

Als、N 和过热度对 $\Phi 50 \sim 60$ mm 40Mn2 钢裂纹影响分析和改进工艺

郭志强

(河南凤宝特钢有限公司技术中心, 林州 456500)

摘 要 通过使用 ARL8820 直读光谱仪,LECO 氧氮氢气体分析仪和铂铑热电偶等方法,研究了 40Mn2 圆钢中的 Als、N 和连铸钢液过热度对钢材裂纹的影响。结果表明: Als、N 和连铸钢液的过热度分别为 0.021% ~ 0.035%, 0.0065% ~ 0.0083% 和 32 ~ 46 °C 的炉次 $\Phi 50 \sim 60$ mm 轧材表面出现了裂纹。工艺改进后,控制钢中的 Als 0.015% ~ 0.025%, $[N] \leq 0.0060\%$, 连铸钢液过热度 18 ~ 30 °C, 连铸坯表面未出现裂纹,保证了轧材表面质量。

关键词 40Mn2 钢 Als N 过热度 钢材裂纹

Analysis on Effect of Als、N and Superheat on 40Mn2 Steel $\Phi 50 \sim 60$ mm Bar Crack and Technology Improvement

Guo Zhiqiang

(Technology Center, Henan Feng Bao Special Steel Co Ltd, Linzhou 456500)

Abstract The effect of Als、N in 40Mn2 round steel and superheat of molten steel on the steel bar crack is studied by using ARL8820 Direct-reading spectrometer,LECO oxygen-nitrogen-hydrogen gas analyzer,platinum rhodium thermocouple etc. The results show that of heats respectively with 0.021% ~ 0.035% Als,0.0065% ~ 0.0083% N and cast liquid super-heat 32 ~ 46 °C the $\Phi 50 \sim 60$ mm rolled bar surface occurs crack. After technology improvement,with controlling 0.015% ~ 0.025% Als, $\leq 0.0060\%$ $[N]$ and the superheat of molten steel 18 ~ 30 °C,the cracks on the surface of continuous casting billet non-occur and the surface quality of the products is guaranteed.

Material Index 40Mn2 Steel, Als, N, Superheat, Steel Crack

2020 年 5 月公司轧钢厂正常轧制批号为 204458 ~ 204468 的 40Mn2 钢种,成材规格为 $\Phi 50 \sim 60$ mm。成材后做热顶锻检验时,有 5 个炉号的圆钢出现了裂纹(图 1),判定废品约 500 t,合格率仅 83.89%,给公司造成了较大的经济损失。为找到圆钢裂纹产生的原因,避免事故再次发生,对有裂纹的炉号钢材及试样取样进行了分析。

1 40Mn2 钢生产工艺和化学成分

40Mn2 钢的生产流程为: 100 t 复吹转炉冶炼→LF 精炼→R9m 180 mm × 180 mm 方坯连铸 (MES + FES 电磁搅拌)→连铸坯堆垛缓冷→连铸坯加热→连轧机轧制→圆钢→打包→入库,其化学成分见表 1。

2 钢材出现裂纹的原因分析

2.1 裂纹圆钢的金相分析

表 1 40Mn2 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of 40Mn2 steel/%						
C	Si	Mn	P	S	Cu	Als
0.38 ~ 0.42	0.17 ~ 0.30	1.50 ~ 1.70	≤ 0.025	≤ 0.015	≤ 0.20	0.010 ~ 0.025

