

· 工艺技术 ·

改善 QT20CrMo 含硫齿轮钢 A 类夹杂物的优化中心偏析的工艺实践

周力¹ 刘从德² 马建超² 徐松¹

(1 江苏省(沙钢)钢铁研究院,苏州 215625;2 淮钢特钢股份有限公司,淮安 223002)

摘要 对 A 类夹杂物超标 ($A_{\text{粗}} > 3.0$ 级, $A_{\text{细}} > 2.5$ 级) 含硫齿轮钢 QT20CrMo (/% : 0.20C, 0.020S, 0.020Al, 0.95Cr, 0.20Mo) $\Phi 16$ mm 轧材和 150 mm \times 150 mm 铸坯中的 MnS 夹杂进行了分析, 得出铸坯中心区域的大尺寸 MnS 夹杂物是轧材中超标 A 类夹杂物的来源, 并且中心偏析严重是铸坯中心区域形成大尺寸 MnS 夹杂物的主要原因。通过将二次冷却比水量从 0.37 L/kg 提高到 0.59 L/kg 后, 铸坯中心碳偏析指数由 1.12 ~ 1.44 降低至 0.99 ~ 1.23, 硫偏析指数由 1.28 ~ 1.70 降低至 1.01 ~ 1.31, 最大网状 MnS 尺寸由 2 000 μm 降低至 1 000 μm 。QT20CrMo 钢轧材 A 类夹杂物合格率达 100%, A 细类夹杂物 ≤ 2.0 级的比例由 25.0% 提高至 97.0%。

关键词 含硫齿轮钢 QT20CrMo 150 mm \times 150 mm 铸坯 A 类夹杂物 中心偏析 二冷比水量

Practice of Process for Optimized Center Segregation to Improve A-Type Inclusions in Sulfur-Bearing Gear steel QT20CrMo

Zhou Li¹, Liu Congde², Ma Jianchao² and Xu Song¹

(1 Research Institute of Iron and Steel, Jiangsu Shasteel, Suzhou 215625; 2 Huaigang Special Steel Co Ltd, Huai'an 223002)

Abstract Based on analysis on MnS in $\Phi 16$ mm rolled products and in 150 mm \times 150 mm casting billet of sulfur-bearing gear steel QT20CrMo (/% : 0.20C, 0.020S, 0.020Al, 0.95Cr, 0.20Mo) to get the factors to occur non-qualified rating of A-type inclusions ($A_{\text{fine}} > 3$ rating and $A_{\text{course}} > 2.5$ rating) in steel, it is obtained that the large size MnS inclusions occurring in central zone of casting billet are source of non-qualified rating A-type inclusions in rolled products and the serious center segregation is main reason of formed large size MnS inclusions in central zone of casting billet. With increasing secondary cooling water rate from 0.37 L/kg to 0.59 L/kg, the billet central carbon segregation index decreases from 1.12 ~ 1.44 to 0.93 ~ 1.23, the sulfur segregation index decreases from 1.28 ~ 1.70 to 1.01 ~ 1.31 and the size of max network MnS decreases from 2 000 μm to 1 000 μm . As a result the qualified rate of rating of A-type inclusions in steel QT20CrMo rolled products is up to 100%, and the ratio of ≤ 2.0 rating of A-type thin inclusions increases from 25.0% to 97.0%.

Material Index Sulfur-Bearing Gear Steel QT20CrMo, 150 mm \times 150 mm Casting Billet, A-Type Inclusions, Center Segregation, Secondary Cooling Water Rate

硫系易切削钢占易切削钢总产量的 90%, 其易切削元素 S 的切削作用与 MnS 夹杂物密切相关。为了得到良好的切削加工和力学性能, 应尽量使 MnS 夹杂物尺寸细小、呈纺锤状均匀分布。针对 MnS 夹杂物的尺寸和形态控制, 冶金工作者开展了大量工作, 目前主要的控制思路包括: (1) 利用钛、铝、锰、镁等元素脱氧生成的细小氧化物夹杂作为硫化锰的形核核心^[1-4]; (2) 利用钙、镁以及稀土元素等对 MnS 夹杂物进行变性^[5-8]; (3) 采用大压缩比及合适的轧制温度, 使 MnS 夹杂物在轧制过程中断裂破碎^[9-11]; (4) 利用 Ostwald 熟化使长条状变形 MnS 夹杂物在热处理加热过程中断裂并球化^[12-15]。

