稀土耐磨钢绿色产品设计与研发*

陆 斌[1,2,3], 张 军[1], 张文博[1], 李文艺[1], 隋 鑫[1]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司薄板厂, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古工业大学材料科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;
3. 内蒙古自治区稀土钢产品研发企业重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 包钢宽厚板生产线采用绿色清洁的炼钢、连铸、双机架轧制及热处理工艺, 研制开发了一种绿色环保的工程机械用高强度稀土耐磨钢板。该产品具有高强度、高硬度、优秀的耐磨性、良好的低温韧性和焊接性能, 产品的生产使用全周期过程贯穿循环经济理念思路。

关键词: 绿色; 稀土; 宽厚钢板; 耐磨钢

中图分类号: TG142.72 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009-5438(2019)06-0006-04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.06.002

Design and Research and Development for Green Products of Wear-resistant Steel with Rare Earth

Lu Bin[1,2,3], *Zhang Jun*[1], *Zhang Wen-bo*[1], *Li Wen-yi*[1], *Sui Xin*[1]

(1. *CSP Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot* 010051, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
3. *Inner Mongolia Enterprise Key Laboratory of Rare Earth Steel Products Research & Development, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The wide and heavy plate production line of Baotou Steel adopts the green and clean steel making, continuous casting, double-stand rolling and heat treatment processes. A kind of green and environment friendly high-strength wear-resistant steel plate with rare earth used for construction machinery is researched and developed. It is with high strength, hardness and excellent wear resistance, good low temperature toughness and welding performance as well as the idea of circular economy is through its whole cycle process of production and use.

Key words: green; rare earth; wide and thick steel plate; wear-resistant steel

随着经济迅猛发展, 迫切需要具有高强度、优良的耐磨性、良好的耐冲击性和焊接性能的钢铁新材料。耐磨钢是专供大面积磨损工况条件下使用的特种板材产品。耐磨钢板具有高耐磨性、较好力学和加工性能, 能够进行切割、弯曲、焊接等, 可采取焊接、塞焊、螺栓连接等方式与其它结构进行连接, 广

收稿日期: 2019-09-16

作者简介: 陆 斌(1977-), 男, 山西省大同市人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事钢铁冶金研究工作。

中国知网 https://www.cnki.net

泛应用于冶金、煤炭、水泥、电力、玻璃、矿山、建材、砖瓦等行业，与其它材料相比，有很高的性价比，已经受到越来越多行业和厂家的青睐。

绿色钢铁是世界钢铁工业发展的共同选择与发展方向，节能环保、降耗减排等方面的法规和要求日益严格，钢铁行业需加快绿色制造工艺、技术、装备的改革和创新。钢铁行业把绿色、低碳、环保的观念融入到生产全过程，加快绿色制造工艺、技术、装备的改革和创新[1]。《工业和信息化部办公厅关于开展绿色制造体系建设的通知》(工信厅节函〔2016〕586 号) 中提到，绿色产品是以绿色制造实现供给侧结构性改革的最终体现，侧重于产品全生命周期的绿色化。包钢的稀土钢新材料，正是贯彻绿色环保理念，探索钢铁材料发展的方向。

中国是世界稀土储量最多的国家，包头稀土储量占比较大，从 2002 年起，包头市将稀土开采权统一到了包钢集团。包头稀土主要为白云鄂博铁矿伴生的氟碳铈镧矿，其中富含稀土镧、铈。稀土加入钢铁以后有净化钢液、提高钢水纯净度的作用。近年来，广大科技工作者研究发现适量的稀土添加，除了对钢铁材料的物理性能(尤其是低温冲击韧性) 有显著提升外，还对材料的耐磨性、耐蚀性、焊接性等有奇妙的改善作用。与使用其它传统铁合金比较起来，达到同样的效果，使用稀土量更少，过程更加环保，使用性能更加显著稳定，甚至有的使用性能是其它合金元素不能达到的。

