

· 工艺技术 ·

20CrMnTiH 齿轮钢 Φ120 mm 棒材硬点缺陷分析及改善措施

丰 年

(山东钢铁股份有限公司莱芜分公司, 莱芜 271104)

摘 要 通过金相显微镜、扫描电镜和能谱仪分析了 20CrMnTiH 齿轮钢 Φ120 mm 棒材锯切下料过程硬点缺陷成因。结果表明, 齿轮钢棒材试样内部存在 30 ~ 80 μm 大颗粒夹杂物聚集是造成齿轮钢锯切过程硬点缺陷的主要原因。这些大颗粒夹杂物主要为 Al₂O₃ 夹杂物和 TiN 夹杂物的聚集。通过控制 120 t 转炉出钢钢水溶解氧含量小于 200 × 10⁻⁶、调整精炼终点钙铝参数(0.015% ~ 0.025% Al, 0.001 5% ~ 0.002 0% Ca)、连铸保护浇铸减少过程吸氮、浇铸钢水温度由 1 530 °C 降至 1 525 °C、优化二冷配水加速钢的凝固等措施, 消除了转炉生产 20CrMnTiH 齿轮钢硬点缺陷。

关键词 20CrMnTiH 硬点 转炉 Al₂O₃ + TiN 夹杂物 钙铝参数

Analysis of Hard Point Defects of 20CrMnTiH Gear Steel Φ120 mm Product and Improvement Measures

Feng Nian

(Laiwu Branch Co, Shandong Iron and Steel Group Corporation, Laiwu 271104)

Abstract The causes of hard spot defects in cutting process of 20CrMnTiH gear steel Φ120 mm product were systematically analyzed by metallographic microscopy, scanning electron microscopy and energy dispersive spectrometer. The results show that the main cause of hard spot defects in gear steel sawing process is the aggregation of large inclusions of 30 ~ 80 μm in gear steel round bar. The main inclusions are Al₂O₃ inclusions and TiN inclusions. By controlling the dissolved oxygen content of 120 t converter tapping steel less than 200 × 10⁻⁶, adjusting the parameters of calcium and aluminium (0.015% ~ 0.025% Al, 0.001 5% ~ 0.002 0% Ca) at refining end point, reducing nitrogen absorption during continuous casting, decreasing casting liquid temperature from 1 535 °C to 1 525 °C and optimizing secondary cooling water to accelerate the solidification of steel, the hard point defect in 20CrMnTiH gear steel produced by converter is eliminated.

Material Index 20CrMnTiH, Hard Spot, BOF, Al₂O₃ + TiN Inclusions, Parameters of Calcium and Aluminum

山东钢铁公司莱钢分公司生产的齿轮钢热轧成不同规格的圆钢发给下游客户使用, 在用户锯切下料的过程中, 发现由于钢材硬度非常高, 导致下料用锯床的锯片频繁断齿和断裂。对钢材锯切面进行观察, 发现存在较多硬点。本文对存在此现象的钢材切割面及硬点进行了系统的分析, 找出引起钢材硬度局部增大的原因, 根据分析结果结合现场生产工艺采取优化改善措施。

1 齿轮钢生产工艺流程

20CrMnTiH 齿轮钢采用铁水预处理→600 t 混铁炉→120 t 复吹转炉冶炼→120 t LF→方坯合金钢连铸(180 mm × 220 mm、260 mm × 300 mm 断面)→热轧圆钢工艺流程生产。转炉采用顶底复吹拉碳取样放钢, 入炉铁水 S ≤ 0.040%, 终渣碱度控制在 2.8 ~ 3.2, 终点碳 ≥ 0.10%, 采用铝锰铁、SiMn、中碳 Mn-Fe、中碳 Cr-Fe、高碳 Cr-Fe 进行脱氧合金化, 挡渣出钢, 出钢过程加顶渣。LF 精炼主要采用碳化钙和碳

化硅脱氧, 精炼渣碱度控制在 3.5 ~ 4.5, (TFe + MnO) ≤ 1.0%。LF 精炼工序在调出白渣后, 根据铝含量喂入铝线补铝, 终点控制 Al ≥ 0.020%。配成分结束温度合适后, 进行喂钛铁线增钛。终点进行钙处理, 软吹时间不低于 15 min。连铸使用塞棒中间包, 全保护浇铸, 中间包使用碱性覆盖剂, 保护渣采用齿轮钢专用保护渣, 连铸二冷水配水采用弱冷工艺。铸坯入加热炉确保钢坯加热均匀, 预热段温度控制在 550 ~ 850 °C, 加热段温度控制在 1 200 ~ 1 260 °C, 均热段温度控制在 1 200 ~ 1 250 °C, 加热时间 3 h, 开轧温度 1 200 ~ 1 180 °C, 加强对轧制节奏的控制, 保证终轧温度 850 ~ 950 °C。

