下可以获得内部较为致密、无明显中心缩孔缺陷、可保障后续棒材探伤合格的高碳含硫钢连杆用钢坯; 但搅拌强度过大会改变铸坯断面宏观偏析形态, 并在铸坯面部产生明显的皮下负偏析白亮带组织。

(2)当前连铸工况条件下, 凝固柱状晶生长具有明显的偏转角。柱状晶偏转角由宽窄面角部向

中心逐渐增大, 数值在 $-7^{\circ} \sim 27^{\circ}$ 之间。其中铸坯面部柱状晶偏转角较大, 且宽窄面偏转角具有一定的不对称性。柱状晶偏转生长及其方向与凝固前沿钢水的横向流动有关, 其偏转程度也间接反映了结晶器搅拌强度及其合理性。

(3)伴随碳、硫偏析, 该钢种铸坯中合金元素 Mn、Mo 等在不同晶区偏析程度差异大。这种铸态组织中合金元素的宏观偏析在后续热加工环节具有遗传性, 也将对后续胀断连杆产品的裂解加工性能产生一定的影响。

综合认为, 含硫高碳非调质胀断连杆钢连铸工艺的开发, 窄成分控制的关键是连铸宏观偏析及其程度的控制, 基于铸态组织特征从连铸源头优化工艺、调控组织具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Wang Z H, Li S, Ge Y, et al. Research on microstructure and mechanical properties and fracture splitting properties of forged connecting rod of C70S6 non-quenched and tempered steel. *Hot Working Technol*, 2015, 44(19): 39
(王占花, 李慎, 葛宇, 等. C70S6非调质钢锻造连杆的组织力学性能和胀断性能研究. 热加工工艺, 2015, 44(19): 39)
- [2] Kang T, Liu X Y, Yang J H, et al. Analysis on cause of off-qualified continuous-rolling products of steel C70S6 BY by ultrasonic detection and process improvement. *Special Steel*, 2019, 40(2): 21
(康浩, 刘向艳, 杨建华, 等. 胀断连杆用C70S6 BY钢连轧材探伤不合格原因分析和工艺改进. 特殊钢, 2019, 40(2): 21)
- [3] Ji Y, Tang H Y, Lan P, et al. Effect of dendritic morphology and central segregation of billet castings on the microstructure and mechanical property of hot-rolled wire rods. *Steel Res Int*, 2017, 88(8): 1600426
- [4] Li B, Zhang Z H, Liu H S, et al. Characteristics and evolution of the spot segregations and banded defects in high strength corrosion resistant tube steel. *Acta Metall Sin*, 2019, 55(6): 762
(李博, 张忠铎, 刘华松, 等. 高强耐蚀钢管点状偏析及带状缺陷的特征与演变. 金属学报, 2019, 55(6): 762)
- [5] Raihle C M, Sivesson P, Tukiainen M, et al. Improving inner quality in continuously cast billets: comparison between mould electromagnetic stirring and thermal soft reduction. *Ironmaking Steelmaking*, 1994, 21(6): 487
- [6] Oh K S, Shin Y K, Chang Y W. The role of combination stirring and final stirring pool thickness on center defects of continuous cast high carbon steel blooms. *Trans Iron Steel Soc*, 1994, 21(4): 43
- [7] Spitzer K H, Dubke M, Schwerdtfeger K. Rotational electromagnetic stirring in continuous casting of round strands. *Metall Trans B*, 1986, 17(1): 119
- [8] Yu Z, Lei Z S, Jia H H, et al. Numerical simulation of flow field using swirling flow nozzle in continuous casting billet mould // *Proceedings of 4th International Conference on Continuous Casting of Steel in Developing Countries*. Beijing, 2008: 554
- [9] Sun H B, Li L J, Wu X X, et al. Control of segregation and hardenability band width by optimizing M-EMS parameters for gear steel. *Iron Steel*, 2018, 53(8): 55
(孙海波, 李烈军, 吴学兴, 等. 基于M-EMS工艺优化的齿轮钢偏析及淬透性带宽控制. 钢铁, 2018, 53(8): 55)
- [10] Li S X, Wang P, Lan P, et al. Melt flow and heat transfer at the crater end of round billet continuous casting using final electromagnetic stirring. *Chin J Eng*, 2019, 41(6): 748
(李少翔, 王璞, 兰鹏, 等. 圆坯凝固末端电磁搅拌作用下的流动与传热行为. 工程科学学报, 2019, 41(6): 748)
- [11] Yokoya S, Takagi S, Iguchi M, et al. Swirling effect in immersion nozzle on flow and heat transport in billet continuous casting mold. *ISIJ Int*, 1998, 38(8): 827
- [12] Li S X, Zhang X M, Li L, et al. Representation and effect of mushy zone coefficient on coupled flow and solidification simulation during continuous casting. *Chin J Eng*, 2019, 41(2): 199
(李少翔, 张晓萌, 李亮, 等. 连铸流动与凝固耦合模拟中糊状区系数的表征及影响. 工程科学学报, 2019, 41(2): 199)
- [13] Sun H B, Li L J, Wu X X, et al. Effect of subsurface negative segregation induced by M-EMS on component homogeneity for bloom continuous casting. *Metall Res Technol*, 2018, 115(6): 603
- [14] Zhang W J, Luo S, Chen Y, et al. Numerical simulation of fluid flow, heat transfer, species transfer, and solidification in billet continuous casting mold with M-EMS. *Metals*, 2019, 9(1): 66
- [15] Bridge M R, Rogers G D. Structural effects and band segregate formation during the electromagnetic stirring of strand-cast steel. *Metall Trans B*, 1984, 15(3): 581
- [16] Wu H J, Wei N, Bao Y P, et al. Effect of M-EMS on the solidification structure of a steel billet. *Int J Miner Metall Mater*, 2011, 18(2): 159
- [17] Wang X C, Wang S Q, Zhang L F, et al. Analysis on the deflection angle of columnar dendrites of continuous casting steel billets under the influence of mold electromagnetic stirring. *Metall Mater Trans A*, 2016, 47(11): 5496
- [18] Griffiths W D, McCartney D G. The effect of electromagnetic stirring during solidification on the structure of Al-Si alloys. *Master Sci Eng A*, 1996, 216(1-2): 47
- [19] Takahashi T, Ichikawa K, Kudou M, et al. The effect of fluid flow on the macrosegregation in steel ingot. *Tetsu Hagané*, 1975, 61: 2198
(高橋忠義, 市川洸, 工藤昌行, 等. 鋼塊の凝固偏析におよぼす溶湯流動の影響. 鉄と鋼, 1975, 61: 2198)
- [20] Geng D Q, Lei H, He J C, et al. Effect of electromagnetic swirling flow in slide-gate SEN on flow field in square billet continuous casting mold. *Acta Metall Sin (Engl Lett)*, 2012, 25(5): 347
- [21] Xu Y, Xu X J, Li Z, et al. Dendrite growth characteristics and segregation control of bearing steel billet with rotational electromagnetic stirring. *High Temp Mater Processes*, 2007, 36(4): 339
- [22] Niu L, Qiu S T, Zhao J X, et al. Effects of continuous casting process parameters on carbon segregation degree of 38CrMoAl steel big round billet. *J Iron Steel Res*, 2018, 30(5): 359
(牛亮, 仇圣桃, 赵俊学, 等. 连铸工艺参数对38CrMoAl大圆坯碳偏析的影响. 钢铁研究学报, 2018, 30(5): 359)
- [23] Beckermann C, Diepers H J. Modeling melt convection in phase

