

## 汽车曲轴用含硫易切削钢 C38N2 硫化物控制的工艺实践

郑文超<sup>1,3</sup> 夏旺苒<sup>2</sup> 何浪<sup>2</sup> 陈国生<sup>2</sup> 张念<sup>1,3</sup>

(湖北新冶钢有限公司 1 棒材研究所; 2 炼钢事业部, 黄石 435001;

3 大冶特殊钢股份有限公司高品质特殊钢湖北重点实验室, 黄石 435001)

**摘要** C38N2 钢( /% : 0.36 ~ 0.40C, 0.50 ~ 0.65Si, 1.40 ~ 1.55Mn, ≤ 0.025P, 0.010 ~ 0.040S, 0.10 ~ 0.25Cr, ≤ 0.01Al, 0.015 ~ 0.020N) 的生产工艺流程为 120 t BOF-LF-RH-410 mm × 530 mm 连铸坯-连轧成 Φ170 mm 材。统计分析精炼渣碱度(2.0 ~ 5.5)、成品钢中 Ca 含量(0 ~ 0.075%)、中间包覆盖剂碱度(5.94 和 1.70)、二冷水(0.14 ~ 0.24 L/kg) 和结晶器搅拌电流(250 A 和 100 A) 对钢中硫化物的影响, 通过采用 2 ~ 3 低碱度精炼渣, 控制 [Ca]/[S] > 0.03, 使用 1.70 碱度中间包覆盖剂, 二冷水 0.24 L/kg, 结晶器搅拌电流 100 A 等工艺措施, 使钢中 A 类细系硫化物 ≤ 2.5 级的比率从工艺改进前 80% 提高至 95%, 钢中小尺寸、弥散分布的球形或纺锤形硫化物明显增多。

**关键词** 含硫易切削钢 C38N2 MnS 钙处理 形态控制 二冷水 结晶器电磁搅拌

## Process Practice of Sulfide Controlling for Free Cutting Steel C38N2 Bearing Sulfur for Auto Crankshaft

Zheng Wenchao<sup>1,3</sup>, Xia Wanggou<sup>2</sup>, He Lang<sup>2</sup>, Chen Guosheng<sup>2</sup> and Zhang Nian<sup>1,3</sup>

(1 Steel Bar R&D Department; 2 Steelmaking Plant, Hubei Xinyegang Steel Co Ltd, Huangshi 435001;

3 Hubei Key Laboratory of High Quality Special Steel, Daye Special Steel Co Ltd, Huangshi 435001)

**Abstract** The production process flowsheet of steel C38N2 ( /% : 0.36 ~ 0.40C, 0.50 ~ 0.65Si, 1.40 ~ 1.55Mn, ≤ 0.025P, 0.010 ~ 0.040S, 0.10 ~ 0.25Cr, ≤ 0.01Al, 0.015 ~ 0.020N) is 120 t-BOF-LF-RH-410 mm × 530 mm bloom casting-continuous rolling to Φ170 mm products. The statistics of effect of refining slag basicity (2.0 ~ 2.5), Ca content in finished steel (0 ~ 0.075%), tundish shielding agent basicity (5.94 and 1.70), secondary cooling water (0.14 ~ 0.24 L/kg) and mould electromagnetic stirring current (250 A and 100 A) on sulfide in steel has been analyzed. With process measures including using 2 ~ 3 low basicity slag in refining, controlling [Ca]/[S] > 0.03, using tundish shielding agent basicity 1.70, secondary cooling water rate 0.24 L/kg and mould electromagnetic stirring current 100 A, the ratio of rating ≤ 2.5 of A-thin series sulfide in steel increases from 80% before process improvement to 95%, and the fine, dispersed distributed spheroidal and spindle-shaped sulfide in steel increases markedly.

