960 MPa级高强度重型机械用钢板的试制*

李 浩,柳 婕,隋 鑫,张 军

(内蒙古包钢钢联股份有限公司薄板厂,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章介绍了包钢薄板厂试制960 MPa级重型机械用钢板化学成分设计及冶炼、连铸、轧制及热处理工艺,并对试制钢板进行了组织和性能检测,结果表明: 该产品钢质纯净,夹杂物含量低,低温韧性及强度匹配良好,可焊接性能与国内同类产品比肩。

关键词: 高强钢; 重型机械; 显微组织

中图分类号: TG335.5 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009-5438(2021)05-0045-05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.05.012

Trial Production of 960 MPa Grade High-strength Steel Plate for Heavy Machinery

Li Hao, Liu Jie, Sui Xin, Zhang Jun

(*CSP Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In this paper, it is introduced that the chemical composition design as well as smelting, continuous casting, rolling and heat treatment technologies of steel plate for trial produced 960 MPa grade heavy machinery by CSP Plant of Baotou Steel. Moreover, its microstructure and performances are tested. The results show that it is pure, the inclusion content is low, matching of low temperature toughness and strength is good as well as the weldability can be compared with the like products in China.

Key words: high-strength steel; heavy machinery; microstructure

随着中国制造业的飞速发展,对起重机、矿山机械、挖掘机、载重汽车、推土机等重型机械的需求日渐增大,对其性能的要求也日渐提高。国外重型机械用钢发展较早,已形成了一系列成熟的产品,如日本的Werl-ten系列,美国的HY及HSLA系列,瑞典SSAB公司的WELDOX系列[1]。为紧跟我国机械制造行业发展的脚步,研发重型机械专用钢板成为钢铁生产企业的重要任务之一。

重型机械的应用领域极广,在供电、水利、隧道、建筑、冶金等各行各业都会用到,作业环境的复杂多变,使得行业内对重型机械用钢的要求越来越高,大型化、轻量化、抗寒抗疲劳、良好的焊接性能等都成为重型机械用钢选择的必要条件[2]。近年来,重型机械用钢强度级别越来越高,从460 MPa逐渐提高到690 MPa,甚至1 000 MPa以上。高强度钢板的使用能够极大的减轻机械的自重,更好的适应各种作业条件,延长重型机械的使用寿命,因此,研发960 MPa级高强度重型机械用钢板已成为如今机械制造不可忽视的发展方向。

本文介绍了采用包钢宽厚板生产线的炼钢、连

* **收稿日期**: 2021-08-07

作者简介: 李 浩(1971-),男,河北省保定市人,高级工程师,现从事宽厚板产品研发及技术管理工作。

中国知网 https://www.cnki.net

铸、轧制以及热处理等先进设备生产960 MPa级高强度重型机械用钢板。

1 技术条件与工艺流程

1.1 技术条件

由于重型机械用钢的特殊用途和使用环境的限制，要求该产品除满足常规力学性能要求外，还必须拥有良好的低温冲击韧性及可焊接性能。

根据标准GB/T 16270—2009[3]要求，钢板力学性能应符合表1规定，化学成分应符合表2规定。

表1 力学性能要求

厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	KV_2（-20 ℃、-40 ℃、-60 ℃）/J
≤30	≥960	980~1 150	10	≥34

表2 化学成分要求（质量分数） %

C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ni	B	Cr	Mo	Al_s
≤0.2	≤0.8	≤2.0	≤0.02	≤0.01	≤0.06	≤0.12	≤2.0	≤0.005	≤1.5	≤0.7	≥0.015

1.2 生产工艺流程

工艺流程为：铁水脱硫→转炉冶炼→LF精炼→RH真空脱气→连铸→缓冷→加热→除鳞→粗轧→精轧→矫直→等离子切割→探伤→淬火→回火→取样检验→入库发货。

2 成分设计

根据表1的力学性能要求可以考虑采用低碳成分设计，恰当的C、Mn配比，添加提高淬透性的Cr、Mo、Ni等元素进行固溶强化以提高基体强度；采用Nb、V、Ti微合金化，结合控制轧制工艺细化晶粒，确保成品钢板具有良好的力学性能；降低P、S含量的同时添加稀土元素改善钢板的低温冲击韧性。综合考虑钢板的力学性能以及技术要求，Q960E的化学成分设计如表3所示。