在 204459 批号的圆钢上裂纹处取试样进行金相分析,分析结果如图 2。

裂纹金相分析结论: 腐蚀后裂纹处组织存在明显脱碳,裂纹尾部存在大而多的氧化原点向内延伸,

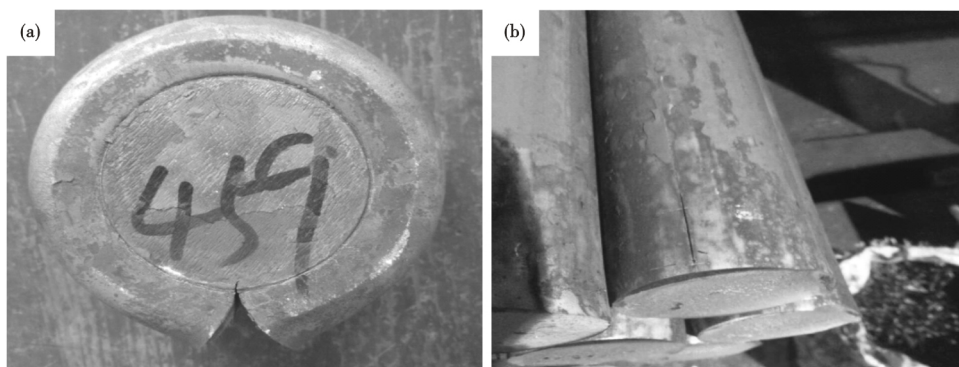


图 1 圆钢 (a) 热顶锻开裂和 (b) 轧材表面裂纹

Fig. 1 Morphology of round bar hot heading cracking (a) and rolled bar surface crack (b)

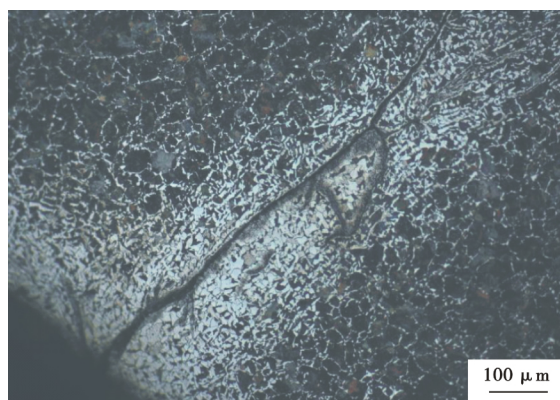


图 2 圆钢表面裂纹处组织

Fig. 2 Microstructure of round bar at surface crack

表 2 裂纹圆钢中的酸溶铝、氧和氮含量

Table 2 Content of acid soluble aluminium, oxygen and nitrogen in cracked round steel

冶炼日期	炉号	[Als] /10 ⁻⁶	[O] /10 ⁻⁶	[N] /10 ⁻⁶
5.17	20051069	348	14	75
5.17	20051071	256	11	73
5.20	20051222	280	12	83
5.20	20051218	211	10	65
5.20	20051220	206	11	70

裂纹是由于表面存在缺陷,试样表面缺陷源于坯料缺陷。

2.2 坯料缺陷原因分析

2.2.1 钢中的酸溶铝

为分析坯料缺陷,首先对裂纹钢材的化学成分进行了分析,并与正常控制水平进行了对比,结果发现 5 炉裂纹圆钢的化学成分中的 Als 有 3 炉较正常水平明显偏高,如表 2 所示。

由表 2 可以看出,裂纹的 5 炉钢中有 3 炉 Als 较正常水平明显偏高,均超出了内控标准的范围上限。

固态钢中的全铝量由固溶的金属铝、AlN 和 Al₂O₃ 中的铝所组成^[1],即 $Al_{全} = Al_{金属} + Al_{AlN} + Al_{Al_2O_3}$ 。因金属铝和 AlN 均溶于酸,故二者称为酸溶铝。

40Mn2 钢种属铝镇静钢,需要用铝终脱氧,在制定终脱氧工艺时,钢中酸溶铝(Als)控制的高低必须同时兼顾既要防止加铝量太少,脱氧不良而造成铸坯气孔,又要防止钢液中 N 含量高的情况下加入过多的 Al 而生成过量的 AlN,AlN 在奥氏体晶粒形成时,以粗大薄膜状析出于晶界,而弱化晶界,降低铸钢的塑性与韧性,增加铸坯产生裂纹的倾向^[1]。

2.2.2 钢中 N 含量

为查找造成坯料缺陷的原因,使用 LECO 氧氮

氢分析仪,对裂纹圆钢中 N 含量做了检测,并与正常控制水平进行对比,结果发现 5 炉裂纹坯料中 N 含量较正常控制水平明显偏高,如表 2 所示。

由表 2 可以看出,出现裂纹的炉号圆钢中氧的质量分数正常,说明钢液脱氧良好,氧不是引起 40Mn2 圆钢裂纹的因素。而 N 含量均明显高于正常控制水平,经炼钢现场调查,这 5 炉钢原本是计划在板坯铸机浇铸的 45 钢,由于板坯铸机故障停机,临时改炼成 40Mn2 钢在方坯连铸机上铸成方坯,因 [C] 高都有掺兑钢液的情况,掺兑钢液时,钢液暴露在空气中,大量吸气,造成这 5 炉钢液 N 含量上升;另外,这 5 炉钢在 LF 精炼时大量加入锰铁合金,二次精炼时间长,是造成 N 含量上升的另一因素。

