

风电法兰用钢 S355NL 探伤缺陷的分析和工艺改进

闻小德 吕安明 刘利 刘兵

(山东钢铁股份有限公司莱芜分公司特钢事业部,莱芜 271105)

摘要 风电法兰用钢 S355NL(/% :0.14~0.48C,0.15~0.40Si,1.30~1.60Mn,≤0.013P,≤0.005S,0.04~0.12V,0.03~0.05Nb,≤0.009Ti,≤0.30Cr,≤0.50Ni,≤0.20Cu,≤0.10Mo,≥0.020Alt)的冶金流程为 100 t UHP EAF-LF-VD-Φ650 mm,Φ800 mm 坯 CC 工艺。该钢 1~2 mm 裂纹探伤不合格的分析结果表明,其主要原因为氧的铝类夹杂和铸坯疏松缺陷所致。通过在 LF 终点喂钙线 0.45 kg/t,VD 处理时间由原 25 min 增至 27 min,降低钢中 [N] 至 $78 \times 10^{-6} \sim 82 \times 10^{-6}$, [H] 为 $1.1 \times 10^{-6} \sim 1.3 \times 10^{-6}$, [O] 为 $12 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6}$, 软吹氩气流量由 2×25 L/min 降至 2×20 L/min,时间 ≥12 min,降低钢水过热度 5 °C 等工艺措施,使铸坯锻造后的探伤合格率超过 99%。

关键词 风电法兰用钢 S355NL 超声波探伤 裂纹 工艺改进

Analysis on Nondestructive Examination Defects of Steel S355NL for Wind Power Flange and Process Improvement

Wen Xiaode, Lü Anming, Liu Li and Liu Bing

(Special Steel Business Division, Laiwu Branch, Shandong Iron and Steel Co Ltd, Laiwu 271105)

Abstract The metallurgical flowsheet for steel S355NL for wind power flange (/% : 0.14~0.48C, 0.15~0.40Si, 1.30~1.60Mn, ≤0.013P, ≤0.005S, 0.04~0.12V, 0.03~0.05Nb, ≤0.009Ti, ≤0.30Cr, ≤0.50Ni, ≤0.20Cu, ≤0.10Mo, ≥0.020Alt) is 100 t UHP EAF-LF-VD-Φ650 mm, Φ800 mm bloom CC process. The results of analysis on unqualified steel by nondestructive examination due to 1~2 mm cracks show that cracks are mainly caused by alumina inclusions and casting bloom porosity defects. By the process measures including feeding calcium wire 0.45 kg/t at end LF, increasing VD treading time to 27 min from original 25 min, decreasing the [N] in steel to $78 \times 10^{-6} \sim 82 \times 10^{-6}$, the [H] to $1.1 \times 10^{-6} \sim 1.3 \times 10^{-6}$ and the [O] to $12 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6}$, decreasing the soft argon blowing rate to 2×20 L/min from 2×25 L/min, time ≥12 min and decreasing the liquid overheating extent by 5 °C, the qualified ratio of steel forged from casting bloom is more than 99%.

Material Index Steel Wind Power Flange, S355NL, Ultrasonic Nondestructive Examination, Cracks, Process Improvement

S355NL 铸坯作为风电法兰用钢,要求有较好的综合力学性能、耐低温性能,良好的焊接工艺性能和较好的耐腐蚀性能^[1],其化学成分见表 1,锻件均要求探伤交货。莱钢 S355NL 铸坯生产工艺流程为:配料→100 t UHP EAF→120 t LF→120 t VD→CC→缓冷,供国内锻造厂的铸坯尺寸主要有 Φ650 mm、Φ800 mm 两个规格,其锻件尺寸为(Φ 2 000~Φ 3 000)mm×(Φ 2 200~Φ 3 900)mm×(100~200)mm,锻件制造流程为:铸坯下料→加热→制坯→二次加热→碾环→缓冷→粗加工→探伤→热处理→精加工→二次探伤→成品,但锻造成风电法兰后超声波探伤,出现了探伤不合格问题,超声波探伤显示为

密集型缺陷。通过采取超声波探伤定位缺陷、取样、制样、低倍、高倍及扫描电镜检验等一系列手段,确定了缺陷产生原因,并提出了生产工艺改进措施,最终提高了锻件的探伤合格率。