淮钢特钢在采用 90 t LD-LF-RH-150 mm \times 150 mm 小方坯工艺流程生产 QT20CrMo (/% : 0.20C, 0.020S, 0.020Al, 0.95Cr, 0.20Mo) 等含硫齿轮钢时, $\Phi 18 \sim 32$ mm 轧材的 A 类夹杂物超标率 (A 细评级大于 3.0 级, A 粗评级大于 2.5 级) 达 4.0%。为

解决 A 类夹杂物超标的问题, 对 A 类夹杂物超标的原因进行了细致分析, 得出中心偏析严重是造成 A 类夹杂物超标的原因, 通过优化连铸工艺参数, 改善中心偏析后, A 类夹杂物评级明显改善。

1 A 类夹杂物超标的原因分析

1.1 轧材及铸坯中的 MnS 夹杂物

采用光学显微镜对 $\Phi 26.0$ mm 和 $\Phi 28.0$ mm 的轧材中的 A 类夹杂物进行了分析, 发现轧材中 A 类夹杂物主要分布在直径 1/4 位置到中心的区域内。采用 EVO18 扫描电子显微镜对 $\Phi 26.0$ mm 的轧材中不同位置处的 A 类夹杂物形貌进行了分析, 图 1 (a, b, c) 分别给出了轧材边部、1/4 位置处及中心的尺寸最大的 A 类夹杂物的形貌, 可以发现轧材边部 A 类夹杂物尺寸较小, 约为 100 μm ; 轧材 1/4 位置处最大 A 类夹杂物的尺寸约为 450 μm ; 而轧材中心处最大 A 类夹杂物尺寸约为 600 μm 。此外, 对不同

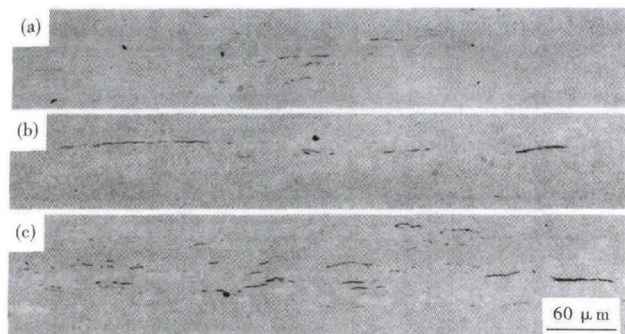


图 1 $\Phi 26.0$ mm 含硫齿轮钢 QT20CrMo 轧材 (a) 边部、(b) 1/4 直径及 (c) 中心处最大 A 类夹杂物的形貌
Fig. 1 Morphology of largest A-type inclusions in $\Phi 26$ mm rolled products of sulphur-bearing gear steel QT20CrMo at edge (a); 1/4 diameter (b); and center (c)

位置处长度大于 $100 \mu\text{m}$ 的 A 类夹杂物数量进行了统计,表明轧材边部、1/4 位置及中心处数量分别为 1 个、4 个、7 个。

采用 EVO18 电子显微镜对 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 铸坯中不同位置处 MnS 夹杂物的形貌进行了分析,观察面距铸坯表面分别为 $0.2, 15.0, 30.0, 45.0, 60.0, 75.0 \text{ mm}$, 其中 75.0 mm 处即为铸坯中心位置。图 2 为距铸坯表面不同位置处 MnS 夹杂物的形貌,其中图 2(a) 为距表层 0.2 mm 位置处的夹杂物形貌,图 2(b~c) 为距表层 15.0 mm 处 MnS 夹杂物形貌,图 2(d~e) 为距表层 30.0 mm 处夹杂物的形貌,图 2(f~g) 为距表层 45.0 mm 处 MnS 夹杂物的形貌,图 2(h) 为距表层 60.0 mm 处夹杂物的形貌,图 2(i) 为铸坯中心处夹杂物的形貌。各个位置处 MnS 夹杂物的形貌特点及尺寸总结如表 1 所示。

