

文章编号: 0258-2724(2012)04-0618-05 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2012.04.013

X射线衍射法测试 高速列车车体铝合金残余应力

苟国庆¹, 黄楠¹, 陈辉¹, 田爱琴²

(1. 西南交通大学材料先进技术教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 南车四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 为了准确、无损、快速地检测高速列车铝合金的表面残余应力, 采用等强杆拉伸试验方法, 用 X 射线衍射法对测试结果进行标定, 并用 X 射线衍射法、盲孔法以及有限元法对测得的车体铝合金焊接接头残余应力进行了对比。结果表明: 等强杆拉伸试验标定过程中, 在 10 ~ 70 MPa 范围内, 随着拉伸载荷的增加, X 射线法测得的应力与载荷应力具有一致性, 可采用 X 射线衍射法对车体关键部位应力状态进行测试分析, X 射线衍射法残余应力的数值略大于理论计算值和电测法计算值; 车顶铝合金焊接接头最大残余应力可达 146.3 MPa; X 射线衍射法与等强杆标定方法、盲孔法、有限元计算模拟方法的残余应力结果保持了较好的一致性。

关键词: 高速列车; 铝合金; 残余应力; 等强杆; X 射线衍射法

中图分类号: TG404 **文献标志码:** A

Detection of Residual Stress in Aluminum Alloy Carbody of High-Speed Train Using X-ray Diffraction Technology

GOU Guoqing¹, HUANG Nan¹, CHEN Hui¹, TIAN Aiqin²

(1. Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. CSR Qingdao Sifang Co. Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: In order to test the surface residual stress in the aluminum alloy carbody of high-speed trains accurately, quickly, and non-destructively, the tensile test of an equal strength rod was used to calibrate the measurement of X-ray diffraction (XRD) method. The residual stress values of welded joints in the aluminum alloy carbody of a high speed train were detected separately by XRD method, blind hole-drilling method, and finite element method (FEM), and then compared with each other. The results show that during the tensile test of the equal strength rod sample, the stress value measured by XRD method well accords with the tensile loading stress in the range of 10 to 70 MPa, and hence the XRD method can be used for testing the residual stress in the key parts of the aluminum alloy carbody of high speed trains. In addition, the numerical values of residual stress detected by XRD method are slightly higher than those obtained by theoretical calculation and electrical measuring method. The maximum residual stress of welded joints in high speed train aluminum alloy vehicle roof is approximately 146.3 MPa. The residual stress results detected by XRD method are in good agreement with those by the equal strength rod tensile calibration, blind hole-drilling method, and FEM.

Key words: high speed train; aluminum alloy; residual stress; equal strength rod; XRD

收稿日期: 2011-10-19

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2009BAG12A04)

作者简介: 苟国庆(1979-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为高速列车焊接工艺及无损检测, E-mail: 15816314@qq.com

通讯作者: 黄楠(1957-), 教授, 博士生导师, 研究方向为涂层处理及表面防护技术, E-mail: nhuang@263.net

350 km/h 及以上的高速列车,采用大型中空铝合金型材焊接而成,疲劳破坏现象突出. 疲劳破坏一般都是从表面开始,表面残余应力对铝合金车体疲劳强度有较为显著的影响. 残余应力与焊接缺陷、接头几何不连续、冶金非均匀等因素交互作用,影响焊接结构的强度、抗脆断能力、耐腐蚀性能等,降低高速列车车体结构的安全可靠性,缩短其服役寿命^[1-7]. 目前,对于高速列车用大型中空铝合金型材焊接残余应力的研究还处于起步阶段,因此,无损、快速检测车体焊接结构残余应力对于高速列车车体可靠性研究具有重要的工程意义.

文献[7]中采用超声波测量方法对高速车体侧墙的焊接残余应力进行了测量,为服役状态下高速列车车体结构安全评估和疲劳寿命预测奠定了一定的基础.

X 射线衍射法残余应力测试技术,具有测试速度快、数据可重复性强,便于现场大面积测试等优点,已经在很多领域得到了推广使用^[8-13]. 文

献[12-14]的研究表明, X 射线衍射法获得的残余应力结果与盲孔法、中子衍射法等方法获得的结果有很好的 consistency.

本文选取某类型高速列车,对铝合金焊接接头分别采用 X 射线法、盲孔法进行了残余应力测试研究,并针对关键焊接接头进行了残余应力有限元模拟. 通过对比研究,以期探究较为精准的高速列车车体结构残余应力的无损检测技术,实现有效地对高速列车车体安全可靠性进行评价.

