

稀土微合金化钢板 BTP500 性能研究

袁晓鸣¹, 刘泽田², 董丽丽¹, 白海瑞¹

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010;

2. 河北工业大学材料科学与工程学院, 天津 300130)

摘要: 文章对 BTP500 钢板的折弯和抗弹性能进行了检验和试验。厚度为 6 mm、9 mm 的 BTP500 钢板 90° 折弯试验结果满足要求; 对比 BTP500 钢板分别采用铁素体焊丝和奥氏体焊丝焊接后的性能检测结果, 采用铁素体焊丝焊接的钢板抗拉强度比采用奥氏体焊丝焊接的钢板高 100 MPa 以上。采用铁素体焊丝焊接的试板的 -40 °C 冲击功为 20 ~ 30 J, BTP500 钢板焊接试验满足协议要求。在子弹侵彻时, 工业化试制的 6 mm、9 mm 厚度的 BTP500 钢板均未被穿透, 具有很好的防弹防侵彻能力, 防弹性能满足协议要求。

关键词: 稀土; 微合金化; 焊接; 折弯试验; 抗弹性能

中图分类号: TG142.1

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438(2023)04 - 0001 - 05

Study on Properties of Rare Earth Microalloying Steel Plate BTP500

Yuan Xiao - ming¹, Liu Ze - tian², Dong Li - li¹, Bai Hai - rui¹

(1. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,

Inner Mongolia Autonomous Region, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of

Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: In this paper, the bending and bullet - proof properties of steel plate BTP500 are tested. The results of 90° folding test for steel plate BTP500 with thicknesses of 6 mm and 9 mm meet the requirements; the tensile strength of steel plate welded with ferritic welding wire is 100 MPa higher than that of the steel plate welded with austenitic welding wire through comparing the results of performance tests for steel plate BTP500 welded with ferritic welding wire and austenitic welding wire. The impact energy of the test plate welded with ferritic welding wire at -40 °C is 20 ~ 30 J and the weld test of steel plate BTP500 could meet the agreement requirements. With the penetration of bullet, both of the steel plates BTP500 with thicknesses of 6 mm and 9 mm by industrial trial production are not penetrated, which are with very good bullet - proof and anti - penetration properties as well as the bullet - proof property could meet the agreement requirements.

Key words: rare earth; microalloying; weld; folding test; bullet - proof property

装甲车辆最为重要的指标就是其防护性能, 因此装甲车辆所采用的防护钢板的抗弹性能尤为关

键^[1-2]。目前针对装甲防护钢板力学性能和抗弹性能的研究主要集中在钢板的硬度与抗弹性能的关系^[3-5]。防护用钢板想要获得理想的防弹性能,应注重防护用钢板的硬度与韧性的良好匹配。防护钢板钢质的洁净度、热轧、退火各阶段钢板显微组织和力学性能均匀性等众多因素都会在一定程度上影响钢板的性能^[6-7]。

包钢股份利用包钢特有的稀土资源优势,成功开发出满足用户需求的高性能稀土微合金化 BTP500 装甲防护钢板。为全面评价 BTP500 钢板的各项性能指标,本文以其为研究对象,在完成常规力学性能检测的基础上,选取 6 mm、9 mm 厚度钢板分别检测其加工性能、焊接性能以及抗弹性能,并对焊接性能、抗弹性能等进行评价。

表 1 试样的力学性能及要求

规格/mm	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	延伸率 A /%	硬度(HBW)	-40 °C 冲击吸收功/J
6	1 289	1 572	9.0	494	51.6
	1 291	1 585	9.5	488	54.6
9	1 411	1 645	9.5	506	32.4
	1 405	1 624	9.5	504	33.8
协议要求	≥1 250	1 450 ~ 1 750	≥8	480 ~ 540	≥25