由图 2 及表 1 可知,铸坯中主要存在不规则点状、(近似)球状、复合球状、链状、网节状及网状等不同形貌的 MnS 夹杂物,铸坯中 MnS 夹杂物尺寸沿厚度方向逐渐增大,且大尺寸夹杂物的数量也逐渐增大。在铸坯中心区域存在大量约 $2000 \mu\text{m}$ 的网状 MnS 夹杂物,这与轧材中 MnS 夹杂物的分布存在良好的对应关系。神户制钢的 Takada^[11] 等研究了棒线材轧制过程中 MnS 夹杂物的变性,认为当轧制压缩比小于临界值时, MnS 夹杂物被拉长;而轧制压缩比超过临界值后, MnS 夹杂物发生破碎断裂的现象,轧材中 MnS 夹杂物长度变小。由此推断,轧材中 A 类夹杂物超标可能是铸坯中心区域的大尺寸 MnS

夹杂物在轧制后被拉长,但又未完全破碎而导致的。

1.2 铸坯的低倍组织及中心偏析

为明确含硫钢铸坯中心大尺寸网状 MnS 夹杂物的来源,采用碳硫分析仪对铸坯的成分分布进行了分析。该铸坯浇铸过热度为 $49 \text{ }^\circ\text{C}$,拉速 2.2 m/min ,二次冷却比水量为 0.37 L/kg ,其中足辊段、

表 1 含硫齿轮钢 QT20CrMo $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 铸坯横断面表面至中心处 MnS 夹杂物特点

Table 1 Characteristics of MnS inclusions from surface to center of cross section of $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ casting billet of sulfur-bearing gear steel QT20CrMo

距铸坯表面的位置/mm	夹杂物形貌	最大夹杂物尺寸/ μm	大尺寸夹杂物数量
0.2	不规则点状	10	无
15.0	(近似)球状、复合球状、链状	100	无
30.0	球状、链状、网节状	300	极少
45.0	网节状、网状	1 000	较少
60.0	网节状、网状	1 500	少
75.0	网状	2 000	多

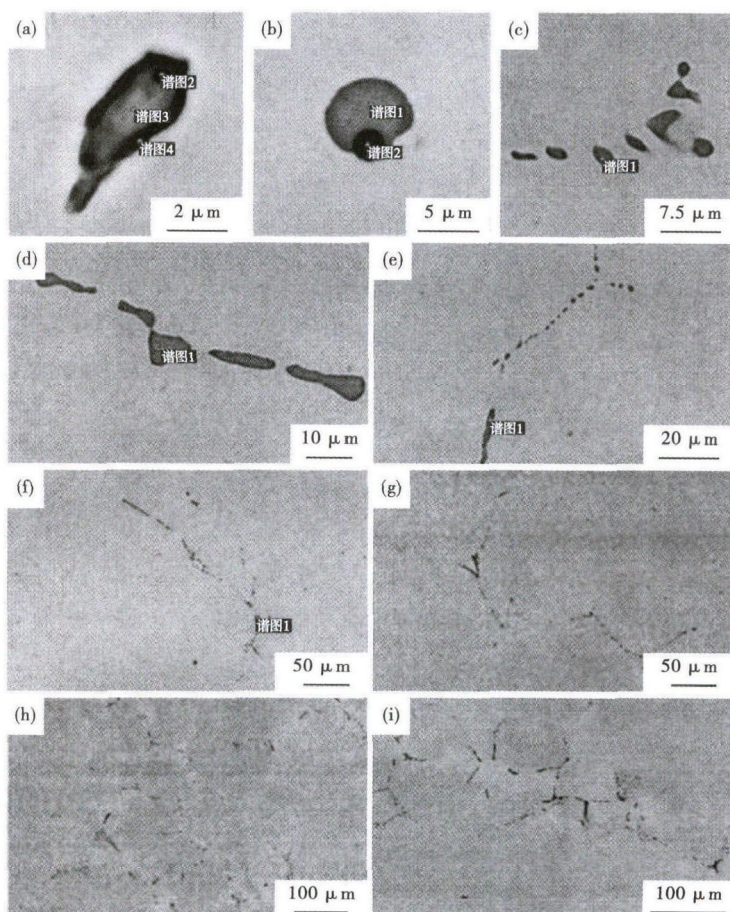


图 2 含硫齿轮钢 QT20CrMo $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 铸坯横断面 MnS 夹杂物的形貌,距表面 0.2 mm (a), 15.0 mm (b) (c), 30.0 mm (d) (e), 45.0 mm (f) (g), 60.0 mm (h) 和 75.0 mm (中心) (i)