**Material Index** Free-Cutting Bearing sulfur Steel C38N2, MnS, Calcium Treatment, Morphology Control, Secondary Cooling Water, M-EMS

随着以切削加工为用途的汽车用钢需求量增加,用户对钢材的加工性能日益重视。近年来,含硫汽车用钢在我国已逐渐被批量开发和应用。在钢中加入一定量的硫,一般使钢中硫含量控制在 0.015% ~ 0.035% 或者更高一些,以便产生有利于切削加工的硫化物<sup>[1]</sup>夹杂。硫化物是切削用钢中主要的夹杂物,其存在对钢材的切削性能影响显著。在易切削钢中,硫化物的作用是:在切削过程中钢材被加工部分产生应力集中,导致其内部裂纹的产生和扩展,从而改善了切屑的处理性即自动断屑与排屑性能。但钢中单纯的硫化锰在轧制过程中易生成沿轧制方向延伸的细长条状的硫化锰,引起钢材力学性能的各向异性<sup>[2]</sup>。研究表明,球形、纺锤形的硫化物比长条形硫化物更能改善钢材的横向性能的各向异性<sup>[3]</sup>。因此,合理控制钢中硫化物的析出,

使其具有合适的形态、数量、尺寸以及分布,对提高非调质钢等高品质钢的综合性能有着重要意义。

### 1 工艺控制优化

#### 1.1 控制思路

试验以汽车曲轴用 C38N2 钢为例,通过统计分析含硫钢品种的历史数据,从精炼渣碱度,钙处理等方面进行工艺优化,控制钢中硫化物的析出。C38N2 钢的生产工艺流程为 120 t BOF→LF→RH→连铸 410 mm × 530 mm 方坯→一火轧制成 Φ170 mm 材。C38N2 钢的化学成分如表 1 所示。

#### 1.2 降低精炼渣碱度及钙处理量调整

统计 100 炉含硫钢品种的 A 类夹杂物级别与精炼后期的精炼渣碱度的关系,用 Minitab 软件进行分析,得出如图 1 的 A 细与碱度的关系和主效应图。低碱度渣降低对钢中细小氧化物的吸附<sup>[4]</sup>,有

利于硫化物夹杂物在凝固过程中形成以氧化物为核心外包裹硫化物的球状复合硫化物夹杂物,降低硫化物夹杂物的相对塑性,使其在轧制过程中不易变形或减少轧制过程的变形量<sup>[5]</sup>,从而降低硫化物夹杂物级别,提高硫化物夹杂物合格率。因此在炼钢实践中主要操作为精炼末期渣白后加入硅粉脱氧进行变渣操作,使精炼前期为高碱度渣,精炼后期变为低碱度渣,这样更有利于氧化物及硫化物夹杂物的控制,并且碱度降低后有利于降低真空及软吹过程中的硫损,避免真空后补硫,使硫的控制更加稳定,调整前后精炼渣碱度如表 2。

对生产过程连铸中间包成品钙与硫化物夹杂物数据分析,通过数据收集并运用 minitab 软件及 68 分析技术进行分析,如图 2 硫化物与成品钙、[Ca]/[S]的关系,确定各个含硫范围内硫化物夹杂物最佳钙化所需要的钙量。

根据现场数据分析及结合资料显示<sup>[6]</sup>, [Ca]/[S] > 0.03, 硫化物级别较低概率增加,且能避免高熔点的硫化钙生成。根据硫要求在 0.010% ~ 0.040%, 目标硫控制在 0.025%, 成品钙可控制在 0.000 8% 以上, 根据中间包钙损情况,真空后喂入少量钙线,使钢中保持适量钙,确保在凝固过程中对析出的硫化锰进行钙化<sup>[7]</sup>,各区间硫含量钢种真空后钙处理量如表 3。对连铸坯进行取样,运用 FEI Quanta 400F 扫描电镜对试样进行扫描,配合 INCA Feature 分析软件对试样夹杂物数量及成分等进行统计,结果表明,工艺改进后单纯 MnS 的数量由原来的 63.15% 降低到了 35.42%, 同时 (Ca, Mn)S 及与氧化物复合型硫化物比例明显提高。