1 取样检测分析

1.1 缺陷探伤定位及低倍检验

对探伤不合格的风电法兰钢进行超声波复探和缺陷准确定位。在缺陷中心处沿径向切开,制取低倍试样,并采用 1:1 的硝酸溶液浸湿 4 h,进行缺陷宏观形貌观察。由图 1 试样纵截面的低倍照片可见,缺陷呈现为闭合的细短裂纹,裂纹长度 1~2 mm,裂

表 1 S355NL 钢的化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of steel S355NL / %

标准	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	Cr	Ni	Cu	Mo	Alt
LCJX09-2004	0.14~0.48	0.15~0.40	1.30~1.60	≤0.013	≤0.005	0.04~0.12	0.03~0.05	≤0.009	≤0.30	≤0.50	≤0.20	≤0.10	≥0.020

纹取向垂直于法兰的内、外圆柱面。

1.2 高倍检验

在低倍试样的缺陷部位制取高倍试样进行金相检验,见图2。从高倍照片观察,缺陷为细短裂纹,裂纹长度1~2 mm,裂纹两侧无脱碳现象,钢基体组织正常。

1.3 扫描电镜及能谱分析

对1#试样进行扫描电镜和能谱分析检验,在缺陷处发现有夹杂物缺陷。试样扫描电镜检验和能谱分析结果见图3(a,b,c)。由分析结果可知,裂纹内夹杂主要为Al、O元素,含有少量的Fe、Ca元素,为典型的氧化铝类夹杂物。

对2#试样进行扫描电镜和能谱分析检验结果见图4所示。能谱分析结果表明,裂纹内主要是Fe、O成分,含有微量的Mn、S、Si等元素。

2 原因分析及改进措施

2.1 原因分析

氧化铝类夹杂物的形成十分复杂,涉及冶炼、精炼、浇注各个过程及这些过程中使用的辅料^[2-3]。针对探伤不合格炉次,查找炼钢和连铸工序原始记录,未发现过程异常情况,气体检验数据显示 $[O] 12.6 \times 10^{-6}$ 、 $[N] 78 \times 10^{-6}$ 、 $[H] 1.4 \times 10^{-6}$,说明铸坯气体含量正常,在标准范围内。1#试样的氧化铝类夹杂物极有可能是铝脱氧后钢水中的细小 Al_2O_3

夹杂物未去除干净。2#试样裂纹内夹杂物为FeO,含有微量的Mn、S、Si元素,主要是铸坯凝固过程中的选分结晶造成的。S、Mn等易偏析元素会在凝固末期向钢中的疏松、偏析等薄弱部位聚集,形成较多的杂质元素,判断2#试样为疏松缺陷。

氧化铝类夹杂属于脆性夹杂物,与钢基体相比呈硬脆性^[4]。热加工时该类夹杂物形状和尺寸都不变化,但可能沿加工方向成串排列或成点链状。由于脆性夹杂与钢基体的流动能力不同,不能随基体材料变形,其与基体界面的结合能力很差,两界面非常容易脱开并形成微裂纹^[5-6],导致探伤不合格。

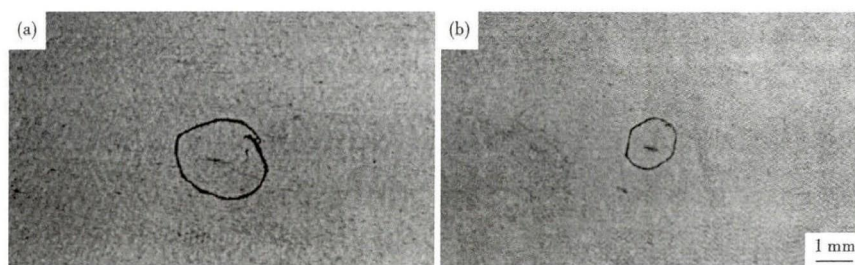


图1 酸浸低倍试样形貌:(a)1#试样;(b)2#试样

Fig.1 Morphology of macrostructure of acid-etching specimen No1 (a) and No2 (b)

