

提高 20CrMnTiH 齿轮钢冶金质量的工艺实践

杜东福 赵喜庆 张建元 田景林 贾文军
(凌源钢铁股份有限公司技术中心, 凌源 122500)

摘要 20CrMnTiH 齿轮钢(/% :0.17~0.23C,0.80~1.20Mn,0.17~0.37Si,1.00~1.45Cr,0.04~0.10Ti, ≤0.035S, ≤0.030P, ≤0.002 00) 的工艺流程为脱硫铁水-120 t BOF-LF-160 mm × 160 mm 坯连铸-轧制 Φ20~45 mm 材。通过目标控制 LF 精炼渣碱度 4.0~8.0, 渣中(FeO) ≤0.75%, [Als] 0.020%~0.035%, LF 白渣时间 ≥30 min 等并经过 Ca 处理和吹氩搅拌等工艺措施, 145 炉分析结果表明, T[O] 为 0.000 6%~0.001 8%, 158 炉统计结果得出, 当 Ca/Als = 0.10~0.14 时, 钢中非金属夹杂物 A、B、C 细系 ≤2.0 级, 粗系 ≤1.5 级, Ds 类 ≤1.0 级, 20CrMnTiH 齿轮钢的冶金质量显著提高。

关键词 20CrMnTiH 齿轮钢 120 t BOF-LF 160 mm × 160 mm 坯 CC 流程 LF 精炼渣碱度 钢中氧含量 夹杂物 应力裂纹

Process Practice on Improving Metallurgical Quality of Gear Steel 20CrMnTiH

Du Dongfu, Zhao Xiqing, Zhang Jianyuan, Tian Jinglin and Jia Wenjun
(Technology Center, Lingyuan Iron and Steel Co Ltd, Lingyuan 122500)

Abstract The process flowsheet of gear steel 20CrMnTiH (/% : 0.17~0.23C, 0.80~1.20Mn, 0.17~0.37Si, 1.00~1.45Cr, 0.04~0.10Ti, ≤0.035S, ≤0.030P, ≤0.002 00) is desulphurized metal-120 t BOF-LF-160 mm × 160 mm billet casting-rolling to Φ20~45 mm products. With process measures including aim controlling LF refining slag basicity 4.0~8.0, (FeO) in slag ≤0.75%, [Als] 0.020%~0.035%, LF white slag time ≥30 min, calcium treatment and argon stirring, the 145 heats analysis results show that T[O] in steel is 0.000 6%~0.001 8%, and the 158 heats statistic results obtains that as Ca/Als = 0.10~0.14, the rating of A, B and C thin series inclusions in steel is ≤2 and that of rating of heavy series is ≤1.5, and the rating of Ds series inclusion in steel is ≤1.0, the metallurgical quality of gear steel 20CrMnTiH improves markedly.

Material Index Gear Steel 20CrMnTiH, 120 t BOF-LF-160 mm × 160 mm Billet Casting Flowsheet, Basicity of LF Refining Slag, Oxygen Content in Steel, Inclusions, Stress Cracks

1 工艺设计

1.1 技术要求

20CrMnTiH 齿轮钢执行标准 GB/T5216-2014, 标准中除对 [C]、[Mn]、[Si]、[Cr]、[Ti]、[S]、[P] 有要求外, 同时 [O] 有 ≤0.000 20% 的要求; 不仅要求低倍组织一般和中心疏松、中心偏析 ≤2.0 级, 而且对非金属夹杂、奥氏体晶粒度、末端淬透性、表面质量等有较高的要求(见表 1)^[1]。同时为更好地满足客户要求, 凌源钢铁股份有限公司(凌钢)又增加了热顶锻、带状组织、塔型发纹等检验项目, 并进行成分内控设计。

1.2 主体装备

主体装备炼钢有 KR 铁水脱硫 2 套, 120 t 氧气顶底复合吹炼转炉 2 座, 120 t LF 精炼炉 3 座, RH 真空精炼炉 1 座, 带有结晶器电磁搅拌、气雾冷却、二冷动态自动

配水和末端电磁搅拌功能全弧形八机八流连铸机 1 台; 轧钢有效长度 30 m 步进梁蓄热式加热炉 1 座, 全连续平立交替布置二辊短应力轧机 16 架, 精轧前后均拥有水冷装置, 12.5 m × 120 m 冷床 1 座, 1 300 t 冷剪机 1 座, BRAUN 公司引进固定式砂轮锯 2 台, 缓冷箱 3 个。