本文介绍了包钢全流程在宽厚板生产线采用绿色清洁的生产工艺，采用绿色设计理念，研制开发了 BTNM400 稀土耐磨钢板。

1　技术条件与生产工艺流程

1.1　技术条件

由于耐磨钢板主要用在采矿领域，由于其特殊用途，工作环境严苛，要求该钢种除满足常规力学性能要求外，必须满足表面布氏硬度和良好的焊接性能，耐磨钢产品从投入使用到全生命周期，要达到全程免维护的要求。

根据 GB/T 24186 – 2009《工程机械用高强度耐磨钢板》和使用行业的要求[2]，BTNM400 钢板的设计成分见表 1，力学性能要求见表 2。

表 1　BTNM400 化学成分要求(质量分数)　　%

C	Si	Mn	Nb + Ti	Ni + Cr + Mo	Ce	CEV
≤0.30	≤0.70	≤1.60	≤0.06	≤2.00	>0.000 3	≤0.65

表 2　BTNM400 力学性能技术要求

厚度/mm	抗拉强度/($N \cdot mm^{-2}$)	伸长率(A_{50})/%	–20 ℃纵向冲击功/J	表面布氏硬度/HBW	心部硬度/HBW
≤50	≥1150	≥10	≥24	380 ~ 430	340 ~ 430

1.2　生产工艺流程

根据用户行业特殊性能要求，结合包钢宽厚板装备特点生产条件，设计采用的绿色清洁生产工艺流程为：铁水预处理→铁水脱硫→顶底复吹转炉冶炼→LF 精炼→RH 真空脱气→宽厚板连铸→加热→除鳞→粗轧→精轧→矫直→冷却→切割→抛丸→淬火→回火→取样检验→入库→发货。

2　钢种成分设计和工艺设计

2.1　成分设计

稀土耐磨钢板的成分设计主要考虑四个因素：①钢板的力学性能及硬度等；②冲击韧性；③焊接性能和耐磨性；④钢板表面裂纹以及其它表观缺陷。

稀土耐磨钢化学成分设计的关键在于产品的硬度是否能保证材料的耐磨性，厚度方向的硬度是否均匀一致，确保使用周期的磨损速度恒定。而钢的淬透性及硬度主要取决于含碳量。同时，应充分考虑硬度、耐磨、焊接、成型和冲击韧性等因素，采用较低的碳含量，使钢通过淬火后获得较高的、均匀的硬度的同时，钢板具有足够的塑性和韧性，以满足工程机械的综合力学性能[3]。

根据耐磨钢的客户需求，采用低碳成分设计并配以稀土微合金技术，通过 TMCP、淬火 + 回火工艺生产的稀土耐磨钢板具有钢质洁净、优秀的耐磨性、良好的冲击韧性和焊接性能等特性。包钢宽厚板生产线稀土耐磨钢 BTNM400 的成分设计见表 3。

中国知网　https://www.cnki.net

表3 BTNM400的成分设计(质量分数) %

C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Cr	Mo	Ni	B	Ce
0.08~0.30	0.15~0.50	1.20~1.60	≤0.020	≤0.008	≤0.040	≤0.02	≤1.2	≤0.50	≤0.70	0.001~0.003	>0.000 3

2.2 绿色产品工艺设计

2.2.1 冶炼工艺

包钢宽厚板生产线采用经过脱硫预处理的铁水和优质自用废钢作为原料,以高效顶底复吹、炉气自动分析以及动静态自动炼钢先进生产技术为保障,进行转炉洁净钢的冶炼生产。精炼采用复合脱氧工艺、埋弧造渣操作,控制钢水成分和温度在较窄的范围内,实现钢水窄成分、恒温控制。终点成分命中率大于99%,终点温度命中率大于97%。通过优化钙处理操作和配套的软吹工艺,进一步上浮排除钢中的非金属夹杂物,获得洁净钢质。RH工序采用循环深脱气工艺,在保证钢水温度稳定的前提下大幅降低氢、氧、氮等气体含量,减小有害气体对钢质的不利影响。在冶炼过程中采用包钢自主知识产权的稀土加入技术。