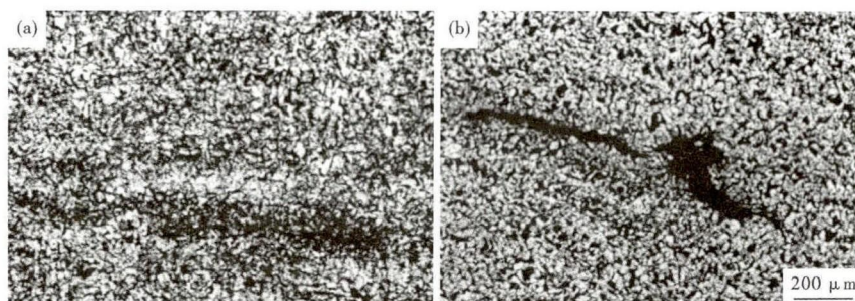


图2 缺陷高倍组织形貌:(a)1#试样;(b)2#试样

Fig.2 Morphology of crack and near area microstructure of specimen No1 (a) and No2 (b)

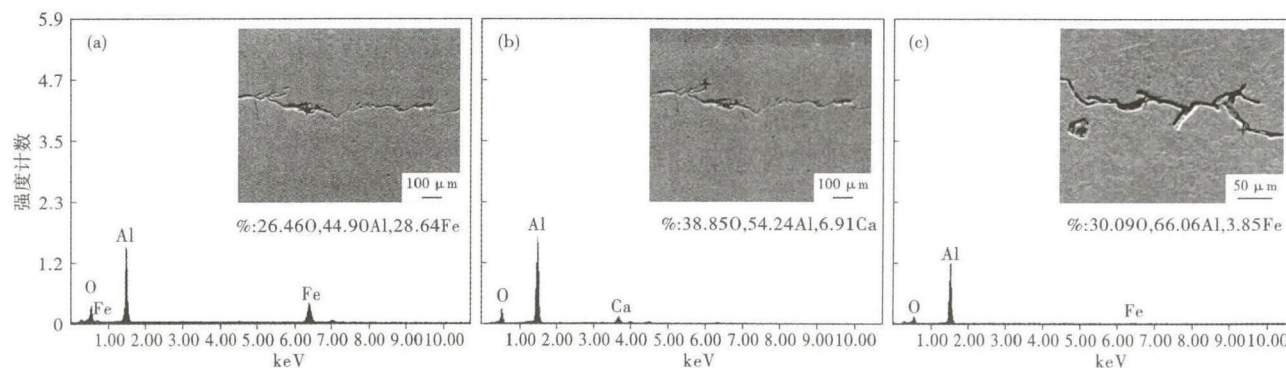


图3 (a)(b)(c)1#试样裂纹处夹杂物形貌

Fig.3 (a) (b) (c) Morphology of inclusions at cracks of specimen No1

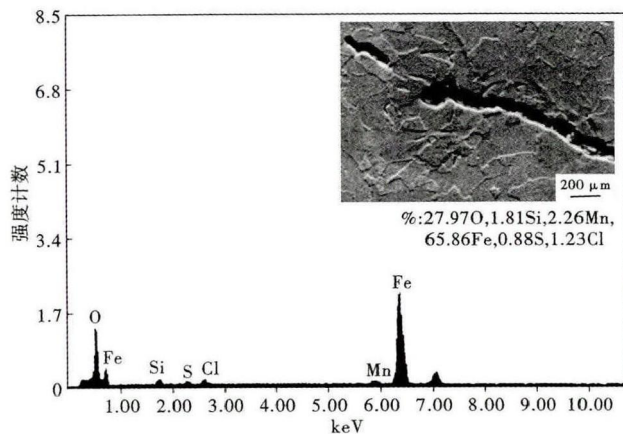


图 4 2#试样裂纹处夹杂物形貌

Fig. 4 Morphology of inclusions at cracks of specimen No2

而疏松是选分结晶造成的铸坯常见缺陷,加上 S、Mn 等元素容易在此部位偏聚,容易在锻造过程中诱发裂纹的萌生和扩展,从而导致锻件探伤不合格。

2.2 改进措施

2.2.1 炼钢工序

稳定钢水成分控制,加强 P、S 元素的稳定控制,降低 P、S 含量,由改进前的 0.007% ~ 0.012% P、0.003% ~ 0.012% S 降低到 0.007% ~ 0.009% P、0.003% ~ 0.005% S。

保证钙处理效果,钢水在 LF 出站前喂入钙线 0.45 kg/t_钢 进行钙处理,除浇次第 1 炉破空后喂入 0.1 kg/t_钢 钙线外,其他炉次 VD 破空后禁止喂入合金线及调整成分。

