Q345B 圆形连铸坯中心疏松的成因分析

丰小冬[1],赵广林[2],姜海龙[1]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 在Q345B圆形连铸坯的生产过程中出现明显的中心疏松,为此,对连铸坯进行了气体含量和热酸低倍检测,并对连铸坯的凝固过程进行了分析。分析表明,结晶器电磁搅拌强度和末端电磁搅拌强度偏低导致晶粒的形核数量偏少,二次冷却强度偏低导致晶粒的充分长大,晶粒堆砌在液相穴末端,并分割钢液,封闭空间内的钢液在凝固过程中发生体积收缩,会形成相应的小缩孔,在此基础上提出相应的改进措施。

关键词: 圆形连铸坯; 中心疏松; 凝固过程; 分割; 缩孔
中图分类号: TF777.9 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2018)05-0060-04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2018.05.017

Cause Analysis on Center Porosity of Q345B Round Continuous Casting Billet

Feng Xiao-dong[1], *Zhao Guang-lin*[2], *Jiang Hai-long*[1]

(1. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Steel Tube Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: There was obvious center porosity in the production of Q345B round continuous casting billet, so the gas content and hot acid of continuous casting billet were tested as well as the solidification process of continuous casting billet was analyzed. The results indicated that the lower strength of mold electromagnetic stirring and final electromagnetic stirring caused fewer nuclear of grain, the lower strength of secondary cooling caused the full growth of grains, the grains piled up at the end of liquid core and divided the molten steel, the volume of molten steel in enclosed cavity was shrinked in the solidification process and formed small contraction cavity. The relative improvement measures are put forward based on this.

Key words: round continuous casting billet; center porosity; solidification process; divide; contraction cavity

包钢炼钢厂生产的规格为Φ300 mm的Q345B圆形连铸坯,在硫印检测中发现连铸坯的中心存在明显的疏松缺陷,这将影响热轧无缝管的质量。为此,取连铸坯样进行理化性能检测,以便分析疏松缺陷产生原因。

1 性能检测与结果分析

在连铸坯样上制取一组试样进行化学成分及气

收稿日期:2018-03-09
作者简介:丰小冬(1975-),男,内蒙古包头市人,高级工程师,现从事无缝钢管产品研发及质量攻关。

体含量的检测，切取一个厚度为 50 mm 的低倍样进行热酸检测。

从热酸低倍照片可看出（见图 1），连铸坯的中心弥散分布着疏松缺陷。从化学检测结果可看出（见表 1），连铸坯的成分和气体含量均不高，不会导致疏松缺陷。

表 1　连铸坯的化学成分检测结果

质量分数/%					气体含量/ $\times 10^{-6}$		
C	Si	Mn	P	S	[N]	$[O]_{total}$	[H]
0.160	0.410	1.430	0.015	0.007	61	17	1.2

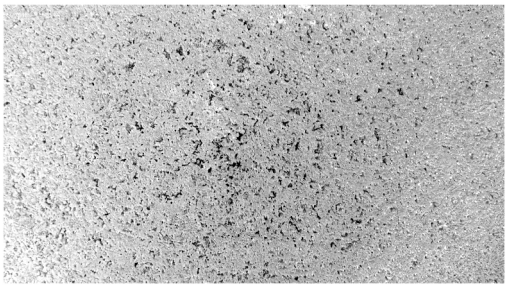


图 1　连铸坯的热酸低倍照片

2　分析与讨论

圆形连铸坯的低倍凝固组织从表面到心部分别是激冷晶层、柱状晶区和等轴晶区，钢液凝固过程伴随着体积的收缩，所形成的小缩孔构成连铸坯的疏松[1]。

2.1　钢液的凝固过程

进入结晶器的钢液受到器壁的急剧冷却，产生大量细小的激冷晶核，在器壁表面迅速凝固成细小的等轴晶粒，构成了激冷晶层。由于冷却强度非常大，钢液的结晶温度范围非常窄，凝固区间非常窄，连铸坯能够逐层进行凝固，有利于液相的补缩，因此，激冷晶层组织致密，不存在疏松[2]。