2 齿轮钢材样锯切过程硬点缺陷检测分析

2.1 硬点缺陷形貌分析

对钢材锯切面进行观察, 发现存在较多硬点, 钢材样锯切断面存在明显的锯斜现象, 见图 1 所示。图 1 为齿轮钢 Φ120 mm 圆钢材样锯切下料过程硬

表 1 20CrMnTiH 钢化学成分/%
Table 1 Chemical composition of steel 20CrMnTiH / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cr	Cu	Ni	Al
标准	0.18 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.80 ~ 1.10	≤ 0.030	≤ 0.035	0.04 ~ 0.10	1.0 ~ 1.30	≤ 0.20	≤ 0.25	0.015 ~ 0.060
内控	0.18 ~ 0.21	0.18 ~ 0.25	0.95 ~ 1.05	≤ 0.025	≤ 0.020	0.045 ~ 0.070	1.05 ~ 1.10	≤ 0.20	≤ 0.25	0.015 ~ 0.040

点缺陷宏观形貌,从图 1 中可以明显观察出断面上的硬点及锯斜缺陷。

2.2 硬点缺陷处金相电镜及能谱分析

对图 1 处钢基体上硬点缺陷进行取样金相及能谱分析。从硬点处金相图可以看出,硬点周围钢的组织正常,为铁素体和珠光体;围绕着硬点处的组织为变形拉长的铁素体和珠光体。能谱测试硬点处成分为 Fe,含有的 Co 和 W 为锯切过程中高速锯条钢残留成分。检测情况见图 2。据此判断硬点应为锯切过程中产生,钢材样锯切过程中受到锯齿极度挤压的钢基形成硬点缺陷。由于锯片受到阻力,只能极端挤压前端的钢基,当钢基压缩到极致,形成高硬

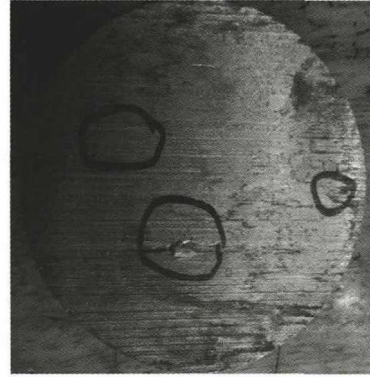


图 1 棒材试样硬点缺陷宏观形貌
Fig. 1 Macro-morphology of hard point defect of sample

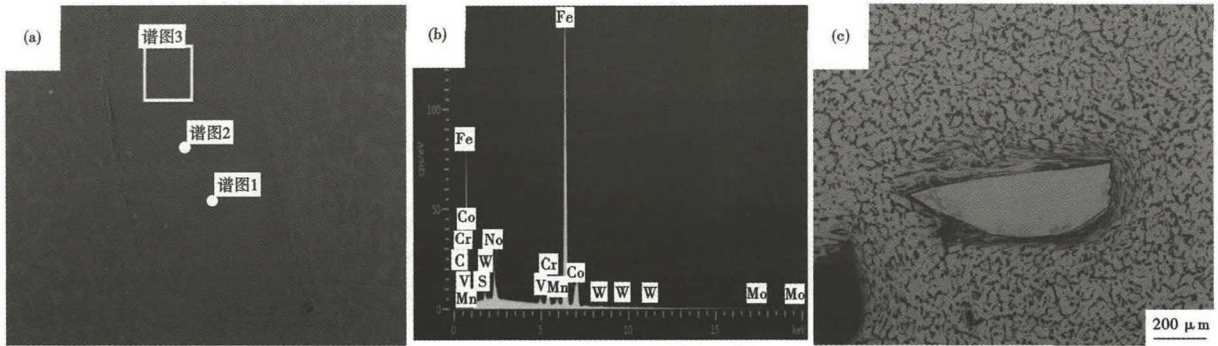


图 2 硬点缺陷分析:(a)硬点处形貌(b)硬点处能谱分析(c)硬点处金相分析

Fig. 2 Hard point defect analysis: (a) hard point morphology; (b) energy spectrum analysis of hard points; (c) metallographic analysis of hard point