采用废渣综合利用及“超低排放”标准,实现变废为宝,炼钢富余蒸汽回收自用。工业水循环利用,实现废水达标排放。转炉煤气回收率达到90%以上,吨钢回收量在150 m^3 以上,实现负能炼钢。将节能降耗的理念推广到新品研发上,转炉烟尘综合治理,采用干法除尘技术,通过除尘风机、卸灰装置改造,除尘管网、风口优化设计等50余项优化改进,使除尘系统风量大大提高。不仅大幅降低了系统运行成本,而且成倍提高了烟尘处理能力,这些工作的落实,都是为建设“绿色”炼钢创造极为有利的条件。

包钢除了在稀土耐磨钢,在冷轧硅钢、稀土桥梁钢、稀土高强钢等一批高附加值的节能环保钢材也被开发出来。目前已经已经向市场提供这样的节能环保钢材累计200多万吨。挖掘“绿色”能源,积极探索资源高效利用、能源高效转化、废弃物高效再生的循环经济发展模式。把转炉煤气、钢渣、铸机含铁尘泥等生产废弃物回收利用作为减排增效的重要内容,按照“责任、措施、考核、机制”四到位原则,建立起完整的废旧物资、废弃物回收利用网。冷系列产线氢气的回收,回收率达到70%。这些清洁生产工艺技术的应用实现冶炼清洁生产。

2.2.2 连铸工艺

连铸区域采用直弧形连铸机,上装链式引锭杆、多点弯曲连续矫直技术、凝固末端动态轻压下以及优化的动态二冷技术,通过恒温、恒拉速工艺,减轻连铸坯中心偏析和中心疏松等缺陷;通过结晶器保护渣的跟踪、改进和优化以及结晶器热成像仪的高效应用,减少铸坯表面裂纹以及振痕等表面质量缺陷。从而实现优质铸坯。

铸余渣回收工艺利用,实现了能量、资源的综合利用,大大降低了吨钢成本,保护了生态环境。铸机冷却工业水循环利用,同样实现废水达标排放。

2.2.3 加热及轧制工艺

根据钢种特点和用途,采用优化的铸坯加热曲线充分保证钢坯加热温度和均热时间,实现在铸坯长度、宽度和厚度方向的温度均匀一致。加热温度控制在1 180~1 250 ℃,保证铌的化合物充分溶解,使其在随后的轧制过程中析出,起到阻止奥氏体晶粒长大的作用。

轧机采用控轧控冷工艺保证组织和晶粒的均匀。轧制时加大粗轧道次变形量,严格保证精轧各道次变形量。粗轧开轧温度为1 190~1 250 ℃,单道次相对压下率至少有两道以上控制在25%~40%,使变形充分渗透,防止奥氏体晶粒不均,为后续加工过程做好组织准备。精轧开轧温度不高于950 ℃,至少有两道压下率大于20%以上,末道次压下率控制在大于10%,以增加相变时铁素体的形核率,保证晶粒细化效果。轧后钢板采用控制冷却,终冷温度不高于700 ℃,得到晶粒细小的铁素体+贝氏体组织。

加热炉采用ORC透平发电技术,实现加热炉烟气100%余热利用。工业用水串级循环使用,循环利用率大于等于98%。选择有资质的企业对危险废物回收处置。通过控制轧制与超快冷有效结合,综合利用细晶强化、析出强化、相变强化等多种强化方式,可以充分挖掘钢铁材料的潜力,实现资源节约型、节能减排型的绿色钢铁产品制造过程[4]。