表3 化学成分设计（质量分数） %

C	Si	Mn	P	S	Al_s	Nb	V	Ti	Cr	Mo	Ni	Ce
0.12~0.18	0.10~0.30	1.1~1.4	≤0.010	≤0.005	≥0.015	0.015~0.035	0.035~0.060	0.015~0.035	0.30~0.45	0.40~0.60	0.20~0.50	0~0.010

3 冶炼

根据表3成分设计，试制一炉Q960E高强钢。要求铁水预处理后S含量小于0.005%，转炉进行顶底复合吹炼，保证吹炼终点的C-O平衡；出钢过程中进行渣洗操作，确保夹杂物充分聚集、上浮，提高钢水纯净度。转炉冶炼过后进行LF炉外精炼，该阶段投入Si、Mn、Nb、V、Ti、Cr、Mo等合金并确保合金命中目标，造白渣脱硫时成渣必须速度快且保持时间大于15 min，钢水需要进行Ca处理，要求达到总氧含量不大于0.002 0%，S含量不大于0.002 0%。RH精炼主要进行真空脱气，抽气4 min，最小真空度即可达到266 Pa以下，处理时真空度反弹近100 Pa，真空处理过程中需要调节氩气流量，保证钢水充分的循环，该阶段需要加入稀土Ce合金，然后吹氩5 min后复压，再软吹5~6 min，总处理时间超过20 min，保证钢水中H、O、N元素的含量符合要求。

4 连铸

使用直弧式铸机，出坯250 mm厚度规格11块。全程使用中空颗粒中包覆盖剂隔绝空气并吸附夹杂物以达到保护浇铸的目的，增氮量要求小于0.000 6%；连铸过程中采用动态轻压下以及动态二冷技术，保证恒温、恒拉速工艺的同时投入电磁搅拌，减轻连铸坯中心偏析、中心疏松、裂纹及振痕等缺陷。铸坯入保温坑缓冷，保温温度360~460 ℃，缓冷时间大于10 h。缓冷抗缓冷能够降低铸坯表层温度梯度，确保有害氢元素逸出，均匀成分，减少偏析，充分释放其组织内应力，提高铸坯塑韧性。

中国知网 https://www.cnki.net

5　加热及控制轧制

为使铸坯组织充分的奥氏体化，且 Nb、V、Ti 等微合金元素得到充分的固溶，需要对铸坯进行再加热。本次 Q960E 高强钢的试制选用厚度规格为 250 mm的 4 块冷装板坯进行加热，要求在炉时间为 250 ~ 350 min，出炉温度为 1 150 ~ 1 250 ℃；出炉后需要进行高压水除鳞以消除其表面氧化铁皮，要求除鳞水压力不小于 18 MPa。

本次试制 Q960E 高强钢板分别轧制 20 mm 及 30 mm 两个厚度规格，共 4 块钢板。采用两阶段控制轧制工艺，在粗轧阶段完成对板坯的整形、展宽和高温阶段的延伸，该阶段要求实施尽可能大的压下。当中间坯温度降至 900 ~ 980 ℃时开始精轧，由于在精轧阶段晶粒极少发生再结晶，随着轧制的进行压下率逐渐累积，最终钢板内部晶粒呈扁平状，新相晶粒在长大过程中受到原扁平状晶粒晶界的限制而细化，达到细化晶粒的效果。在轧制过程中，必须采取机架除鳞设备进行除鳞，高温延伸阶段视钢板表面情况灵活进行除鳞，以保证钢板表面质量；同时，在确保板形的前提下要求终轧温度尽量低，终轧道次压下率尽量大[4-5]。

6　热处理工艺

为得到优异的综合性能，重型机械用钢通常需要采用热处理调质工艺处理。在热处理过程中，加热温度和保温时间是重要的控制参数，直接影响钢的原始奥氏体晶粒尺寸和均匀性[6]。本次试制选取 20 mm 及 30 mm 厚 Q960E 钢板各 1 块，采用淬火 + 中温回火工艺，钢板入炉前先进行抛丸处理，以保证钢板表面光洁；淬火温度在 880 ~ 920 ℃之间，淬火保温时间为 10 ~ 30 min，回火温度为 450 ~ 550 ℃，回火保温时间为 30 ~ 60 min；钢板出炉后要进行冷矫直，保证钢板平直度。

