SMA490BW 耐候钢 TIG 焊接接头残余应力分析

马龙

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司,山东 青岛 266111)

摘要:【目的】旨在进行 SMA490BW 耐候钢 TIG 焊接接头疲劳寿命的评估。【方法】采用盲孔法、X 射线法、有限元分析 3 种方法对 SMA490BW 耐候钢 TIG 焊接接头进行了焊接残余应力分析,并对切割小试样引起的残余应力变化进行分析。【结果】 结果表明, SMA490BW 耐候钢纵向残余应力在焊缝拉应力峰值接近材料屈服强度,远离焊缝中心残余应力迅速降低并进一步 转变为压应力,此分布规律为典型的纵向残余应力分布特征。在整体试板上采用线切割出用于疲劳试验的足尺寸小试样,小试 样上纵向残余应力的峰值接近 230 MPa,约为屈服强度的 70%,纵向残余应力在横向分布规律保持不变。【结论】该部分所建 立的有限元模型分析结果与测试数据吻合很好,证实模型的热源模型、力学边界条件均与实际工艺接近,采用该计算模型的精 度和正确性可以保障。

关键词: SMA490BW 耐候钢; 残余应力; 盲孔法; 有限元法; X 射线法

中图分类号: TG404 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20220706002

Residual stress analysis of TIG welded joints of SMA490BW weathering steel

Ma Long

(CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, Shandong, China)

Abstract: [**Objective**] The purpose was to evaluate fatigue life of TIG welded joints of SMA490BW weathering steel. [**Methods**] Three methods, namely blind hole method, X-ray method and finite element analysis, were used to analyze welding residual stress of TIG welded joints of SMA490BW weathering steel, and changes of residual stress caused by cutting small specimens were analyzed. [**Results**] The results showed that longitudinal residual stress of SMA490BW weathering steel approached yield strength of material at the peak tensile stress in weld, and rapidly decreased and further transformed into compressive stress away from the center of weld. This distribution pattern was a typical characteristic of longitudinal residual stress distribution. Full size small specimens were cut by wire cutting on the overall test panel for fatigue testing. The peak value of longitudinal residual stress on small specimens was close to 230 MPa, which was about 70% of yield strength. Transverse distribution pattern of longitudinal residual stress remained unchanged. [**Conclusion**] Analysis results of this finite element model established in this section were in good agreement with test data, it was confirmed that the heat source model and mechanical boundary conditions of the model were close to actual process. Accuracy and correctness with this calculation model could be guaranteed.

Key words: SMA490BW weathering steel, residual stress, blind hole method, finite element method, X-ray method

0 前言

SMA490BW 耐候钢是高铁转向架焊接中常用的 焊接材料,具有良好的耐候性和力学性能^[1]。SMA490BW 耐候钢常用的焊接方法为 MAG,这种焊接方法在焊 接过程中会产生较为严重的飞溅,会使焊缝质量变差,从而降低焊接接头的性能^[2-3]。TIG可以减少焊接过程中气孔的产生,使得焊缝更加致密^[4-5],因此,采用TIG对SMA490BW耐候钢进行对接焊。在转向架的焊接中,焊接残余应力的存在会直接影响到焊

接结构的承载能力和使用寿命^[6]。因此,分析焊接接 头焊后残余应力的大小成为必要。

应之丁等学者^[7]对超声冲击技术消除转向架焊 后残余应力方案进行了分析,结果表明:超声冲击对 焊接残余应力有一定的消除能力,且能提高焊接接 头的硬度。张世欣等学者^[8]采用超射流过度焊的方 法对 SMA490BW 耐候钢进行了焊接,研究了焊接接 头的残余应力和疲劳强度,结果表明:焊接接头残余 应力的峰值仍位于焊缝,但大小明显减小。曹金山 等学者^[9]采用 TIG 方法对高速动车转向架进行了熔 修,结果表明:采用 TIG 熔修的方法不仅可以改善焊 趾的形状,还可以提高焊接接头的力学性能。目前, 针对 SMA490BW 耐候钢 TIG 焊接接头残余应力的研 究较少。该文采用盲孔法、X 射线法、有限元分析 3 种方法对 SMA490BW 耐候钢 TIG 焊接接头进行了焊 接残余应力分析,并对切割小试样引起的残余应力 变化进行分析,为 TIG 焊接工艺在转向架焊接中的应 用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