根据研究结果,采用统计方法确定了铸钢中氮量与加铝量之间的关系:

$$[N] = 0.345 Al^2 - 0.066 Al + 0.0102^{[2]}$$

研究表明:在 N 含量相同的情况下,钢中铝质量分数越高,AlN 析出温度越高;在铝含量相同的情况下,钢中 N 含量越高,AlN 析出温度越高^[3],开始析出的温度越高,析出物 AlN 的量和尺寸也就越大。

AlN 对铸坯裂纹的影响表现在,在第 III 脆性温度区域 AlN 在奥氏体晶界上沉淀析出,增加了钢的脆性,使钢的延展性达到最低点,加剧了裂纹的形成和扩展^[4]。

前人研究结果表明,钢中 N 和 Al 的溶解度取决于它们的浓度积: $K_{AlN} = [Al][N]$,当超过 K_{AlN} 的平衡值时,在 800 ~ 1100 °C 便析出 AlN 夹杂物;如果低于 K_{AlN} 平衡值,则钢中 N 和 Al 不相互作用。如果钢中 [N]、[Al] 均较高,AlN 在奥氏体晶粒形成时,便以粗大薄膜状析出于晶界,产生宏观组织缺陷,降低铸钢的塑性与韧性,增加铸钢产生裂纹的倾向^[5]。

表 3 连铸钢液的过热度对轧材裂纹的影响

Table 3 Effect of superheat of casting liquid steel on round bar crack

冶炼日期	炉号	中间包炉次	过热度/°C	拉速/(m·min ⁻¹)	钢材质量
5.17	20051069	1	46	1.92	裂纹
	20051071	2	38	1.92	裂纹
	20051074	3	25	1.92	合格
	20051076	4	28	1.92	合格
	20051078	5	32	1.92	合格
5.20	20051222	1	38	1.92	裂纹
	20051224	2	28	1.92	合格
	20051218	3	35	1.92	裂纹
	20051220	4	32	1.92	裂纹
	20051227	5	28	1.92	合格

2.2.3 钢液的过热度

连铸钢液的过热度是指连铸钢液实际浇铸温度超过该钢种液相线温度的值^[3]。

连铸工艺参数的正常与否对铸坯质量影响是至关重要的,其中连铸钢液的过热度是影响铸坯质量非常重要的一个参数,为此,查阅和统计了 10 炉钢的过热度,其中包含出现裂纹的这 5 炉钢,见表 3。

表 3 表明: 钢材出现裂纹的 5 个炉号,其连铸钢液过热度在 32 ~ 46 °C,超出了工艺规定的正常控制范围,即 20 ~ 30 °C。

众所周知,连铸钢液过热度高,在钢液凝固时易生成异常粗大的奥氏体晶粒。国际著名冶金学家 M. Wolf 曾经指出,粗大的奥氏体晶粒是引起表面晶间裂纹的主要原因^[4]。Rain Dippenaar 教授将尺寸超过 1 mm (宽度) 的奥氏体晶粒称为“Blown Grains”,认为这种异常粗大的奥氏体晶粒在表面横裂纹和网状裂纹的形成过程中起决定作用^[5]。

过热度高时,过冷条件下形成的晶粒碰到液态的过热钢水时会熔化,这样,能形成等轴晶的晶粒很少,柱状晶可以无阻碍地横向纵向生长,形成粗大的柱状晶^[6]。

本文述及有裂纹的 5 炉 40Mn2 圆钢,连铸坯浇铸时的过热度均超出了工艺控制范围的上限,属于高过热度浇铸,因此,铸坯凝固形成的奥氏体晶粒也异常粗大,晶粒尺寸宽度和长度达到了毫米级,见图 3 所示,20051220 炉(对应 204459 批号),40Mn2 钢铸态组织。

