

## WB36 厚壁无缝钢管低倍组织气泡分析及工艺研究

夏云峰,周仲成,胡永平,林 雨

(内蒙古北方重工业集团有限公司特钢事业部,包头 014033)

**摘要:**采用扫描电镜、磁粉和超声探伤以及性能测试等方式对 WB36 厚壁无缝钢管低倍“气泡”形成的原因和实际影响进行了分析研究。结果表明:低倍组织气泡产生的原因主要有脱氧不良、浇注温度高、钢包和耐火材料受潮等,气泡在宏观下呈短线状暗色条纹,微观下为圆形或椭圆形孔洞,主要分布于对应钢锭头部接近冒口端部的钢管近内壁至 1/2 壁厚处。轻微的气泡采用磁粉、渗透、超声波探伤均无法检出,对钢管的室温力学性能影响较小。WB36 钢浇注温度控制在 1 590 ℃ 以下,保证 VD 精炼 67 Pa 保持时间不少于 15 min、发热剂和保温材料水分含量小于 0.1% 能够有效防止低倍组织气泡缺陷产生。

**关键词:**WB36 无缝钢管;低倍组织;气泡;性能

## Bubble Analysis of Macrostructure of WB36 Thick Wall Seamless Steel Pipe and Process Research

Xia Yunfeng, Zhou Zhongcheng, Hu Yongping, Lin Yu

(Special steel division, Inner Mongolia North Heavy Industry Group Co., Ltd., Baotou 014033)

**Abstract:** The causes and practical effects of macrostructure “bubbles” in WB36 thick wall seamless steel pipe are analyzed and studied by means of scanning electron microscope, magnetic particle and ultrasonic flaw detection and performance test. The results show that the main reasons for the formation of macrostructure bubbles are poor deoxidation, high pouring temperature, and damp of ladle and refractory materials etc, the bubbles are short linear dark stripes at the macro, and circular or elliptical holes in the micro, it is mainly distributed near the inner wall to 1/2 wall thickness of the steel pipe corresponding to ingot head near hot top. Slight bubbles cannot be detected by magnetic particle, penetration and ultrasonic flaw detection, which has little impact on the mechanical properties of the steel pipe at room temperature. With controlling casting temperature of WB36 steel below 1 590 ℃, holding time of VD refining at 67 Pa should not be less than 15 min, and moisture content of heating agent and thermal insulation material less than 0.1%, the generation of macrostructure bubble defects can be effectively prevented.

**Key Words:** WB36 Seamless Steel Pipe; Macrostructure; Bubble; Performance

WB36 钢是德国在 20 世纪 30 年代开发的一种韧性良好、耐高温,具有良好可焊性的 Ni-Cu-Mo 型低合金结构钢,该钢种在美国 ASME 标准中被命名为 1.15Ni-0.65Cu-Mo-Nb,GB/T5310-2017 高压锅炉用无缝钢管标准中对应牌号为 15Ni1MnMoNbCu。由于加入了 Ni、Mo、Nb、Cu 等合金元素,起到了固溶强化、细晶强化及沉淀强化的效果,显著提高了该钢的高温强度。WB36 钢稳定使用温度可达 400 ℃ 以上,可用于制造工作温度在 500 ℃ 以下的临界及超临界机组中高温、高压部件,如给水系统、集箱、锅炉气包等<sup>[1-3]</sup>。在超临界机组中,WB36 钢是主给水管道的首选钢种。

WB36 厚壁无缝钢管生产检验过程中,经酸浸的低倍试片上经常出现沿钢管周向分布的短暗色线

条,暗色线条主要分布于钢管近内壁至 1/2 壁厚处,对应于钢锭头部从冒口端至水口端逐渐减少直至完全消失。为分析该缺陷产生的原因,判定其对钢管性能的影响,本文通过扫描电镜、磁粉和超声探伤以及性能测试等方式对 WB36 厚壁无缝钢管低倍组织缺陷进行深入分析,为后续该类低倍组织问题处理提供参考依据。

### 1 试验材料及方法

本试验的试验材料为毛坯规格  $\Phi 740 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 6\,000 \text{ mm}$  的大口径厚壁无缝钢管,钢管的制造工艺为超高功率电弧炉冶炼、LF/VD 精炼、铸锭-加热制坯-坯料加工-挤压成型-去应力退火-热处理-理化检测。所用钢锭锭型为 13.5 t,总变