2.1 折弯试验

当高性能稀土微合金化 BTP500 钢板发货到用户后,用户需要对热轧 BTP500 防护钢板进行冷成形加工。冷成形加工过程中,要考虑 BTP500 钢板的回弹等影响。钢板强度越高,其回弹越大。特别要注意的是,BTP500 钢板的最小折弯直径不能小于技术协议中双方商定的冷弯直径。BTP500 钢板折弯时,最小折弯半径应不小于板材厚度的 5 倍。高性能稀土微合金化 BTP500 钢板折弯试验参数见表 2。

表 2 折弯试验参数

试板尺寸	板厚/mm	弯曲半径/mm	折弯角度/(°)	试板数量/块
1 800 mm × 200 mm	6	30	90	3
	9	45	90	3

1 生产工艺流程

高性能稀土微合金化 BTP500 钢板生产工艺流程为铁水预处理→转炉顶底复吹冶炼→LF 炉外精炼→RH 真空脱气→板坯连铸→堆垛缓冷→板坯加热→除鳞→粗轧轧制→精轧轧制→ACC 冷却→矫直→探伤→精整→钢板表面质量检查→表面抛丸→热处理→取样检验→成品入库。

2 试验方案

试样(板)取自 2 250 mm 宽厚板生产线生产的厚度 6 mm、9 mm 的钢板,试验项目包括折弯、焊接、抗弹等。试板的常规力学性能结果见表 1。

2.2 钢板的焊接评定试验

高性能稀土微合金化 BTP500 钢板采用常用的焊接方法进行焊接。一般选择焊接材料时,推荐使用奥氏体焊丝材料焊接。如果焊接接头强度是重要的性能要求时,也可以采用强度较高的铁素体焊接材料。本文分别对 6 mm、9 mm 厚钢板采用铁素体焊丝和奥氏体焊丝两种材料进行焊接工艺试验。焊接试验结束后对焊接板进行焊接试板拉伸、焊接试板弯曲、焊接试板冲击性能等检测。同时开展钢板对接接头焊接裂纹试验。焊接采用富氩混合气体保护焊,试验参数见表 3。

表 3 焊接试验条件

编号	焊丝类别	焊丝型号	混合气体配比	焊接速度/(mm · min ⁻¹)
6A	奥氏体焊丝	H1Cr21Ni10Mn7Mo	Ar: CO ₂ = 95% : 5%	350 ~ 380
6T	铁素体焊丝	ER100	Ar: CO ₂ = 80% : 20%	350 ~ 380
9A	奥氏体焊丝	H1Cr21Ni10Mn7Mo	Ar: CO ₂ = 95% : 5%	350 ~ 380
9T	铁素体焊丝	ER100	Ar: CO ₂ = 80% : 20%	350 ~ 380

2.3 钢板的抗弹性能试验

高性能稀土微合金化 BTP500 钢板最重要的使用性能就是抗弹性能。按照协议要求,6 mm 厚 BTP500 钢板采用 53 式 7.62 mm 手枪进行抗弹试验,9 mm 厚 BTP500 钢板采用 53 式 7.62 mm 测速工作枪进行抗弹试验。抗弹试验参数见表 4。

表 4 抗弹试验条件

厚度规格 /mm	布氏硬度 (HBW)	弹速 /($m \cdot s^{-1}$)	射距 /m	靶板法线角 /($^{\circ}$)
6	440 ~ 510	820 ~ 835	80	0
9	440 ~ 510	950 ~ 990	30	0

表 5 折弯试验结果

板厚 /mm	硬度 (HBW)	钢板编号	弯曲半径 /mm	实际折弯角度 /($^{\circ}$)
6	488	6-1	30	100.9
		6-2		90.0
		6-3		102.5
		6-4		100.0
6	494	6-5	30	97.2
		6-6		105.0
		9-1		95.0
		9-2		95.0
9	506	9-3	45	94.0
		9-4		94.0
		9-5		93.0
		9-6		95.0

