

装甲钢焊缝区抗弹防护性能初步探讨

华绍春¹, 丁华¹, 王鹏¹, 张玉红¹, 刘正涛², 陈大军²

(1.火箭军装备部驻重庆地区军事代表室, 重庆 400039; 2.西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 初步探索装甲钢焊缝区的抗弹防护性能并提出防护能力提升措施。**方法** 通过对装甲钢焊接结构进行组织性能分析及抗弹性能测试, 获得焊接对装甲车辆抗弹防护性能的影响规律, 并对装甲车辆抗弹防护能力提升对策进行讨论。**结果** 装甲钢接头焊缝区宽度达到 46 mm, 焊缝中心硬度低于 312HV, 较母材区硬度降低 40%以上; 抗弹性能测试结果表明, 焊缝区的抗弹性能较母材区的显著衰减, 为提升装甲车辆整体抗弹防护能力, 针对焊缝区薄弱点从焊接工艺控制、结构优化、加装防护组件 3 个方面进行讨论, 并提出了相应的防护对策。**结论** 装甲钢焊缝区是抗弹防护的薄弱点, 需通过一系列的防护措施减少焊缝区正面中弹概率, 提高装甲车辆服役期间的抗弹防护能力。

关键词: 装甲钢; 焊缝; 抗弹性能

中图分类号: TG40 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)21-0272-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.21.036

Preliminary Discussion on Ballistic Behavior of Armor Steel Weld Zone

HUA Shao-chun¹, DING Hua¹, WANG Peng¹, ZHANG Yu-hong¹, LIU Zheng-tao², CHEN Da-jun²

(1. Representative Office of PLA Rocket Force Equipment Department in Chongqing, Chongqing 400039, China; 2. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to preliminarily explore the ballistic behavior of armor steel weld zone and propose measures to improve the protection capacity. By analyzing the structure and properties of the armor steel welding structure and testing the ballistic behavior, the effects of welding on the ballistic behavior of armored vehicles were obtained. And countermeasures for improving the ballistic behavior of armored vehicles were discussed. The width of armor steel joint weld zone reached 46 mm. The hardness of weld center was lower than 312HV, which was 40% lower than that of base metal. The test results of ballistic behavior showed that the ballistic behavior of the weld zone was significantly attenuated compared with that of the base metal zone. To improve the overall ballistic behavior of armored vehicles, the welding process control, structural optimization and installation of protective components were discussed and the corresponding protective countermeasures were proposed for the weak points in the weld zone. The weld zone of armor steel is the weak point of ballistic protection. A series of protective measures should be taken to reduce the probability of being shot in the front of the weld zone and improve the ballistic behavior of armored vehicles during service.

KEY WORDS: armor steel; weld seam; ballistic behavior

装甲车辆是在战场为步兵提供侦查、通信指挥等设备, 以及人员运输、火力支援的机动平台, 需具备优良的越野机动、防护和火力打击能力。为满足现代

装甲车辆较高的抗弹防护性能要求, 当前国内外装甲车辆防护材料主要有金属装甲(包括装甲钢、铝合金、钛合金等)、防弹玻璃、陶瓷、芳纶纤维、PE 纤维等^[1]。

收稿日期: 2022-08-12

作者简介: 华绍春(1982—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为特种车辆防护设计。

通信作者: 刘正涛(1994—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为特种精密焊接。

其中, 装甲钢板因硬度高、塑性好, 性能均衡, 抗侵略能力、抗冲击和抗崩落效果好, 在现代装甲车辆中运用广泛^[2]。装甲钢结构通常采用铸造、焊接、铆接等方式成型, 其中, 焊接具有工艺简单、效率高、成本低等优势, 目前国内外金属装甲车辆车体大多采用焊接结构^[3], 但装甲钢结构焊接过程中热量输入造成连接部位组织状态发生变化, 焊缝区残余应力大, 强度、硬度等力学性能相较于母材有一定程度降低, 对装甲车辆整体抗弹防护性能有不利影响^[3]。李晓源等^[4]采用 12.7 mm 穿甲燃烧弹对厚度为 18 mm 不同抗拉强度的 40CrNi2Mo 钢板进行抗弹性能测试, 结果表明, 随抗拉强度增大, 抗弹性能总体呈增大趋势。时捷等^[5]采用 53 式 7.62 mm WO-109C 穿甲燃烧弹射击 10 mm 厚不同硬度的 Cr-Ni-Mo 装甲钢板, 结果表明, 随钢板硬度增大, 弹丸开坑扩孔消耗的能量增大, 弹丸消耗的塑性扩孔功提高, 钢板抗弹性能获得相应提升,