表1 WB36 无缝钢管的化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of WB36 seamless steel pipe/%

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	Nb	P	S	Al	H	O	N
0.14	0.29	1.05	0.20	0.31	0.002	1.13	0.54	0.02	0.011	0.001	0.013	0.0005	0.0018	0.0050

形比为5.8。试验用 WB36 无缝钢管化学成分检测结果见表1。

钢管取样抛光酸洗后肉眼观察低倍组织形貌,挑出存在暗色线条缺陷的试片,从缺陷部位取样,通过扫描电镜观察缺陷部位微观组织,检测拉伸和冲击性能,同时对缺陷试片进行磁粉和超声探伤,分析缺陷的性质及其影响。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 低倍组织检测

WB36 无缝钢管经热处理后从对应钢锭冒口端部的钢管端部切除 200 mm 后锯切一个 20 mm 厚环形试片,破开成若干弧形试样,机加工磨光至表面粗糙度  $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$ ,放入 70 ~ 80 °C 的盐酸水溶液中浸泡 30 min 后取出,热水冲洗并吹干后肉眼观察低倍组织。WB36 无缝钢管低倍组织检测照片如图1。

从图1可以看到,试片近内壁至 1/2 壁厚处有多处沿钢管周向分布的短线状暗色条纹,部分条纹

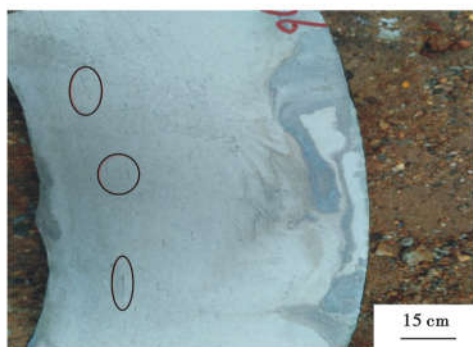


图1 WB36 无缝钢管低倍组织形貌

Fig. 1 Macrostructure morphology of WB36 seamless steel pipe

上有肉眼可见的针孔状缺陷。

为了摸清缺陷整体形貌和纵向分布情况,从其中一支钢管复试余料上切取 2 条长 300 mm、宽 40 mm 纵向试样,内外壁加工平整后进行低倍组织检测(检测时每条切成 2 半),检测结果未能发现肉眼可见缺陷。另外选取 3 支冒口端存在上述低倍组织缺陷的钢管,从水口端切齐后的切片上进行低倍组织检测,亦未发现上述缺陷。

### 2.2 扫描电镜分析

从缺陷集中部位切取 2 块横向试块经超声波清洗后在 ZEISS EVO10 电子扫描显微镜下进行微观形貌分析,从中发现少量圆形孔洞,孔洞形状规则,内壁光滑,部分孔洞呈线状分布。缺陷电子扫描微观形貌如图2。

对孔洞中心和边缘部位进行能谱分析,判定孔洞中心主要为氧化铝,边缘主要为硫化物夹杂,孔洞内部未见明显脱碳现象。对缺陷附近进行线扫描,未发现明显的成分偏析现象。图3为 WB36 无缝钢管缺陷处的能谱分析。

### 2.3 磁粉及超声波检测

在缺陷较为集中的低倍组织试片上进行磁粉探伤,结果未发现任何异常。再次对该试片进行渗透探伤,仍未发现异常。在缺陷试片上进行横、纵向超声波探伤,均未发现异常,说明缺陷深度普遍较浅,且宏观尺寸较小。图4为 WB36 钢管低倍组织试片磁粉探伤照片。