随着激冷晶层的形成，传热速度减慢，凝固前沿的过冷度在减小，径向的稳定热流导致柱状晶的优先成长，并迎着液相穴内钢液的流动方向发生倾斜。较大的冷却强度导致凝固区域变窄，连铸坯趋向于逐层凝固，有利于液相的补缩，因此，柱状晶区组织致密，不存在疏松[2]。

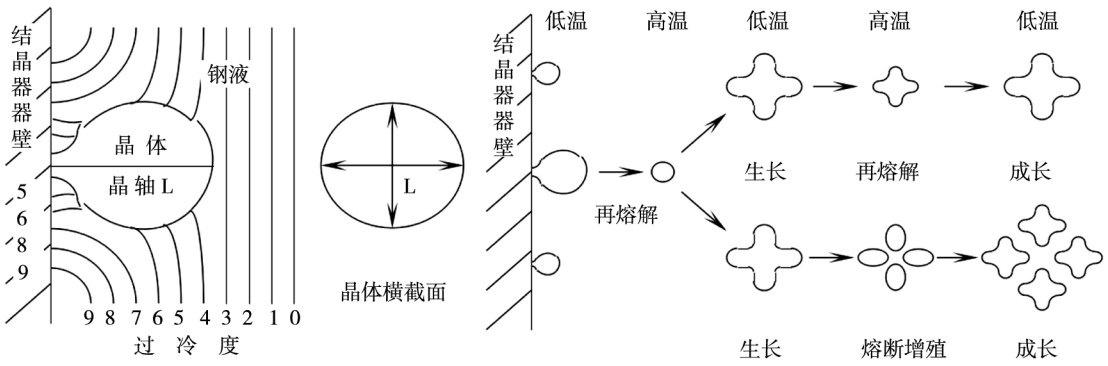
随着坯壳的增厚，传热速度的下降导致柱状晶生长缓慢。凝固前沿富集的气体夹杂和 C、Mn 元素能够降低钢液的熔点。当凝固前沿的钢液温度接近液相穴中心的钢液温度时，中心尚未凝固的钢液开始大量形核，此时柱状晶停止生长。由于界面较大的晶粒之间位向各不相同，其侧向可以自由生长，因此，枝晶比较发达，等轴晶区组织不够致密，存在明显的杂质和疏松。

疏松主要发生在凝固末端的等轴晶区，该区域内的钢液在凝固过程中先后经历了晶核的形成和长大两个过程。

2.2　晶核的形成过程

2.2.1　缩脖晶的再熔解增值过程

如图 2 所示，受到器壁表面静摩擦力的阻碍，激冷晶核在根部的横向生长受到限制，产生缩脖现象，相对富集的 C、Mn 元素降低了根部的熔点，在钢液的机械冲刷和温度波动的热冲击下，多数缩脖晶在根部折断，被流动的钢液卷入到内部[3]。



（a）缩脖晶的温度场分布示意图　　（b）缩脖晶的再熔解增殖示意图

图 2　温度变化引起的缩脖晶再熔解增殖示意图

此时钢液的温度较高，多数游离的缩脖晶会熔解，这会降低周围钢液的温度，少数游离的缩脖晶将会快速生长，释放结晶潜热并析出C、Mn元素，由于存在结构起伏和能量起伏，晶粒可向任意方位进行生长。根部的生长最为缓慢，相对富集的C、Mn元素降低了根部的熔点，在界面层内热溶质流的冲刷下，根部发生收缩并被熔断[3]。这个过程的交替发生导致等轴晶核的大量增加，浇铸温度越低，生成晶粒的数目也越多。

2.2.2 树枝晶的再熔解增值过程

如图3所示，由于存在稳定的径向热流，树枝晶以轴向生长为主；受到相邻晶粒的阻碍，侧向生长受到限制。头部的快速生长将对树枝晶产生一种沿轴向的拉伸效应，造成颈部发生收缩。相对富集的C、Mn元素降低了颈部的熔点，在界面层内热溶质流的冲刷下，颈部发生熔断。

