高寒地区用稀土桥梁钢板的开发*

张 军[1,2],隋 鑫[1,2],薛 越[1,2],詹卢刚[1,2],高 军[1,2],柳 婕[1,2],张 帅[1,2]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司薄板坯连铸连轧厂,内蒙古 包头 014010;
2. 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: 采用包晶成分设计,添加了适量稀土合金,利用包钢宽厚板生产线先进的炼钢、连铸、双机架轧制及冷却工艺开发了稀土桥梁钢。试验结果表明,钢板组织均匀、性能优良,满足国家标准要求,通过低温环境测试,新研发的稀土桥梁钢冲击性能、焊接性能符合高寒地区使用要求。

关键词: 宽厚板; 桥梁钢; 稀土; 高寒地区

中图分类号: TG142.1; U444 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2021)06-0035-05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.06.023

Development of Rare Earth Bridge Steel Plate in Alpine Region

Zhang Jun[1,2], *Sui Xin*[1,2], *Xue Yue*[1,2], *Zhan Lu-gang*[1,2],
Gao Jun[1,2], *Liu Jie*[1,2], *Zhang Shuai*[1,2]

(1. *CSP Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Inner Mongolia Enterprise Key Laboratory of Rare Earth Steel Products Research & Development, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The rare earth bridge steel is developed by adopting the composition design of peritectic, adding appropriate amount of rare earth alloy as well as applying such advanced processes on the production line of wide and thick plate of Baotou Steel as steelmaking, continuous casting, double stands rolling and cooling. The test results showed that the steel plate was with well-closed formation and excellent performances so as to meet the requirements of national standard. The impact and welding performances of new developed rare earth bridge steel could meet the requirements of using in alpine region through low temperature environment test.

Key words: wide and thick plate; bridge steel; rare earth; alpine region

我国存在着大范围的冬季寒冷和严寒地区,最低温度达零下54 ℃。已有的研究表明,低温会显著降低钢材的断裂韧性,从而降低疲劳裂纹扩展的临界尺寸。而关于低温条件下桥梁用钢相关细节的研究还比较匮乏,尚未有明确的结论。另外,关于低温地区钢结构桥梁的选材设计还没有具体的特殊规定,工程技术人员还缺乏相应的设计和实践经验。因此,为保障低温严寒地区钢结构桥梁的设计和运营安全,还需要进一步明确低温条件下钢结构桥梁的性能参数和断裂机理。在室温条件下,钢结构桥

* 收稿日期:2021-06-10

作者简介:张 军(1977-),男,内蒙古包头市人,硕士,工程师,现从事质量管理工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

梁的机械性能问题得到了广泛的关注和研究，但在低温严寒地区，钢结构桥梁的低温韧性与焊接性能等还缺乏相应的研究。因此，开展钢结构桥梁特别是焊接钢结构桥梁低温环境下的评估研究具有非常重要的学术价值和工程实践意义，有利于促进钢结构桥梁的应用和发展[1]。

稀土桥梁钢是包钢(集团)公司近些年研发成功的“稀土品牌系列产品”，是一种综合优化了材料力学性能、便于加工制造、可用于低温和腐蚀环境、具备较高性价比的桥梁结构用钢。它不仅保持了较高的强度，而且在材料的低温韧性、可焊性和抗脆断性能等方面都比传统的钢材有明显的提高。相比普通桥梁用钢，稀土桥梁用钢因其具有初期成本低、全寿命成本低、建造速度快、对环境影响小、不产生影响健康及安全问题等优点，正在逐渐得到用户的认可。

1 成分设计及生产工艺

包钢近年来突出稀土钢发展战略，大力发展稀土钢品牌，充分发挥稀土的资源优势、随铁开采的成本优势、科研优势和产业链优势，开发了稀土风电钢、稀土高强钢、稀土耐磨钢、稀土硅钢等产品[2]。稀土桥梁钢是包钢众多稀土钢产品之一，与传统的桥梁结构钢相比，稀土桥梁钢在化学成分、力学性能、可焊性及加工性能、耐候性及低温冲击等方面具有自己的特色和优点[3]。

