

· 工艺技术 ·

风电齿圈用钢 F42CrMo4 探伤缺陷分析和工艺改进

刘 鹏

(山钢股份莱芜分公司特钢事业部, 莱芜 271105)

摘 要 F42CrMo4 钢风电齿圈的生产工艺流程为热装铁水-100 t EAF-LF-VD-Φ500 mm CCM-缓冷-锻制成 Φ 2 000 ~ 3 900 mm 环形锻件。对探伤不合格的风电齿圈缺陷部位运用超声波进行定位取样,分析表明,氧化铝类夹杂物以及铸坯疏松缺陷,是造成部分批次风电齿圈用 F42CrMo4 钢探伤不合格的主要原因。通过控制电弧炉终点碳 ≥ 0.15%, LF 终点喂钙线 0.50 kg/t, 喂钙后软吹氩 ≥ 10 min, VD 后氩气流量由 2 × 25 L/min 增加至 2 × 30 L/min, 控制钢水过热度 10 ~ 18 °C 等工艺措施使钢中氮、氢和氧含量分别由原 ≤ 80 × 10⁻⁶、≤ 1.5 × 10⁻⁶ 和 ≤ 20 × 10⁻⁶ 降低到 ≤ 75 × 10⁻⁶、≤ 1.2 × 10⁻⁶ 和 ≤ 15 × 10⁻⁶, 锻件探伤合格率提高到 98.95% 以上。

关键词 F42CrMo4 钢 风电齿圈 探伤 裂纹 工艺改进

Analysis on Detecting Defect of Steel F42CrMo4 for Wind Power Gear Ring and Process Improvement

Liu Peng

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

Abstract The production process flowsheet of wind power gear ring of steel F42CrMo4 is hot metal-100 t EAF-LF-VD-Φ500 mm CCM-slow cooling-forged to Φ 2 000 ~ 3 900 mm ring forgings. The analysis on sampling at wind power gear ring defect region by ultrasonic positioning shows that the main causes for some batch of wind power gear ring of steel F42CrMo4 unqualified by detection test are aluminum oxide inclusions and porosity defects of casting bloom. With the process measures including controlling EAF end carbon ≥ 0.15%, the end point of LF was fed with 0.5 kg/t calcium wire, and after fed with calcium, argon was blown soft ≥ 10 min, after VD the argon blowing rate increasing to 2 × 30 L/min from original 2 × 25 L/min, and controlling liquid super-extend 10 ~ 18 °C, the nitrogen, hydrogen and oxygen content in steel decrease respectively from ≤ 80 × 10⁻⁶, ≤ 1.5 × 10⁻⁶ and ≤ 20 × 10⁻⁶ to ≤ 75 × 10⁻⁶, ≤ 1.2 × 10⁻⁶ and ≤ 15 × 10⁻⁶ and the detection qualified rate of forgings increases to more than 98.95%.

Material Index Steel F42CrMo4, Wind Power Gear Ring, Nondestructive Testing, Cracks, Process Improvement

随着风力发电的迅猛增长,市场对风电用钢的需求量也愈来愈大。风电齿圈用 F42CrMo4 钢是主要用于制造风电主机齿轮箱产品,是风力发电设备的重要部件,对生产制造有很严格的要求。由于偏航和变桨系统要承受很大的倾覆力矩,加上部分部件裸露在外,易受沙尘、水雾、冰冻等污染和侵害,因此对用钢的要求很高^[1]。锻造厂采购 Φ500 mm F42CrMo4 连铸圆坯铸坯加工成 Φ 2 000 ~ 3 900 mm 的环形锻件进行探伤,探伤合格品用于加工风电齿圈,个别批次的环形锻件探伤合格率偏低,对该批次探伤不合格环形锻件产品进行了检验分析,分析缺陷产生的原因,提出改进措施,提高产品的探伤合格率。

1 试验用材料与方法

1.1 试验材料

对厂家反馈的探伤不合格的风电齿圈 F42CrMo4 钢进行取样,该钢种生产工艺为:配料(热装铁水)-100 t UHP EAF-120 t LF-120 t VD-CCM-入坑缓冷。

表 1 F42CrMo4 钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of steel F42CrMo4 / %