Fig. 2 Morphology of MnS inclusions at cross section of $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ casting billet of sulfur-bearing gear steel QT20CrMo, distance from surface 0.2 mm (a), 15.0 mm (b) (c), 30.0 mm (d) (e), 45.0 mm (f) (g), 60.0 mm (h) and 75.0 mm (center) (i)

活动段、固定段比例分别为 30.0%、40.0%、30.0%，末端电磁搅拌电流及频率分别为 250 A、10 Hz。图 3 给出了含硫钢铸坯的中心偏析度，可以发现中心碳、硫偏析度分别为 1.35、1.67。

在铸坯中心位置处（距铸坯表面 75.0 mm 位置），富集 S 元素的液相凝固过程中在奥氏体晶界处析出 MnS 夹杂物，因液相中 S 元素过高，多个晶粒析出的 MnS 夹杂物连接在一起，构成大尺寸 MnS 夹杂物，表现为截面试样中的网状。

采用热酸侵蚀的方法分析了铸坯的低倍组织，如图 4 所示，发现距铸坯表面约 45.0 mm 处存在明显的白亮带，等轴晶区内存在大量分散疏松，铸坯中心的缩孔同样较为明显。结合铸坯低倍组织，推断造成铸坯中心偏析度过高的原因为：末端电磁搅拌位置处，铸流凝固率较低，液芯过厚，电磁搅拌未充分发挥作用。

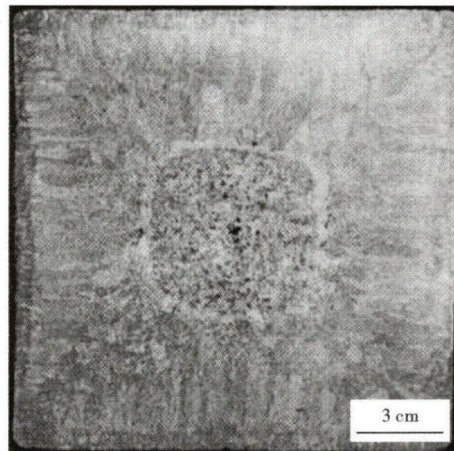


图 4 工艺优化前含硫齿轮钢 QT20CrMo 150 mm × 150 mm 铸坯低倍组织形貌

Fig. 4 Morphology of macrostructure of sulfur-bearing gear steel QT20CrMo 150 mm × 150 mm casting billet before process optimization

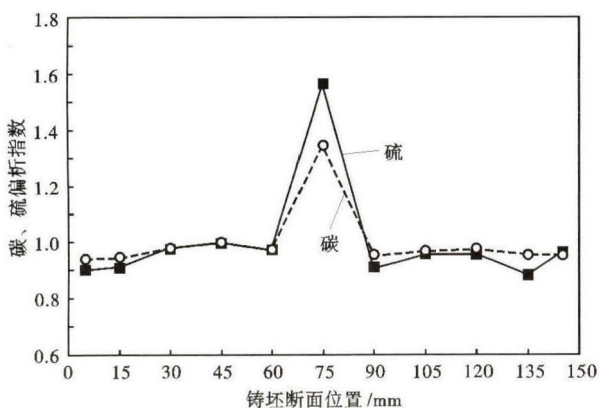


图 3 含硫齿轮钢 QT20CrMo 铸坯断面碳、硫偏析指数的分布
Fig. 3 Distribution of carbon and sulfur segregation index of sulfur-bearing gear steel QT20CrMo at cross section of casting billet

综上所述，认为末端电磁搅拌位置处凝固率较低导致末端电磁搅拌效果不佳，凝固末期，铸流中心存在富集 Mn、S 等元素的溶液，进一步凝固过程中析出大量大尺寸 MnS 夹杂物；大尺寸 MnS 夹杂物在轧制过程中被拉长，但未能充分破碎，进而导致轧材 A 类夹杂物超标。