1.3 成分设计

基于 20CrMnTiH 齿轮钢从铁水-120 t 转炉冶炼-LF 精炼-连铸-加热-轧制-冷却-剪切-收集-入箱的生产工艺以及末端淬透性和奥氏体晶粒度等标准要求, 进行化学成分窄范围内控设计(表 2)。

表 1 20CrMnTiH 钢夹杂物、奥氏体晶粒度、淬透性标准要求
Table 1 Standard requirement of inclusions, austenite grain size and hardenability for steel 20CrMnTiH

非金属夹杂物/级				奥氏体晶粒度/级	末端淬透性, HRC 硬度值											
A	B	C	D		J ₉	J ₁₅										
细	粗	细	粗	细	粗	≥3.0	≤2.5	≤3.0	≤2.0	≤2.0	≤1.5	≤2.0	≤1.5	≥5.0	30~42	≥22 或 ≤35

表 2 20CrMnTiH 钢化学成分要求和内控目标/%
Table 2 Requirement and internal control aim of chemical composition for steel 20CrMnTiH /%

项目	C	Mn	Si	Cr	Ti	S	P	Als	O
国标要求	0.17~0.23	0.80~1.20	0.17~0.37	1.00~1.45	0.04~0.10	≤0.035	≤0.030	-	≤0.002 0
内控设计	0.17~0.21	0.86~0.92	0.21~0.27	1.06~1.12	0.05~0.08	≤0.015	≤0.025	0.020~0.035	≤0.001 5
目标	0.19	0.89	0.24	1.09	0.06	≤0.010	≤0.020	0.025	≤0.001 5

1.4 工艺概况

炼钢: 转炉终点控制 $[C] \geq 0.08\%$ 、 $[P] \leq 0.020\%$, 残余元素 $Ni \leq 0.30\%$, $Cu \leq 0.20\%$, $Mo \leq 0.10\%$; 出钢时采用铝锭(参考用量 0.8 kg/t)、中碳锰铁(参考用量 4.5 kg/t)、硅锰合金(参考用量 12.0 kg/t)、中碳铬铁(参考用量 21.0 kg/t)脱氧合金化(合金经烘烤), 并加入高铝矾土(参考用量 1.0~2.0 kg/t)等渣料; LF 精炼按要求加入石灰(参考用量 6~8 kg/t)、碳化硅(参考用量 0~1.0 kg/t)、电石(参考用量 0~0.6 kg/t)、铝粒(参考用量 0~0.5 kg/t)等造渣材料, 采用 Ca 处理, 喂 Ca 线前加入钛铁、钛合金化; 连铸 8# 铸机 160 mm × 160 mm, 过热度控制 18~30 °C, 中间包正常液面 ≥ 800 mm, 结晶器水流量 110 m³/h, 电磁搅拌电流 240 A、频率 4 Hz, 工作拉速 1.7 m/min, 比水量 0.55 L/kg。

轧钢: 以 5# 棒材为例, 原坯料 160 mm × 160 mm × 11 m, 轧制规格 $\Phi 20 \sim 45$ mm, 炉膛温度均热段 I 160~1200 °C, 加热 II 段 1170~1230 °C, 加热 I 段 840~920 °C, 炉内停留时间 ≥ 120 min; 开轧温度 1000~1160 °C, 终轧温度 950~1100 °C, 为避免轧件出现上贝氏体及马氏体等异常组织, 采用冷床快进方式进行剪切, 并确保剪切温度 ≥ 400 °C, 检重后收集打捆并及时入箱缓冷。

1.5 关键工艺设计研究

1.5.1 氧含量

钢液常用的脱氧方式有沉淀脱氧、扩散脱氧和真空脱氧。结合产品市场用途、成本和装备等因素综合考虑, 凌钢氧气顶吹转炉主要采用铝锭沉淀脱氧: (1) 铝与钢液中溶解氧结合能力较大, (2) 产生的脱氧产物 Al₂O₃ 配以 Ca 处理易于从钢液中去除; LF 精炼采用扩散脱氧, 虽然脱氧过程慢, 但 LF 有充足的还原时间, 钢液不易被脱氧产物所沾污, 那么 LF 造渣工艺就显得尤为重要。

研究表明, 熔渣的还原性决定于熔渣碱度和渣中氧化铁含量, 1600 °C 熔渣碱度和 (FeO) 与钢液中 [O] 的关系见图 1 所示。从图 1 中可以看出, 若渣中 (FeO) 一定时, 则渣碱度为 1.87 时, 钢中 [O] 最高, 碱度大于 1.87 时, [O] 随碱度提高而降低, 但碱