### 2.4 力学性能试验

为判定该缺陷对力学性能的影响,选取两个试

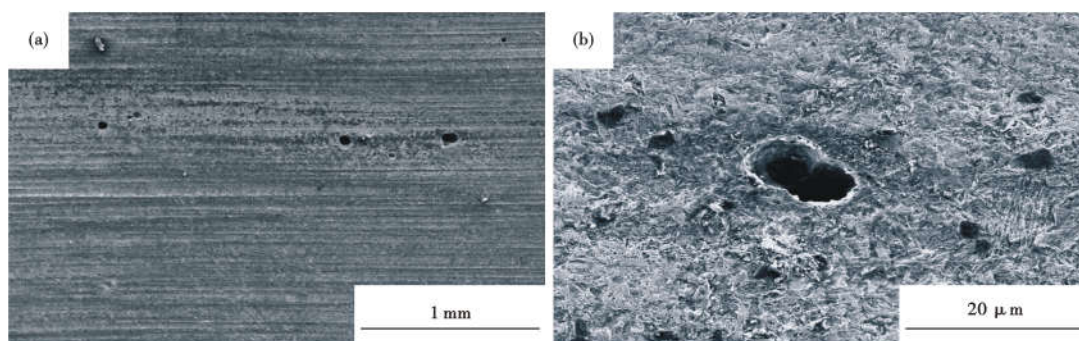


图2 WB36 无缝钢管低倍组织缺陷部位微观形貌

Fig. 2 Micro morphology of macrostructure defects of position WB36 seamless steel pipe

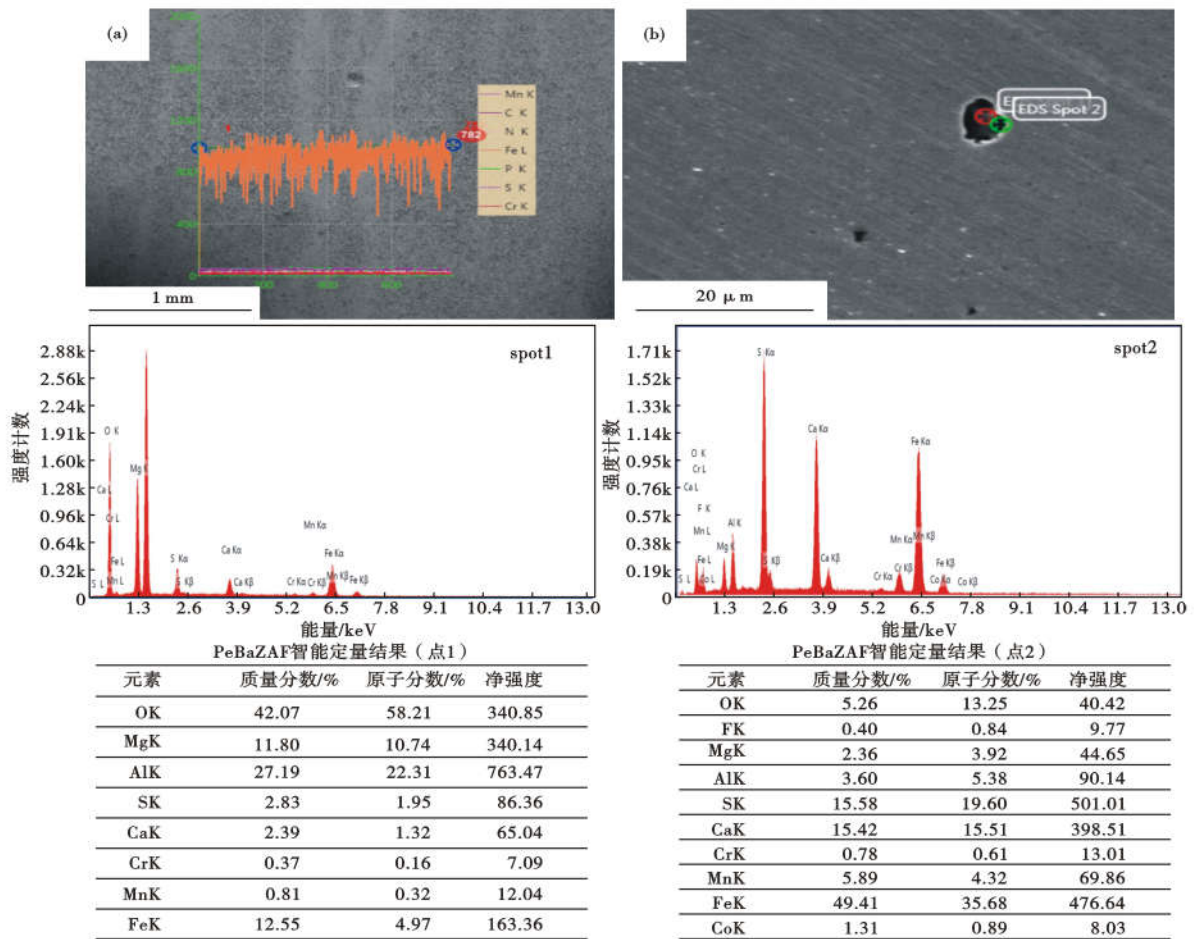


图 3 WB36 无缝钢管低倍缺陷部位线扫描和能谱分析结果

Fig. 3 Line scanning and potential energy spectrum analysis results of macro defects in WB36 seamless steel pipe