随着树枝晶主轴及侧枝的快速生长，不断析出C、Mn元素、并释放大量的结晶潜热，导致生长相对缓慢的侧枝根部发生收缩。相对富集的C、Mn元素降低了侧枝根部的熔点，在界面层内热溶质流的冲刷下，侧枝根部发生熔断[3]。

树枝晶头部、侧枝熔断过程的连续发生，导致等轴晶核呈几何倍数进行增加。

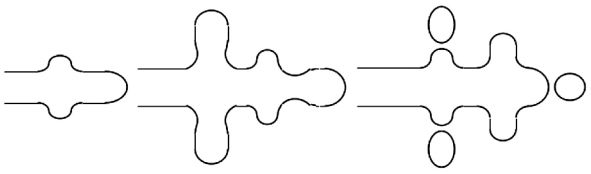


图3 凝固速度变化引起的树枝晶再熔解增殖示意图

2.3 晶核的长大过程

等轴晶核在钢液的流动下沉淀在液相穴末端，钢液中富集的C、Mn元素造成凝固前沿存在成分过冷区域。固体表面的凸起能够伸入到钢液中的过冷区域，沿着散热最快的方向优先生长，形成一些伸长的晶柱，析出C、Mn元素并释放出结晶潜热，在这些晶柱的侧面又会形成新的成分过冷区域，从而又生出一些侧枝，这些晶粒相互堆砌，最终形成等轴晶带[2]。

如图4所示，晶粒开始以轴向生长为主，主要进行枝干和侧枝的纵向延伸，遇到相邻晶粒的阻碍后则停止轴向生长，转而进行枝干和侧枝的横向生长。较细侧枝周围液相的C、Mn元素浓度相对较低，在界面层热溶质流的冲刷下，较细的侧枝在逐渐熔解，较粗侧枝和枝干逐渐增粗。随着较细侧枝的逐一熔解，侧枝间距逐渐增大[4]。

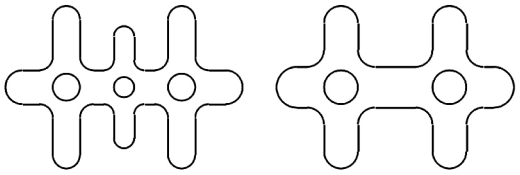


图4 等轴晶的侧枝熔解增粗示意图

2.4 疏松的形成过程

结晶器电磁搅拌强度偏低，钢水的冲刷力度不够，导致脱落的缩脖晶数量偏少；凝固末端电磁搅拌强度偏低，钢水的冲刷力度不够，导致缩脖晶和树枝晶的熔断能力下降，产生晶核的数量偏少，为晶粒的粗化创造了条件。

相互搭接的枝晶将糊状区进行分割，封闭空间内的钢液凝固后形成相应的小缩孔。受到表面张力的阻碍，钢液无法进入这些小缩孔，形成弥散分布的疏松。

二次冷却强度偏低导致凝固区间增大，C、Mn元素有充足的时间进行长距离扩散，枝干和侧枝能够得到充分的生长，释放出的结晶潜热和析出的C、Mn元素能够进一步延长晶粒的生长期，导致枝干和侧枝的异常粗大。增大的侧枝间能够容纳更多的钢液，因此，被封闭的钢液凝固后所产生的缩孔也相对增大，形成的缩松也相对比较明显。

3 改进措施

一方面通过增加晶核的数量来细化等轴晶，另一方面通过增大冷却强度来抑制等轴晶的长大，这样能够有效的减轻连铸坯中心疏松的程度。

采用低温浇注，增加参与再熔解增殖的缩脖晶数量，从而增加晶粒的数量。但浇注温度也不宜过低，否则会引起水口冻结和降低连铸坯的质量。

精炼末期加入少量的铝铁或钛铁，能够与钢水反应生成Al_2O_3或TiN等活性质点，凝固末端低温的钢液通过逐层浸润这些活性质点的表面缺陷，能够形成一部分晶核，从而增加晶粒的数量。