1.1 化学成分

目前利用稀土改善桥梁钢性能的研究开展较少，且多停留在实验室阶段。包钢技术团队从2016年起，使用特定的添加稀土合金方法，经过多轮多钢种试验，探明了稀土对提升桥梁钢综合性能的作用机理，实现了规模化长连浇生产。2019年12月在连铸过程中以特定方式添加稀土合金，成功生产超高稀土含量桥梁钢，目前采用稀土微合金化的方式已实现工业化批量生产。

稀土桥梁钢与普通桥梁钢最显著的区别在于采用包晶成分设计来达到降低屈强比的目的。在桥梁钢中添加了稀土合金后，通过稀土氧化物的作用，使桥梁钢的低温冲击性能、耐候性能得到极大提高。近期国家工信部《稀土管理条例》指出，想要真正发挥出稀土“工业维生素”的作用，稀土元素添加在钢中也不是“多多益善”的。包钢正在研究不同的稀土含量对桥梁钢的影响，摸索出收得率最高、对性能改善最有益的稀土添加方式和稀土添加量。对比试验生产两炉桥梁钢Q345qE，一炉不添加稀土，另一炉添加31.5 kg 10%的铈铁合金，具体化学成分见表1。

表1 桥梁钢化学成分设计(质量分数) %

编号	C	Si	Mn	P	S	RE
1#	0.14	0.29	1.49	0.016	0.002	
2#	0.15	0.30	1.51	0.012	0.001	0.000 8

1.2 工艺流程

稀土桥梁钢生产工艺流程为：KR脱硫→转炉冶炼→LF精炼→RH精炼→连铸→加热→轧制→冷却→热矫→剪切→探伤。

1.3 生产工艺

1.3.1 冶炼工艺

保证钢质高纯净度，严格控制钢中有害元素P、S含量，并采用RH真空处理，去除钢中氢、氧、氮有害气体，去除钢中的硫化物、氧化物等，实现钢水窄温度、窄成分的精确控制。包钢宽厚板生产线采用经过脱硫预处理的铁水和优质废钢作为原料，以高效顶底复吹、炉气自动分析以及动静态自动炼钢三项先进生产技术为保障进行转炉洁净钢的冶炼。精炼采用复合脱氧工艺、埋弧造渣操作，严格控制钢水成分和温度，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软吹工艺，进一步上浮去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。

1.3.2 连铸工艺

成分设计碳含量在包晶区，许多研究表明，包晶在连铸时容易出现纵裂纹。针对稀土桥梁钢的成分设计，连铸采用凝固末端动态轻压下和电磁搅拌，以及优化的动态二冷技术，保证恒温、恒拉速工艺浇

