Al_2O_3 夹杂对厚规格X80M热轧钢带DWTT性能影响*

李人杰[1],刘成龙[2],魏晓东[2],李 钊[2]

(1. 包头钢铁(集团)有限责任公司办公室,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 通过优化钙处理过程氩气流量提高脱氧产物上浮到钢渣中效果、改进中包结构改善流场促进夹杂物上浮等措施,实现钢水T[O]<0.001 5%,有效减少了钢水中Al_2O_3夹杂物的数量,板卷DWTT性能符合标准要求,实现了稳定开发生产22 mm厚X80M管线钢热轧钢带的目的。

关键词: DWTT; X80M管线钢; Al_2O_3夹杂
中图分类号: TG142.71 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2020)01-0033-06
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.01.009

Effects of Al_2O_3 Inclusions on DWTT Properties of Thick X80M Hot Rolled Strip

Li Ren-jie[1], *Liu Cheng-long*[2], *Wei Xiao-dong*[2], *Li Zhao*[2]

(1. *Office of Baotou Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In this paper, it is introduced the T[O]<0.001 5% is realized by such measures as optimizing the argon flow in calcium treatment process to improve the effects that deoxidation products float up into steel slag and improving the structure of tundish to improve flow field so that the flotation of inclusions is accelerated. As a result, the amount of Al_2O_3 inclusions in molten steel is effectively reduced, the DWTT properties of coiled sheet could meet the standard requirements as well as the aim of stable development and production of 22 mm thick hot-rolled strip with X80M pipeline steel was realized.

Key words: DWTT; X80M pipeline steel; Al_2O_3 inclusions

国内重要管线工程用高钢级管线钢的壁厚已经达到20 mm以上[1-2],中石油西气东输一、二、三期工程主管线主要采用X80管线钢,考虑其制造成本中石油主推22 mm厚度规格X80M管线钢螺旋焊接。

落锤撕裂试验是用来表征材料韧脆特性,主要用于金属材料的低温韧性研究[3-4]。根据石油管线的协议及应用标准要求,22 mm厚X80M管线钢落

* 收稿日期:2019-08-01
作者简介:李人杰(1988-),男,内蒙古包头市人,硕士,工程师,现从事钢铁生产调研及督察管理工作。

锤撕裂韧性断口比例大于85%，中国多数科研院所及钢铁企业将该厚度X80M管线钢热轧卷板作为试验研究及技术储备进行生产试制，仅有少数几家成功具备工程应用业绩。厚规格板卷断裂韧性控制是制约大口径厚壁高钢级管线钢开发的技术瓶颈，因此，必须通过生产工艺过程的关键工序优化控制达到其特殊性能要求以实现稳定生产。

本文主要针对开发试制过程中出现板卷DWTT性能不合格问题，通过炉外精炼钙处理工艺优化对夹杂物进行球化处理，铸机保护浇铸进行严格控制从而达到钢质的高纯净度要求，降低了钢中Al_2O_3夹杂物数量，解决厚规格高钢级管线钢研发过程DWTT性能攻关的瓶颈难题，实现了稳定生产厚壁、大口径长距离运输管线用钢22 mm厚X80M管线钢热轧钢带。

1 生产中出现的问题

某大型厂在开发22 mm厚规格的X80M管线钢试制阶段出现批量DWTT性能不合格，其断口形貌见图1，初验取样与复验取样的DWTT性能均小于85%的标准要求，见图2。产品一次合格率的低，直接影响生产顺行。

