

残余应力检测与消除方法的研究现状及发展

张铁浩¹, 王洋¹, 方喜风¹, 赵毅², 刘雪梅², 李亚辉², 梁鹏²

(1.中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;
2.山东大学 材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 济南 250061)

摘要: 残余应力的存在会严重影响工件的强度及相关性能, 对残余应力的检测及消除方法的研究具有重要的理论意义及工程应用价值。从残余应力的概念及形成原因入手, 介绍了钻孔法、X射线衍射法、磁测法、超声波检测法等测量残余应力的手段以及研究发展现状; 同时阐述了热处理法、振动时效法、超声波冲击法等消除残余应力的方法。

关键词: 残余应力; 钻孔法; X射线衍射法; 振动时效

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.05.017

中图分类号: TG115 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2017)05-0122-06

Research Status and Development of Residual Stress Detection and Elimination Methods

ZHANG Tie-hao¹, WANG Yang¹, FANG Xi-feng¹, ZHAO Yi², LIU Xue-mei², LI Ya-hui², LIANG Peng²

(1.CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China; 2.Key Laboratory for Liquid-Solid Structure Evolution & Processing of Materials, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China)

ABSTRACT: The residual stress would seriously affect the strength and related properties of workpiece. It is of great theoretical significance and engineering application value to study methods for detecting and eliminating the residual stress. From the concept of residual stress and the formation reason of measurement, this paper introduced the measurement and development of the residual stress, such as: drilling method, X-ray diffraction method, magnetic method and ultrasonic detection method. Meanwhile, the methods of heat treatment, vibration ageing, ultrasonic peening, etc. were introduced to eliminate the residual stress.

KEY WORDS: residual stress; drilling method; X-ray diffraction method; vibration stress relief

残余应力是指消除外力或不均匀的温度场等作用后, 仍留在物体内的内应力。焊接、锻压、切削加工、喷丸、金属热处理等产生不均匀塑性变形或相变的行为都能引起残余应力。残余应力一般是有害的, 残余应力的存在严重影响工件的疲劳强度、耐腐蚀性能以及工件的精度, 使工件在服役过程中产生变形和开裂, 进而影响工件的使用寿命, 因此对工件残余应力的测量以及消除, 对于进一步完善工件制造工艺以及保证工件使用安全具有重大意义。

1 残余应力的检测

目前关于残余应力的检测方法主要分为机械测量法和无损测量法2大类。机械测量法是对工件进行切割或分离, 使内部应力得到释放, 测量工件的应变, 从而计算出残余应力。机械检测法对工件本身会造成一定程度的破坏。常见的机械测量法包括钻孔法、切条法、套孔法等。无损测量法就是利用声、光、磁和

电等特性, 在不损害或不影响被测量对象使用性能的前提下, 来测量残余应力的方法。无损测量法主要包括磁测法、X射线衍射法、超声波法等。

1.1 钻孔法

钻孔法测量残余应力最早由 J. Mathar 于 1934 年提出^[1], 后经 W. Soete 和 Vancombrugge 等人发展, 使测量精度提高^[2]。近些年来我国的一些专家学者, 如陈会丽^[3]、施彦彬^[4]、裴怡^[5]、陈怀宁^[6]、戴福隆^[7]等人都对钻孔法的发展做出了贡献。

钻孔法的基本原理是在产生残余应力的工件表面钻一个小孔, 小孔邻近区域应力得到释放, 从而产生相应的应变, 测量应变的大小, 通过计算便可以得到钻孔深度方向的平均残余应力^[2]。该方法具有测量精度高、操作方便、设备便宜等优点, 被 ASTM 确定为标准的残余应力测量方法^[8]。

传统钻孔法只能测量工件表面层下沿深度均匀变化的平均残余应力, 对于非均匀残余应力其精度较差, 近年来逐步发展出一种新型的钻孔测量法: 逐层钻孔法^[9]。逐层钻孔法是通过有限元法计算校准系数矩阵, 构建的一种非均匀应力测试方法^[9]。钻孔法与其他方法相结合的测试方法应用也很广泛, 如结合盲孔法和 DIC 测量技术的 DIC-盲孔法^[10], 该方法采用 DIC 测量技术代替了传统盲孔法中应变仪, 使检测更为简便、快捷。陈玲玲^[11]提出的结合电子散斑干涉法和钻孔法的残余应力测定方法, 该方法利用半导体激光器, 使光路和 CCD 布置在倾斜平面上, 避开了钻孔方向, 从而可以实现单向压缩残余应力的实时测定。