1 残余应力测试对象、设备及参数

1.1 测试对象

X 射线衍射法及盲孔法残余应力测试均选取某类型高速列车焊接接头,母材为 A5083P-O 铝合金.

1.2 测试设备及参数

X 射线衍射法测试残余应力采用 iXRD 应力测试仪. 表 1 为 X 射线衍射法测试涉及的参数.

表 1 X 射线衍射法残余应力测试参数
Tab. 1 Test parameters of XRD method for residual stress

辐射靶材	应力计算方法	管电流/mA	衍射晶面	衍射角/(°)	扫描范围 2θ/(°)	准直管直径/mm
CoKα	sin ² ψ 法	4	311	148.90	120 ~ 160	1
测试方法	弹性常数	管电压/kV	定峰方法	滤波片	应力常数/MPa	曝光时间/s
侧倾固定 Ψ ₀ 法	18.56 × 10 ⁻⁶	25	Pearson VII	V	-125.2	2

对 X 射线残余应力测试仪进行拉伸试验标定 (图 1).

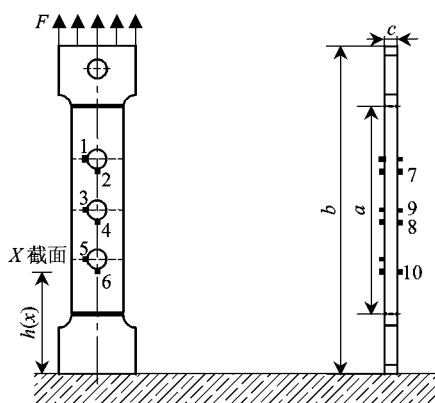


图 1 X 射线法残余应力测试拉伸标定
Fig. 1 Tensile calibration of XRD method for residual stress test

采用 WD-20KE 拉伸试验机,基于拉伸试样设计了等强杆. 等强杆的有效面积为

$$S = ab, \tag{1}$$

式中: a 为等强度杆有效长度,随着拉伸力的增加而伸长; b 为等强度杆有效宽度.

在 A5083P-O 铝合金材料弹性极限范围内,为保证拉伸力 F 均匀作用于面积 S 上,设计拉伸杆件夹持部位的长度大于拉伸试验机夹头长度的 1.2 倍,且在等强杆的有效面积与夹持部位设计过渡槽,以保证力的传递和均匀分布. 根据材料力学基本理论,等强杆受拉伸时各截面为单向应力状态,因此,等强杆截面正应力为

$$\sigma = \frac{F}{S}. \tag{2}$$

式(2)表明正应力在等强杆截面上与加载拉伸力呈线性关系.

设定: x 方向垂直于 F 方向; y 方向平行于 F 方向. 在等强杆拉伸试样所贴应变片中,应变片 1~6 所贴面为 X 射线测试面,应变片 7~10 是用来监督被测试的一面. 拉伸试验过程中,试验加载为 0 ~ 17.28 kN,拉伸速度为 0.1 mm/min. 残余应力数值分别由拉伸应力理论、电测法与 X 射线残余应力测试仪软件系统内置的 Pearson、Cauchy 等数学方法计算.

盲孔法测量残余应力采用高速钻孔装置在高

速列车车体结构上钻取 $\phi 1.5$ mm、深度达 1.5 mm 的盲孔. 利用 DH3816 静态应变仪测量钻孔过程中产生的钻削应变. 根据标准^[15] 计算残余应力并进行盲孔法标定试验, 获得的标准系数为

$$A = -1.53 \mu\epsilon/\text{MPa}; \quad B = -2.69 \mu\epsilon/\text{MPa}.$$

2 车体焊接残余应力有限元模拟

针对实验检测的焊接接头, 使用非线性有限元分析软件 Sysweld 进行热耦合分析, 建立有限元计算模型. 采用 Hypermesh 软件进行网格构建. 在

温度梯度变化较大的焊缝及其附近区域, 网格进行加密处理, 在远离焊缝较远处和温度变化不明显的区域, 网格划分较为稀疏, 整个几何模型表现为由细密到疏松的过渡方式. 模型单元为八节点六面体类型, 节点为 465 556 个, 单元为 330 450 个. 热源模型采用双椭球热源模型.

热物理性能和力学性能参数随温度发生变化, 采用材料性能计算软件 Jmatpro 4.1 进行热物理性能计算, 得到不同条件下的主要物理性能参数与温度的对应关系如图 2 所示.