2 中心偏析优化

2.1 优化方案

为改善轧材的 A 类夹杂物，则需降低铸坯的中心偏析度，最为有效便捷的措施是增加电磁搅拌位置处铸流的凝固率，充分发挥电磁搅拌的作用。因此，建立了凝固传热数学模型，对原工艺条件下铸坯的凝固规律进行了模拟计算，结果如图 5 (a) 所示。

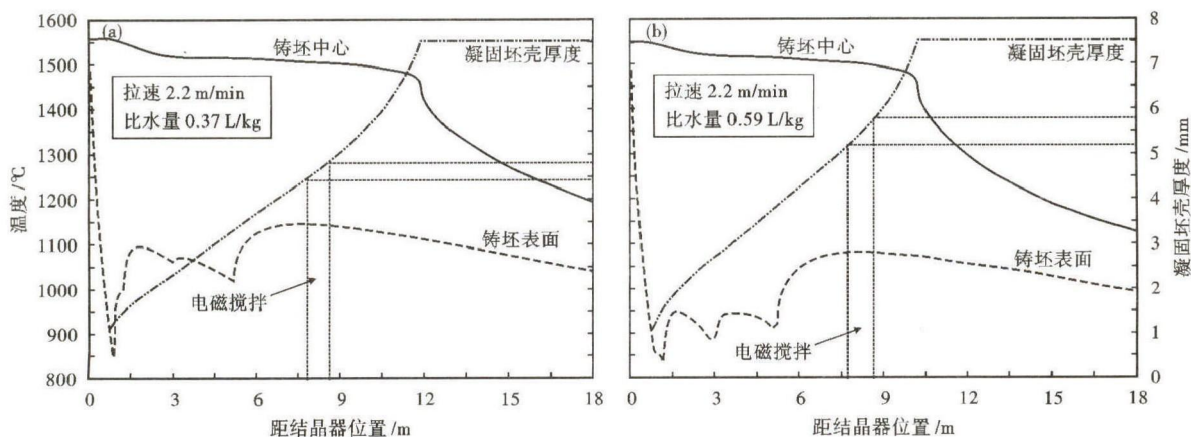


图 5 (a) 原工艺 (二冷比水量 0.37 L/kg) 和 (b) 优化工艺 (二冷比水量 0.59 L/kg) 下铸坯的温度和坯壳厚度的分布
Fig. 5 Distribution of temperature and shell thickness of casting billet with original process (secondary cooling water rate 0.37 L/kg) (a) and optimized process (secondary cooling water rate 0.59 L/kg) (b)

表 2 工艺优化前后 150 mm × 150 mm 铸坯的浇铸参数
Table 2 Casting parameters of 150 mm × 150 mm billet before and after optimization process

工艺	拉速/ (m · min ⁻¹)	二冷比水量/ (L · kg ⁻¹)	末端电磁搅拌	
			电流/A	频率/Hz
优化前	2.2	0.37	250	10
优化后	2.2	0.59	250	10

表 3 优化工艺 150 mm × 150 mm 铸坯的二次冷却参数
Table 3 Secondary water cooling parameters for 150 mm × 150 mm casting billet by optimized process

辊道	a	b	c	水量计算公式
足辊段	39	0		$Q = aV + b$
活动段	14	0	30	$Q = aV^2 + bV + c$
固定 I 段	6	0	14	$Q = aV^2 + bV + c$

注:表中 Q-水量/L;V-拉速/(m · min⁻¹);a,b,c-计算系数。

计算结果表明,二冷比水量为 0.37 L/kg,拉速为 2.2 m/min时,铸流的凝固终点距结晶器液面 11.85 m,而进入电磁搅拌位置处的坯壳厚度为 44.70 mm,与铸坯低倍组织上的白亮带位置相一致(图 4 所示),表明传热数学模型计算结果较为准确。

利用传热数学模型对不同工艺参数进行了计算,结果表明,拉速保持 2.2 m/min,将二冷比水量提升至 0.59 L/kg,如图 5(b)所示,末端电磁搅拌入口和出口位置处坯壳厚度分别为 52.0 mm、57.8 mm,凝固率分别为 0.69、0.77,对于发挥末端电磁搅拌作用较为有利^[16]。根据模拟结果,确定优化工艺的浇铸参数如表 2 所示,其中工艺优化后二次冷却参数如表 3 所示。