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Cu | Ti |
|-------------|-------------|------|-------|-------|--------|------|--------|------|-------|
| 0.41 ~ 0.17 | 0.17 ~ 0.60 | ~ ≤ | ≤ | ≤ | 0.90 ~ | ≤ | 0.20 ~ | ≤ | ≤ |
| 0.45 | 0.37 | 0.80 | 0.015 | 0.010 | 1.20 | 0.50 | 0.30 | 0.20 | 0.005 |

注:钢的氧含量 ≤ 20 × 10⁻⁶、氮含量 ≤ 80 × 10⁻⁶、氢含量 ≤ 1.5 × 10⁻⁶;钢材的化学成分允许偏差按 GB/T222-2006 的规定执行。

该钢种的化学成分见表 1。风电齿圈的制造工艺为:下料-加热炉加热-制坯-二次加热-碾环-缓冷-粗加工-探伤-精加工-热处理-二次探伤-成品。

1.2 试验方法

探伤不合格的 F42CrMo4 齿圈环形锻件,用超声波定位后切取试样,对试样进行低倍检查后,用光学显微镜进行组织观察,最终使用扫描电镜分析夹杂物的组成和裂纹处元素的偏析情况。

2 试验结果及讨论

2.1 超声波定位

为了准确地捕捉到缺陷部位,在齿圈锻件上进

行超声波探伤定位。超声波探伤主要是利用超声波在不同介质中的声阻以及穿过钢板后透射率、反射率的差异,并通过其反映在探伤示波仪上的波形来判断钢板内部质量的一种无损检测方法^[2]。齿圈中的疏松、偏析、非金属夹杂物、气体等都可能导致超声波探伤不合格^[3]。探伤反映出的主要缺陷有断续点条状及密集型超标缺陷,当量 $\Phi 2 \sim 3$ mm 不等,深度 50 ~ 90 mm,距离内圈 50 ~ 70 mm。

2.2 试样低倍观察

切取两块金相试样,沿厚度方向进行酸洗,发现在 2 块试样在深度 50 ~ 70 mm 均存在不连续、短条状的微裂纹,如图 1 所示。

2.3 金相分析

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,裂纹长度约 1 ~ 2 mm,裂纹两侧无脱碳现象,钢基体组织正常,见图 2。

2.4 扫描电镜分析

(1) 试样电镜扫描存在微量 MnS 夹杂,试样典型的缺陷为图 3 显示的集中的沿晶成簇状裂纹,有明显的疏松挤压痕迹且裂纹处有未压合的孔洞;

(2) 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,裂纹内夹杂主要为 Al 元素,并含有少量的 O、Fe、Ca 元素,为典型的氧化铝类夹杂物。

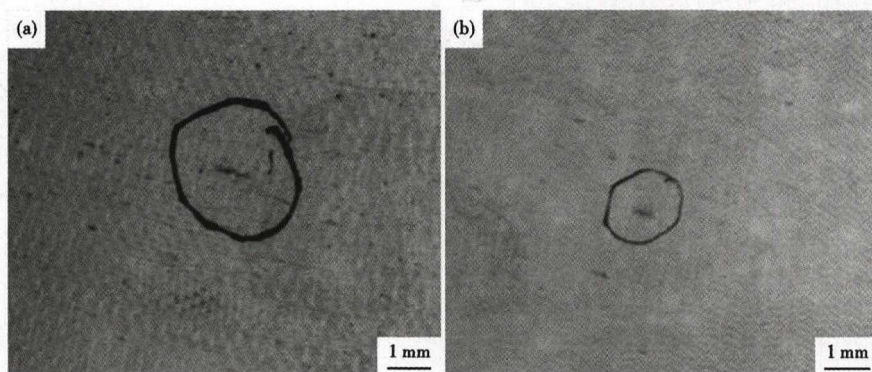


图 1 F42CrMo4 钢齿圈锻件裂纹形貌:(a) 试样 1;(b) 试样 2

Fig. 1 Morphology of cracks in ring forgings of steel F42CrMo4: (a) sample No1 and (b) sample No2