稳定铸坯气体含量控制,钢水的真空处理时间由改进前 25 min 增加到 27 min,钢中气体含量由工艺改进前的 $82 \times 10^{-6} \sim 92 \times 10^{-6}$ [N]、 $1.4 \times 10^{-6} \sim 1.6 \times 10^{-6}$ [H]、 $14 \times 10^{-6} \sim 18 \times 10^{-6}$ [O] 降低到工艺改进后 $78 \times 10^{-6} \sim 82 \times 10^{-6}$ [N]、 $1.1 \times 10^{-6} \sim 1.3 \times 10^{-6}$ [H]、 $12 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6}$ [O]。

采用软吹操作对钢水进行弱搅拌净化处理,氩气流量由原来的 2×25 L/min 调整为 2×20 L/min,软吹时间大于 12 min,从而保证吹入钢液的氩气泡均匀、细小、数量多且分散,达到最佳吹氩效果。

2.2.2 连铸工序

工艺改进前中间包钢水过热度为第 1 炉 35 ~ 45 °C,第 2 炉 25 ~ 35 °C,正常炉次 ≤ 30 °C。通过采取中间包钢水低过热度控制措施,第 1 炉控制在 30 ~ 40 °C,第 2 炉 20 ~ 30 °C,正常炉次基本稳定在 15 ~ 20 °C。

Φ650 mm 断面铸坯,开 4 个流的情况下,第 1

炉拉速 0.24 m/min,正常炉次 0.25 m/min,第 2 炉和第 3 炉过热度偏高的情况下,拉速控制在 0.24 m/min。Φ800 mm 断面铸坯,开 4 个流的情况下,第 1 炉拉速 0.16 m/min,正常炉次 0.17 m/min,第 2 炉和第 3 炉过热度偏高的情况下,拉速控制在 0.16 m/min。

优化连铸二次冷却参数,降低二冷比水量,Φ650 mm 铸坯二冷比水量由 0.08 L/kg 降低为 0.05 L/kg,Φ800 mm 铸坯二冷比水量由 0.10 L/kg 降低为 0.06 L/kg。

调整结晶器电磁搅拌和末端电磁搅拌参数,提高电磁搅拌强度。Φ650 mm 铸坯结晶器电磁搅拌参数由 150 A、1.2 Hz 增大到 250 A、1.2 Hz,末端电磁搅拌参数由 100 A、6.0 Hz 增大到 150 A、6.0 Hz。Φ800 mm 铸坯结晶器电磁搅拌参数由 200 A、1.0 Hz 增大到 300 A、1.0 Hz。

3 结论

(1) 风电法兰用钢 S355NL 超声波探伤的密集型缺陷为氧化铝夹杂物以及铸坯疏松缺陷造成的,铸坯原始缺陷在锻造过程中促进了微裂纹的萌生和扩展,导致了风电法兰的探伤不合格。

(2) 通过稳定钢水成分,提高钢水纯净度,做好夹杂物的钙处理以及降低钢水过热度等改进措施,莱钢生产的 S355NL 连铸坯经锻造成风电法兰后探伤合格率提高到了 99% 以上。

参考文献

- [1] 于学文,于辉,谷昊. 100 t EAF-LF-VD-CCM 流程 S355NL 风电法兰用钢 Φ500 ~ 800 mm 连铸坯的研制[J]. 特殊钢,2015,36(1):28-30.
- [2] 陈义雄. 提高 Q370qE 钢板超声波探伤合格率的实践[J]. 中国冶金,2008,18(8):19-22.
- [3] 刘自立,张汉谦,刘春明. 12Cr2Mo1R 厚板探伤不合格原因的试验分析及对策[J]. 压力容器,2014,31(4):13-19.
- [4] 李连任,高伟,杜海涛,等. 高强度容器板探伤不合格原因分析[J]. 山东冶金,2011,33(5):104-106.
- [5] 马庆贤,钟约先,曹起骧. 大型锻件夹杂性缺陷的形成及控制措施[J]. 清华大学学报,2000,40(5):13-15.
- [6] 郭早勤,杜大鹏,白焜,等. 中厚板探伤不合格原因分析[J]. 宽厚板,2010,16(3):13-17.

闻小德(1985-),男,硕士(东北大学),工程师,2007 年安徽工业大学(本科)毕业,轧钢技术与探伤工艺研究。

E-mail:wenziaode@126.com

收稿日期:2015-10-20