7　试制结果与分析

7.1　化学成分

钢的实际熔炼化学成分见表 4。由表 4 可知，P、S 含量较低，为保证钢板的低温韧性奠定了基础；Cr、Mo、Ni 等合金元素充分加入，为钢板强度的提升创造了条件。

表 4　Q960E 钢板实际熔炼化学成分(质量分数)　　%

C	Si	Mn	P	S	Al_s	Nb	V	Ti	Cr	Mo	Ni	Ce
0.16	0.18	1.25	0.01	0.005	0.041	0.03	0.03	0.017	0.39	0.46	0.35	0.000 7

7.2　铸坯低倍情况

采用的冷酸蚀剂对在炉次第一块铸坯上取的试样进行低倍酸蚀检验，铸坯低倍酸蚀照片见图 1。



图 1　Q960E 铸坯低倍检验酸蚀照片

铸坯评级结果为中心偏析 C 类 3.0 级，中心疏松 3.0 级，有轻微的白亮带但不影响钢板性能。从评级结果及低倍照片可以看出铸坯内部质量控制较好。

7.3　力学性能

分别从 20 mm 及 30 mm 厚 Q960E 钢板上各取 1 块横向试样进行拉伸性能及弯曲性能检验，再各取 1 块纵向试样进行系列低温冲击韧性检验，检验结果如表 4 及表 5 所示。

表 4　Q960E 钢板拉伸及弯曲性能

厚度/mm	拉伸性能			弯曲性能
	$RP_{0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	$D = 3a$,180°
30	1 065	1 080	12	表面无裂纹
20	1 060	1 074	11	表面无裂纹

中国知网　https://www.cnki.net

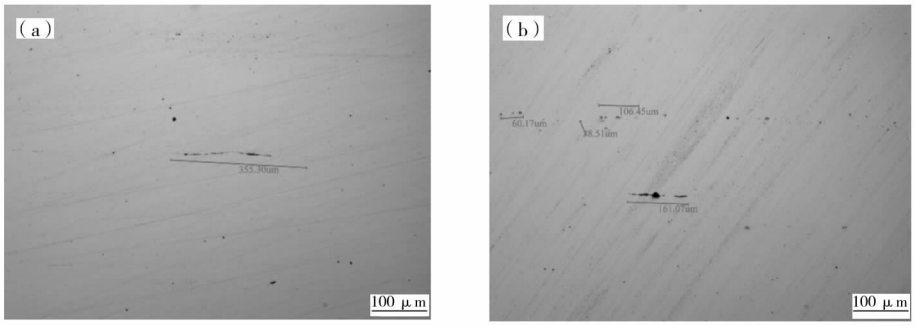
表5 Q960E钢板系列低温冲击韧性均值 J

厚度/mm	-20 ℃	-40 ℃	-60 ℃
20	131	87	60
30	147	75	58

由表4可以看出,本次试制的Q960E钢板拉伸性能达到了标准要求且有较大富余量。由于拉伸试验时屈服平台不甚明显,故取0.2%残余应变对应的应力值作为钢材的屈服强度值,达到1 000 MPa以上,抗拉强度在1 000~1 100 MPa之间,断后延伸率也在11%以上。试样弯曲后均未出现裂纹,具备较好的再加工性能。从表5可以看出,Q960E钢板的系列低温冲击韧性均值都达到标准要求且有一定富余量,说明本次生产的Q960E钢板具有良好的低温冲击韧性。

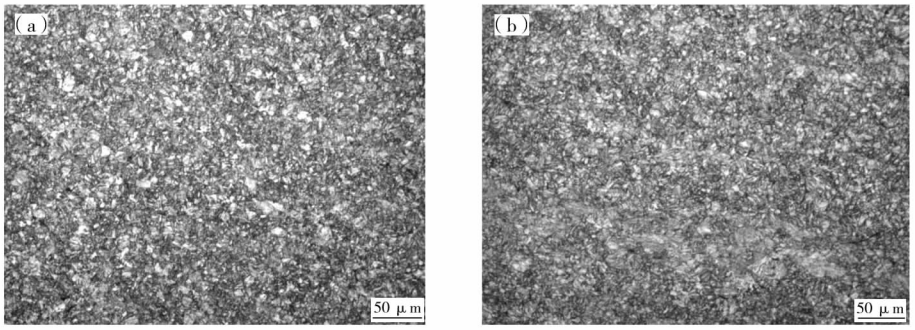
7.4 夹杂物及微观组织

分别从20 mm及30 mm厚Q960E钢板上各取1块试样进行夹杂物及微观组织观察,结果如图2、图3所示。



(a) 20 mm (b) 30 mm

图2 Q960E钢板的夹杂物照片



(a) 20 mm (b) 30 mm

图3 Q960E钢板的金相组织照片(×200倍)

