15Mn 无缝钢管带状组织的形成原因分析

丰小冬,刘 金,姚晓乐

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 采用热轧方式生产的 15Mn 无缝钢管,管体存在明显的带状组织。对管体进行化学成分和金相检验,通过对连铸坯凝固过程和轧制过程的分析,得出连铸坯中的枝晶偏析是管体产生带状组织的主要原因,并提出相应的改进措施。

关键词: 无缝钢管; 连铸坯; 带状组织; 枝晶偏析

中图分类号: TG142. 1 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009 - 5438(2018) 01 - 0045 - 04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2018.01.016

Analysis on Formation Causes of 15Mn Seamless Steel Tube Banded Structure

FENG Xiao - dong, LIU Jin, YAO Xiao - le

(*Technical Center of Inner Mongolia Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel (Group) Corp.*, *Baotou* 014010, *Nei Monggol*, *China*)

Abstract: In the production of 15Mn seamless steel tube with hot rolling process, the pipe body has obvious banded structure. Through the chemical composition and metallographic examination of pipe body and the analysis of solidification process and rolling process for continuous casting billet, it is concluded that the dendritic segregation in continuous casting billet is the main reason for pipe body to produce banded structure, and the corresponding improvement measures are put forward.

Key words: seamless steel tube; continuous casting billet; banded structure; dendritic segregation

钢管公司生产的规格为 Φ339. 7 mm × 12. 0 mm 的 15Mn 无缝钢管,在金相检验中发现基体存在带状组织,取管样进行理化性能检测,以便分析带状组织产生原因。钢管生产工艺: 转炉冶炼→LF 炉精炼→圆坯连铸→管坯加热→菌式穿孔→MPM 连续轧管→定径→冷床冷却。

1 检验分析

取样状态: 热轧后的管样;

检验项目: 化学成分检验,高倍金相检验。

2 结果分析

2.1 化学成分检验

从化学成分的检测结果(如表 1 所示) 可看出,管样的化学成分均在设计要求范围内。

表 1 化学成分检测结果(质量分数) %

项目	C	Si	Mn	P	S	Al_t
管样	0. 15	0. 26	1. 41	0. 016	0. 009	0. 019
设计上限	0. 18	0. 37	1. 60	0. 025	0. 015	0. 040
设计下限	0. 12	0. 17	1. 30			

* **收稿日期**: 2017 - 05 - 01

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

中国知网 https://www.cnki.net

2.2 高倍金相检验

金相组织检验结果如图1所示，管体组织为铁素体+珠光体，晶粒度为9.5级，存在明显的带状组织，无明显脱碳层。

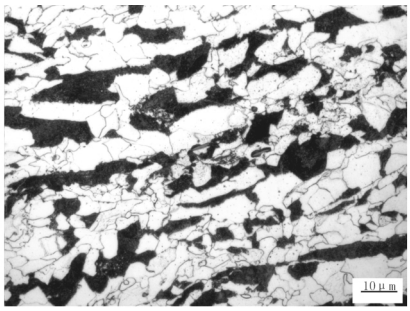


图1 管体的金相组织

从非金属夹杂物检验结果(如表2所示)可看出，基体的非金属夹杂物控制较好，硫化物、硅酸盐和球状氧化物的级别均为0.5级，氧化物的级别为1.0级，不存在大颗粒夹杂物。

表2 高倍金相检验结果

组织	晶粒度/级	脱碳层/mm	夹杂物/级			
			A	B	C	D
F+P	9.5	无	0.5	1.0	0.5	0.5

3 分析与讨论

钢液在冷却过程中以枝晶的方式进行凝固，枝晶内和枝晶间存在成分偏析，连铸坯的枝晶偏析是造成带状组织的根本原因[1]。

3.1 晶核形成的过程

形核过程是钢液中浮动的原子集团逐渐长大到一定的尺寸，形成固体质点(稳定的原子集团)，使周围的原子能够向上堆砌的过程。形核的前提条件是结构起伏、能量起伏和一定的过冷度，主要有匀质形核和异质形核两种形式[2]。