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

铸，以减轻连铸坯中心偏析和中心疏松、裂纹、振痕等缺陷，连铸工序通过采取以下工艺措施来改善铸坯质量：

（1）借助连续测温动态调整连铸二冷参数配比，稳定铸坯质量；

（2）优化电磁搅拌参数，提高铸坯质量；

（3）调整结晶器振动参数，减轻铸坯表面振痕；

（4）调整保护渣成分及性能指标，解决铸坯表面纵裂问题。

1.3.3　加热轧制工艺

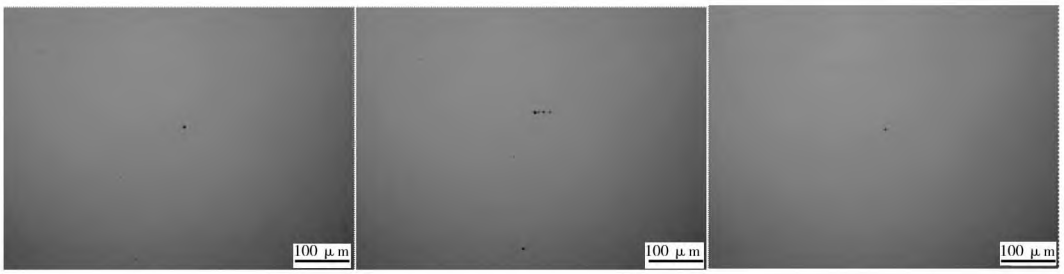
板坯加热温度在 1 220 ~ 1 260 ℃，出炉板坯心部温度大于 1 180 ℃，温度不宜太高，板坯高温段停留时间不宜太长，避免奥氏体晶粒长大，确保均热段保温不低于 60 min，保证钢坯烧透、均匀。轧制工艺采用两阶段控轧，充分发挥设备潜力对板坯实施强力大压下，一方面确保再结晶区板坯反复再结晶以细化晶粒，另一方面增加未再结晶区的相变形核点，进一步细化晶粒，保证单道次压下量，高温延伸阶段单道次最小压下率为 21%，二阶段最后三道次累计压下率不小于 40%。

2　试验结果分析

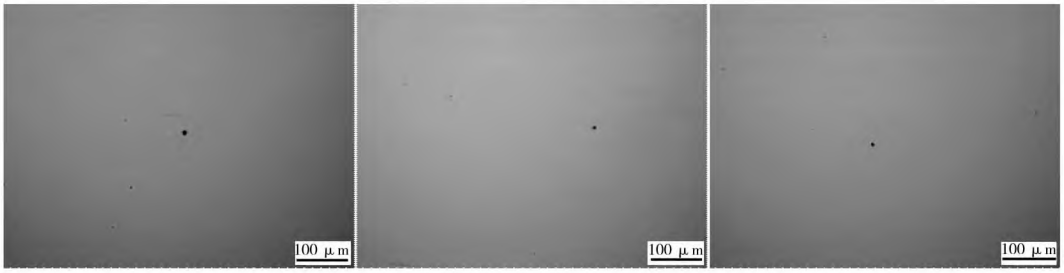
2.1　夹杂物分析

钢中夹杂物的多少和大小是影响钢板抗疲劳性能和其他力学性能的重要因素，夹杂物的控制水平体现了生产线的冶炼、连铸技术水平和过程控制水平。

图 1 为不添加稀土的试验钢和添加稀土的试验钢夹杂物对比，添加稀土后 B 类夹杂物的尺寸明显减小。



（a）普通桥梁钢夹杂物图片



（b）稀土桥梁钢夹杂物图片

图 1　普通桥梁钢与稀土桥梁钢夹杂物对比

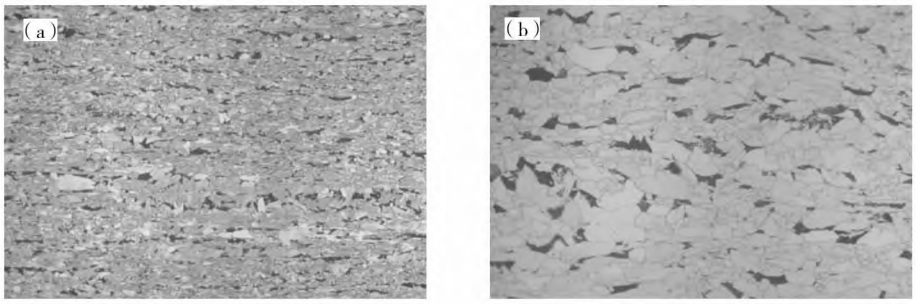
2.2　显微组织分析

取稀土桥梁用钢板的轧态试样磨制金相试样并抛光后，用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀进行显微组织分析。显微组织主要是铁素体 + 珠光体，对于厚钢板其心部会出现少量过冷相，存在轻微的带状组织，金相组织见图 2。