从图2、图3可以看出,钢板夹杂物均为B类2.0级,符合标准要求;组织为回火屈氏体,具有高硬度、高耐磨性及高的抗疲劳强度等特点。

7.5 焊接试验

对钢板进行对接接头刚性拘束焊接裂纹试验。试验采用80% Ar + 20% CO_2 混合气体保护焊,分别对20 mm及30 mm厚Q960E钢板进行焊接性能检验。

表6 Q960E钢板焊接试验结果 %

厚度/mm	表面裂纹率	断面裂纹率
20	0	0
30	0	0

由表6可以看出,两组试样表面裂纹率和断面裂纹率均为零,由此说明Q960E钢板在拘束程度较苛刻条件下焊接未产生冷裂纹,可焊接性能优良。

中国知网 https://www.cnki.net

8　结论

(1) 通过科学合理的化学成分设计,严格的冶炼、浇铸、轧制及热处理等工艺过程控制,成功生产出了具有良好的低温冲击韧性和再加工性能的960 MPa级高强度重型机械用钢板。

(2) 生产高强度厚钢板需要严格控制化学成分,尽量降低 C 含量,适度添加纯净钢质的稀土 Ce 元素及提高淬透性的 Cr、Mo、Ni 等合金元素,从而保证钢板的低温韧性及强度能够达到标准要求。

(3) 包钢薄板厂试制的 Q960E 高强钢板产品质量优良,满足用户需求,为开发超高强度重型机械用钢奠定了基础。

参　考　文　献

[1] 徐晓玉. “一带一路”沿线主要国家高端装备制造贸易网络结构研究 [D]. 大连: 大连海事大学,2018.

[2] Nagao A, Ito T, Obinata T. Development of YP 960 and 1 100 MPa Class Ultra High Strength Steel Plates with Excel - lent Toughness and High Resistance to Delayed Fracture for Construction and Industrial Machinery [J]. JFE Technical Report, 2008,(11):13 - 18.

[3] GB/T 16270—2009,高强度结构用调质钢板 [S].

[4] 孙岩,赵楠,薛峰,等. 960 MPa 级高强钢的连续冷却转变 [J]. 金属热处理,2021,46(3):166 - 169.

[5] 王有铭,李曼云. 钢的控制轧制和控制冷却 [M]. 北京: 冶金工业出版社,1995.

[6] 张楠,董现春,刘宏. 960 MPa 工程机械用钢焊接性能试验研究 [J]. 电焊机,2012,42(7):1 - 6.

(上接第 15 页)

高烧结矿品位,但烧结碱度合格率降低。

(2) 与南阳蛇纹石相比,汉中蛇纹石粒度较粗,导致烧结过程垂速升高,返矿率升高,烧结固体燃耗升高。

(3) 汉中蛇纹石替代南阳蛇纹石后烧结矿转鼓强度提高了 0.14 个百分点,得到改善; 平均粒径升高了 0.25 mm; 粒级分布更加合理,其中 25 ~ 40 mm 粒级占比增加了 0.5 个百分点,16 ~ 10 mm 粒级占比降低了 1.65 个百分点,小于 10 mm 粒级略有升高。

(4) 汉中蛇纹石替代南阳蛇纹石后,烧结矿还原度 RI 提高,低温还原粉化率 $RDI_{+3.15}$ 提高,熔滴试验压差降低。

参　考　文　献

[1] 薛俊虎. 烧结生产技能知识问答 [M]. 北京: 冶金工业出版社,2019.

[2] 贺真. 烧结含铁原料性能与配矿试验研究 [D]. 长沙: 中南大学,2005.

[3] 许满兴,张天启. 铁矿石优化优化配矿技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社,2017.

中国知网　https://www.cnki.net