2.2.4 热处理工艺

结合现场生产实际,根据经验公式确定稀土耐磨钢板淬火保温温度为860~950 ℃,保温时间根据钢板厚度的不同而不同,淬火后的温度小于150 ℃,回火温度为200~400℃。

中国知网 https://www.cnki.net

3　试验结果与分析

研发过程中，共轧制了 20 mm、30 mm、50 mm 的 BTNM400 各 6 块。对热处理后试样进行抗拉强度、延伸率、冲击韧性以及表面布氏硬度检测，并对钢板的淬透性进行了考查。同时，对 BTNM400 的焊接性能和耐磨性能进行了评价。

3.1　常规力学性能

通过几次 20 mm、30 mm、50mm BTNM400 的试制和生产，过程控制和性能都趋于稳定，特别是工艺优化后综合力学性能合格率达到了 100%，钢板的平均力学性能见表 4。

表 4　不同规格钢板力学性能平均值

厚度 /mm	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	延伸率(A_{50}) /%	-20℃ 冲击功 /J			表面布氏硬度 /HBW		
20	1 313	1 345	27.0	106	81	62	407	403	404
30	1 152	1 397	29.0	68	55	51	411	412	410
50	1 130	1 267	29.5	92	70	69	414	414	413

从表 4 可以看出，各个规格的力学性能不仅到达了国标要求，而且低温冲击功值和表面布氏硬度远远地超出了国标要求的下限，说明开发的BTNM400具有优良的耐磨性和良好的低温冲击韧性。

3.2　焊接性能

取 40 mm 钢板进行焊接试验，焊接试板的尺寸为 300 mm × 300 mm × 40 mm，试板坡口切削加工为双面单 V 形，钝边为 2 mm，坡口间隙为 3 mm。采用 80% Ar + 20% CO_2 作为保护气体进行常温对接焊，焊接前试板预热，焊后空冷不热处理。试板焊后静置 48 h，加工成尺寸为 300 mm × 30 mm × 20 mm 的拉伸试样，保证焊缝在拉伸试样的中心位置，拉伸实验温度为室温。拉伸结果如表 5 所示。

表 5　焊接接头机械性能测试结果

钢种	序号	抗拉强度/MPa	断裂位置
标准要求		≥850	热区或铸件一侧
BTNM400	1	853	热区
	2	868	热区



图 1　拉伸试样的宏观形貌

由表 5 可知，在相同焊接工艺条件下，耐磨钢 BTNM400 试样在拉伸过程中断裂位置为热影响区及铸钢一侧，拉伸试样断裂后的宏观形貌见图 1。试验结果表明，焊接接头的熔合性较好，焊接接头强度均高于铸钢一侧的母材强度。试验结果符合焊接工艺评定相关要求。

3.3　磨砺磨损试验

采用线切割设备在厚度方向距表面 7 mm 位置切取并加工成尺寸为 57.0 mm × 25.5 mm × 7.0 mm 的样片进行磨砺磨损试验。

表 6　BTNM400 与对比材料的磨损结果

样品编号	样品材质	磨损量/g	磨损量平均值/g
N1	BTNM400	0.292 1	0.265 26
N2	BTNM400	0.280 7	
N3	BTNM400	0.223 0	
H1	Hardox400	0.392 2	0.405 76
H2	Hardox400	0.410 0	
H3	Hardox400	0.415 1	
D1	DILLIDUR400	0.326 6	0.301 76
D2	DILLIDUR400	0.309 0	
D3	DILLIDUR400	0.269 7	

表 6 为包钢稀土高强度耐磨钢 BTNM400 与瑞典 Hardox400、德国 DILLIDUR400 在相同磨损周期下的磨损量对比试验结果。其中包钢稀土高强度耐磨钢 BTNM400 的磨损量为 0.265 26 g，明显低于瑞典 Hardox400 的磨损量 0.405 76 g、德国 DILLIDUR400 的磨损量 0.301 76 g。试验结果表明，包钢稀土高强度耐磨钢 BTNM400 具有优良的耐磨损性能。