但硬度过高可能引发冲塞破坏、钢板崩落式破坏等, 从而导致抗弹性能下降。此外, 有研究表明, 钢板硬度对抗弹性能的影响最为显著, 主要体现在弹丸侵入方式和弹丸完整性的影响^[6]。

以上研究表明, 装甲钢焊缝区因力学性能劣化成为装甲车辆抗弹防护的薄弱点。文中以 6252 装甲钢为研究对象, 初步探索了装甲钢焊缝区的抗弹防护性能, 并从焊接工艺控制、结构优化和加装防护组件等方面进行了装甲车辆抗弹防护能力提升对策研究, 为全方位提升装甲车辆抗弹防护能力提供理论支撑。

1 试验

试验材料选用厚度为 4.5 mm 的淬火 6252 装甲钢 (牌号为 30MnMoTiB), 化学成分见表 1。

表 1 6252 装甲钢化学成分
Tab.1 Chemical composition of 6252 armor steel

C 的质量分数/%	Si 的质量分数/%	Mn 的质量分数/%	P 的质量分数/%	S 的质量分数/%	Fe 的质量分数/%
0.30	0.21	1.40	0.010	0.006	其余

采用熔化混合气体保护焊 (MAG) 对 6252 装甲钢结构进行焊接, 焊接结构见图 1。保护气体为 Ar (质量分数为 0.5%~2.0%) 和 O₂, 焊丝采用 ER100S-G, 直径为 1 mm; 焊接电流控制在 150~200 A, 气体流量为 15~20 L/min。



图 1 装甲钢焊接结构形式
Fig.1 Form of armor steel welding structure

焊后采用线切割取下装甲钢焊接接头金相试样, 依次进行砂纸粗磨、精磨和机械抛光, 随后经体积分数为 5% 的硝酸酒精腐蚀后, 在光学显微镜下观察微观组织状态; 采用显微硬度计检测焊接区域显微

硬度分布, 试验力为 0.980 7 N; 利用水刀切割的方式从上述装甲钢板焊缝区位置剖取尺寸为 400 mm×400 mm 的靶板, 采用 85 式狙击枪发射 53 式 7.62 mm 普通钢芯弹对靶板焊缝部位进行射击试验。装甲钢损伤级别参照 GJB 59.18—18《装甲车辆试验规程 装甲板抗弹性能试验》执行, 如果弹速大于规定速度 (820 ~ 835 m/s), 且未发生击穿视为有效; 如果发生击穿视为无效; 如果弹速低于规定速度, 发生击穿视为有效, 未发生击穿视为无效。靶试后对弹坑宏观形貌进行观察分析。

2 结果与分析

2.1 微观组织

装甲钢焊接接头微观组织见图 2, 接头区域由熔合区、热影响区、母材区组成。熔合区为铁素体、珠光体和板条马氏体的混合组织, 该组织具有较好的韧塑性, 但强度、硬度较低 (图 2a); 热影响区为板条状马氏体组织, 该组织是焊后快速冷却形成的过饱和固溶体, 其硬度高, 但脆性大 (图 2b); 母材区为细小回火马氏体组织, 具有较好的强韧性 (图 2c)。以上结果表明, 装甲钢焊接接头受焊接热输入和冷却条件的影响, 与母材相比, 焊缝区组织存在一定程度的弱化。

2.2 显微硬度

已有研究表明,硬度对材料抗弹性能有最为显著的影响。对装甲钢焊接区域开展了显微硬度检测,以焊缝中心作为0点,向一侧进行连续显微硬度检测,硬度测试点位置见图3。3件装甲钢板接头显微硬度分布曲线见图4。测试结果表明,距离焊缝中心越远,硬度值越大;在距离焊缝中心约10.5 mm时,硬度值

急剧上升,此处应当为熔合区与热影响区的交界点,可判断出熔合区宽度约为21 mm,显微硬度值低于312HV;当距离焊缝中心约23 mm后,硬度值趋于稳定,此处应当为热影响区与母材区的交界点,可判断出单侧热影响区宽度约为12.5 mm,显微硬度值为312HV~518HV。由此可知,整个装甲钢板接头焊缝区宽度约为46 mm,焊缝区硬度较母材区硬度降低40%以上。