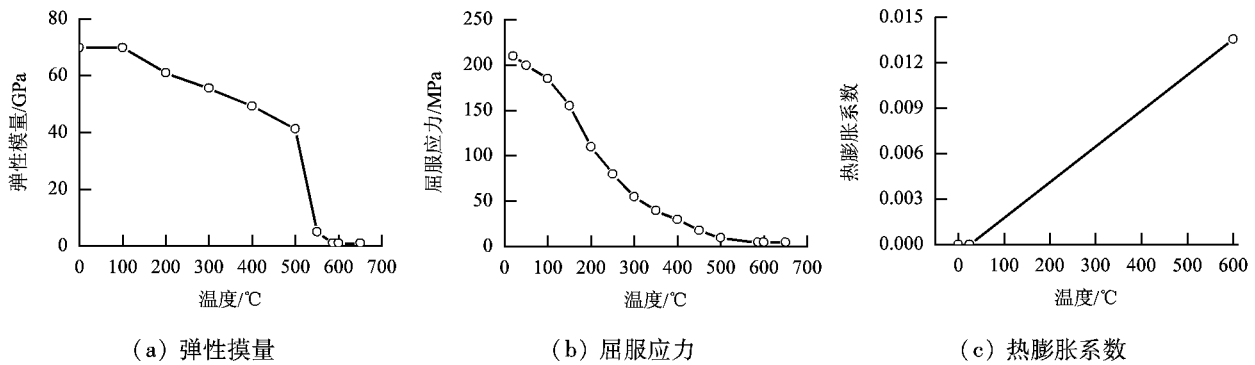


图 2 主要物理性能参数与温度的关系
Fig. 2 Relationship between main parameters and temperature

3 残余应力研究结果分析

取 A5083P-O 铝合金的弹性模量为 70 GPa, 图 3 及表 2 为残余应力标定结果. X 射线衍射法是通过测定材料中晶面间距的应变来计算应力, 在试件承载的情况下, 测得载荷应力与残余应力之和. 由图 3 可知, 在 10 ~ 70 MPa 范围内, 随着拉伸载荷的增加, X 射线衍射法应力测试结果与电测法应力、载荷应力有很好的 consistency.

X 射线衍射法测试的是铝合金表面 30 μm 以内的平均残余应力, 电测法及理论算法反应的是整个结构的平均残余应力, X 射线衍射法残余应

力的数值略大于理论计算值和电测法计算值.

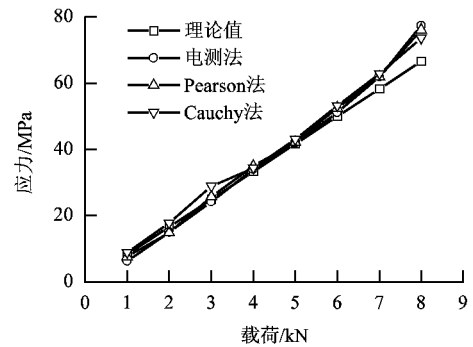


图 3 A5083P-O 铝合金材料残余应力拉伸标定结果
Fig. 3 Tensile calibration results for A5083P-O aluminum alloy

表 2 A5083P-O 铝合金材料残余应力测试结果
Tab. 2 Residual stress results tested by XRD method for A5083P-O aluminum alloy

载荷 /kN	理论应力 /MPa	电测法残余应变						电测法残余应变均值	电测法应力 /MPa	X 射线衍射法应力/MPa	
		1	2	3	4	5	6			Pearson	Cauchy
1	8.33	98	88	83	80	93	93	89.17	5.53	7.64	8.90
2	16.67	239	216	204	188	219	218	214.00	13.27	14.92	17.81
3	25.00	390	344	325	308	357	354	346.33	21.47	25.71	28.88
4	33.33	523	467	442	419	483	479	468.83	29.07	35.00	34.45
5	41.67	662	600	570	535	619	612	599.67	37.18	42.17	43.01
6	50.00	799	731	700	651	755	748	730.67	45.30	52.52	53.19
7	58.33	952	889	872	771	912	918	885.67	54.90	61.90	62.88
8	66.67	1 136	1 097	1 144	924	1 134	1 194	1 104.83	68.49	76.13	73.61

图 4、图 5 为车顶铝合金焊接接头由 X 射线衍射法、盲孔法以及有限元法测得的残余应力分布。图 4 中: W 表示焊缝; HAZ 表示热影响区; M 表示母材。

由图 5 可知,车顶铝合金焊接接头分布着较高

的拉伸残余应力及压缩残余应力,最高纵向应力达到 146.3 MPa,由于焊接缺陷的存在,残余应力会加速焊接缺陷的扩展,降低高速列车运行的安全可靠。由图 4 及图 5 可知,除少数点之外,有限元法模拟计算结果比其他两种方法所得结果要大。这是