### 1.3 连铸使用低碱度中间包覆盖剂

原工艺使用高碱度中间包覆盖剂和工艺改进后所用低碱

表 1 C38N2 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of Steel C38N2 / %

C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cr	Mo	Ni	Cu
0.36 ~ 0.40	0.50 ~ 0.65	1.40 ~ 1.55	≤ 0.025	0.010 ~ 0.040	0.015 ~ 0.020	≤ 0.01	0.10 ~ 0.25	≤ 0.06	≤ 0.15	≤ 0.25

表 2 调整前后精炼终渣组成和碱度

Table 2 Ingredient and basicity of refining slag before and after adjusting

精炼终渣	组成 / %						碱度
	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MnO	
调整前 (平均)	0.43	28.21	5.45	8.66	50.38	0.16	5.82
调整后 (平均)	0.35	25.68	6.42	16.96	48.72	0.16	2.87

度中间包覆盖剂成分如表 4 所示。低碱度覆盖剂能降低连铸中间包硫损,减少覆盖剂与钢水的反应,避免生成高熔点的 CaS 夹杂物。低碱度覆盖剂与高碱度覆盖剂硫化物级别对比,经过统计使用低碱度覆

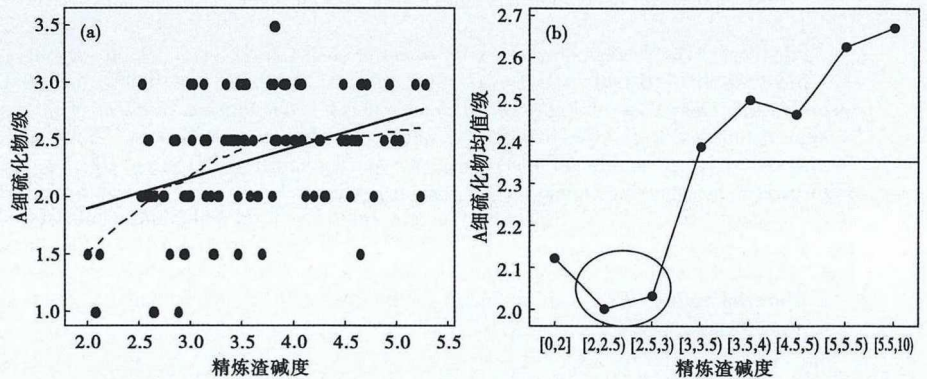


图 1 精炼渣碱度对 C38N2 钢 Φ170 mm 热轧材 A 类硫化物级别的影响:(a)分布图;(b)均值

Fig. 1 Effect of refining slag basicity on rating of A-fine sulfide in steel C38N2 Φ170 mm hot-rolled products: (a) distribution diagram; (b) average value distribution

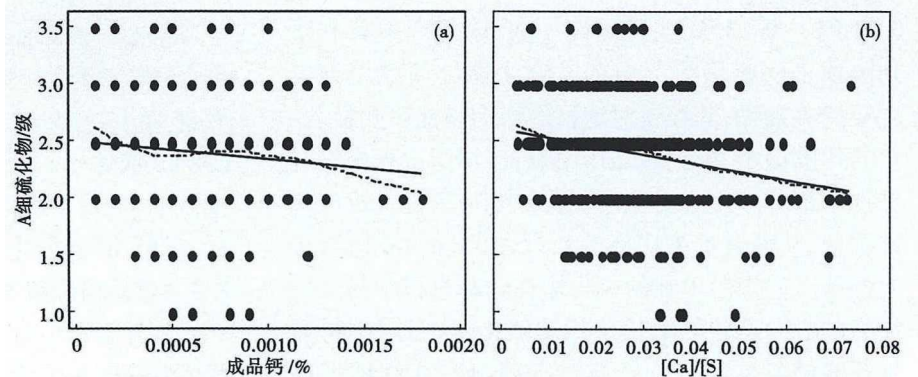


图 2 C38N2 钢成品钙含量(a)和 [Ca]/[S] (b) 对钢中 A 类硫化物级别的影响

Fig. 2 Effect of calcium content in finished steel C38N2 (a) and [Ca]/[S] (b) on rating of A-fine sulfide in steel