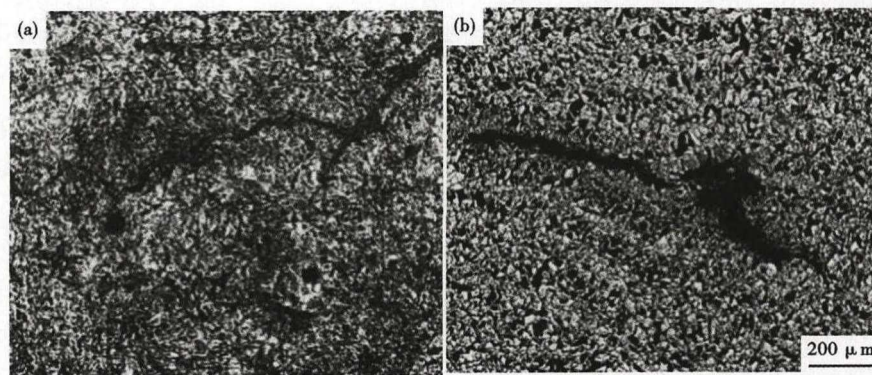


图 2 F42CrMo4 钢齿圈裂纹微观形貌:(a) 试样 1;(b) 试样 2

Fig. 2 Micro morphology of cracks in ring forgings of steel F42CrMo4: (a) sample No1 and (b) sample No2

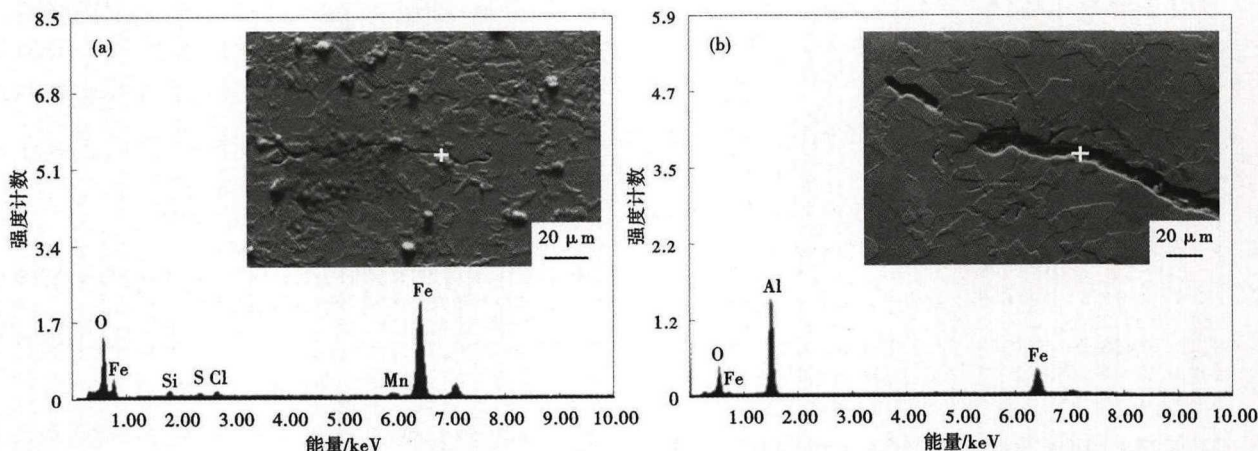


图 3 F42CrMo4 钢齿圈裂纹电子衍射分析:(a) 试样 1;(b) 试样 2,SEM

Fig. 3 Energy dispersive spectrometer analysis of cracks region in ring forgings of steel F42CrMo4: (a) sample No1 and sample No2,SEM

2.5 原因分析及结果讨论

查询生产过程, 取样分析异议炉次气体含量 $[O]$ 、 $[N]$ 、 $[H]$ 分别为 17×10^{-6} 、 79×10^{-6} 、 1.4×10^{-6} , 排除气体原因造成孔洞缺陷。

从(a)试样1探伤缺陷做出的金相及电镜扫描来看, 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。缺陷产生的原因: 疏松孔洞未能焊合造成的缺陷。连铸坯凝固缓慢的区域因微观补缩通道堵塞而在枝晶间及枝晶的晶臂之间会形成细小空洞, 疏松的宏观端口形貌与缩孔相似, 微观形貌为分布在晶界和晶臂间, 伴有粗大树枝晶的显微空穴^[4]。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^[5]。