母材为厚度 8 mm 的 SMA490BW 钢板材,尺寸 为 500 mm×300 mm×8 mm。焊丝采用 ø1.2 mm 的 CHW-55CNH 焊丝。母材与焊丝化学成分见表 1。

表1 SMA490BW 母材和 CHW-55CNH 焊丝的化学成分(质量分数,%) Tab. 1 Chemical composition of SMA490BW base metal and CHW-55CNH welding wire (wt.%)

材料	С	Si	Mn	S	Р	Cu	Cr	Ni
SMA490BW	≤0.18	0.15 ~ 0.65	≤1.4	≤0.035	≤0.035	0.30 ~ 0.50	0.45 ~ 0.75	0.05 ~ 0.30
CHW-55CNH	≤0.10	≤0.60	1.20 ~ 1.60	≤0.020	≤0.025	0.20 ~ 0.60	0.30 ~ 0.90	0.20 ~ 0.60

1.2 试验方法

1.2.1 焊接接头的制备

采用的电弧电压为 22.6 V, 焊接电流为 227 A, 焊 接速度为 2.87 mm/s, 保护气体为 100%Ar, 气体流量 为 22 L/min。采用对接的方法将 2 块钢板焊接在一起。 1.2.2 盲孔法测试焊接残余应力

该次测试采用济南西格玛科技有限公司的盲孔 法残余应力测试系统,系统组成为:ASMB2-16应变 采集箱,RSD1型测残余应力打孔仪,综合测试信号 分析软件系统及相关耗材等。该次试验沿测试路径 上均匀布置10个测点,测点布置图如图1所示,应变 花尺寸为8mm,每个测点盲孔直径为1.5mm,孔深不 大于2mm。



图 1 测点布置图 Fig. 1 Layout of measuring points

1.2.3 X射线法测试焊接残余应力

基于对 X 射线衍射峰半高宽的分析, 研究在不同准直器直径及摇摆角条件下 X 射线衍射晶粒群的 微观应变的均匀性, 进而探究合理的 X 射线应力测试工艺参数, 并对试件焊接接头残余应力进行测试。测试示意图如图 2 所示。



图 2 X 射线测试示意图 Fig. 2 Schematic diagram of X-ray test

1.2.4 有限元法模拟焊后残余应力 该研究中几何模型是在 Catia 中完成, 网格划分

借助于 Altair 公司的 Hypermseh 进行,最后将文件导 入到 marc 软件中,建立的模型如图 3 所示。模型单 元数 81 600 个,单元类型全部采用 8 节点 6 面体单元。 SMA490BW 钢的质量密度为 7.8×10⁻⁹ T/mm³, 泊松比 为0.33; 热膨胀系数、杨氏模量、屈服强度、热导率 及比热随温度的变化规律分别见表 2。将材料参数 赋予模型后进行计算,模拟中采用的热源为双椭球 热源^[10],得到焊接结果,分析焊接残余应力。



图 3 对接试板焊接有限元模型

Fig. 3 Welding finite element model of butt test plate. (a) finite element analysis model; (b) weld unit and groove

温度	弹性模量	线膨胀系数	屈服强度	导热系数	密度	泊松比	比热容					
<i>T∕</i> ℃	$E/10^5$ MPa	$\alpha / 10^{-6} \ ^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$	$R_{\rm eH}/{ m MPa}$	$W/(\mathbf{m} \cdot \mathbf{C})$	$ ho/(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3})$	γ	$c/(J \cdot kg^{-1} \cdot C^{-1})$					
20	2.07	18.6	355	57	78	0.33	450					
150	1.75	18.6	321	50	78	0.33	521					
300	1.67	18.6	295	45	78	0.33	825					
600	1.25	18.6	157	39	78	0.33	967					
800	0.77	18.6	65	35	78	0.33	1 152					
1 000	0.15	18.6	10	40	78	0.33	1 152					
1 500	0.10	18.6	5	50	78	0.33	1 152					
3 000	0.01	18.6	5	55	78	0.33	1 152					

表2 SMA490BW 材料热学与力学非线性参数 Tab. 2 Thermal and mechanical nonlinear parameters of SMA490BW material