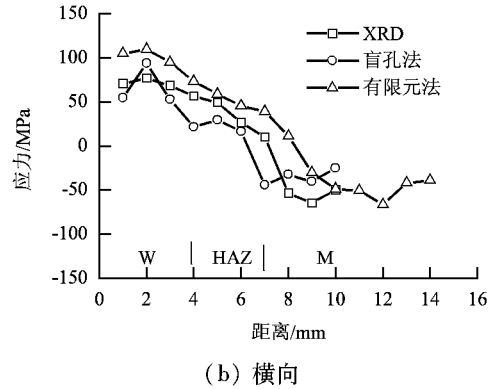
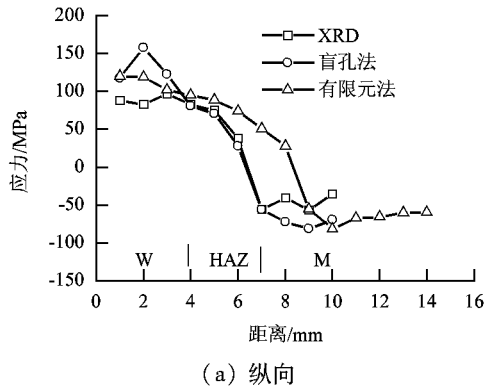


图 4 车顶焊接接头焊接残余应力分布

Fig. 4 Residual stress distribution of welding joints in the vehicle roof of high speed train

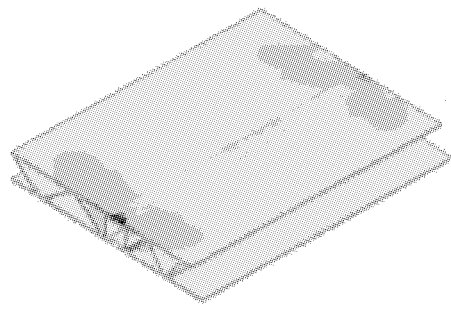
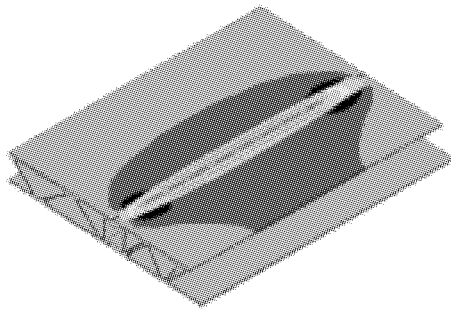
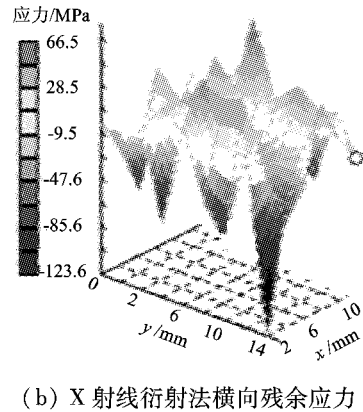
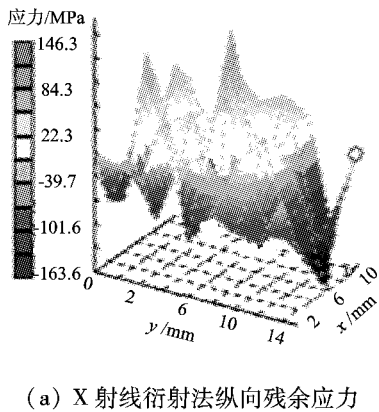


图 5 X 射线衍射法及有限元法测得的车顶焊接接头残余应力分布

Fig. 5 Residual stress distribution of welding joints in the vehicle roof obtained by XRD and FEM

由于实际车体铝合金焊接结构和有限元几何模拟结构之间的差异产生的。实际车体铝合金焊接接头受力较为复杂,不仅受纵向载荷的作用,在车体运行过程中,还受到振动载荷以及其他载荷的作用,实际焊接状态和模拟状况受热、散热以及边界条件均不同,因此,造成测试结果和模拟结果的差异。

4 结 论

(1) 等强杆拉伸试验标定法结果表明,在 10 ~ 70 MPa 范围内,随着拉伸载荷的增加, X 射线衍射法与载荷应力有很大的一致性, X 射线衍射法残余应力的数值略大于理论计算值和电测法

计算值.

(2) X射线衍射法、盲孔法、有限元模法计算结果表明,车顶铝合金焊接接头最大残余应力达到146.3 MPa. 由于实际车体铝合金焊接结构和有限元几何模拟结构之间的差异,有限元法模拟计算结果略大于X射线衍射法结果以及盲孔法结果.