图 4 WB36 钢管低倍组织缺陷试片磁粉探伤照片

Fig. 4 Photo of magnetic particle flaw detection for WB36 steel pipe macrostructure defect test piece

片,分别在缺陷较多部位和无缺陷部位各取两个常温拉力和两个常温 V 型冲击试样,试验结果见表 2。

从试验对比情况来看,该缺陷对室温拉伸性能影响不大,室温冲击性能略有下降,下降幅度为 8.5% ~ 22.4%。

### 2.5 结果分析讨论

缺陷在宏观下呈短线状暗色条纹,电镜下放大 500 倍后为圆形孔洞,孔洞形状规则,内壁光滑,孔洞内部伴有微小可见的夹杂物。这与《结构钢低倍组织缺陷评级图》GB/T1979-2001 标准中内部气泡特征基本吻合,按照标准对内部气泡产生原因的释为钢中含有较多气体。钢水在凝固过程中,钢中

表 2 WB36 无缝钢管力学性能检测结果

Table 2 Test results of mechanical properties of WB36 seamless steel pipe

试样号	缺陷情况	取样部位	$R_{p0.2}$ /MPa	$R_m$ /MPa	A/%	Z/%	冲击功/J
1	无气泡	1/2 壁厚处	529	656	25.0	72	199.5
2	有气泡	1/2 壁厚处	535	656	24.0	72	182.7
3	无气泡	1/2 壁厚处	512	631	28.5	72	232.2
4	有气泡	1/2 壁厚处	535	637	24.5	72	170.0

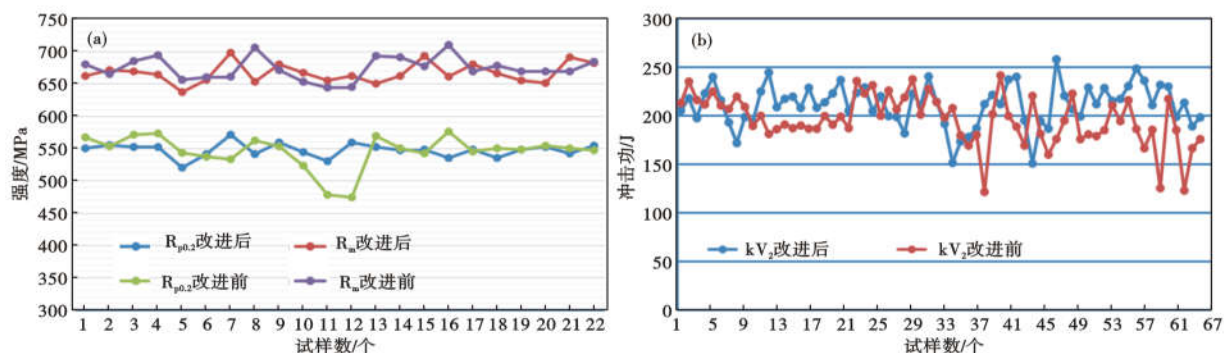


图 5 工艺改进前后 WB36 无缝钢管室温力学性能对比图, (a) 室温拉伸; (b) V 型缺口冲击

Fig. 5 Comparison of mechanical properties of WB36 seamless steel pipe at room temperature before and after process improvement: (a) tensile at room temperature; (b) V-notch impact

的氢、氧、氮和碳元素在凝固界面富集, 当其形成的  $CO$ 、 $H_2$ 、 $O_2$  等气体的总压力大于钢水静压力和大气压力之和时就会形成气泡, 在钢锭凝固前气泡会自发上浮, 在上浮过程中会不断吸附周围的非金属夹杂物<sup>[4]</sup>, 如果浇注时钢锭冒口保温效果不好, 钢锭冒口开始凝固前这些气泡未能及时从钢中逸出, 最终会形成缺陷保留在钢中, 由于氧化铝类夹杂凝固温度较高, 会率先在气泡中心凝固形成核心, 而硫化物夹杂随后凝固附着在氧化铝夹杂周围<sup>[5-6]</sup>。气泡主要集中在钢锭冒口端对应的钢管上, 水口端对应的钢管未发现, 且通过超声波探伤难以检出, 说明气泡深度较浅, 在钢锭内部移动距离较短, 未形成纵向通道, 由此可判定气体主要产生于钢锭冒口部位。