2 结果与讨论

2.1 盲孔法残余应力测试结果

采用盲孔法对焊接板材进行残余应力测试,结 果如图 4 所示。图中横坐标 0 位置为焊缝中心,距离 焊缝中心位置越近,纵向残余应力数值越大,约为 330 MPa,接近母材屈服极限。远离焊缝处残余应力 逐渐降低,在距离焊缝中心 60 mm 处,纵向残余应力 接近零。随着远离焊缝距离的进一步增大,残余应 力表现为压应力,在距离焊缝中心 100 mm 处,压应 力接近 200 MPa,在接近试板边缘横向残余应力再次 接近零值。该次在焊趾两侧对称测试,分析数据发 现,纵向残余应力的对称性很好。



图 4 盲孔法测试纵向残余应力分布曲线

Fig. 4 Longitudinal residual stress distribution curve tested by blind hole method

2.2 X射线法残余应力测试结果

采用 X 射线法对焊板残余应力进行测试,测试 结果如图 5 所示。图中横坐标 0 位置为焊缝中心,在 焊缝附近残余应力达到峰值,为 320 MPa。随着离焊 缝越来越远,残余应力呈下降趋势,且两侧对称。在 焊缝中心纵向残余应力峰值接近材料的屈服强度, 随着距离焊缝焊趾距离的增大,纵向残余应力迅速 降低,距离焊趾 80 mm 处,纵向残余应力为压应力。 2.3 有限元法残余应力计算结果

对 8 mm 厚的模型, 位移约束条件与焊板约束条件相同。经过热力耦合分析得到有限元法焊接温度场结果如图 6 所示。焊接温度最高为 1 500 ℃, 与实际焊接温度相符合。经热力耦合分析得到有限元法残余应力结果如图 7 所示。焊接残余应力最高达到350 MPa, 距离焊缝越远, 焊接残余应力逐渐降低, 在





焊板边缘处表现为压应力。这是因为在冷却过程中, 焊缝冷却后纵向收缩被遏制,因此焊缝处的纵向残 余应力较大^[11]。



图 6 焊接过程温度场云图





图 7 焊接纵向残余应力云图

Fig. 7 Cloud map of welding longitudinal residual stress. (a) cloud map; (b) top view

2.4 模拟结果与测试结果

將图 7 中的纵向残余应力沿着垂直于焊缝的方向进行提取,然后将得到的结果与盲孔法和 X 射线法得到的残余应力汇总如图 8 所示。从图中可以看出,除几个奇点之外,盲孔法、X 射线及有限元分析数据均表明:在焊缝中心纵向残余应力接近材料屈服强度,远离焊缝中心,残余应力迅速下降并转变为压应力。3 种测试方法得到的数据高度吻合,说明有限元分析中热源模型及位移约束条件等同于实际焊接工艺,模型的精度得以保障。



图 8 8 mm 对接板纵向残余应力曲线对比示意图



2.5 切割小试样引起的残余应力变化

在做疲劳试验时,需要将整体试板切割成小试样。 当焊板切割为小试样时,残余应力有一定程度的释 放^[12]。在进行疲劳试验前,需要知道焊板小试样的残 余应力,因此,需要对小试板进行残余应力分析。采 用盲孔法与有限元法对焊板小试样的焊接残余应力 进行分析。试样切割示意图如图9所示。

对切割后的小试板进行残余应力测试(试板宽度 100 mm),应变片测试点分布情况如图 10 下排方框 所示,上排方框为整体大试板残余应力测试位置,测 试位置尽可能接近试板中间位置,同时,该研究认为: 测试中打孔直径 D<3 mm,单个打孔引起的残余应力 再分布对后续测试点残余应力之间不产生影响。

模拟完成焊接整体试板的热-力耦合有限元分析 后,杀死小试样外的其余单元,残余应力再平衡后获 得小试样的纵向残余应力场分布云图,如图11所示, 从云图上可以发现,高应力峰值有所降低,高应力区 域基本不变,远离焊缝中心应力降低。





图 11 切割小试样后焊接纵向残余应力图

Fig. 11 Cloud map of longitudinal residual stress after cutting small sample. (a) cloud map; (b) top view

将切割前后的残余应力数据进行综合对比,如 图 12 所示。可以发现:有限元测试中纵向残余应力 在小试样上的分布规律与盲孔法测试结果吻合性很 高,小试板纵向残余应力峰值约为 230 MPa,残余应 力的分布规律保持不变。无论是有限元分析还是盲 孔法测试,在整体试样上切割下宽度为 100 mm 的小 试样,纵向残余应力峰值有一定程度的降低,约为屈 服强度的 70%,纵向残余应力沿着横向的分布规律保 持不变。