表 3 钙处理 C38N2 钢成品硫、钙控制目标/%

Table 3 Control target of end sulfur and calcium content in steel C38N2 by calcium treatment /%

硫要求	成品硫控制目标	成品钙控制目标
0.010 ~ 0.025	0.015	0.000 5
0.015 ~ 0.030	0.020	0.000 6
0.020 ~ 0.040	0.025	0.000 8

表 4 中间包覆盖剂组成和碱度

Table 4 Ingredient and basicity of tundish shielding agent

覆盖剂	组成 / %								碱度
	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	C	
高碱度	0.80	36.33	2.86	8.98	0.09	0.01	53.31	1.91	5.94
低碱度	0.74	7.05	7.28	28.37	0.12	0.01	48.23	1.51	1.70

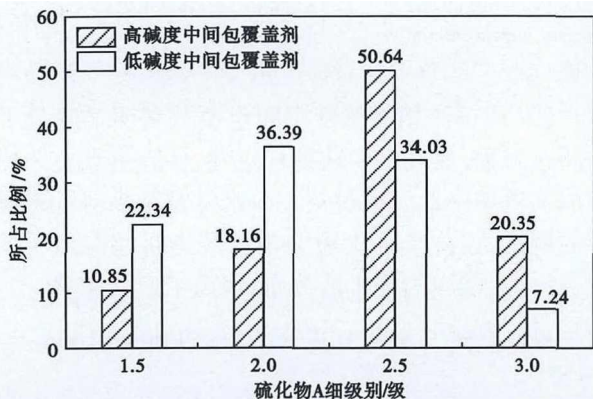


图 3 高、低碱度中间包覆盖剂对 C38N2 钢硫化物分布的影响  
Fig. 3 Effect of high and low basicity tundish shielding agent on distribution of sulfide in steel C38N2

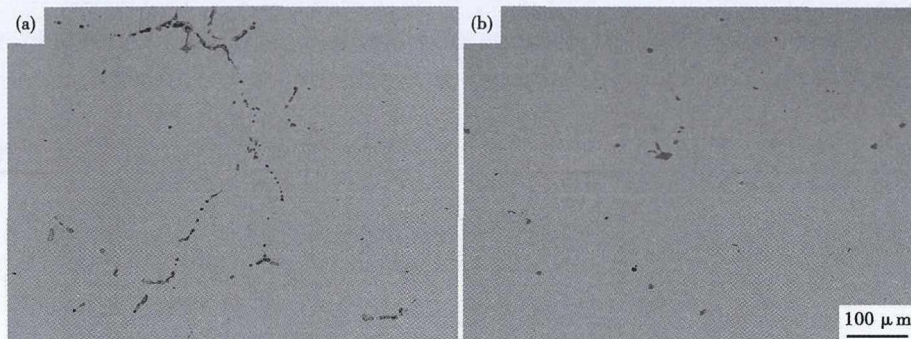


图 4 连铸参数改进前二冷水 0.14 L/kg, 结晶器搅拌电流 250 A (a) 和改进后二冷水 0.24 L/kg, 结晶器搅拌电流 100 A (b) 铸坯半径 1/2 处硫化物分布形貌

Fig. 4 Distribution morphology of sulfide at 1/2 radius of casting bloom before casting parameters improvement- secondary cooling water 0.14 L/kg, M-EMS current 250 A (a) and after improvement- secondary cooling water 0.24 L/kg, M-EMS current 100 A (b)