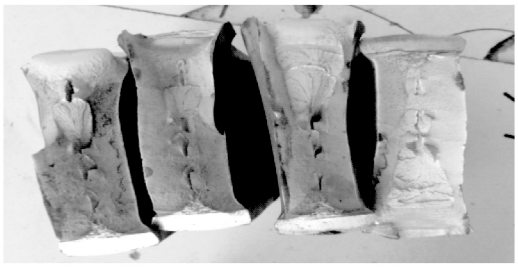
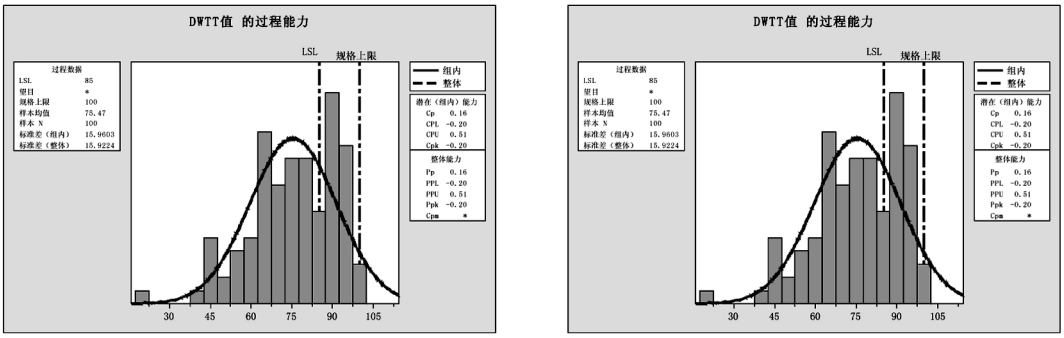


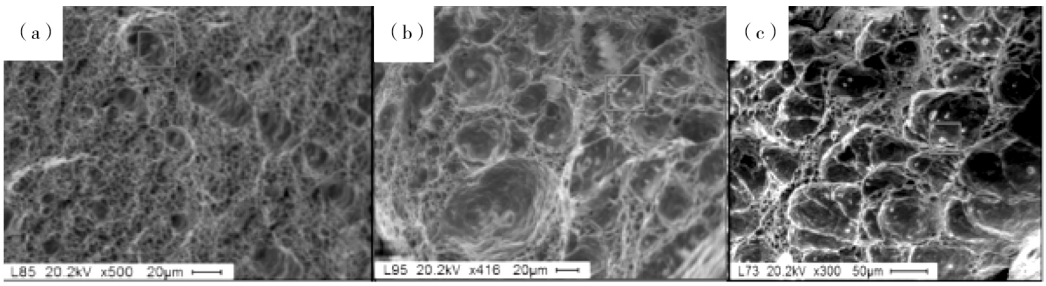
图1 落锤断口处形貌

通过断口扫描电镜分析，DWTT断口面由韧性断裂的纤维状断口和脆性断裂的结晶状断口组成。纤维区的微观形貌为韧窝，韧窝底部存在颗粒状第二相质点，脆性断裂区域以变形的扇形准解理为主。对比不同试样韧性断口面积比例分别为97%、85%以及73%。通过SEM扫描检测其洁净度发现(见图3)，DWTT性能差的韧窝里有大量的第二相Al_2O_3夹杂偏聚现象。



(a)初验值 (b)复验值

图2 DWTT性能频率统计



(a) 97%；(b) 85%；(c) 73%

图3 不同韧性断口剪切面积SEM检测对比

2　分析讨论及工艺优化

高性能管线钢应高度重视纯净钢的冶炼技术，从入炉铁水开始，通过炉外精炼和真空除气，对 S、P、气体等有害元素进行严格控制，以及钙处理对夹杂物进行球化处理，从而达到钢质的高纯净度要求[5]。通过采用保护浇注、结晶器液位自动控制、动态轻压下等先进技术，实现板坯无缺陷浇注，提高连铸坯质量。

当 B 类夹杂物以长条状存在于钢中时，恶化其韧性，因而提高其韧性的一种办法即为严格控制钢中的氧化物含量，且严格控制钢中 Al_2O_3 的存在数量。当氧化物分布较多，尺寸过大时，管线钢的韧性就会下降，导致落锤性能恶化[6-7]。针对 DWTT 性能不合格的炉次进行了铝偏差统计，图 4 统计结果显示，该浇次平均 $Al_t - Al_s \geqslant 0.003\%$，说明钢水内部脱氧产物不能充分上浮，滞留钢中导致钢中 Al_2O_3 存在数量增加。