(3) X射线衍射法与等强杆标定方法、盲孔法、有限元计算模拟方法的残余应力结果保持了较好的一致性,可以采用XRD衍射法对车体关键部位应力状态进行测试分析.

参考文献:

- [1] 王元良,周友龙,胡久富. 铝合金运载工具轻量化及其焊接[J]. 电焊机,2005,35(9): 14-18.
WANG Yuanliang, ZHOU Youlong, HU Jiufu. Al-alloy lighten vehicle and its development of new welding technology[J]. Electric Welding Machine, 2005, 35(9): 14-18.
- [2] 晏传鹏,莫斌. 新型锌铝合金焊接技术研究[J]. 西南交通大学学报,1993(2): 37-41.
YAN Chuanpeng, MO Bin. A study on the welding technique for new Zn-Al alloys[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1993(2): 37-41.
- [3] 屈金山,王元良,雷万钧. 铝合金6063焊接接头性能分析[J]. 西南交通大学学报,1993(2): 22-25.
QU Jinshan, WANG Yuanliang, LEI Wanjun. Analysis of welded joint properties for aluminum alloy 6063[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1993(2): 22-25.
- [4] 陈明鸣,王元良. 热处理工艺对LD10铝合金残余应力的影响[J]. 西南交通大学学报,1997,32(2): 198-202.
CHEN Mingming, WANG Yuanliang. The effect of heat treatment procedures on residual stresses of LD10 aluminum alloy[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1997, 32(2): 198-202.
- [5] 郑弃非,孙霜青,温军国. 铝及铝合金在中国的大气腐蚀及其影响因素分析[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(6): 359-365.
ZHENG Qifei, SUN Shuangqing, WEN Junguo. Atmospheric corrosion and its influencing factors of aluminum and aluminum alloys[J]. Corrosion and Protection, 2009, 30(6): 359-365.
- [6] 王荣,鄢国强,李国福,等. 7020铝合金列车车钩梁开裂原因与机理[J]. 中国腐蚀与防护学报,2008, 28(4): 240-245.
WANG Rong, YAN Guoqiang, LI Guofu et al. Failure analysis of cracking of coupler beam of aluminum alloy 7020[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2008, 28(4): 240-245.
- [7] 路浩,刘雪松,孟立春,等. 高速列车车体服役状态残余应力超声波法无损测量及验证[J]. 焊接学报, 2009,30(4): 81-83.
LU Hao, LIU Xuesong, MENG Lichun, et al. Residual stress evaluation of high speed train body structure by ultrasonic method and verification[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(4): 81-83.
- [8] 陈玉安,周上祺. 残余应力X射线测定方法的研究现状[J]. 无损检测,2001,23(1): 19-22.
CHEN Yuan, ZHOU Shangqi. The state of the study on residual stress measurement by X-ray analysis[J]. Nondestructive Test, 2001, 23(1): 19-22.
- [9] 吉华,陈辉,苟国庆,等. 新型列车铝合金搅拌摩擦焊接残余应力[J]. 西南交通大学学报,2011,46(增刊): 130-134.
JI Hua, CHEN Hui, GOU Guoqing, et al. Research on residual stresses for friction stir welding on aluminum alloys of new-type train[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(Sup.): 130-134.
- [10] American Society for Testing and Materials. ASTM E915—96 Standard test method for verifying the alignment of X-ray diffraction instrumentation for residual stress measurement[S]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials Press, 1996.
- [11] 中国航天工业总公司. QJ 2916—97 铝及铝合金表面残余应力的X射线测试方法[S]. 北京:中国标准出版社,1998.
- [12] JI Hua, CHEN Hui, GOU Guoqing, et al. Research on stress calibration technology on aluminum of high-speed train body structure by nondestructive X-Ray method measurement[J]. Advanced Materials Research, 2011, 189: 734-742.
- [13] ALBERTINI G, BRUNO G, DUNN B D, et al. Comparative hole-drilling and X-ray residual stress measurements on steel welded plate[J]. Materials Science and Engineering, 1997, 224: 157-162.
- [14] OWEN R A, PRESTON R V, WITHERS P J, et al. Neutron and synchrotron measurements of residual strain in TIG welded aluminum alloy 2024[J]. Materials Science and Engineering, 2003, 24(346): 159-167.
- [15] 中国船舶工业总公司. CB 3395—92 残余应力测试方法:钻孔应变释放法[S]. 北京:中国标准出版社,1993.