匀质形核是过冷的钢液借助能量起伏而形成新相晶核的过程，钢液只有过冷到一定温度后才能形成大量的固体晶核。晶核生长较快，放出结晶潜热导致周围钢液温度回升，再选择在较小的过冷度下保持生长。

异质形核是钢液湿润固体质点表面而形成新相晶核的过程，结晶器内壁、活性质点和难熔质点都能够作为形核的依托。活性质点(如Al_2O_3)与钢的晶体结构相似，难熔质点(如TiN)的表面存在细微的凹凸或裂纹[2]。

从匀质形核和异质形核的综合比较(如表3所示)可看出，异质形核优先于匀质形核。

表3 匀质形核和异质形核的综合比较

形核	需要表面能	需要行核功	需要过冷度	临界晶核半径	是否需要依附	能否自发	发生顺序
匀质形核	较大	较大	较大	较大	不需要	自发	较晚
异质形核	较小	较小	较小	较小	需要	非自发	较早

3.2 晶体长大的过程

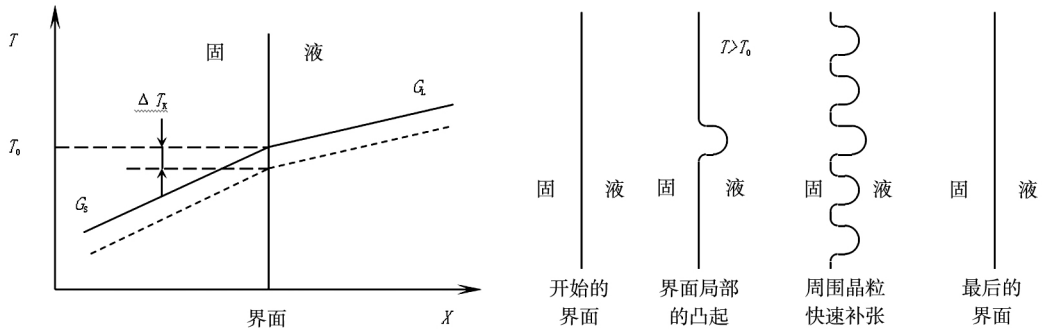
晶体一旦形成且稳定存在后将快速长大，方式有连续生长、侧向生长和缺陷生长。由于存在结构起伏和能量起伏，钢液中的原子排列不规则、交界面粗糙，可向任意方位进行生长，按照发生顺序分正温度梯度下的晶体长大和负温度梯度下的晶体长大。

3.2.1 正温度梯度下的晶体长大过程

如图2所示，在正温度梯度下晶体表现为均匀长大。远离固液交界处的钢液温度相对较高，固体不具备深入钢液中向前生长的条件，只能等热量经过固体逐步散失，在固液交界面前获得一定的过冷度后，固体才能向前生长。散热条件控制着晶体长大的速度，晶体表面一些偶然的凸起伸入到钢液中过冷度较小的地方，生长速度立即减缓。局部凸起随着周围晶体的快速补长而失去尖端优势，所以固体表面宏观上是平滑的[2]。

进入结晶器的钢液受到器壁的激烈冷却而形成大量晶核，并迅速凝固成细小的等轴晶，形成圆铸坯的激冷晶层。由于冷速快，溶质元素来不及扩散和析出，因此，激冷晶层的化学成分与钢液的成分接近，不存在成分偏析。