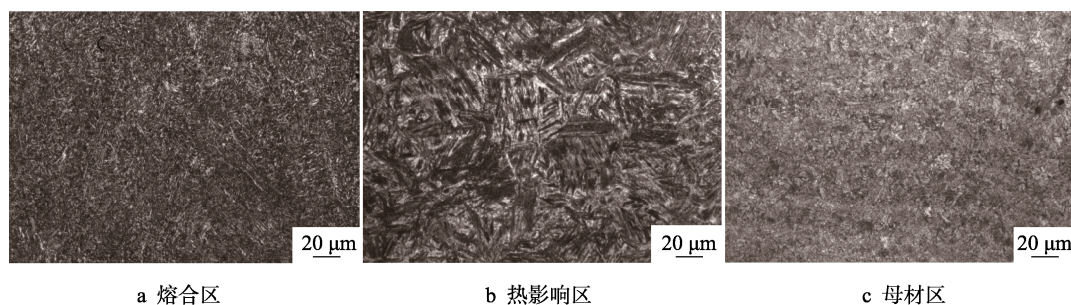


图2 装甲钢焊接接头微观组织
Fig.2 Microstructure of armor steel welded joint

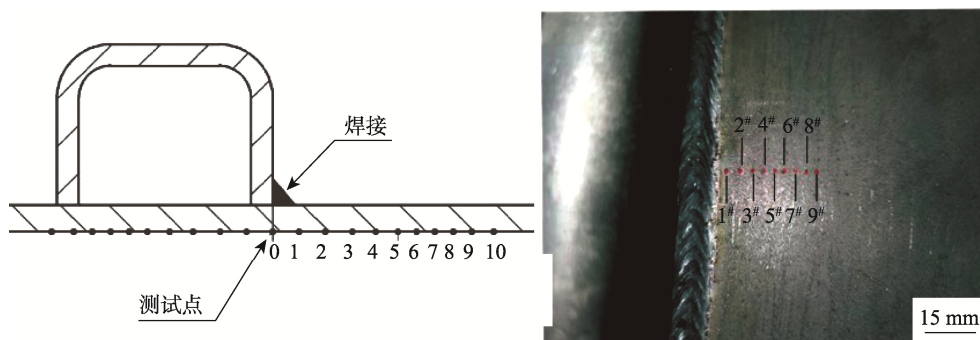


图3 硬度测试点位置
Fig.3 Location of hardness test point

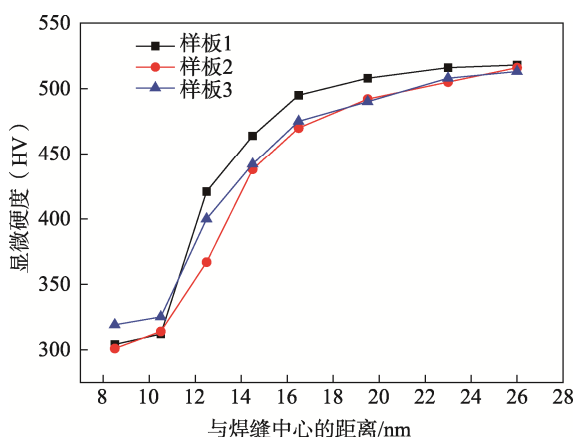


图4 装甲钢板接头一侧显微硬度分布曲线
Fig.4 Microhardness distribution curve of armor steel joint side

2.3 抗弹性能

为验证焊接对装甲钢抗弹防护性能的影响,分别

对焊缝区(焊缝两侧)和非焊缝区进行了实弹测试。从图5可以看出,焊缝区着弹后子弹完全穿透靶板,正面冲孔四周出现塑性流动特征且轮廓规则,而着弹点附近靶板整体无明显变形,弹丸侵彻方式为冲塞破坏^[7]。图6为非焊缝区实弹测试情况,着弹点未穿透,正面弹坑呈圆锥形凹陷,靶板背面出现锥形凸起,弹丸侵彻方式为塑性变形扩孔破坏^[8]。以上结果表明,与非焊缝区母材相比,靶板焊缝区抗弹防护性能显著减弱。

3 抗弹能力提升对策讨论

装甲钢焊接结构受热量输入影响,焊缝区组织性能发生劣化,该区域成为装甲车辆抗弹防护的薄弱点,提升接头性能或对焊缝区进行特殊保护是全面提高装甲车辆抗弹防护能力的主要途径^[9]。从焊接工艺控制、结构优化、加装防护组件等3个方面讨论提升装甲车辆焊缝区防护性能的有效对策。