度块把锯齿瓣断或者导致锯切过程锯斜现象的发生^[1]。因此,齿轮钢材样锯切过程受到极大的阻力是形成硬点的原因。能够清晰地看到受力变形后的组织。经过能谱分析,证实这两个硬块都是与钢材基体成分相同。

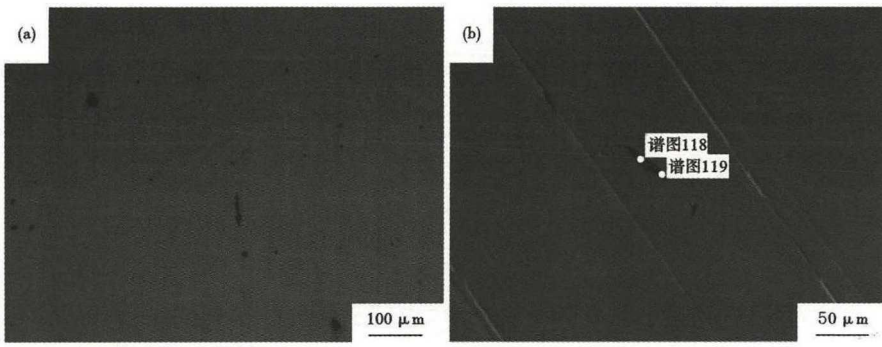
2.3 硬点材样周围金相电镜和能谱分析

对图 1 中材样硬点周围取样加工进行金相分析,金相观察周围钢材样存在大量的夹杂物,这些夹杂物弥散分布,夹杂物颗粒形状不规则,主要以细小夹杂物居多,但也明显观察到大量的大颗粒夹杂,见图 3(a)。放大后沿着锯斜面锯条锯切方向明显观察到大颗粒夹杂物存在,见图 3(b),正是锯条运行方向断面上钢的基体内存在的大颗粒夹杂物给锯条造成了阻力导致锯斜或断齿情况出现。

对图 3 中大颗粒夹杂物电镜下进行夹杂物形貌观察,夹杂物的形貌见图 4 所示。图 4(a)中夹杂物为长条形,尺寸在 40 ~ 50 μm,图 4(b)中夹杂物形貌多种形态,有球形夹杂物和不规则菱形夹杂物,其尺寸 30 ~ 40 μm,在这些大颗粒夹杂物周围还可以观察到大量的 10 微米级细小的夹杂物,这些细小的夹杂物弥散分布在钢的基体中。对图 3(a)、图 3(b)大颗粒夹杂物进行能谱分析。能谱分析结果中元素原子百分含量如表 2 所示。从表 2 可以分析出图 3(a)夹杂物为 Al₂O₃ 夹杂物聚集;图 3(b)球状夹杂物为 CaS 类点状球形夹杂,同时还包含镁铝尖晶石类夹杂的存在;其他不规则夹杂物主要为 TiN 类夹杂。

2.4 齿轮钢硬点缺陷原因分析

硬点周围钢的组织正常,为铁素体和珠光体;硬



点应为锯切过程中产生, 钢材样锯切过程中受到锯齿极度挤压的钢基形成硬点缺陷。通过对钢材样进行能谱分析, 造成齿轮钢锯切过程下料过程锯条断齿及锯斜原因主要为大颗粒夹杂物对锯条运行形成的阻力, 这些大颗粒夹杂物尺寸分布范围 30 ~ 80 μm , 主要为 Al_2O_3 和 TiN 。TiN 一部分单独存在, 一部分是以 CaS 为核

图 3 夹杂物微观形貌: (a) 硬点缺陷周围金相; (b) 局部放大夹杂物形貌
Fig. 3 Microscopic morphology of inclusions: (a) metallography around hard point defect; (b) locally enlarged inclusion morphology