增大结晶器和凝固末端的电磁搅拌强度，增大

钢水的搅动力度，增加结晶器上细脖晶脱落的数量，促进细脖晶和树枝晶的再熔解增值过程，从而增加晶粒的数量。

适当增加二冷比水量，加大二次冷却区的强度，通过快速凝固来抑制选分结晶，阻止等轴晶粒因发生相互吞并而变得异常粗大，能够减轻连铸坯的疏松程度。

4　实施效果

经过对后续 Q345B 圆形连铸坯的生产跟踪，中心疏松得到明显改善，证明上述改进措施切实有效。

5　结论

(1) 激冷晶层的冷却强度大，钢液能够进行逐层凝固，组织非常致密; 柱状晶区的冷却强度较大，钢液趋向于逐层凝固，组织比较致密，不存在疏松。

(2) 结晶器电磁搅拌强度偏低，导致器壁上脱落的细脖晶数量偏少; 凝固末端电磁搅拌强度偏低，导致细脖晶和树枝晶的再熔解增殖过程不能充分进行，形核数量偏少。

(3) 糊状区内晶核数量偏少，导致晶粒充分长大，相互搭接的侧枝将糊状区分割，封闭空间内的钢液凝固后会形成小缩孔; 表面张力阻碍钢液的补入，形成弥散分布的疏松。

(4) 二次冷却强度偏低，C、Mn 元素有充足的时间进行扩散，导致枝干和侧枝的粗大; 随着较细侧枝的熔解，侧枝间可容纳的钢液增多，凝固后所产生的缩孔相应增大。

参　考　文　献

[1] 蔡开科. 连续铸钢 500 问 [M]. 北京: 冶金工业出版社，2002.

[2] 王久彬，潘秀兰，张富强. 连铸坯的凝固传输现象 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社，1999.

[3] 大野笃美著，朱宪华译. 金属凝固学 [M]. 北京: 机械工业出版社，1983.

[4] 高义民. 金属凝固原理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社，2010.

(上接第 34 页)

表 2　除磷试验结果

工艺单元	磷化废液原水	一级混凝池	二级混凝池	三级混凝池	除磷固定床
磷含量/(mg·l^{-1})	5 000 ~ 10 000	1 490 ~ 1 530	142 ~ 166	0.37 ~ 0.68	0.2 ~ 0.5
除磷效率/%		80.00	90.00	99.67	23.53

试验结果表明，采用混凝沉淀与除磷固定床结晶法技术处理包钢股份钢管公司磷化废水工艺可行。

采用该方法可以利用原处理工艺的一级、二级反应池作为一级、二级混凝池、利用原斜管沉淀池作为三级混凝池，利用原处理系统的板框压滤机处理污泥，降低投资成本。

3　结论

(1) 一级、二级混凝剂采用聚合氯化铝，三级混凝剂采用聚合氯化铝和钢渣微粉结合的方法，除磷固定床采用的晶种为钢渣颗粒。

(2) 磷化废液经一级混凝沉淀和二级混凝沉淀后与磷化清洗液混合后，再经过三级混凝沉淀和除磷固定床吸附过滤，整个试验期间，各部分运转稳定，出水水质稳定，且最终出水达标排放。

(3) 本工艺在原有工艺的基础上进行改进，原工艺的部分设施可以利用。同时采用钢渣微粉和钢渣滤料作为除磷介质，不仅有效提高除磷效率，同时实现了以废治废，有效降低水处理成本。

参　考　文　献

[1] GB13456—2012，钢铁工业水污染物排放标准 [S].

[2] 张继华. 化学沉淀法处理磷化废水 [J]. 工业水处理，2000，20(5): 43 - 44.

[3] 徐丰果. 废水化学除磷的现状与进展 [J]. 工业水处理，2003，23(5): 18 - 20.

[4] 俞栋. 污水除磷技术的现状与发展 [J]. 重庆工业高等专科学校学报，2004，19(1): 9 - 12.

[5] 赵庆祥. 晶析法脱磷的研究. [J]. 化工环保，1989，51 (1): 19 - 21.