盖剂钢中硫化物出现高级别的概率减小,如图 3,说明低碱度覆盖剂对改善硫化物级别有一定作用。

#### 1.4 连铸二冷水量及结晶器电磁搅拌调整

前期对连铸坯半径 1/2 处取样发现此处硫化物

成片状分布,硫化物聚集严重,主要为 II 类硫化物,根据低倍酸洗结果判断此处为晶界交接处,此类硫化物主要分布在先共晶奥氏体枝晶间,为共晶产物<sup>[8]</sup>,如图 4(a) 所示。研究表明<sup>[9]</sup>,随着冷却速率的增加, MnS 的平均尺寸减小,而当冷却速率大于 100 °C/min 时,冷却速率对 MnS 尺寸影响不大,因此在较低冷却速率时可以适当提高冷却速率来减少 MnS 的生长。铸坯半径 1/2 处偏析严重时存在高浓度的锰和硫,在凝固过程中很容易生成大量尺寸很大的 MnS 夹杂,在随后的轧制过程中被轧成大尺寸长条状。MnS 的数量随着硫浓度的增加而增多,因此要改善 MnS 夹杂超标问题必须减轻铸坯的偏析<sup>[10]</sup>。

在实际操作中对二冷配水量、结晶器电磁搅拌进行调整,二冷水从弱冷 0.14 L/kg 改为强冷 0.24 L/kg,结晶器电磁搅拌电流由 250 A 改为 100 A,对冶炼过程、铸坯及轧材进行取样,统计参数改进对硫化物的影响,改进后铸坯半径 1/2 处硫化物高倍情况如图 4(b)。对比改进前图 4(a) 可以看出,改进后的连铸坯半径 1/2 处硫化物分布均匀,尺寸细小。

## 2 改进效果

通过大量的生产试验,优化含硫钢的生产工艺,成品材硫化物情况得到明显改善,从图 5(a) 与 (b) 分别为改进前后成品材硫化物情况可以看出改进后成品材硫化物得到明显改善。使用 ASPEX 夹杂物

扫描仪对试样中硫化物进行数量、尺寸、长宽比统计,统计情况如表 5,改进后平均视场的硫化物数量减少,尺寸减小,长宽比减小,硫化物情况明显改善。工艺改进后成品材一检硫化物合格率明显提高,金相检验夹杂物 A 类细系 ≤ 2.5 级合格率从工艺改进前 80% 提高到 95%。工艺改进后硫化物级别统计如图 6 所示。

## 3 结论

(1) 采用降低精炼渣碱度及钙处理量调整工艺,有利于钢中球状或纺锤状复合硫化物的生成,减少了单纯硫化锰夹杂物的数量,复合硫化物塑性降低,减少了轧制过程的变形,从而降低了硫化物级别。

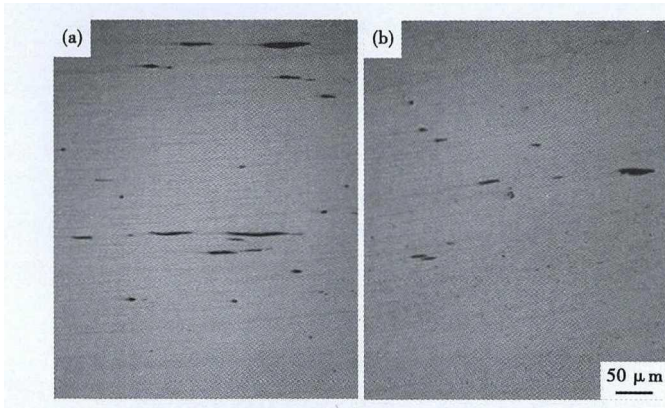


图 5 改进前(a)和后(b)C38N2 钢 Φ170 mm 热轧材硫化物的分布形貌

Fig.5 Distribution morphology of sulfide in steel C38N2 finished hot-rolled Φ170 mm products before (a) and after (b) improvement

表 5 改进前后 C38N2 钢 Φ170 mm 热轧材硫化物统计(平均值)