1.2 X射线衍射法

X射线衍射法测量残余应力最早由俄国学者于 1929 年提出^[2], 1961 年德国学者 E. Macherauch^[12]创造了 $\sin 2\psi$ 法, 随后 cheekie^[12]在其基础上将其简化为 0~45° 法, 逐渐成为 X 射线衍射测量残余应力的标准方法。

X 射线衍射法的基本原理是根据弹性力学和 X 射线晶体学理论, 理想晶体在不受应力的状态下, 晶体同一族的晶面间距是相等的, 而受到残余应力的作用, 晶面间距随残余应力的变化发生变化, 根据这一特性, 可以从 X 射线衍射谱线位移的大小计算出试样的残余应力^[13]。X 射线衍射法测量残余应力对工件没有消损, 测量结果较为精确, 且可以重复测试, 适用于具有良好晶体结构的材料, 但该方法对试样尺寸和几何形状具有很大的限制^[8], 且测试所需的 X 射线衍射仪较为昂贵^[14]。

X 射线衍射法在薄膜残余应力测量上的应用十分广泛, 如 Hanabusa^[15]等人利用类单晶法测量了强织构 TiC 薄膜的残余应力。Brennan 等人^[16]利用掠入

射 X 射线衍射技术(可以通过改变掠射角来控制 X 射线的穿透深度), 分析了 Au 膜中的残余应力, 其分析精度可达 5 MPa。朱宏喜^[17]等人利用 X 射线衍射透射法, 测量了不同沉积工艺 CVD 自支撑金刚石薄膜的残余应力, 与常规法相比, 测量过程简捷、准确。

1.3 磁测法

磁测法的基本原理是利用铁磁物质的磁致伸缩效应^[18~20]来测定应力, 当铁磁体内部存在应力时, 铁磁体具有各向异性, 不同应力状态的部位具有不同的磁导率, 实际试验中利用感应线圈中感应电流的变化来反应磁导率的变化, 由此可以进行残余应力的测量。磁测法具有无损、测量速度快、适合现场操作等优点, 但是其测量精度差, 容易对环境造成污染且待测物质必须为铁磁材料。

目前磁测法测量残余应力的技术主要有磁记忆检测法^[18]、磁声发射法^[21~23]、巴克豪森效应法^[24~26]等, 就目前而言巴克豪森效应法运用的最为广泛^[27]。我国已经实现了磁测法在大型球罐中焊接应力的测定^[28], 田浩^[29]等人利用巴克豪森效应测定了钢轨纵向应力。

1.4 超声波检测法

超声波检测法是以材料的声弹效应^[30]为基础(材料上内应力的变化可以引起超声波在材料中传播速度的变化), 通过测定超声波在工件内部传播速度的变化, 从而可以计算出残余应力^[31~32]。超声波法测量法的优点有: ① 超声波检测设备易于携带, 可在现场操作, 且安全无公害; ② 超声波方向性好, 可以实行定向发射; ③ 超声波穿透能力较强, 可以测定构件的表面和内部应力分布而不对构件造成损坏。该方法的缺点是超声波法测量精度较低, 因此, 超声波检测法在测量大型工件的三维残余应力方面很有发展潜力。基于超声波检测法的特点, 目前的技术有表面波法、电磁超声法^[33]、激光超声法^[34]、临界折射纵波法^[35]、反射纵波法^[36]、声双折射法^[37]等。刘蕊^[38]等人利用临界折射纵波来检测钢轨应力。贺玲凤^[39]等人利用激光超声法对 H 型钢梁进行了检测。王茹^[40]等人利用临界折射纵波法来测量了焊缝残余应力。

2 残余应力的消除方法

2.1 自然时效法

自然时效法^[41]是最古老的一种消除残余应力的方法, 该方法是将工件放置在户外, 经过长久的温度变化, 工件经受反复的温度压力, 造成工件内金属晶格的滑移, 从而达到消除残余应力的效果。这种方法效率低、耗时长、对应力的消除效果较差, 只能达到