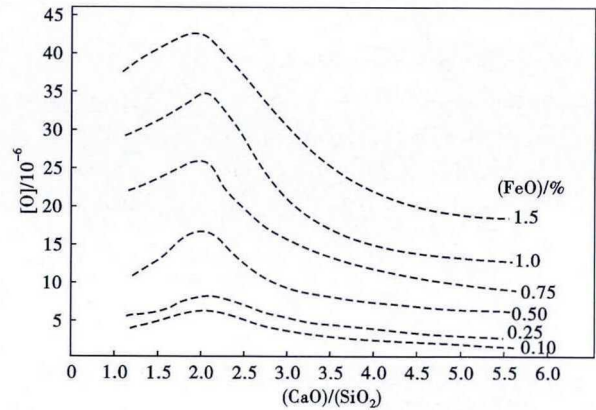


图 1 熔渣碱度 $R = (CaO)/(SiO_2)$ 和 (FeO) 对钢液 [O] 的影响

Fig. 1 Effect of slag basicity $R = (CaO)/(SiO_2)$ and (FeO) on oxygen content in liquid

度大于 3.5 时影响就不显著了, 因此设计时 LF 炉渣碱度应至少大于 3.5^[2]。凌钢内控设计时 $[O] \leq 0.001 5\%$, 从图 1 中可以看出, LF 精炼后炉渣碱度最好达到 4.0 以上, 且渣中 (FeO) 需 ≤ 0.75%。同时考虑炉渣碱度过高渣流动性不好, 不利于吸附夹杂, 凌钢设计 LF 炉渣碱度 4.0~8.0, 渣系目标 CaO 含量 57%, SiO₂ 含量 9%, Al₂O₃ 含量 25%, FeO ≤ 0.75%, 并依据转炉下渣及出钢 [S] 等情况调整渣量, 平均渣量 13.5 kg/t。

1.5.2 非金属夹杂物

钢中非金属夹杂物分为内在和外来两类, 内在的主要为脱氧产物和硫化物以及与空气、钢渣、耐火材料二次氧化反应产物, 外来的主要为卷渣和被腐蚀的耐火材料^[3]。凌钢优特钢目前 [S] 较低, 夹杂物缺陷主要为氧化物, 凌钢冶炼采用挡渣锥和挡渣塞双挡渣出钢控制下渣量, 出钢时钢包加高铝矾土和顶灰造低熔点渣控制钢包渣氧化性, LF 精炼采用高碱度、低熔点、低氧化铁、富氧化钙铝酸盐类渣系, 钢包软吹氩配以合理的渣量有效吸附大颗粒夹杂降低总氧; 连铸钢包采用长水口氩封保护浇注、钢包下渣检测、碱性包衬、恒拉速恒液位操作, 结晶器液面自动控制、浸入式水口、合适的保护渣等措施控制非金属夹杂及氧含量。基于以上控制钢中氧含量辅以 LF 合理渣系减少夹杂是凌钢技术设计研究的重点。

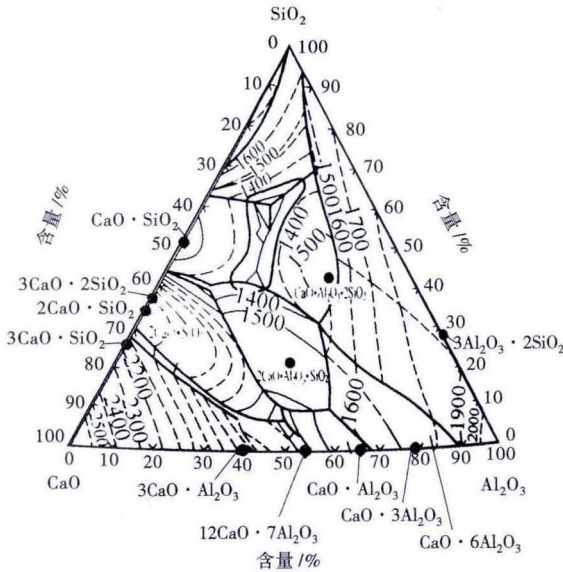


图 2 Ca 处理后钢中夹杂物在 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 相图塑性夹杂物区域中的位置

Fig. 2 Location of inclusions in steel after calcium treatment at inclusion plasticity area of CaO-SiO₂-Al₂O₃ phase diagram