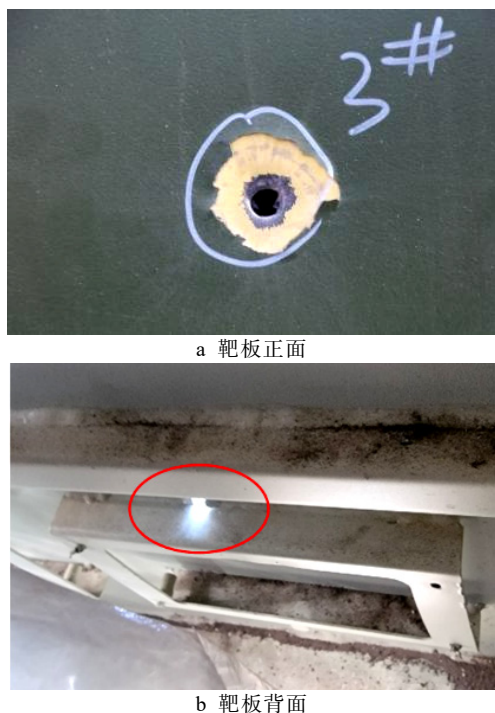


图 5 焊缝区着弹点
Fig.5 Impact point in weld zone

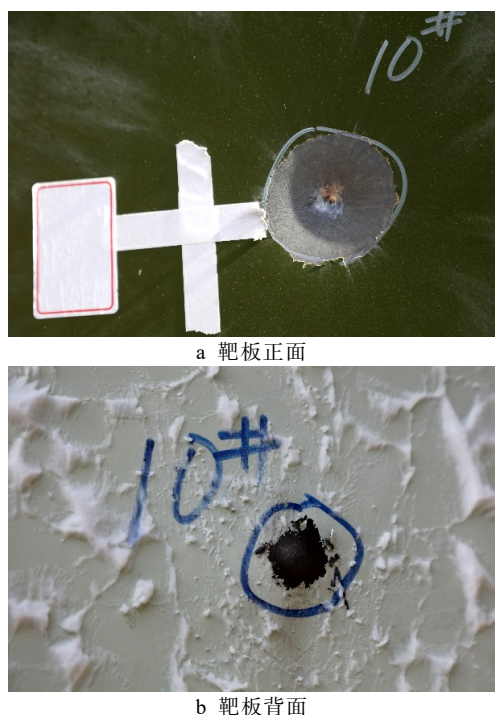


图 6 非焊缝区着弹点
Fig.6 Impact point in non-weld zone

3.1 焊接工艺控制

在焊接热作用下, 装甲钢板连接部位发生了熔化、凝固等冶金过程, 接头处不可避免地存在晶粒粗大、孔隙、夹杂、残余应力等冶金缺陷, 导致其力学性能显著降低。通过有效的工艺措施可以一定程度上缓解焊缝区性能劣化, 如: 在满足焊缝质量前提下, 通过减小焊丝

直径和焊接电流等方法减少焊接热输入, 可以缩小焊接热影响范围; 其次, 焊接时保持移动速度匀速, 使整条焊缝受热均匀一致, 减小应力集中^[10]。

3.2 结构优化

通过对装甲车辆外形结构进行优化设计, 可以减小子弹对焊缝区等薄弱点的损坏^[11]。可采取的改进方法如下。

1) 甲板倾角设计, 增加跳弹功能, 当子弹以一定倾斜角度入射时, 子弹很容易被反弹, 弹着角越小, 运动速度越大, 装甲板表面越光滑、坚硬, 则越容易产生跳弹。

2) 焊接结构优化布置, 焊缝区尽量避开子弹正面入射方向, 减小中弹概率。

3) 将部分非必须焊接结构改为螺栓连接, 减少焊缝数量。

4) 优化焊接结构, 将必须焊接的支架设计为螺座形式, 减少焊缝长度。

3.3 加装防护组件

目前金属装甲车辆在工艺上、结构上均不能完全避免焊接, 焊缝区始终存在, 对焊缝区进行附加保护是一种解决方案, 即在车体抗弹性能薄弱点(焊缝区)通过螺栓连接方法加装防护组件, 提高局部防护能力^[12]。图 7 为车体焊缝外表面加装附加防弹材料后实弹测试的效果, 该组件以双层叠加的方式完全覆盖了焊缝区, 靶试后着弹点未被穿透, 相比不加装防护组件, 车体抗弹防护性能获得显著提升。