2.2 中心偏析改善效果

图 6 为采用优化工艺时铸坯的低倍组织,对比图 4 原工艺下铸坯的低倍组织可以发现,提高二冷比水量后,距表面约 45.0 mm 处的白亮带消失,铸坯中心等轴晶保留了电磁搅拌而导致的流动特征,表明电磁搅拌力作用于凝固末期富集溶质的液相。

工艺优化前后,铸坯中心偏析度的变化情况如图 7 所示。将二冷比水量由 0.37 L/kg 提高至 0.59 L/kg,中心碳偏析度由 1.12 ~ 1.44 降低至 0.99 ~ 1.23,中心硫偏析度由 1.28 ~ 1.70 降低至

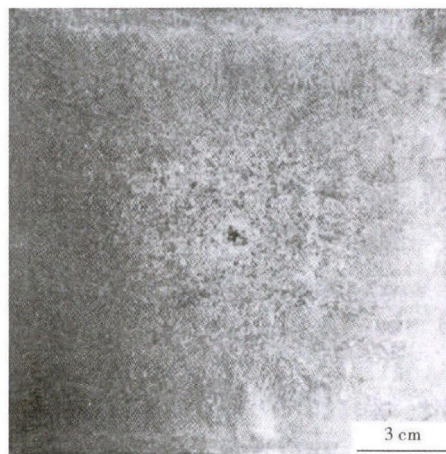


图 6 工艺优化后含硫齿轮钢 QT20CrMo 150 mm × 150 mm 铸坯的低倍组织形貌

Fig. 6 Morphology of macrostructure of sulfur-bearing gear steel QT20CrMo 150 mm × 150 mm casting billet after process optimization

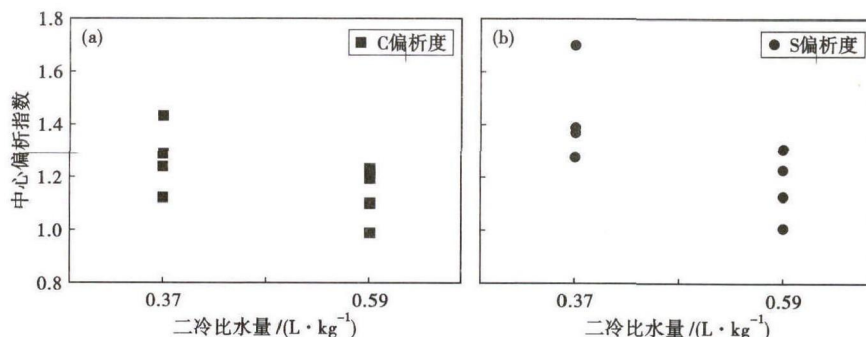


图 7 工艺优化前含硫齿轮钢 QT20CrMo(二冷比水量 0.37 L/kg)后(二冷比水量 0.59 L/kg)中心碳(a)和硫(b)偏析度指数对比

Fig. 7 Comparison of center carbon (a) and sulfur (b) segregation index of sulfur-bearing gear steel QT20CrMo between before (secondary water cooling rate 0.37 L/kg) and after (secondary water cooling rate 0.59 L/kg) process optimization