凌钢生产 20CrMnTiH 齿轮钢采用铝脱氧,并设计 [Als] 在 0.020% ~ 0.035%, 目标值 0.025%。资料表明,脱氧产物 Al₂O₃ 夹杂呈簇群状存在,不易上浮排除,通过吹氩搅拌会加速上浮,或者可以通过钙处理,改变形态利于其上浮,但处理后生成的夹杂物应处于 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 相图的塑性夹杂物区域(图 2); [Als] 较低时,钙处理生成低熔点 2CaO · Al₂O₃ · SiO₂; [Als] 较高时,钙处理应保持合适的钙铝比,以形成 12CaO · 7Al₂O₃^[5]。凌钢采用钙处理和吹氩搅拌两种方式并行的夹杂物处理方式,设计 LF 白渣保持时间 ≥ 30 min,成分温度合适后喂 Ca 线量 [Als] × 15 ~ 20 m,出站软吹时间 ≥ 20 min。

2 实物控制情况

2.1 氧含量

为验证氧含量控制工艺设计的准确性,摸索最佳工艺参数,对近期生产数据进行了统计,结果见表 3,从表 3 中看 T[O] 均符合标准 ≤ 0.0020% 要求,且多数 ≤ 0.0015%,说明按 4 ~ 8 控制 LF 炉渣碱度,渣中 (FeO) ≤ 0.75% 是正确的。同时为确定最佳工艺控制目标,结合凌钢工况,将 LF 炉渣碱度 (CaO)/(SiO₂)、渣中 (CaO)/(Al₂O₃) 与钢中 T[O] 对应关系分别做成散点图(图 3、图 4),从散点图趋势看,碱度在 7.0 左右比较合适,下一步若继续降低 T[O],应适当降低 (CaO)/(Al₂O₃) 比值,也就是说降低渣中 Al₂O₃ 的活度,促进吸附钢中的 Al₂O₃ 夹杂。

表 3 LF 精炼渣碱度、(FeO) 和 (CaO)/(Al₂O₃) 与 T[O] 统计,145 炉

Table 3 Statistics of LF refining slag basicity, (FeO) and (CaO)/(Al₂O₃), and T[O] in steel, 145 heats

项目	碱度 (R)	(FeO)/%	(CaO)/(Al ₂ O ₃)	T[O]/%
实物范围	3.63 ~ 11.98	0.08 ~ 1.50	1.75 ~ 2.97	0.0006 ~ 0.0018
平均值	6.49	0.59	2.32	0.0011

注:表中 (FeO) 数值受取渣样用铁管沾管表面氧化影响,检测结果与实际比偏高,经反算平均高约 0.15%。

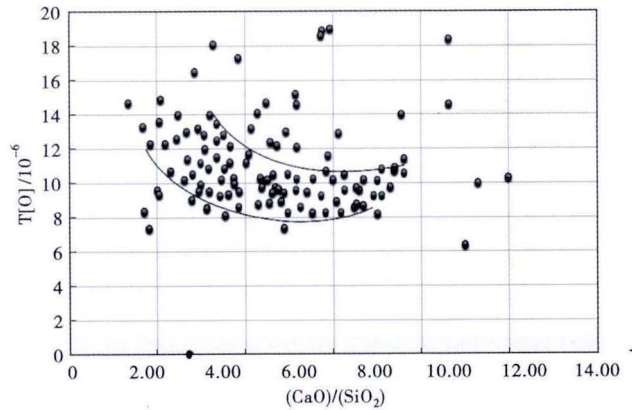


图 3 LF 精炼渣碱度对 T[O] 的影响

Fig. 3 Effect of LF refining slag basicity on T[O]

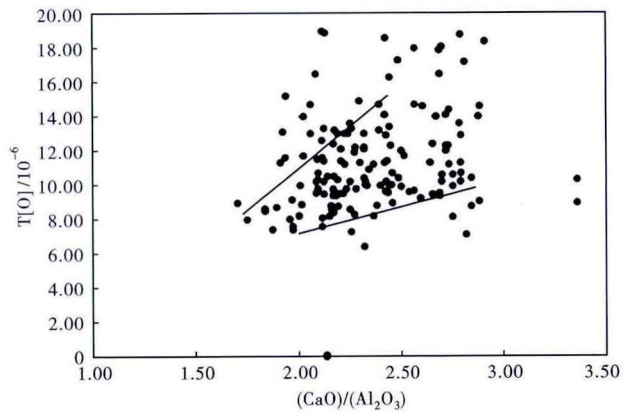


图 4 渣中 (CaO)/(Al₂O₃) 对 T[O] 的影响

Fig. 4 Effect of (CaO)/(Al₂O₃) in slag on T[O]