3 试验结果与分析

3.1 折弯试验结果

高性能稀土微合金化 BTP500 钢板折弯试验的结果如表 5 和图 1 所示。



(a) 6 mm 钢板折弯



(b) 9 mm 钢板折弯

图 1 BTP500 钢板折弯试验

从表 5 和图 1 显示的折弯试验结果看出,厚度为 6 mm 的高性能稀土微合金化 BTP500 钢板在弯曲半径为 30 mm ($d = 5a$) 时的实际折弯角度范围为 $90.0^{\circ} \sim 105.0^{\circ}$,厚度为 9 mm 钢板在弯曲半径为 45 mm ($d = 5a$) 时折弯角度范围为 $93.0^{\circ} \sim 95.0^{\circ}$,折弯处均无裂纹产生。

3.2 焊接试验结果

高性能稀土微合金化 BTP500 钢板焊接试验的

结果如表 6、表 7 所示。

表 6 焊接试验结果

焊接方法	厚度/mm	表面裂纹率	断面裂纹率
富氩混合气体保护焊	6	0	0
	9	0	0

表 7 焊接试样力学性能结果

厚度/mm	编号	R_m /MPa	$KV_2(-40^{\circ}C)$ /J	备注
6	6A	745	46	冲击试样尺寸 5 mm × 10 mm × 55 mm
	6T	946	26	冲击试样尺寸 5 mm × 10 mm × 55 mm
9	9A	820	90	冲击试样尺寸 7.5 mm × 10 mm × 55 mm
	9T	988	30	冲击试样尺寸 7.5 mm × 10 mm × 55 mm

由表 6、表 7 可见,采用铁素体焊丝焊接后,试板抗拉强度达到 900 MPa 以上,比奥氏体焊丝焊接试板抗拉强度高 100 MPa 以上。铁素体焊丝焊接试板的 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收功为 26 ~ 30 J。

3.3 抗弹试验结果

高性能稀土微合金化 BTP500 钢板抗弹性能检验结果如表 8 所示。由表 8 可见,6 mm、9 mm 厚 BTP500 钢板抗弹性能均满足防护协议要求。不同

厚度的 BTP500 钢板打靶试验的结果如图 2、图 3 所示。

表 8 打靶结果

厚度规格/mm	靶板编号	损伤评定结果
6	1#	合格
9	1#	合格

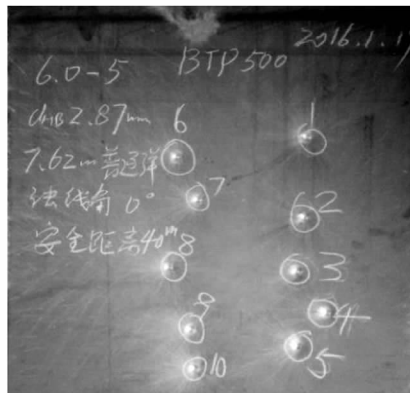
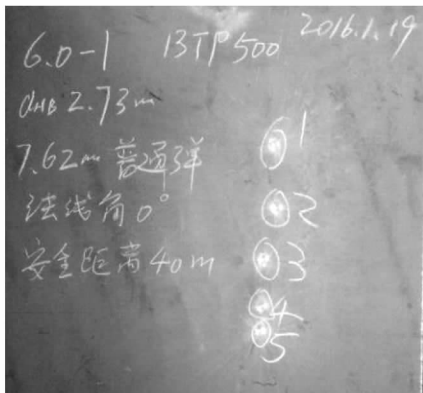