（下转第 17 页）

中国知网　https://www.cnki.net

以，改变水口材质可以促进稀土钢的稳定浇铸。相关研究表明，熔融石英水口不结瘤，在浇铸稀土钢时反而会扩大，对预防结瘤具有较好的效果[3]。

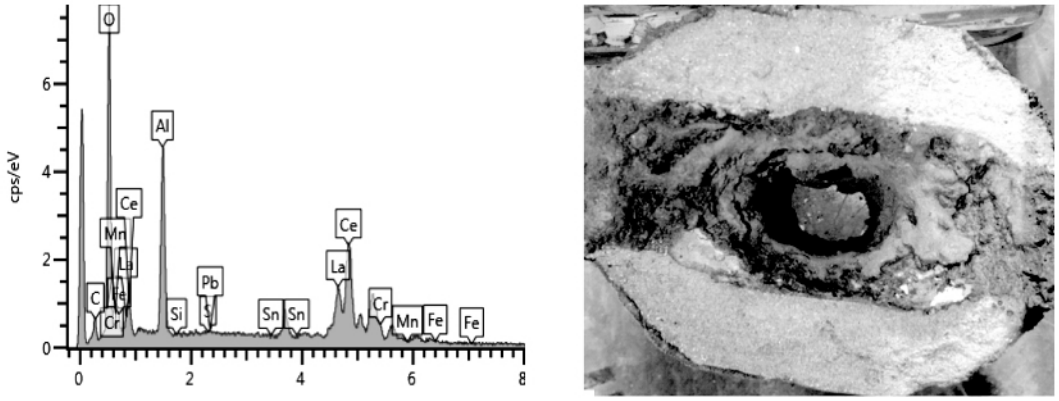


图 4　水口堵塞物

4　结论

(1) 与不添加稀土的钢种相比，试制工艺生产的稀土钢氧含量要明显低于常规钢种。

(2) 当中间包中的 S 含量较低时，其夹杂物主要为 2.0 μm 以下的 RE_2O_2S – CaO 和 RE_2O_2S、RE_2O_2S – Al_2O_3，是亚微米级含 RE 夹杂物。

(3) 水口结瘤物质主要为钢中稀土脱氧产物、稀土的铝酸盐，稀土夹杂聚集粘附是结瘤的主要原因。

参　考　文　献

[1] 李春龙. 稀土在钢中应用与研究新进展[J]. 稀土，2013，34(3)：78 – 83.

[2] 赵所琛，沈福元，韩其勇，等. 含稀土钢水口结瘤机理的探讨[J]. 钢铁，1982，17(5)：25 – 31.

[3] 余宗森，赵万智，谢逸凡，等. 加稀土钢水口结瘤原因分析[J]. 北京钢铁学院学报，1981，(3)：113 – 116.

(上接第 9 页)

4　结束语

经过两年多的努力，包钢宽厚板生产线在生产经营、产品质量、降低成本、环境保护上都以绿色生产为目标，应用稀土处理技术，进行产品设计生产，成功开发了稀土耐磨钢系列产品。该产品具有高强度、高硬度、高淬透性、良好的焊接性能和优越的耐磨性能，投放市场 1 万余吨，净增利润显著，并顺利通过中国工信部绿色产品评价认证。

参　考　文　献

[1] 王新东，田京雷，宋程远. 大型钢铁企业绿色制造创新实践与展望[J]. 钢铁 2018，53(2)：1 – 9.

[2] GB/T 24186—2009，工程机械用高强度耐磨钢板[S].

[3] 崔风平，孙玮，刘彦春，等. 中厚板生产与质量控制[M]. 北京：冶金工业出版社，2008.

[4] 王国栋，王昭东，刘振宇，等. 基于超快冷的控轧控冷装备技术的发展[J]. 中国冶金，2016，26(10)：9 – 17.

中国知网　https://www.cnki.net