2.2 非金属夹杂物

结合凌钢实际,对 5# 棒材生产 20CrMnTiH 齿轮钢的 [Als] 控制、Ca/Als 与非金属夹杂物对应情况进行了统计,结果见表 4。从实物统计情况看,20CrMnTiH 齿轮钢的 Ca/Als 在 0.10 ~ 0.14 相对比较合适,夹杂物(细系和 ≤ 2.0、粗系和 ≤ 1.5 和 D_s 类 ≤ 1.0)比例均好于 Ca/Als 小于 0.10 的;从目前看奥氏体晶粒度均在 6 级以上,且 7 级以上比例达 99.3%,结合非金属夹杂物情况综合考虑,[Als] 控

制不易太高,总体上凌钢设计 [Als] 在 0.020% ~ 0.035% 是合理的;由于 D_s 类夹杂成分复杂、来源复杂,涉及反应产物长大、卷渣、耐火材料、水口脱落物及合金等诸多方面^[4]。

2.3 剪切应力裂纹

冬季生产时,由于北方气温较低的气候条件等影

表4 钢中 [Ca/Als] 和 [Als] 对非金属夹杂物级别的影响

Table 4 Effect of [Ca/Als] and [Als] in steel on rating of nonmetallic inclusions

项目	成分/%	样本数/ 炉	类别	非金属夹杂物/级			
				细系和 ≤ 2.0	粗系和 ≤ 1.5	D_s 类 ≤ 1.0	三类均合
Ca/Als	<0.10	175	数量/炉 比例/%	172 98.3	174 99.4	167 95.4	163 93.1
	$\geq 0.10 \sim$ 0.14	81	数量/炉 比例/%	81 100	81 100	79 97.5	79 97.5
	$\geq 0.020 \sim$ 0.030	139	数量/炉 比例/%	139 100	139 100	133 95.7	133 95.7
Als	≥ 0.030	119	数量/炉 比例/%	116 97.5	118 99.2	115 96.6	110 92.4



图5 20CrMnTiH 钢轧材(a)应力裂纹宏观形貌;(b)裂纹处上贝氏体组织形貌;(c)正常铁素体+珠光体组织形貌

Fig.5 Macro-morphology of stress cracks (a), morphology of upper bainite structure at cracks (b), and morphology of normal ferrite + pearlite structure (c), rolled products of steel 20CrMnTiH

响,轧件在冷床上冷却速度较快,部分轧件经冷剪剪切后端面出现“剪切应力裂纹”现象(图5a),裂纹与剪切方向垂直,裂纹深度约0.1 mm,经金相分析,缺陷轧件存有较高含量的上贝氏体等异常组织(图5b),因此必须降低轧件冷却速率,提高轧件在铁素体和珠光体区域的停留时间,减少贝氏体尤其马氏体形成几率,为此凌钢采取轧件冷床快进方式提高剪切温度(实际400℃以上),剪切后及时入箱缓冷,利用轧件堆垛回温使20CrMnTiH表面温度一定时间内保持在 M_s 转变点380℃以上,经出箱后检验为正常铁素体+珠光体组织(图5c),剪切应力裂纹现象消失。

3 结语

通过生产实践证明,凌钢生产的20CrMnTiH 齿轮钢按4.0~8.0设计LF炉渣碱度,设计渣中 $(FeO) \leq 0.75\%$, [Als]在0.020~0.035%,采用钙处理和吹氩搅拌夹杂物处理方式,LF白渣保持时间 ≥ 30 min,成分、温度合适后喂Ca线量[Als] ×

15~20 m,出站软吹时间 ≥ 20 min,提高轧件剪切温度达380℃以上,并及时入箱缓冷的工艺是有效可行的,实物质量完全能够满足标准GB/T5216-2014的相关要求。

参考文献

- [1] 王毛球,栾燕,曹红福,等.保淬透性结构钢[S].中国国家标准化管理委员会,2014.
- [2] 韩至成.炼钢学[M].北京:冶金工业出版社,1980:30-31.
- [3] 菜焕堂.夹杂物的表征与洁净钢生产工艺[R].北京:中国金属学会第五届高品质钢研讨会,2016.
- [4] 岳峰.高品质特殊钢棒线材非金属夹杂物控制技术[R].石家庄:中国金属学会全国特殊钢年会,2015.
- [5] 张岩,张红文.氧气转炉炼钢工艺与设备[M].北京:冶金工业出版社,2010:154-156.

杜东福(1971-),男,高级工程师,1994年鞍山钢铁学院(本科)毕业,优特钢研发。E-mail:dudongfu@sina.com

收稿日期:2017-11-06