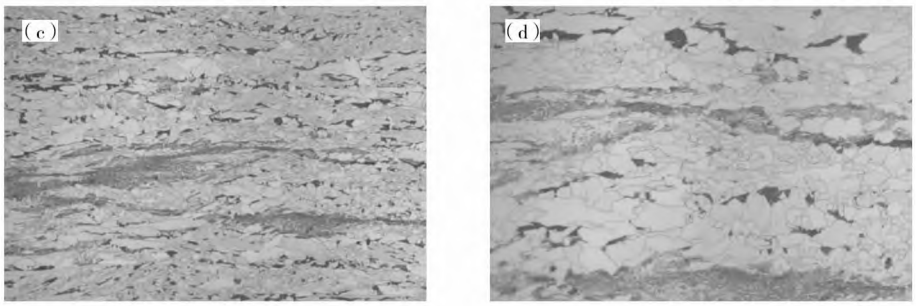
2.3　横纵向拉伸性能

开发的高寒地区稀土桥梁钢拉伸性能均满足 GB/T 714—2015 桥梁用结构钢[4] 的要求，富余量合适，性能稳定。具体性能见表 2。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 1/4位置 200倍　　(b) 1/4位置 500倍



(c) 1/2位置 200倍　　(d) 1/2位置 500倍

图2　稀土桥梁钢金相组织

表2　桥梁钢横、纵向拉伸性能

编号	稀土含量/%	横向屈服强度(R_{el})/MPa	纵向屈服强度(R_{el})/MPa	横向抗拉强度/MPa	纵向抗拉强度/MPa	横向延伸率/%	纵向延伸率/%	屈强比
标准		≥345		≥490		≥20		≤0.85
1#		390	384	520	518	26	25	0.75
2#	0.000 8	391	386	525	521	26	25.5	0.74

从试验结果可得出，稀土桥梁钢与普通桥梁钢拉伸性能区别不大，屈强比都比较低，满足设计要求。

2.4　横纵向系列温度冲击性能

检验稀土桥梁钢与普通桥梁钢的冲击性能，根据GB/T 714—2015要求，Q345qE在-40 ℃时纵向冲击性能(KV_2)不小于120 J。由表3试验结果可以看出，普通桥梁钢与稀土桥梁钢-40 ℃时纵向冲击性能均符合标准要求。在温度逐渐降低到-60 ℃、-80 ℃时，普通桥梁钢冲击性能逐渐低于标准要求，稀土桥梁钢的横、纵向冲击性能(KV_2)依然大于120 J。由此得出结论，稀土桥梁钢的韧脆转变温度在-80 ℃以下。

表3　桥梁钢横、纵向系列温度冲击功(KV_2)　　J

稀土含量/%	取样方向	0 ℃	-20 ℃	-40 ℃	-60 ℃	-80 ℃
0	横向	248/213/214	229/243/224	192/206/195	90.7/118/136	25.9/31.5/62.7
	纵向	265/223/230	243/251/248	225/231/204	126/141/155	53.5/62.9/41.6
0.000 8	横向	241/255/212	269/250/276	231/243/268	238/256/242	128/136/142
	纵向	331/297/408	293/313/327	298/309/309	312/272/276	162/152/146