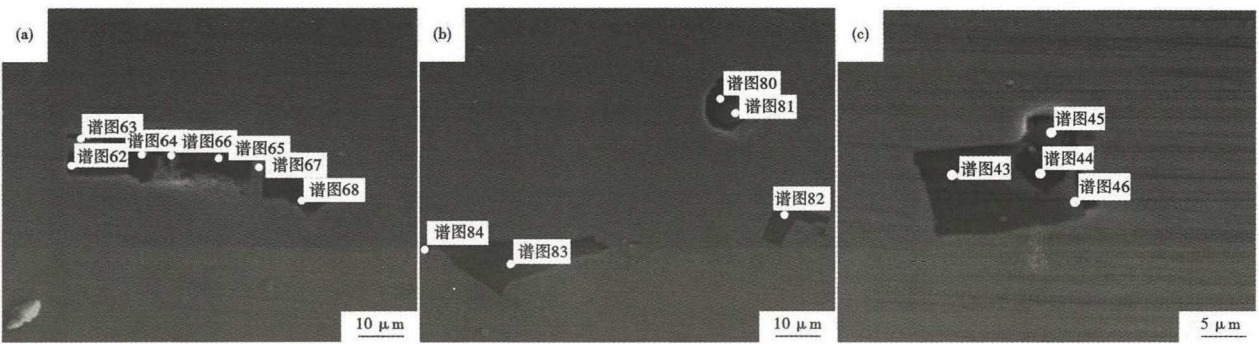


图 4 夹杂物扫描电镜形貌: (a) Al_2O_3 ; (b) Al_2O_3 和 TiN ; (c) TiN 复合夹杂
Fig. 4 Scanning electron microscope morphology of Inclusions: (a) Al_2O_3 ; (b) Al_2O_3 and TiN ; (c) TiN composite inclusion

心析出聚集长大, 但是由于 CaS 完全分布在 TiN 的核心, 并没有改变夹杂物与钢基体接触面的形貌, 导致 TiN 尺寸增大进一步增加了 TiN 的危害^[2]。 Al_2O_3 单独聚集存在或和少量的镁铝尖晶石类聚集存在。

3 改进措施

造成齿轮钢硬点缺陷的原因主要为 Al_2O_3 和 TiN 的聚集, 要解决齿轮钢硬点缺陷必须通过工艺优化有效降低钢中的 Al_2O_3 和 TiN 等大颗粒夹杂物生成。 Al_2O_3 夹杂物主要通过控制钢水过氧化, 降低钢水氧含量, 调整脱氧工艺控制。根据郭大勇^[3]等人的研究, 随着钢液温度的降低, TiN 所需的平衡

浓度积下降。这表明在氮、钛含量一定的条件下, TiN 夹杂易于在较低的温度条件下形成。20CrMnTiH 钢的液相线温度为 1 512 $^{\circ}\text{C}$ 固相线温度为 1 448 $^{\circ}\text{C}$, 莱钢齿轮钢钛含量范围 0.045% ~ 0.070%, 氮含量 0.006 5% ~ 0.009 0%, 根据热力学计算^[4], 在目前的工艺条件下, 20CrMnTiH 钢在液相线温度 1 512 $^{\circ}\text{C}$ 以上不会析出 TiN 夹杂, 可以保证在液相线温度 1 512 $^{\circ}\text{C}$ 和固相线温度 1 448 $^{\circ}\text{C}$ 析出 TiN, 主要是在连铸凝固的过程中析出。

3.1 炼钢工艺的控制

钢水过氧化是夹杂物的源头^[5]。在铁水成分和吹炼制度一定的情况下, 要降低转炉吹炼终点钢

表 2 夹杂物元素原子百分含量/%
Table 2 Elemental atomic percentage of inclusions / %

图谱标签	O	Mg	Al	C	N	Fe	S	Ca	Ti	Cr	Mn
65	41.76	-	42.24	4.36	-	11.26	-	-	0.38	-	-
80	31.19	8.65	15.74	17.21	8.75	9.23	6.47	0.25	0.31	1.90	-
82	-	-	-	5.42	21.48	3.25	-	-	68.09	0.91	-
43	-	-	-	5.14	21.33	2.31	-	69.33	0.81	-	-
44	35.76	23.51	3.76	6.21	-	1.54	4.62	1.18	21.82	-	1.59
45	5.97	11.96	2.07	12.98	-	33.88	15.86	4.03	6.62	0.72	5.54

表 3 优化前后转炉、精炼炉渣成分和碱度
Table 3 Composition of converter refining slag and basicity before and after optimizing

项目	炉渣成分/%					碱度(R)
	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO + MnO	
转炉渣优化前	44.05	14.88	7.73	1.54	13.4	2.96
转炉渣优化后	43.44	13.64	7.74	1.48	13.14	3.18
LF 精炼渣优化前	52.6	14.6	6.48	11.8	0.89	3.4
LF 精炼渣优化后	56.64	12.61	7.06	14.4	0.83	4.49