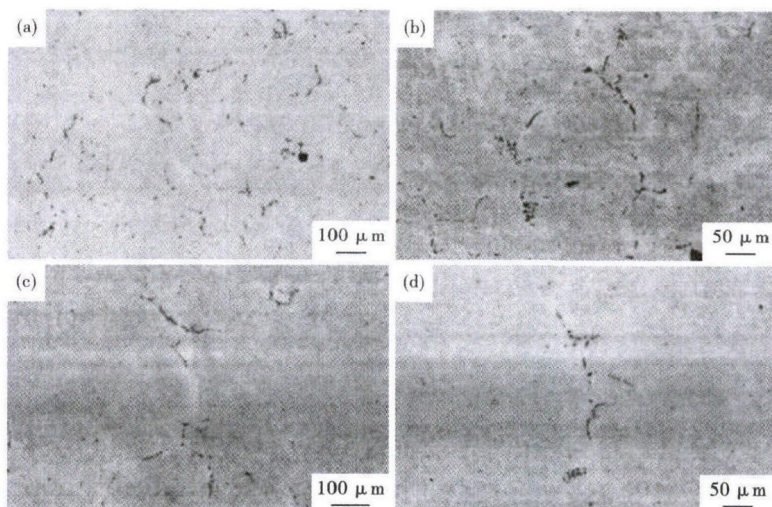


图 8 工艺优化前(a)(b)和优化后(c)(d)含硫齿轮钢 QT20CrMo 150 mm × 150 mm 铸坯中心 MnS 夹杂物形貌,SEM

Fig. 8 Morphology of MnS inclusions at center of 150 mm × 150 mm casting billet of sulfur-bearing gear steel QT20CrMo before (a) (b) and after (c) (d) process optimization, SEM

1.01 ~ 1.31, 铸坯中心偏析得以明显改善。

2.3 铸坯中 MnS 夹杂物改善情况

采用 EVO18 扫描电子显微镜对工艺优化前后铸坯中心的 MnS 夹杂物进行了分析,图 8(a, b)(c, d) 分别给出了优化前、后铸坯中心观察到的 2 个尺寸最大的 MnS 夹杂物的形貌。可以发现优化前 MnS 夹杂物呈网状分布,尺寸达 2 000 μm 左右;提高二冷比水量,优化中心偏析后,铸坯中心最大 MnS 夹杂物在 1 000 μm 左右,尺寸明显变小。提高二冷比水量后 MnS 夹杂物尺寸明显减小可能的原因有两方面:(1)比水量提高后,末端电磁搅拌发挥有效作用,减少了凝固末期钢液的硫含量;(2)提高比水量后,铸坯冷却速率加快,MnS 析出量减少。但考虑到实际凝固过程中,铸坯心部冷却速率数量级仅为 0.1 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$,对 MnS 夹杂物的析出影响不明显;且提高比水量对铸坯表面的冷却速率影响较大,而对心部作用不明显。

3 应用效果

2015 年 11 月优化工艺推广应用后,QT20CrMo 钢种 A 类夹杂物合格率达 100.0%,统计结果表明,A 细夹杂物评级 ≤ 2.0 级的比例由 25.0% 提升至

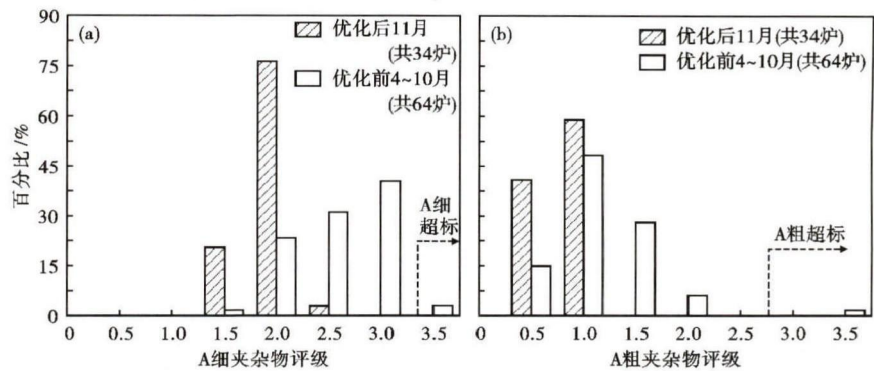


图9 连铸工艺优化前和优化后含硫齿轮钢 QT20CrMo $\Phi 18 \sim 32$ mm 轧材 A 细(a)和 A 粗(b)类夹杂物评级分布

Fig. 9 Distribution of rating of A-type fine (a) and coarse (b) inclusions in $\Phi 18 \sim 32$ mm rolled products of sulfur-bearing gear steel QT20CrMo before and after casting process optimization

97.0%, A 粗夹杂物评级 ≤ 1.0 级的比例由 64.5% 提升至 100.0% (图 9 所示)。

4 结论

(1) QT20CrMo 含硫齿轮钢 A 类夹杂物超标的原因是中心偏析过重导致大量大尺寸 MnS 夹杂物在凝固末期析出,该夹杂物在轧制过程中被拉长但未能完全破碎。