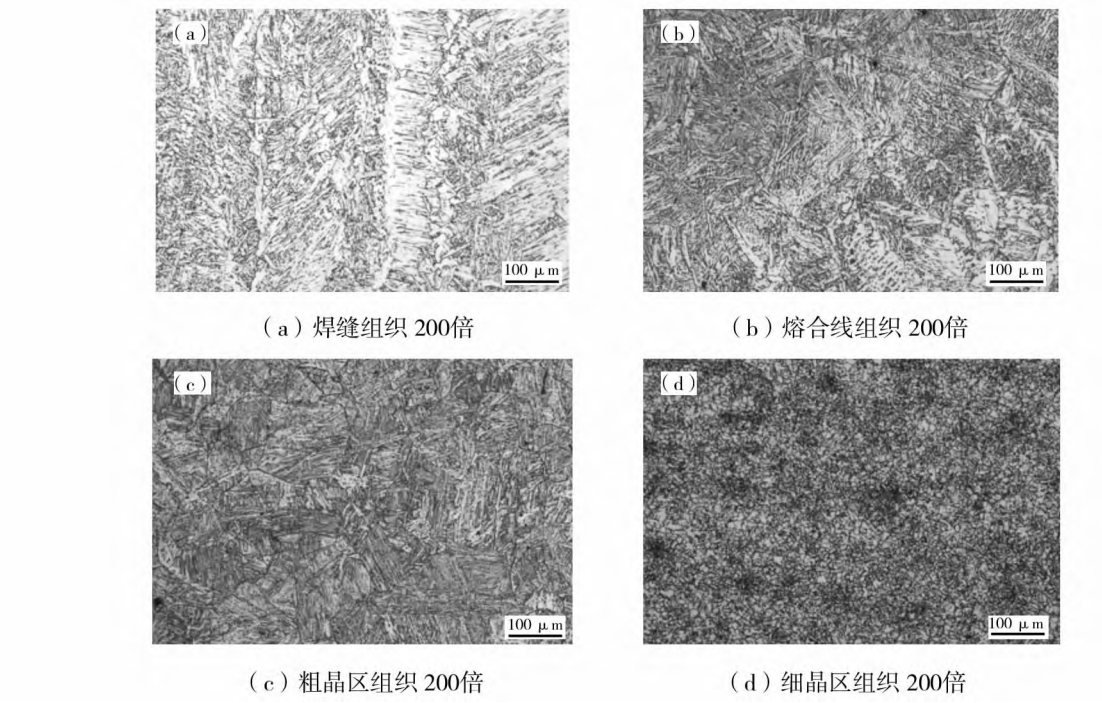
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.5　焊接工艺试验

试验稀土桥梁钢焊接方式采用 X 型坡口、双面对接自动焊接，焊接前将坡口及坡口附近母材清理干净。焊接试验不变量为气体流量 20 L/min，道间温度不低于 200 ℃，焊丝干伸长度 15 mm，板厚 25 mm。焊接工艺对比试验热输入（E）分别为 10 kJ/cm、19 kJ/cm、25 kJ/cm，不同热输入条件下稀土桥梁钢焊接接头力学性能及金相组织见表 4、图 3。

表 4　稀土桥梁钢不同热输入条件下焊接接头力学性能

编号	E /(kJ·cm^{-1})	R_{el} /MPa	R_m /MPa	A /%	焊缝 KV_2 /J	热影响区 KV_2 /J	断裂位置	冷弯（$d=2a$，$a=180°$）
1#	10	396　403	521　537	29　26	262/247/255	206/230/229	母材	合格
2#	19	385　408	508　511	27　21	232/249/245	143/185/206	母材	合格
3#	25	391　398	514　526	28　22	218/237/243	146/138/136	母材	合格



（a）焊缝组织 200倍　（b）熔合线组织 200倍

（c）粗晶区组织 200倍　（d）细晶区组织 200倍

图 3　焊接接头组织图片

稀土桥梁钢在不同热输入下各项力学性能指标符合标准要求，焊缝组织为先共析铁素体 + 针状铁素体 + 少量粒状贝氏体，粗晶区组织为贝氏体，细晶区组织为铁素体 + 粒状贝氏体。

焊接热影响区组织的大角度晶界密度显著提高，冲击韧性得到有效改善，该稀土桥梁钢在焊接热输入量为 19 kJ/cm 条件下，焊接粗晶热影响区 −60 ℃低温冲击吸收功大于 100 J，在焊接热输入量为 25 kJ/cm 条件下，焊接粗晶热影响区 −60 ℃低温冲击吸收功大于 60 J，符合寒冷地区使用要求。

3　结论

（1）添加稀土元素对桥梁钢的拉伸性能无明显改变，对低温韧性有明显改善。稀土含量在 0.000 8% 左右时，韧脆转变温度在 −80 ℃以下，符合高寒地区使用需求。

（2）焊接工艺试验结果表明，25 mm 厚度稀土桥梁钢板最佳热输入（E）为 10 ~ 25 kJ/cm，焊板各项力学性能指标满足标准及使用要求，焊缝及热影响区组织正常，焊缝及热影响区 −60 ℃低温韧性满足高寒地区使用。