图 7 车辆外部附加装甲实弹测试
Fig.7 Live ammunition test of vehicle external additional armor

4 结 语

1) 6252 装甲钢接头焊缝区宽度约为 46 mm, 焊缝中心硬度低于 312HV, 较母材区硬度降低 40%以上。

2) 靶试后焊缝区着弹点完全穿透, 而非焊缝区未被穿透且弹坑呈圆锥形凹陷, 焊缝区的抗弹性能较母材区的显著衰减。

3) 为提升装甲车辆抗弹防护能力, 对焊缝区薄弱点从焊接工艺控制、结构优化、加装防护组件 3 个方面进行讨论, 并提出防护对策。随着现代装甲车辆轻量化要求越来越高, 焊接结构应用越来越广泛, 车辆防护面临新的挑战, 还需在防护方式、防护手段等方面进行更加深入的探索和研究。

参考文献:

- [1] 曹贺全, 张广明, 孙素杰, 等. 装甲车辆防护技术研究现状与发展[J]. 兵工学报, 2012, 33(12): 1549-1554.
CAO He-quan, ZHANG Guang-ming, SUN Su-jie, et al. Status and Development of Protection Technology of Armored Vehicles[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(12): 1549-1554.
- [2] 刘薇, 杨军. 装甲防护材料的研究现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2011, 40(2): 108-111.
LIU Wei, YANG Jun. Current Status and Development of Armor Protective Material[J]. Hot Working Technology, 2011(2): 108-111.
- [3] 谭俊, 张勇. 装甲钢焊接技术研究进展[J]. 兵工学报, 2013, 34(1): 115-124.
TAN Jun, ZHANG Yong. Research on Welding Processes of Armor Steels[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(1): 115-124.
- [4] 李晓源, 时捷, 董瀚. 不同强度的 40CrNi₂Mo 钢抗弹性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2008, 31(1): 14-18.
LI Xiao-yuan, SHI Jie, DONG Han. Research on Ballistic Behavior of 40CrNi₂Mo Steel Targets with Different Strength[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2008, 31(1): 14-18.
- [5] 时捷, 董瀚, 王琪, 等. 硬度对装甲钢板抗弹性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(3): 36-41.
SHI Jie, DONG Han, WANG Qi, et al. Influence of Hardness on the Ballistic Behavior of Armor Steel Plate[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2000, 12(3): 36-41.
- [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): 1-4.
LI Xiao-yuan, SHI Jie, DONG Han. Material Factors Affecting Ballistic Behavior of Armoured Plate[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2008, 20(8): 1-4.
- [7] 陈建华. 新型高强装甲钢板的抗弹性能及焊接性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017: 3-5.
CHEN Jian-hua. Study on the Anti-Elasticity and Weldability of New High Strength Armored Steel Plate[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017: 3-5.
- [8] 蒋志刚, 曾首义, 周建平. 分析金属靶板弹道极限的延性扩孔模型[J]. 弹道学报, 2004, 16(1): 54-59.
JIANG Zhi-gang, ZENG Shou-yi, ZHOU Jian-ping. A Model for Ballistic Limit of Thick Metallic Targets Struck by Projectiles with Conical or Ogival Nose[J]. Journal of Ballistics, 2004, 16(1): 54-59.
- [9] 周古昕, 王有祁, 刘玲霞, 等. 2519-T87 装甲板焊缝抗弹规律及抗应力腐蚀性能初探[J]. 兵器材料科学与工程, 2006, 16(6): 19-23.
ZHOU Gu-xin, WANG You-qi, LIU Ling-xia, et al. Initial Study on Ballistic Performance and Stress Corrosion Resistance Property of Weld Seam of 2519-T87 Armor Plate[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2006, 16(6): 19-23.
- [10] 尹杰. Q345 钢激光-MIG 复合焊工艺参数对焊缝成形的影响[J]. 工程机械, 2013(44): 51-54.
YIN Jie. Effect of Technological Parameters of Laser MIG Hybrid Welding on Weld Formation of Q345 steel[J]. materials and processes, 2013(44): 51-54.
- [11] 张自强, 赵宝荣, 张锐生, 等. 装甲防护技术基础[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2000: 114-179.
ZHANG Zi-qiang, ZHAO Bao-rong, ZHANG Rui-sheng, et al. Technical Basis of Armor Protection[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2000: 114-179.
- [12] 邵磊. 某型军车装甲防弹材料的选择与结构设计[D]. 南京: 东南大学, 2008: 6-7.
SHAO Lei. Selection and Structure Design of Armored Bulletproof Material for a Military Vehicle[D]. Nanjing: Southeast University, 2008: 6-7.

责任编辑: 曾钰婵