(2) 通过提高二次冷却比水量,有效地发挥了末端电磁搅拌的作用,中心偏析度明显降低,铸坯中心 MnS 夹杂物的尺寸也明显减小。

(3) 采用优化工艺后,轧材 A 类夹杂物粗系可控制在 1.0 级以下,细系可控制在 2.0 级以下。

参考文献

- [1] Takada H, Bessho I, Ito T. Effect of Sulfur Content and Solidification Variables on Morphology and Distribution of Sulfide in Steel Ingots [J]. Transaction ISIJ, 1978, 18(6): 564-572.
- [2] Wakoh M, Sawai T, Mizoguchi S. Effect of S Content on the MnS Precipitation in Steel with Oxide Nuclei [J]. ISIJ International, 1996, 36(8): 1014-1021.
- [3] Oikawa K, Ishida K, Nishizawa T. Effect of Titanium Addition on the Formation and Distribution of MnS Inclusions in Steel during Solidification [J]. ISIJ International, 1997, 37(4): 332-338.
- [4] Oikawa K, Sumi S, Ishida K. Morphology Control of MnS Inclusions in Steel during Solidification by the Addition of Ti and Al [J]. Materials Research and Advanced Techniques, 1999, 90(1): 13-18.
- [5] 乔学亮, 孙培植, 崔 崑. 易切削钢中 Ca 含量与硫化物形态的定量研究 [J]. 华中理工大学学报, 1995, 23(1): 121-123.
- [6] Blais C, L. Esperance G, Lehuy H, et al. Development of an Integrated Method for Fully Characterizing Multiphase Inclusions and its Application to Calcium-Treated Steels [J]. Materials Characterization, 1997, 38: 25-27.
- [7] Lis T. Modification of Oxygen and Sulphur Inclusions in Steel by Ca Treatment [J]. Metalurgija, 2009, 48(2): 95-98.
- [8] 赵麦群, 王伟科, 张 颖, 等. 稀土改性 42CrMoS 易切削钢中的硫化物夹杂分析 [J]. 金属热处理, 2005, 29(11): 20-23.
- [9] 简 龙, 陈伟庆, 孟金霞, 等. 含硫非调质钢中硫化物形态的控制 [J]. 钢铁, 2006, 41(10): 74-77.
- [10] 娄德春, 崔 崑, 吴晓春, 等. 硫化锰夹杂物的热变形行为 [J]. 钢铁研究学报, 1996, 8(6): 11-14.
- [11] Takada H, Inoue T, Kaneko K. Shape Change of Sulfide Inclusions in Steel Wire Rods and Bars and its Influence on Mechanical Properties [J]. Kobe Steel Engineering Reports, 1981, 31(4): 42-44.
- [12] Mcfarland W H, Cronn J T. Spheroidization of Type II Manganese Sulfides by Heat Treatment [J]. Metallurgical Transactions A, 1981, 12A(6): 915-917.
- [13] 邵肖静, 王新华, 王万军, 等. 等温热处理对 YF45MnV 钢中硫化物的影响 [J]. 材料热处理学报, 2010, 31(10): 80-84.
- [14] Shao Xiaojing, Wang Xinhua, Jiang Min, et al. Effect of Heat Treatment Conditions on Shape Control of Large-Sized Elongated MnS Inclusions in Resulfurized Free-Cutting Steels [J]. ISIJ International, 2011, 51(12): 1994-2000.
- [15] 齐江华, 杨成威, 朱万军, 等. 加热保温处理对重轨钢中 MnS 夹杂物的影响 [J]. 钢铁, 2013, 48(11): 79-83.
- [16] 马建超, 周青峰, 苏笃星, 等. C70DA 钢小方坯末端电磁搅拌工艺的优化 [J]. 炼钢, 2012, 28(6): 15-18.

周 力 (1991-), 男, 硕士 (北京科技大学), 助理研究员, 2012 年北京科技大学 (本科) 毕业, 洁净钢冶炼和连铸。

E-mail: zhoujinmingyr@126.com

收稿日期: 2016-06-06