脱氧不良、浇注温度高、钢包和耐火材料受潮等, 都会导致钢中气体含量增加, 促使气泡缺陷产生<sup>[7]</sup>。由于该批 WB36 钢管低倍组织气泡均集中在钢锭冒口端对应的钢管靠近壁厚中心部位, 且缺陷宏观尺寸小, 初步判定其主要是由于钢锭冒口发热、保温材料受潮所致, 钢锭冒口保温材料受潮导致冒口部分凝固过程吸气形成气泡, 在钢锭中沿凝固方向移动, 最终在心部富集, 在挤压变形作用下, 部分气泡呈带状分布, 经酸蚀后在低倍下呈暗色条带。经对同批次所有碳化稻壳和绝热板等材料进行分析检测发现, 冒口保温所用中空绝热板水分含量达到 10%, 远超出了 0.1% 规定值, 将绝热板经 500 ~

600 °C 高温烘烤充分干燥至水分含量 < 0.1%, 浇注温度控制在 1 590 °C 以下, 保证 VD 精炼 67 Pa, 保持时间不少于 15 min, 此后连续生产了四炉 22 支钢管, 低倍试片均未发现气泡缺陷。工艺改进前后 WB36 无缝钢管室温拉伸和冲击性能对比如图 5。对比可见, 工艺改进后 WB36 无缝钢管室温拉伸性能与工艺改进前并无明显差异, 但室温夏比 V 型缺口冲击总体上略有提升, 平均提高幅度为 5.6%, 由于在瞬时冲击载荷的作用下, 气泡的存在改变了试样受力分布状态, 在局部形成了应力集中, 增加裂纹敏感性, 导致冲击性能下降<sup>[8]</sup>。

### 3 结论

(1) 低倍气泡在宏观下呈短线状暗色条纹, 微观下为圆形或椭圆形孔洞。其产生的原因主要有脱氧不良、浇注温度高、钢包和耐火材料受潮等。WB36 钢浇注温度控制在 1 590 °C 以下, 保证 VD 精炼 67 Pa 保持时间  $\geq 15$  min、发热剂和保温材料水分含量 < 0.1%, 能够有效防止低倍组织气泡缺陷产生。

(2) 气泡形成后在上浮过程中会不断吸附周围的非金属夹杂物, 其中心部位通常为熔点较高的氧化铝类夹杂, 而边缘部位则为熔点相对较低的硫化物夹杂。气泡微观尺寸普遍较小, 通常在 100  $\mu m$  以下, 轻微的低倍气泡采用磁粉、超声等无损检测手段难以检出, 对钢管的整体力学性能影响较小。

### 参考文献

- [1] 刘志超, 朱锦波, 李学军. 淬火、回火后厚壁 WB36 钢管径向力学性能分析[J]. 热加工工艺 2016, 45(18), 232-234.
- [2] 凌仲秋. WB36 高钢管疑似珠光体组织分析[J]. 特钢技术 2019, 25(99), 18-21.
- [3] 王 学, 常建伟, 黄关政, 等. WB36 钢多层焊接头近缝区网状组织研究[C]. 材料热处理学报 2009, 30(1), 183-187.
- [4] 贾建平. 降低连铸坯内部缺陷技术的研究与应用[J]. 冶金设备 2015, 8(4), 69-73.
- [5] 焦 红, 吕 静, 李凤安, 等. 转炉优质钢顶锻质量与低倍缺陷分析及控制[J]. 山东冶金 2009, 31(1), 35-38.
- [6] 谭振宇. 20 管钢铸坯低倍缺陷控制[J]. 炼钢 2006, 22(2), 14-22.
- [7] 晁月成, 谷成荫. 钢坯的表面裂纹缺陷分析与控制[J]. 特钢技术 2013, 19(75), 23-30.
- [8] 张龙群. 30CrNi3MoV 锻件的典型缺陷分析研究[C]. 安徽工业大学硕士学位论文, TG142.1, 2018, 672.