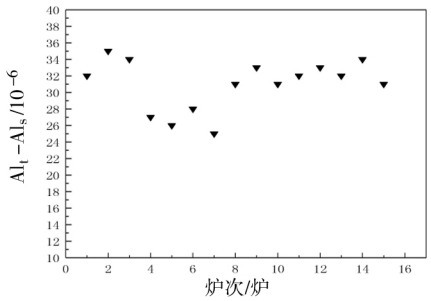


图 4　同浇次连续炉次 $Al_t - Al_s$ 统计

为提高钢水的洁净度，从钢水所经过的各个工艺环节入手，在精炼环节应尽量通过合理的钙处理工艺，使夹杂物充分变性上浮到渣中，同时对精炼进行改质处理减少渣中向钢水传氧，以避免钢水中出现氧化夹杂物，并且在浇注环节应避免钢水出现二次氧化并最大限度的促进夹杂物上浮脱除。

2.1　精炼 Ca 处理工艺优化

管线钢一般采用钢水钙处理的方式进行夹杂物变性处理，合理的喂钙量、喂钙速度及喂钙位置是夹杂物变性处理的关键[8]。管线钢钙处理的另一个关键是钙处理前尽量将钢中氧和硫降至最低值，同时加强钙处理后钢水二次氧化的控制。

实践获得，喂丝速度与钙线收得率有明显的关系[9]。由于钙在高温条件下极容易气化，通常要求钙线在钢包底部熔化，以保证钙与钢液充分反应而起到夹杂物变性的作用。在喂丝过程前钢液及钢渣已经完成脱氧脱硫，喂丝过程中氩气流量过大会将钢渣大面积吹破使钢液内铝及钙接触空气而发生二次氧化，氩气流量过小或者没有又起不到促进气泡和变性后的夹杂上浮的目的。钢包透气砖在使用过程中被不断侵蚀消耗，所以无法给定精准流量控制参数，数据见表 1。

试验结果和现场钢液搅拌情况可知氩气流量控制在 150 ~ 300 L/min，钙线收得率高于其余试验结果，同时喂丝过程中钢渣没有被完全冲破且钢液未被大面积搅起。通过稀土钢板材厂生产 X80M 管线钢钙处理工艺试验，对工艺参数进行优化，获得较洁净钢液并降低了生产成本。

表 1　氩气流量试验数据

熔炼号	喂丝速度/(m·s^{-1})	钙线用量/m	氩气量/(L·min^{-1})	钢水量/t	钙线收得率/%
162XXX20	3	400	0 ~ 150	248.2	4.89
163XXX46	3	400	0 ~ 150	254.5	5.59
162XXX21	3	400	150 ~ 300	247.5	7.69
162XXX23	3	400	150 ~ 300	241.3	8.39
161XXX27	3	400	300 ~ 450	251.7	3.51
162XXX64	3	400	300 ~ 450	245.4	3.88

2.2　改进连铸保护浇注措施

在连铸过程中中间包有着承前启后的关键作用[10]。连铸过程工艺环节多，想要在钢水浇铸过程中提高钢水的洁净度就要做好连铸过程中各个环节的保护措施。中间包采用堰和坝的内部结构，在二者的共同作用下达到促使夹杂物和钢水的分离上浮并进一步达到提高钢水洁净度的目的。二者共同改善钢水在中间包内的流动状态，降低死区比例，均匀

钢水的平均停留时间。

由于钢水在中间包内流速缓慢，传统的中间包挡墙和坝的空隙不能为钢水提供足够的流场上扬动力，因此传统中间包上下挡墙在促进夹杂物上浮、分离方面的效果不是十分的理想。为了更好地利用原有的中间包内部结构，不影响原有中间包在减压、稳流、储存钢液、分流、中间包冶金等方面的重要作用，并充分发挥中间包挡墙和坝在促进夹杂物上浮方面的效果，对原有的中间包内部结构进行了优化改造，力求以最小的改造达到最大的效果，图5为改进之前的中间包挡墙结构简图。图6为改进后的结构简图，图中中间包挡墙和坝之间的阴影区域为所添加的耐火砖。中间包挡墙结构的改进，优化了中间包流场，为促进夹杂物上浮提供了更好的条件，使夹杂物尽可能的在中间包过程脱除并被覆盖剂充分吸收，提高了中间包内钢水的洁净度。