中国知网 https://www.cnki.net



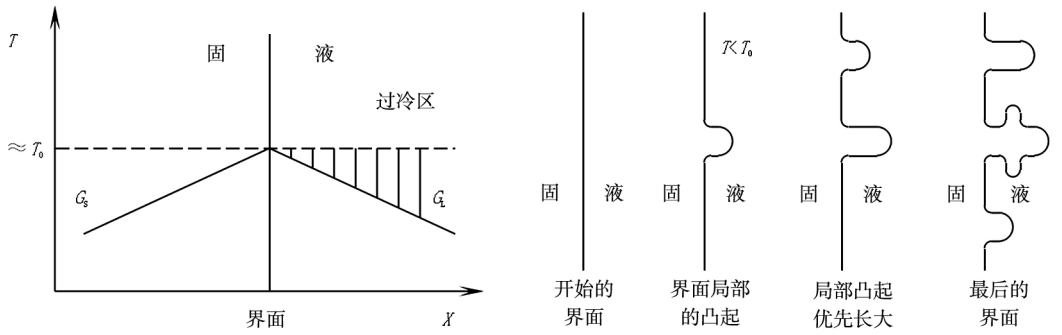
（a）界面前沿正温度梯度　　（b）界面上局部凸起的消失

图 2　正温度梯度下晶体的均匀长大示意图

3.2.2　负温度梯度下的晶核长大过程

如图 3 所示，在负温度梯度下晶体表现为优先长大。远离固液交界处的钢液温度相对较低，固体具备深入钢液中向前生长的条件，热量能够通过固体和液体同时散失。固体表面上的偶然凸起能够伸入到钢液中的过冷区域，沿着传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造成负温度梯度的分布，这又会生出新的分枝。这些晶轴彼此交错，构成树枝状晶体，简称枝晶[2]。

激冷晶层减慢了传热速度，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。受到相邻晶粒的阻碍，枝晶得不到充分的发展，这种柱状晶是大体沿同一方向伸展的树枝晶的集合组织。



（a）界面前沿负温度梯度　　（b）界面上局部凸起部分发展成树枝晶

图 3　负温度梯度下晶体的优先长大示意图

3.3　枝晶偏析的形成过程

C、Mn 元素在固相中和液相中的溶解度有差异，树枝状晶体随着凝固界面的推进而长大，期间不断析出的 C、Mn 元素被排挤到后凝固的枝晶间，造成在枝晶内的含量低于枝晶间的含量[1]。结晶器电磁搅拌强度偏低，运动的钢水不能有效打碎树枝晶；凝固末端电磁搅拌强度偏低，不能将糊状区富集 C、Mn 元素的钢液分散到周围区域，造成中心偏析[3]。二次冷却强度偏低，外围不断析出的 C、Mn 元素有充足的时间向钢液芯部进行扩散，选分结晶进行的比较充分，造成圆铸坯中心的 C、Mn 元素含量最高[3]。

3.4　带状组织的形成过程

C 元素在奥氏体中的扩散速度相对要明显快于 Mn 元素，在圆铸坯的加热过程中，C 元素优先达到相对均匀，但 Mn 元素不能均匀分布。由于 C、Mn 元素在固相中的扩散速度非常缓慢，因此，枝晶偏析

中国知网　https://www.cnki.net

大部分能够继续存在[4]。

固溶在奥氏体中的C、Mn元素能够降低奥氏体向铁素体的转变温度A_3，枝晶内和枝晶间的转变温度A_3出现差别。热轧后的钢管从奥氏体区开始冷却，温度降到A_3时枝晶内开始析出铁素体，析出的C、Mn元素向枝晶周围扩散，温度降到低于A_3时在枝晶周围仍然能够析出铁素体，温度降到A_1、枝晶间达到共析成分时形成珠光体[4]。铁素体和珠光体沿带状分布，导致钢管表现出各向异性，横向力学性能降低。

在斜轧穿孔过程中，轧辊对管坯产生巨大的轧制扭矩作用，管坯表面层受三向压应力作用，管坯中间的塑性区不仅受切应力作用，还受到切向、轴向拉应力作用。金属在应力作用下发生塑性变形，带状组织表现为螺旋状，而轧管过程和定径过程均属于纵轧，随着钢管的纵向延伸，螺旋角度在变小。