图 2 厚度 6 mm 样品打靶试验的结果

图 2 为 6 mm 厚的 BTP500 钢板的冲击面照片,从图 2 中可以看出 BTP500 钢板在受到子弹冲击后在钢板表面留下了较深的弹痕。对冲击面弹痕深度

进行测量,深度约 5 mm 左右,子弹均未穿透 BTP500 钢板,满足协议对于防弹性能的要求。

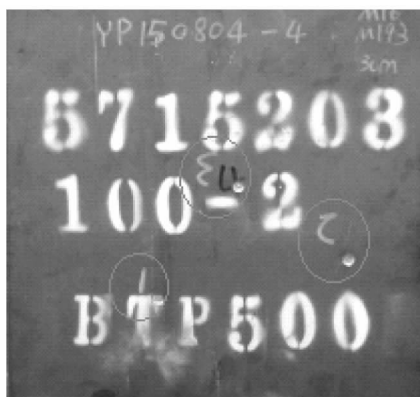
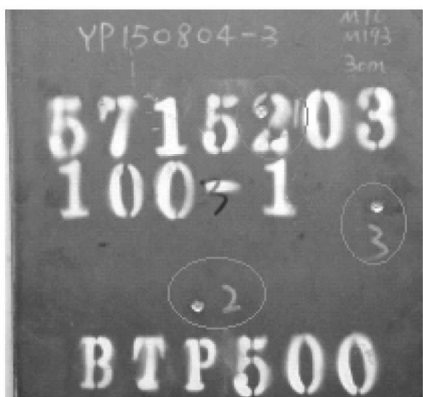


图 3 厚度 9 mm 样品打靶试验的结果

图 3 为 9 mm 厚的 BTP500 钢板的冲击面照片,从图 3 中可以看出 9 mm 厚的 BTP500 钢板在受到子弹冲击后,在冲击面留下的弹痕的深度约为 3 mm,与 6 mm 厚度的 BTP500 钢板相比,9 mm 厚的钢板冲击面弹痕要小很多,说明 9 mm 厚的 BTP500

钢板耐侵彻能力更强。

综合打靶损伤评定结果和冲击面弹痕分析可知,在子弹侵彻时,工业化试制的 6 mm、9 mm 厚度的高性能稀土微合金化 BTP500 钢板均未被穿透。6 mm、9 mm 厚度的高性能稀土微合金化 BTP500 钢

板具有很好的防弹防侵彻能力,防弹性能满足协议要求。

4 结论

(1) 厚度为 6 mm 的高性能稀土微合金化 BTP500 钢板在弯曲半径为 30 mm 下折弯角度为 $90.0^\circ \sim 105.0^\circ$, 厚度为 9 mm BTP500 钢板在弯曲半径为 45 mm 下折弯角度为 $93.0^\circ \sim 95.0^\circ$, 满足折弯试验指标要求。

(2) 采用与现有车辆相同的铁素体焊丝焊接后比奥氏体焊丝焊接试板抗拉强度高 100 MPa 以上。铁素体焊丝焊接试板的 -40°C 冲击功为 26 ~ 30 J。高性能稀土微合金化 BTP500 钢板焊接试验满足协议要求。

(3) 在子弹侵彻时,工业化试制的 6 mm、9 mm 厚度的高性能稀土微合金化 BTP500 钢板均未被穿透。6 mm、9 mm 厚度的高性能稀土微合金化 BTP500 钢板具有很好的防弹防侵彻能力,防弹性能满足协议要求。

参 考 文 献

- [1] 杨烽,吴建鹏,鲍雪君,等. 新型装甲防护钢板焊接工艺研究[J]. 焊接技术,2022,51(6): 54-58.
- [2] 向继伟,朱继进,凡小都,等. 某轻型防护越野车的防弹方案设计[J]. 汽车科技,2013,22(1):51-57.
- [3] 朱鹏霄. 一种超高强度钢的微观组织及其力学性能的影响[D]. 沈阳:东北大学,2007.
- [4] 翁德伟. 坦克装甲车辆防护材料的研究现状及发展趋势[J]. 冶金与材料,2019,39(4): 63-66.
- [5] 董瀚,李桂芬,陈南平. 高强度装甲钢的抗弹性能研究[J]. 钢铁,1996,31(S1),67-71.
- [6] 李晓源,时捷,董瀚. 材料因素对装甲钢板抗弹性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2008,20(8):1-5.
- [7] 付勇涛,刘静,刘武群,等. 装甲钢抗弹性能数学模型研究[J]. 兵器材料科学与工程,2007,30(5),54-57.