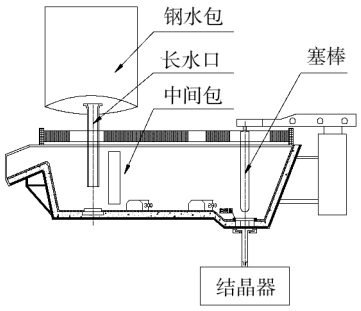


图5 传统中间包结构简图

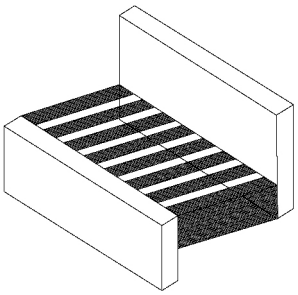


图6 改进后中间包内部结构示意图

3 结果讨论

3.1 钙处理工艺优化效果

经过钙处理工艺的优化为提高钙处理效率，将喂丝过程氩气流量控制在150～300 L/min，可获得钙线收得率为8.96%，中包取15炉样验证 $Al_t - Al_s$ 平均控制在了0.001 5%以内，有效减少了钢水中 Al_2O_3 夹杂物的数量。

表2 优化结果

熔炼号	喂丝前		喂丝后		
	Al_t/%	Al_s/%	Al_t/%	Al_s/%	Ca/%
163XXX13	0.040 1	0.037 2	0.034 3	0.033 4	0.000 8

3.2 中包结构优化效果

2018年1～5月份，在每浇次生产过程取一炉中间包钢水氧含量检测与同炉钢包精炼钢水取样对比统计，具体包括每月24个浇次，1～5月共120浇次、120炉钢、66个钢种，统计结果显示：1～3月份未采取中包结构优化时，铸机中包钢水增氧在0.000 5%～0.000 6%的控制水平（图7），中包优化改造后，4～5月份统计数据显示中包增氧控制在0.000 2%～0.000 3%的控制水平，钢水夹杂物上浮效果良好，实施效果显著。

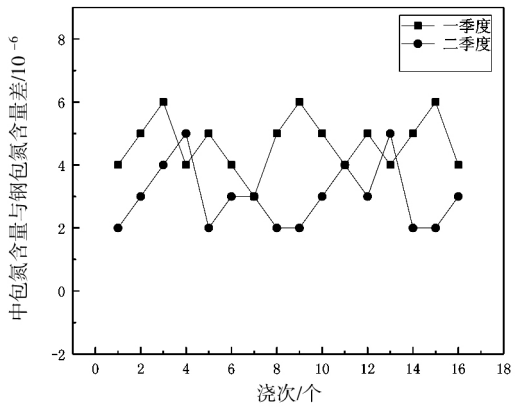


图7 采取氩气保护前后中间包与钢包钢水增氧控制水平对比

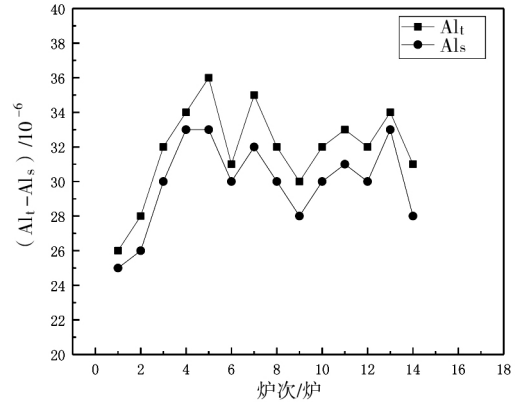


图8 钢水中 Al_t 与 Al_s 控制水平

从铸机中包取样分析，Al_t 与 Al_s 偏差很小，$Al_t - Al_s \leqslant 0.003\%$，所占比例 100%，$Al_t - Al_s \leqslant 0.002\%$，所占比例 99% 以上，具体情况如图 8 所示，Al_t 与 Al_s 的偏差趋势几乎是平行走向，通过以上控制措施，实现钢水 T [O] < 0.001 5%。有效减少了钢水中 Al_2O_3 夹杂物的数量，实现了钢水洁净度大幅提升，为后序的轧制工序提供了优良的坯料，为提高钢带的 DWTT 性能奠定了基础。