4 改进措施

(1) 采用低温浇注方式，适当减小钢水的过热度，能够抑制柱状晶的生长、增加等轴晶所占比例，从而增大等轴晶带的宽度，达到细化晶粒、提高圆铸坯内部质量的目的。

(2) 在浇注时向钢液中加入少量的铁粉、铝铁或钛铁合金粉，一方面能够降低周围钢水的温度，另一方面能够与钢水反应生成Al_2O_3、TiN等质点，促进异质形核，增加晶粒数量，达到细化晶粒、改善成分偏析的目的。

(3) 适当增大结晶器电磁搅拌工艺的强度，保证钢水能够有效打碎树枝晶，增加晶粒数量，达到细化晶粒、改善成分偏析的目的。

适当增大凝固末端电磁搅拌工艺的强度，保证钢水能够将糊状区富集C、Mn元素的钢液及时分散到周围区域，促使成分和温度均匀分布，以减轻中心偏析程度。

(4) 适当增加二冷比水量，加快二次冷却的速度，使选分结晶不能充分进行，快速凝固使C、Mn元素来不及析出和扩散，能够减轻圆铸坯的成分偏析。

(5) 在凝固末端采用轻压下工艺，能够有效打碎树枝晶，增加钢液的流动性，稀释糊状区富集的C、Mn元素，以减轻圆铸坯的成分偏析。

(6) 适当提高圆铸坯的加热温度或延长保温时间，通过C、Mn元素的充分扩散达到奥氏体成分的相对均匀分布，以减轻枝晶偏析对相变的影响。

(7) 加快钢管热轧后的冷却速度，组织相变时析出的C、Mn元素来不及长距离扩散，能够细化晶粒、缩短带状组织的间距，以便于带状组织的消除。

5 结论

(1) 在正温度梯度下，固体不能深入钢液中向前生长，只能通过均匀生长而成为等轴晶。由于冷却强度非常大，圆铸坯能够逐层进行凝固，C、Mn元素来不及扩散和析出，激冷晶层的化学成分与钢液的化学成分接近，不存在成分偏析。

(2) 在负温度梯度下，固体能够伸入到钢液中的过冷区域，通过优先生长而成为树枝晶，径向的稳定热流导致柱状晶的优先成长，相邻的晶粒阻碍枝晶的发展，不断析出的C、Mn元素，导致柱状晶内的化学成分低于钢液的化学成分。

(3) 结晶器电磁搅拌强度偏低，导致运动的钢水不能打碎树枝晶。凝固末端电磁搅拌强度偏低，导致糊状区富集C、Mn元素。二次冷却强度偏低导致选分结晶能够充分进行，圆铸坯发生枝晶偏析，C、Mn元素在枝晶内的含量低于枝晶间的含量。

(4) 在圆铸坯的加热过程中，枝晶偏析大部分能够继续存在，Mn元素的不均匀分布导致枝晶内和枝晶间的转变温度A_3出现差别，增加了铁素体的析出量，枝晶及周围形成铁素体，枝晶间形成珠光体，铁素体和珠光体沿带状分布。

(5) 斜轧穿孔过程中管坯受到轧制扭矩的作用，金属在应力的作用下发生塑性变形，带状组织呈现一定的螺旋状，轧管过程中钢管发生纵向延伸，螺旋角度在变小。带状组织使钢管显现出各向异性，降低横向力学性能。

参 考 文 献

[1] 朱施利，胡文豪. 40MnB钢偏析形成带状组织的机理研究[J]. 物理测试，2009，27(6)：9.

[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] 蔡开科. 连续铸钢500问[M]. 北京：冶金工业出版社，2002.

[4] 刘宗昌，李文学，任慧平，等. 材料组织结构转变原理[M]. 北京：冶金工业出版社，2006.

中国知网 https://www.cnki.net