图 12 切割前后纵向残余应力分析综合对比图



3 结论

(1)验证了 SMA490BW 对接平板纵向残余应力的横向分布规律,在焊缝区拉应力峰值接近材料屈服强度,远离焊缝中心残余应力迅速降低并转变为压应力。

(2)证实足尺寸小试样(100 mm×300 mm×8 mm) 纵向残余应力有一定程度的释放,峰值接近 230 MPa, 纵向残余应力在横向分布规律保持不变,与外载荷 叠加后超过材料的屈服强度,满足足尺寸试样的定义。

(3)有限元分析与盲孔法、X射线得到的数据高度吻合,证实有限元模型、热源模型、力学边界条件均与实际工艺接近,计算模型的精度可以保障。

参考文献

- Wu Xiangyang, Zhang Zhiyi, Qi Weichuang, et al. Corrosion behavior of SMA490BW steel and welded joints for high-speed trains in atmospheric environments[J]. Materials, 2019, 12(18): 3043.
- [2] 王磊, 曾泓润, 刘小鹏, 等. 打磨方式对 SMA490BW 耐候 钢十字接头疲劳性能的影响 [J]. 焊接, 2021(12): 12-16.

Wang Lei, Zeng Hongrun, Liu Xiaopeng, et al. Effect of grinding methods on fatigue properties of SMA490BW weathering steel cross welded joints [J]. Welding & Joining, 2021(12): 12 – 16.

- [3] Liu Dejia, Guo Rui, Hu Yong, et al. Dissimilar metal joining of 304 stainless steel to SMA490BW steel using the filler metal powders with a high-entropy design[J]. Metals and Materials International, 2019, 26(6): 1 – 13.
- [4] Wang T, Ao S S, Manladan S M, et al. Microstructure and properties of surface-modified plates and their welded Joints[J]. Materials, 2019, 12(18): 2883.
- [5] 张建晓, 刘光银, 刘世恩, 等. 12Cr2Mo1R 耐热钢/304 不 锈钢异种钢焊接 [J]. 焊接, 2020(10): 7 - 13.
 Zhang Jianxiao, Liu Guangyin, Liu Shien, et al. 12Cr2Mo1R heat-resistant steel/304 stainless steel welding of dissimilar steel[J]. Welding & Joining, 2020(10): 7 - 13.
- [6] He Bolin, Wei Kang, Yu Yingxia, et al. Fatigue life analysis of SMA490BW steel welded butt joint for train bogie based on ABAQUS/FE-SAFE[J]. China Welding, 2016, 25(4): 1-8.
- [7] 应丁之,高立群,范庆峰.超声冲击技术消除转向架构架 焊接残余应力试验方案分析 [J].城市轨道交通研究, 2016,19(1):44-46.
 Ying Dingzhi, Gao Liqun, Fan Qingfeng. Experiment

elimination plan of residual stress on bogie frame welding joint with ultrasonic impact technology[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(1): 44 - 46.

 [8] 张世欣, 汪认, 谢旭, 等. SMA490BW 耐侯钢超射流过 渡焊接头残余应力与疲劳性能 [J]. 热加工工艺, 2018, 47(19): 85-89.
 Zhang Shixin, Wang Ren, Xie Xu, et al. Residual stress and

fatigue properties of super spray transfer welding joints of SMA490BW weathering steel[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(19): 85 – 89.

- [9] 曹金山,陈北平,马寅,等. 高速动车转向架焊趾 TIG 熔修 工艺研究 [J]. 轨道交通装备与技术, 2020(2): 14-17. Cao Jinshan, Chen Beiping, Ma Yin, et al. Research of the TIG welding repair procedures for weld toe at bogie for high speed EMU rail[J]. Transportation Equipment and Technology, 2020(2): 14-17.
- [10] 王苹, 刘永, 李大用, 等. 固态相变对 10Ni5CrMoV 钢焊接 残余应力的影响 [J]. 焊接学报, 2017, 38(5): 125 - 128.
 Wang Ping, Liu Yong, Li Dayong, et al. Effect of solid-state phase transformation on welding residual stress of 10Ni5CrMoV steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(5): 125 - 128.

(下转第80页)

based on 30CrMnSiNi2A steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(6): 45 - 52.