Table 5 Statistics of sulfide in steel C38N2 Φ170 mm hot-rolled products before and after improvement (average)

项目	改进前	改进后
数量/个	29	18
平均尺寸/μm	24.505	16.61
长宽比	11.258	6.065
平均面积含量/%	0.25	0.16
总长度/μm	710.66	298.98

参考文献

[1] 李润霞,顾文涛,胡喜军.含硫齿轮钢夹杂物控制[C].2012年全国炼钢-连铸生产技术会论文集,重庆;2012:439-445.  
 [2] Brunet J C, Torerat P, Hugo M, et al. Influence Des Inclusions De Sulfures Sur Le Comportement a La Rupture Des Aciers De Construction Metallique[J]. Rev Metall, 1977, 27(1):1-3.  
 [3] 张海霞,梁娜,翟正龙,等.易切削钢中硫化物形态的研究[J].冶金丛刊,2011,196(6):8-11.  
 [4] 代刚,朱志红,储晓明.易切削钢 c53 硫含量控制工艺设计与实践[J].特钢技术,2014,79(2):12-14.  
 [5] 常开地,陈明跃,张慧封,等.转炉生产含硫非调质钢中硫化物夹杂的研究[C].2004年中国金属学会青年学术年会论文集,福州;2004.  
 [6] 袁婷,李国忠,周兴海,等. Ca-Si 处理对易切削非调质钢 30MnVS 中硫化物形态和成分的影响[J].特殊钢,2009,30(5):39-41.  
 [7] 杨文,杨小刚,张立峰,等.钢中 MnS 夹杂物控制综述[J].炼

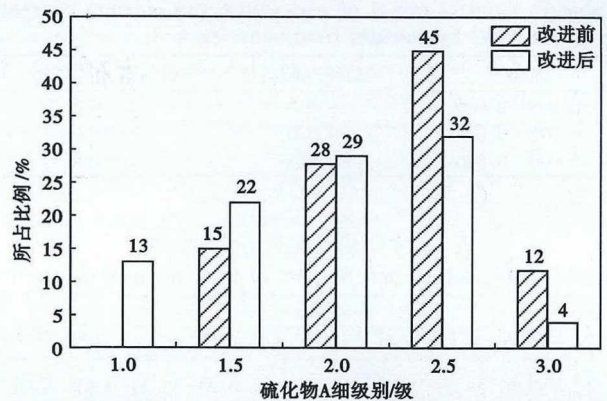


图 6 改进工艺前后 C38N2 钢 Φ170 mm 热轧材硫化物级别分布对比

Fig.6 Comparison of rating distribution of sulfide in steel C38N2 hot-rolled Φ170 mm products between before and after process improvement

(2)通过使用低碱度中间包覆盖剂明显降低了中间包硫损,提高钢中硫的稳定性,使高熔点夹杂物生成的概率降低。通过对二冷水量及结晶器电磁搅拌的调整,连铸坯硫化物夹杂物聚集问题得到明显改善,使其能均匀细小的分布,提高了产品质量。

国家重点研发计划项目资助(2016YFB0300100)

钢,2013,29(6):71-78.  
 [8] 卢献忠,吴润,吴海涛,等.钢中硫化物的形成及作用进展[J].材料导报,2010,24(7):81-84.  
 [9] 吴华杰,岳峰,尤大利,等. Mn/S 对含硫非调质钢中硫化物形态的影响[J].北京科技大学学报,2014,36(1):50-52.  
 [10] 郭登仰,吴晓东,陈瑞泷,等.钙处理含硫 20CrMo 齿轮钢夹杂物析出研究[J].钢铁钒钛,2012,33(6):69-73.

郑文超(1981-),男,主任工程师,2003年太原理工大学(本科)毕业,汽车用非调质钢、齿轮钢、弹簧钢的研发。

E-mail: zhengwenchao@citicsteel.com

收稿日期:2018-08-12