液溶解氧含量,必须提高转炉终点碳、磷一次命中率,减少后期点吹次数^[6]。研究表明不同终点碳含量下钢水中对应溶解氧含量随着转炉终点碳含量的降低而提高^[7],转炉终点碳含量越低,钢水中溶解氧含量和渣中(FeO)比例明显的增加^[8]。通过对转炉炉口火焰观察,控制氧枪枪位,转炉开吹枪位提高至 1 400 mm,使渣中(FeO)含量迅速增加,有助于石灰熔化提高前期脱磷效果;吹炼中期枪位控制在 1 200 mm;吹炼后期“冲枪”调查,避免返干,枪位控制在 1 200 mm ~ 1 400 mm 波动变化;保障转炉出钢钢水溶解氧含量小于 200×10^{-6} ,减少钢水过氧化情况发生,提高转炉终点碳、磷一次拉碳合格率。同时齿轮钢终点铝含量控制在 0.015% ~ 0.025%,钙含量控制在 0.001 5% ~ 0.002 0%,Ca/Als > 0.1,Als/Al > 0.9 确保钢水脱氧效果,降低钢水自由氧。同时优化转炉脱氧剂合金加入顺序,减少精炼铝线喂入量避免 LF 后期补铝情况出现,将 LF 软吹时间由 10 min 延长到 15 min,保证夹杂物上浮时间。渣系优化前后转炉、精炼炉渣成分见表 3。

3.2 连铸工艺控制

连铸凝固过程析出 TiN 的尺寸随着冷却速率的减小逐渐增大,造成以上现象的原因是随着冷却速

率的减小钢液凝固分数相应减小,供析出的 TiN 夹杂长大的时间也就越长^[9]。通过控制钢液浇注温度、钛氮浓度积和冷却速度使钢液弥散析出 TiN。齿轮钢浇铸温度由 1 535 °C 降低到 1 525 °C,使用低过热度浇铸模式,钢水过热度由 20 °C 降低到 10 °C,260 mm × 300 mm 大方坯拉速由 0.65 m/min 调整到 0.75 m/min,中间包使用双层渣工艺,上层采用碳化稻壳保温,下层使用碱性覆盖剂吸附夹杂,确保连铸保温效果为低过热度浇铸创造条件。钢包水口氩封氩气流量,由原来的 4 m³/h 增加到 5 m³/h,降低钢包浇铸过程吸氮。连铸结晶器使用电磁搅拌和优化二冷配水加速钢的凝固和降低凝固过程连铸坯的温度梯度,避免了析出大颗粒的 TiN 夹杂。

4 结语

造成硬点缺陷的原因主要由 Al₂O₃ 夹杂物和 TiN 夹杂物引起。这些夹杂物尺寸主要分布范围 30 ~ 80 μm 的硬夹杂物是造成材样锯斜和硬点的主要原因。通过提高转炉终点碳、磷命中率、钙铝参数的控制、连铸保护浇铸减少过程吸氮及低过热度浇铸工艺控制等工艺措施的实施,有效解决了齿轮钢硬点缺陷问题,提高了产品质量。

参考文献

- [1] 朱伟华,卢峰,陈才,等. 齿轮钢钢材锯切障碍的原因分析[C]. 第十届(2008年)中国科协年会论文集[A]. 郑州:中国科学技术协会,2008:1214-1217.
- [2] 李海波,王郢,王新华,等. 超低氧钢 20CrMoH 和 60Si2Mn 中 TiN 夹杂的控制[J]. 特殊钢,2008,29(2):44-46.
- [3] 郭大勇,耿继双,王秉喜,等. 帘线钢中钛夹杂形成的热力学分析[J]. 炼钢,2011,27(3):44-46.
- [4] 朱宝晶,秦东,汤艳梅,20CrMnTiH 和 GC15 钢中 TiN 析出热力学计算[J]. 冶金丛刊,2010,(1):10-13.
- [5] 李晶,LF 精炼技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2012:20-25.
- [6] 韩宇,张明博,何晴,等. 100t 转炉“留渣+双渣”提钒半钢冶炼低磷钢渣成分控制的工艺实践[J]. 特殊钢,2017,38(1):31-35.
- [7] 蔡开科,连铸坯质量控制[M]. 北京:冶金工业出版社,2010:30-39.
- [8] 张大江,王翠娜,向华,等. 铝镇静钢 SPHC 浸入式水口结瘤成因和控制工艺[J]. 特殊钢,2015,36(3):30-33.
- [9] 方忠强,孙彦辉,汪成义,等. 120 t BOF-LF-RH-CC 流程冶炼石油套管钢时 TiN 的析出和控制[J]. 特殊钢,2014,35(5):30-33.

丰年(1985-),男,2008年武汉科技大学(本科)毕业,高级工程师,炼钢,连铸工艺技术研究。
E-mail:fnfengnian@163.com

收稿日期:2019-03-15