3.3　X80M 板卷显微组织及夹杂物分析

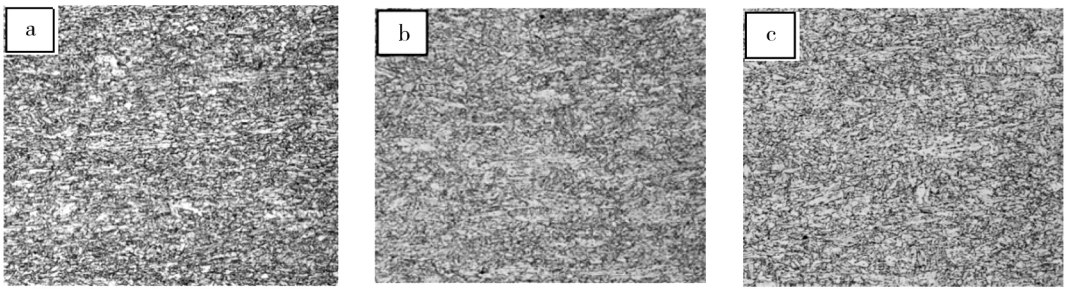
板卷显微组织及带状组织分别见图 9、图 10，板卷及对应钢管显微组织及夹杂物分析统计见表 3 和表 4，板卷、钢管显微组织为 B 粒 + PF，带状组织为 0.5 ~ 1.5 级，夹杂物均不大于 1.5 级，即板卷、钢管的显微组织、晶粒度、带状组织、夹杂物均符合标准要求。

表 3　板卷金相检验结果

编号	夹杂物(级)								带状(级)	组织
	A 粗	A 细	B 粗	B 细	C 粗	C 细	D 粗	D 细		
T	0.5		0.5				1.0		0.5	B 粒 + PF
Z	0.5		0.5				1.0		0.5	B 粒 + PF
W	0.5		0.5				1.0		1.0	B 粒 + PF

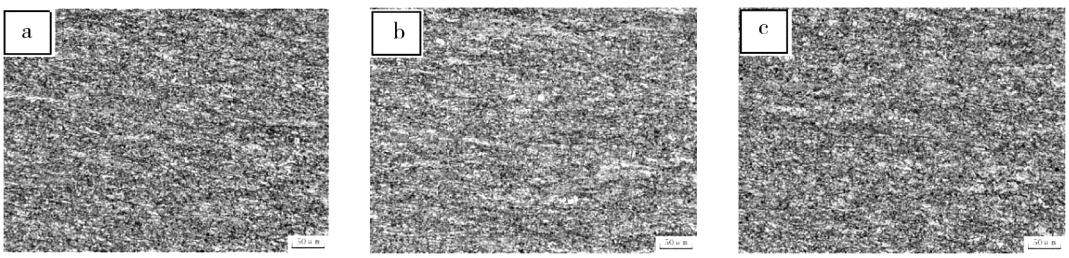
表 4　钢管金相检验结果

编号	夹杂物(级)								带状(级)	组织
	A 粗	A 细	B 粗	B 细	C 粗	C 细	D 粗	D 细		
T	0.5		0.5				1.5		0.5	B 粒 + PF
Z	0.5			0.5			1.0	0.5	0.5	B 粒 + PF
W	0.5		0.5				1.5		1.5	B 粒 + PF