- field simulations of solidification. *J Comput Phys*, 1999, 154(2): 468
- [24] Esaka H, Suter F, Ogibayashi S. Influence of carbon content on the growth angle of steel dendrites in a flowing melt. *ISIJ Int*, 1996, 36(10): 1264
- [25] Li S X, Lan P, Zhang J Q. Numerical simulation of turbulence flow and solidification in a bloom continuous casting mould with electromagnetic stirring // *TMS Annual Meeting & Exhibition*. Springer, 2018: 223
- [26] Zhang D E, Harris S J, McCartney D G, et al. The effect of laser transformation notching on the controlled fracture of a high carbon (C70S6) steel. *Mater Sci Eng A*, 2008, 489(1-2): 273
- [27] Zhang X Z, Zhou G F, Chen Q F, et al. Microstructure and mechanical properties of a new type of sulphur free cutting steel. *Mater Mech Eng*, 2010, 34(6): 61
(张贤忠, 周桂峰, 陈庆丰, 等. 一种新型含硫易切削钢的显微组织和力学性能. 机械工程材料, 2010, 34(6): 61)
- [28] Zhang X Z. *Exploitation and Research of Microstructure and Properties of V-Ti-N Microalloyed Steel for Fracture Splitting Connecting-Rods* [Dissertation]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011
(张贤忠. 裂解连杆用V-Ti-N微合金钢的开发及组织与性能研究[学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2011)