10%左右，目前已经被逐渐淘汰。

2.2 热处理法

热处理法消除残余应力的基本原理是把工件加热到略低于再结晶开始温度，保温后缓慢冷却。在加热保温过程中由于温度升高，金属原子运动能力上升，使工件中晶格缺陷减少，导致晶格弹性畸变能量降低，从而使得工件残余应力减少。热处理法消除残余应力相对于自然时效处理周期大大缩短，但其消除应力的效果并不理想，只有 10%~35%^[8]，且该方法能耗高、价格昂贵、污染严重，热处理后的材料机械性能大大降低。丁昌^[42]等人用热处理法消除钢的焊接残余应力，结果表明，正火加回火处理对焊接残余应力的消除量大于只用回火处理的消除量。王国庆^[43]等人对 Q235 钢焊件进行退火处理，证明了 Q235 钢残余应力的降低是由屈服强度的降低及蠕变后的应力松弛 2 种机理共同决定的。

2.3 振动时效法

振动时效^[44~46]是一种采用机械振动消除残余应力的技术，其基本原理是机械共振与试样材料残余应力叠加，当叠加的应力值大于材料的屈服极限时，材料将会发生塑性变形，从而降低工件的残余应力。振动时效法操作简单，对残余应力消除效果较好，且对工件尺寸和形状没有限制，对于大型复杂工件具有很好的适应性，是一种很有发展前途的残余应力消除方法。

振动时效技术最早出现于 20 世纪 50 年代，并在高速可调电机问世后得到广泛的发展。目前我国学者基于传统振动时效技术发展来的新技术有高频振动时效技术^[47]、频谱谐波振动时效技术^[48]和振动焊接时效技术^[49]等。

2.4 超声波冲击法

超声波冲击法消除残余应力的基本原理就是以大功率超声波设备为动力源，推动冲击工具以 20 000 次/s 以上的频率冲击工件表面，使工件发生塑性变形，从而降低内部残余应力。

超声波冲击法最早由前苏联科学家提出，后于 20 世纪 60 年代在美国取得迅速发展，半个世纪以来超声波消除残余应力方法日趋完善，该方法使用方便、成本低、效率高、无污染目前该方法钢结构焊件中运用十分广泛^[50]。侯国清^[51]等人对装载机动臂中的焊缝进行消除残余应力试验，发现采用超声波冲击的方法可以 100% 消除焊缝中的残余应力。

3 结语

在冷热加工过程中，工件内部不可避免会产生残余应力，而残余应力的存在是影响工件质量不可忽视

的因素。随着工件朝着精密化方向发展，人们对工件质量要求越来越高，残余应力的检测与消除被提到了愈来愈重要的高度。文中从这 2 个方面讨论了目前关于残余应力检测和消除的若干技术方法的原理、特点、应用场合及其发展，对于工程实际应用具有重要的参考价值。

参考文献：

- [1] 王丹, 徐滨士, 董世运. 涂层残余应力实用检测技术的研究进展[J]. 金属热处理, 2006(5): 48—53.
WANG Dan, XU Bin-shi, DONG Shi-yun. Research Progress on Practical Measurement of Residual Stress in Coatings[J]. Heat Treatment of Metals, 2006(5): 48—53.
- [2] 刘倩倩, 刘兆山, 宋森, 等. 残余应力测量研究现状综述[J]. 机床与液压, 2011(11): 135—138.
LIU Qian-qian, LIU Zhao-shan, SONG Sen, et al. Research Status of Measurement for Residual Stress[J]. Hydromechatronics Engineering, 2011(11): 135—138.
- [3] 陈会丽. 爆炸焊接复合板界面残余应力的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005.
CHEN Hui-li. Study on Residual Stress at Interface of Explosive Welded Composite Plate[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005.
- [4] 施彦彬, 何闻, 郑建毅. Q235 钢应变释放系数塑性修正问题的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(11): 2083—2087.
SHI Yan-bin, HE Wen, ZHENG Jian yi. Research on Plasticity Modification of Strain Relief Coefficients in Q235 Steel[J]. Journal of Zhejiang University-Science (Engineering Science), 2010, 44(11): 2083—2087.
- [5] 裴怡, 包亚峰, 唐慕尧. 盲孔法测量精度的研究—边界及孔间距的影响[J]. 焊接学报, 1994(3): 191—196.
PEI Yi, BAO Ya-feng, TANG Mu-yao. Measurement Accuracy of Blind Hole Method—the Influence of Boundary and Hole Spacing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1994(3): 191—196.
- [6] 陈怀宁, 陈亮山, 董秀中. 盲孔法测量残余应力的钻削加工应变[J]. 焊接学报, 1994(4): 276—280.
CHEN Huai-ning, CHEN Liang-shan, DONG Xiu-zhong. Drilling Strain of Residual Stress Measured by Blind Hole Method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1994(4): 276—280.
- [7] 谢惠民, 戴福隆, 邹大庆. 高温云纹干涉法的进展[J]. 光学技术, 1997(2): 24—29.
XIE Hui-min, DAI Fu-long, ZOU Da-qing. Development on the High Temperature Moire Interferometry[J]. Optical Technique, 1997(2): 24—29.
- [8] 王秋成. 航空铝合金残余应力消除及评估技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
WANG Qiu-cheng. Control and Relief of Residual Stresses in High-strength Aluminum Alloy Parts for Aerospace Industry[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [9] 郑建毅, 庄明凤, 郑高峰. 用逐层钻孔的小孔法测量非