2.2.4 粗大奥氏体晶粒的影响

粗大的奥氏体晶粒产生的主要原因是高的过热度 and 不均匀冷却^[7]。

粗大奥氏体晶粒本身的裂纹敏感性。粗大奥氏

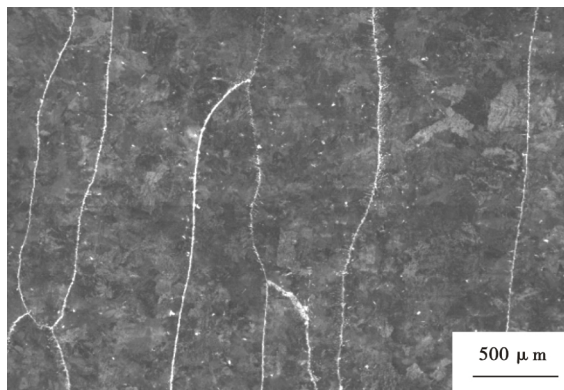


图 3 过热度 32 °C 的铸坯中粗大的奥氏体晶粒形貌

Fig. 3 Morphology of coarsened austenite grain in cast billet with superheat 32 °C

体晶粒之间的结合力本身就比较细小晶粒要弱,较小的应变就可能驱使晶界移动产生微裂纹^[8]。

粗大的奥氏体晶粒是残余元素富集以及氮化物和先共析铁素体薄膜析出的先决条件^[9]。

粗大的奥氏体晶粒尺寸决定了沉淀析出物的析出。Wolf 指出无论是在第 II 脆性温度区由于残余元素的富集引起的表面晶间裂纹,还是在第 III 脆性温度区由于氮化物的析出引起的表面晶间裂纹,都与粗大的奥氏体晶粒有关。在残余元素含量和其它浇铸参数不变的条件下,形成晶间裂纹的必要先决条件是某一临界晶粒直径,即便在残余元素含量并不是很高的情况下,若晶粒尺寸超过一定临界值仍可以在晶界富集析出;同样,氮化物的析出也取决于晶粒尺寸。

3 工艺改进

钢中 Als、[N] 的质量分数控制过高,在较高的温度下,析出较多的 AlN,它以粗大薄膜状析出于晶界,产生宏观组织缺陷,降低铸钢的塑性与韧性,增加钢坯产生裂纹的倾向。

连铸钢液过热度高时,易产生粗大的奥氏体晶粒,它是残余元素富集、氮化物和先共析铁素体析出的先决条件,易造成连铸坯表面晶间裂纹。

为防止 40Mn2 连铸坯再次出现裂纹缺陷,对加铝脱氧工艺、控氮工艺及连铸钢液过热度的控制工艺进行了优化。

加铝脱氧工艺由原来的“一步法”改为“二步法”。“一步法”是在 LF 以喂铝线的方式终脱氧,“二步法”是先在转炉出钢时加铝块预脱氧,然后在 LF 喂铝线终脱氧。

改进后的 40Mn2 加铝脱氧工艺为: 转炉出钢使用铝块预脱氧,出钢 [C] < 0.08% 时,随钢流加铝 0.9 kg/t; 出钢 [C] ≥ 0.08% 时,随钢流加铝 0.5 kg/t。钢水进入 LF 工序后,取第一样,如果第一样钢液中的 Als 低于 0.010%,则采用向钢液中喂铝线的方式,进一步脱氧。同时,在 LF 工序使用铝粒、碳化硅进行渣面扩散脱氧,铝粒使用量: ≤ 0.6 kg/t。钢渣脱氧目标: 渣中的 (FeO + MnO) <

表 4 工艺改进前后工艺参数对比

Table 4 Comparison of process parameters between before and after process improvement

工艺	[Als] / 10 ⁻⁶	终脱氧前 [N] /10 ⁻⁶	钢材 [N] / 10 ⁻⁶	过热度/°C
改进前	206 ~ 348	61 ~ 77	65 ~ 83	25 ~ 46
改进后	137 ~ 244	39 ~ 56	41 ~ 62	18 ~ 33