(a) 表面;(b) 1/4 位置;(c) 1/2 位置

图 9　板卷显微组织

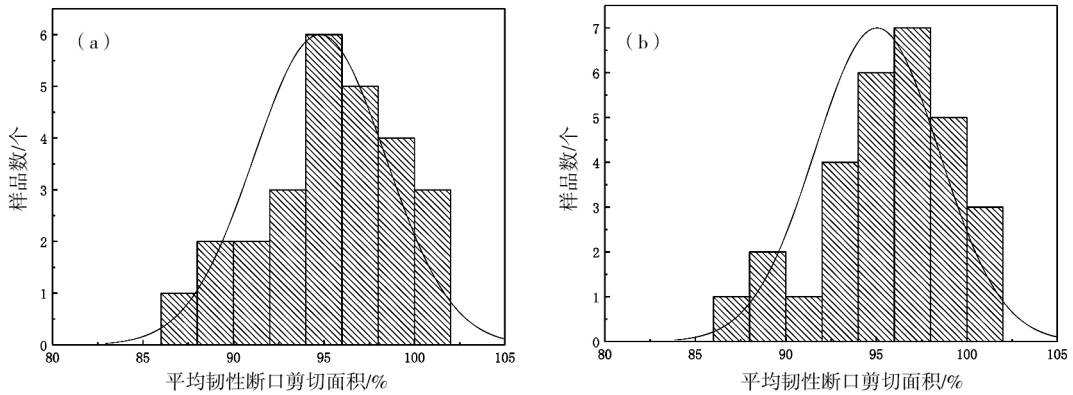


(a) 纵向;(b) 厚度方向;(c) 宽度方向

图 10　板卷带状组织

3.4 DWTT 性能检测

板卷 -15 ℃落锤撕裂试验结果见图11，板卷单个试样剪切面积百分比大于85%的比例占100%，两个试样平均剪切面积百分比大于90%比例为100%，并且板卷单个试样、两个试样平均剪切面积百分比均符合标准要求。



(a) 单个试样; (b) 双试样

图11 平均剪切面积比分布图

4 结论

(1) 针对开发试制22 mm X80M 产品 DWTT 性能不合格问题，通过 SEM 对不同比例脆性断口形貌以及铸坯厚度方向成分偏析程度进行系统分析，得出断口处第二相 Al_2O_3 夹杂物偏聚是影响 DWTT 性能不合格的主要因素。

(2) 通过精炼钙处理优化工艺，使 Al_2O_3 夹杂物充分变性上浮，中包取样验证 $Al_t - Al_s$ 从优化前大于0.003%控制降低至0.001 5%以内，从而减小了钢中 Al_2O_3 夹杂物数量对 DWTT 性能的影响。

(3) 通过优化中间包结构，促进钢中 Al_2O_3 夹杂物上浮，实现钢水 T[O] <0.001 5%，有效减少了钢水中 Al_2O_3 夹杂物的数量，DWTT 断口的剪切面积百分比均符合标准要求，22 mm X80 管线钢 DWTT 性能得到显著提高，实现了稳定生产22 mm 厚 X80M 管线钢热轧钢带。

参 考 文 献

[1] 周民，杜林秀. X80 管线钢落锤撕裂性能的影响因素分析 [J]. 钢铁研究学报，2009，(2)：33 -36.

[2] 余音宏，潘涛. S 含量对高速车轮钢性能和夹杂物的影响 [J]. 钢铁，2013，(10)：58 -62.

[3] 杜占兵，王福明. 含 Ti 复合夹杂物对中碳非调质钢组织和力学性能的影响 [J]. 北京科技大学学报，2007，(11)：1096 -1099.

[4] 舒玮，王学敏. 微合金钢中氧化物夹杂对焊接热影响区组织、性能的影响 [J]. 北京科技大学学报，2010，(2)：191 -195.

[5] 李少华，曾燕屏. 疲劳载荷作用下 X80 管线钢夹杂物的微观行为 [J]. 石油学报，2012，(3)：506 -511.

[6] 刘晓，杨吉春，高学中，等. 稀土对 2Cr13 不锈钢夹杂物的变质及对冲击韧性的影响 [J]. 北京科技大学学报，2010，(5)：605 -609.

[7] 江海涛，康永林，于浩，等. 国内外高钢级管线钢的开发与应用 [J]. 管道技术与设备，2005，(5)：21 -23.

[8] J. M. Gray. Recent Developments in Plate and Line pipe Steels [J]. CBMM，1999，24(4)：6 -7.

[9] 米秋占. 管线钢的氢致裂纹 [J]. 焊管，2000，23(6)：16 -19.

[10] 李玉芝. 管线钢的发展状况及生产特点 [J]. 武汉钢铁学院学报，1994，(2)：136 -142.