- [6] Lei Zhenglong, Li Bingwei, Ni Longchang, et al. Mechan ism of the crack formation and suppression in laser-MAG hybrid welded 30CrMnSiA joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 239: 187 – 194.
- [7] Smurov I. Laser cladding and laser assisted direct manu facturing[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(18): 4496 - 4502.
- [8] Zhong C L, Kittel J, Gasser A, et al. Study of nickel-based superalloys Inconel 718 and Inconel 625 in high-depositionrate laser metal deposition[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 109: 352 – 360.
- [9] 杜学芸, 许金宝, 宋健, 等. 激光熔覆再制造技术研究现状及发展趋势 [J]. 金属加工 (热加工), 2020(3): 5-19.
 Du Xueyun, Xu Jinbao, Song Jian, et al. Research status and development trend of laser cladding remanufacturing technology [J]. MW Metal Forming, 2020(3): 5-19.
- [10] 孙兵兵,张学军,李能,等. 30CrMnSiNi2A 超高强度钢激 光熔覆工艺及性能研究 [J]. 焊接技术, 2016, 45(3): 23 - 25.
 Sun Bingbing, Zhang Xuejun, Li Neng, et al. Study on laser cladding process and properties of 30CrMnSiNi2A ultrahigh-strength steel[J]. Welding Technology, 2016, 45(3): 23 - 25.
- [11] 张志强,程宗辉,曹强,等. 30CrMnSiNi2A 超强钢激光熔 覆修复试验研究 [J].装备环境工程, 2016, 13(1): 62 - 67.
 Zhang Zhiqiang, Cheng Zonghui, Cao Qiang, et al.

Repairing of 30CrMnSiNi2A high strength steel by laser cladding[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(1): 62 – 67.

- [12] 何玉怀, 刘新灵, 姜涛, 等. 失效分析 [M]. 北京: 国防工业 出版社, 2017.
 He Yuhuai, Liu Xinling, Jiang Tao, et al. Failure analysis
 [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.
- [13] 钟群鹏, 赵子华, 张峥. 断口学的发展及微观断裂机理研究 [J]. 机械强度, 2005(3): 358 370.
 Zhong Qunpeng, Zhao Zihua, Zhang Zheng. Development of fractography and research of fracture micromechanism[J]. Journal of Mechanical Strength, 2005(3): 358 370.
 [14] 王永庆. 30CrMnSiNi2A 螺栓断裂分析 [J]. 理化检验 (物)
- 理分册), 2000, 36(10): 461 463. Wang Yongqing. Fracture analysis of 30CrMnSiNi2A bolt[J]. Physical Testing and Chemical Analysis, 2000, 36(10): 461 – 463.
- [15] 刘德林, 胡小春, 何玉怀, 等. 从失效案例探讨钢制紧固件的氢脆问题 [J]. 材料工程, 2011(10): 78 83.
 Liu Delin, Hu Xiaochun, He Yuhuai, et al. Hydrogen brittleness fracture of steel fasteners [J]. Journal of Materials Engineering, 2011(10): 78 83.
- 第一作者: 肖字枫,学士,工程师;主要从事航空发动机增 材制造技术及航空零部件维修技术方向的研究; xide123111@sina.com。

(编辑:王龙权)

本文引用格式:

肖宇枫,张峰. 30CrMnSiNi2A 钢起落架激光熔覆修复失效机理[J]. 焊接, 2024(6): 74-80.

Xiao Yufeng, Zhang Feng. Failure mechanism of laser cladding repair of 30CrMnSiNi2A steel landing gear[J]. Welding & Joining, 2024(6): 74 – 80.

(上接第 73 页)

[11] 方洪渊. 焊接结构学(第2版)[M]. 北京: 机械工业出版 社, 2008.

Fang Hongyuan. Welding structure (2nd edition) [M]. Beijing, China: China Machine Press, 2008.

[12] 武继盛. 基于轮廓法的焊接纵向残余应力三维分布研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. Wu Jisheng. 3-D map of longitudinal residual stress in welded structures by contour method [D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2017.

第一作者:马龙,高级工程师;主要从事结构强度、结构健 康监测、有限元的研究;mdr_lon@qq.com。

(编辑:王龙权)

本文引用格式:

马龙. SMA490BW 耐候钢 TIG 焊接接头残余应力分析[J]. 焊接, 2024(6): 68-73, 80.

Ma Long. Residual stress analysis of TIG welded joints of SMA490BW weathering steel[J]. Welding & Joining, 2024(6): 68 - 73, 80.