从(b)试样2探伤缺陷做出的金相及电镜扫描来看为氧化铝夹杂缺陷, 氧化铝类夹杂物的形成十分复杂, 涉及脱氧、精炼、浇注各个过程及这些过程中使用的辅料^[6-7]。氧化铝类夹杂属于脆性夹杂物, 与钢基体相比呈硬脆性^[8]。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^[9-10], 导致探伤不合格。

3 工艺改进

为了提高钢水质量及连铸铸坯质量, 对部分工艺参数进行了优化, 见表2。

3.1 炼钢工序

电弧炉终点碳 $\geq 0.15\%$, 防止过氧化, 减少钢水

表2 改进前后的工艺参数

| 工艺 | 电弧炉 终点碳/% | 气体含量/ 10^{-6} | | | 过热度/ ℃ | 结晶器电磁 搅拌电流/A | 末端电磁 搅拌电流/A | 二冷比水量/ ($L \cdot kg^{-1}$) |
|-----|--------------|-----------------|------------|-----------|-----------|-----------------|----------------|---------------------------------|
| | | 氮 | 氢 | 氧 | | | | |
| 改进前 | ≥ 0.08 | ≤ 80 | ≤ 1.5 | ≤ 20 | 20~30 | 200 | 125 | 0.14 |
| 改进后 | ≥ 0.15 | ≤ 75 | ≤ 1.2 | ≤ 15 | 10~18 | 260 | 175 | 0.12 |

中氧化夹杂物含量; 保证钙处理效果, 钢水在LF出站前喂入钙线0.50 kg/t钢进行钙处理, 钙处理后软吹氩时间 ≥ 10 min。

改进VD后软吹工艺, 氩气流量由原来的全程 2×25 L/min调整为较大氩气流量(2×30 L/min)软吹10 min、小氩气流量(2×20 L/min)软吹10~20 min的分段软吹模式, 提高了夹杂物去除能力, 保证软吹时间大于20 min。

稳定气体含量控制, 钢水的真空处理时间由改进前22 min改为27 min, 真空处理氩气流量由改进前的 2×100 L/min调整为 2×150 L/min, $[N]$ 、 $[H]$ 、 $[O]$ 由改进前的 $[N] \leq 80 \times 10^{-6}$ 、 $[H] \leq 1.5 \times 10^{-6}$ 、 $[O] \leq 20 \times 10^{-6}$ 降低到 $[N] \leq 75 \times 10^{-6}$ 、 $[H] \leq 1.2 \times 10^{-6}$ 、 $[O] \leq 15 \times 10^{-6}$ 。

3.2 连铸工序

中间包钢水温度控制按照低过热度原则, 由改进前的第1炉控制在 $35 \sim 45$ ℃, 第2炉控制在 $25 \sim 35$ ℃, 正常炉次控制在 30 ℃以下改为第1炉控制在 $30 \sim 40$ ℃, 其余炉次控制在 $10 \sim 18$ ℃。开浇前对喷嘴检查确认, 及时更换堵塞的喷嘴, 保证二次冷却区域冷却均匀。

4 结论

(1) 风电齿圈用钢F42CrMo4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所造成的。

(2) 通过提高钢水纯净度、做好夹杂物的钙处理、改进VD后软吹工艺、降低钢水过热度、开浇前对喷嘴检查确认等措施, 铸坯锻造后探伤合格率提高到了98.95%以上。

参考文献

- [1] 戈文英. 风电齿圈用42CrMo4钢的研究与开发[J]. 中国钢铁业, 2015, 5(5): 25-27.
- [2] 周佩. 15MnNbR钢板探伤不合格原因分析[J]. 中国冶金, 2006, 16(2): 22-25.
- [3] 张海军. 钢板探伤不合格原因分析[J]. 宽厚板, 2002, 8(1): 12-16.
- [4] 姜锡山. 特殊钢金相图谱[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [5] 张玉亭. 环类锻件缺陷分析与预防措施[J]. 大型铸锻件, 2013(1): 12-15.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 郭早勤, 杜大鹏, 白煜, 等. 中厚板探伤不合格原因分析[J]. 宽厚板, 2010, 16(3): 13-17.

刘鹏(1983-), 男, 工程师, 2007年毕业于安徽工业大学(本科), 炼钢工艺技术及新产品开发。

E-mail: 273786163@qq.com

收稿日期: 2019-02-12