（下转第 43 页）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

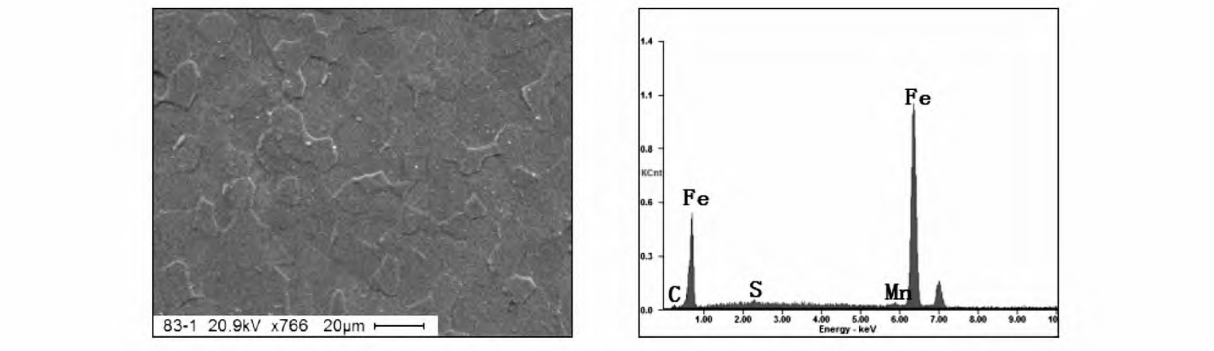


图 6　优化后微观组织中 MnS 形态

4　结论

(1) HC220Y 汽车板冲压开裂件的化学成分满足标准要求，排除了由于成分异常导致钢带冲压开裂的可能性。

(2) 通过显微组织分析、扫描电镜检测及开裂断口分析发现钢板内存在大量 MnS 夹杂，是导致 HC220Y 汽车板冲压开裂的直接原因。

(3) 通过将 S 含量控制在 0.008% 以内，确保钢水洁净度，MnS 夹杂明显减少，形态转变为弥散分布的颗粒状，解决了 HC220Y 冷轧钢带冲压开裂问题。

参　考　文　献

[1] EN 10268 + A1—2013，Cold Rolled Steel Flat Products with High Yield Strength for Cold Forming – Technical Delivery Conditions [S].

[2] 李建军，辛雪倩，刘琦. 影响钢中非金属夹杂物的关键因素的研究 [J]. 大型锻造件，2019，(1)：13 – 15.

[3] 郑浩，刘丽华，张中武. 热加工对硫化物及氧化物夹杂的影响 [J]. 材料导报，2021，35(13)：13 168 – 13 174.

[4] 刘克俭，王祖宽，杨桂荣. 钢中硫化物夹杂的产生及其形态控制 [J]. 河北理工学院学报，2001，23(1)：21 – 24.

[5] 杨泉山，孙朝太，冯胤明. 冷轧退火含磷高强 IF 钢的组织和性能 [J]. 安徽冶金科技职业学院学报，2013，23(4)：1 – 4.

[6] 申少华，刘国林，韦弦，等. 中厚钢板中的硫化物夹杂及其对冷弯性能的影响 [J]. 宽厚板，2005，11(2)：26 – 30.

(上接第 39 页)

参　考　文　献

[1] 朱宜进，高雅，宋庆吉，等. 浅述桥梁钢的发展现状和趋势 [J]. 宽厚板，2016，22(3)：43 – 45.

[2] 陆斌，张军，张文博，等. 稀土耐磨钢绿色产品设计与研发 [J]. 包钢科技，2019，45(6)：6 – 9，17.

[3] 卜向东，涛雅，姜德刚，等. 高强耐候稀土微合金化 YQ450NQR1RE 乙字钢试制 [J]. 包钢科技，2019，45(6)：43 – 46.

[4] GB/T 714—2015，桥梁用结构钢 [S].

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net