0.5%。

为防止钢液中 N 含量高,在生产 40Mn2 钢种时,该厂采取了使用低氮增碳剂、LF 微正压操作、埋弧操作、合理调控 Ar 气搅拌强度、连铸全过程保护浇铸、禁止其它钢种非计划改炼 40Mn2 钢种等措施。按转炉、LF、连铸工序,据日常取样分析统计,钢中 N 含量正常水平为:转炉 35×10^{-6} ,LF 炉 45×10^{-6} ,连铸 55×10^{-6} 。

为提高连铸钢液过热度控制的准确性,炼钢厂采取了以下三项措施:(1) 新增设了两套钢包在线烘烤器,并规定钢包归位至出钢时间 > 5 min 时,必须对钢包进行在线烘烤,从而保证出钢时钢包内衬温度 ≥ 850 °C;(2) 钢包壳内安装隔热板,隔热板材质为纳米复合反射绝热材料;钢包永久层材质由原来的高铝浇注料改为半轻质高铝浇注料,实践证明,采取上述两项隔热措施后,钢包保温性能明显提高。钢水温降由原来的 0.9 °C/min 下降到 0.4 °C/min。(3) 严格控制生产节奏,LF 精炼好的钢水在连铸平台的搁置时间 < 10 min。采取上述三项措施后,连铸钢液过热度控制的准确性明显提高,基本在连铸工艺要求的范围内。工艺改进前后钢液中 Al、N 含量和过热度的数据对比见表 4。

通过上述工艺改进(见表 4),钢中 [Als] 由原来的 $(206 \sim 348) \times 10^{-6}$ 降到 $(137 \sim 244) \times 10^{-6}$,钢材中 N 含量由原来的 $(65 \sim 83) \times 10^{-6}$ 降到 $(41 \sim 62) \times 10^{-6}$,连铸钢液的过热度由原来的 $25 \sim 46$ °C 降低到 $18 \sim 33$ °C。改进后生产的连铸坯未发现裂纹缺陷,轧制成 $\Phi 50 \sim 60$ mm 圆钢后在圆钢表面未检测出裂纹,圆钢做热顶锻检测时也未出现裂纹,工艺优化后每月生产 40Mn2 圆钢 $6\,000 \sim 8\,000$ t,热顶锻检测合格率由 83.89% 提升到 99.76%。

4 结论

(1) 工艺改进后生产的 40Mn2 圆钢裂纹废品率由 16.11% 降低到 0.24%。

(2) 为预防连铸坯产生裂纹,在制定 40Mn2 铝脱氧工艺时,需控制钢中的 Als 和 N,均不能高,否则生成大量 AlN 会在奥氏体晶界呈薄膜状析出,增大连铸坯产生裂纹的倾向。

(3) 连铸时,钢液高的过热度促使形成粗大的奥氏体晶粒,使坯料的裂纹敏感性增强。

(4) 在同一炉钢 Als、N 含量高和连铸钢液的过热度高同时出现时,钢坯出现裂纹的可能性明显增大。

参考文献

- [1] 崔更生. 现代铸钢件冶金质量控制技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- [2] 李明贤, 朱国军. 氮质量分数对铸坯角部裂纹的影响及控制 [J]. 中国冶金, 2017, 27(6): 56.
- [3] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [4] Wolf M M. Fine Intergranular Surface Cracks in Bloom Casting [J]. Iron Steel Technology, 1984, 24(5): 351.
- [5] Dippenaar R, Moon S C, Szekeres E S. Strand Surface Cracks-the Role of Abnormally Large Prior-Austenite Grains [J]. Iron Steel Technology, 2007, 4(7): 105.
- [6] 杨军, 董洁. 铸坯成型理论 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
- [7] 李朋欢, 包燕平, 岳峰, 等. 异常粗大的奥氏体晶粒对表面晶间裂纹的影响 [J]. 北京科技大学学报: 自然科学版, 2009, 31(suppl. 1): 179-181.

郭志强(1973-),男,硕士,(2013年北京科技大学),高级工程师,1997年内蒙古科技大学(本科)毕业,炼钢技术与产品质量管理。E-mail: guozhiqiang197426@163.com

收稿日期: 2021-05-26

欢迎全国冶金、机械、耐材及相关
行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备
和技术、产品研发宣传广告