- 均匀残余应力[J]. 振动测试与诊断, 2014, 34(3): 420—425.
- ZHENG Jian-yi, ZHUANG Ming-feng, ZHENG Gaofeng. Measurement of Non-uniform Residual Stresses by Incremental-step Blind Hole Drilling Method[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(3): 420—425.
- [10] 陈岚树, 董军, 彭洋. 用于残余应力现场检测的 DIC-盲孔法研究进展[J]. 建筑钢结构进展, 2014(3): 37—44.
- CHEN Lan-shu, DONG Jun, PENG Yang. An Over View on Field Residual Stress Detection Using DIC-Hole Drilling Methodology[J]. Progress in Steel Building Structures, 2014(3): 37—44.
- [11] 陈玲玲, 杨吟飞, 何宁. 基于电子散斑干涉术的残余应力测量[J]. 传感器与微系统, 2010(1): 108—110.
- CHEN Ling-ling, YANG Yin-fei, HE Ning. Residual Stress Measurement Based on Electronic Speckle Pattern Interferometry[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010(1): 108—110.
- [12] 孙渊, 王庆明. 残余应力测量技术的研究状况[J]. 上海电机学院学报, 2006(4): 6—10.
- SUN Yuan, WANG Qing-ming. Research Status of Residential Stress Measurement[J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2006(4): 6—10.
- [13] 游长生. 利用 X 射线法测定零件表层残留应力[J]. 工业技术经济, 1994(6): 68—70.
- YOU Chang-sheng. Determination of Residual Stresses in Parts Surface by X-ray Method[J]. Industrial Technology & Economy, 1994(6): 68—70.
- [14] 陈会丽, 钟毅, 王华昆. 残余应力测试方法的研究进展[J]. 云南冶金, 2005(3): 52—54.
- CHEN Hui-li, ZHONG Yi, WANG Hua-kun. Research Progress of Residual Stress Test Method[J]. Yunnan Metallurgy, 2005(3): 52—54.
- [15] HANABUSA T. Residual Stress and In-situ Thermal Stress Measurement of Copper Films on Glass Substrate [J]. Material Science Research International, 2001, 50(1): 54—60.
- [16] BRENNAN S, MUNKHOLM A, LEUNG O S, et al. X-ray Measurements of The Depth Dependence of Stress in Gold Films[J]. Physica B Condensed Matter, 2000, 283: 125—129.
- [17] 朱宏喜, 毛卫民, 冯惠平. 金刚石薄膜残余应力的 X 射线透射测量法[J]. 物理测试, 2005(6): 24—27.
- ZHU Hong-xi, MAO Wei-min, FENG Hui-ping. Measurement of Residual Stress in Diamond Film by X-ray Transmission Method[J]. Physics Examination and Testing, 2005(6): 24—27.
- [18] 王文江. 磁记忆检测技术与应用方法研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2003.
- WANG Wen-jiang. Research on Magnetic Memory Testing Technology and Application Method[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2003.
- [19] 王振山, 张锡庚, 张相臣. 磁测残余应力的几个问题[J]. 石油化工设备, 1992(1): 9—11.
- WANG Zhen-shan, ZHANG Xi-geng, ZHANG Xiangchen. Some Problems of Residual Stress in Magnetic Survey[J]. Petro-Chemical Equipment, 1992(1): 9—11.
- [20] 王金凤, 樊建春, 全钢. 磁声发射无损检测方法研究进展[J]. 石油矿场机械, 2008(5): 72—75.
- WANG Jin-feng, FAN Jian-chun, TONG Gang. Research Advance of MAE Nondestructive Testing Method[J]. Oil Field Equipment, 2008(5): 72—75.
- [21] 陆同理, 尹国珍, 白金斗. 磁声发射技术研究[J]. 河北工学院学报, 1988(4): 57—63.
- LU Tong-li, YIN Guo-zhen, BAI Jin-dou. Study on Magnetic Acoustic Emission Technology[J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 1988(4): 57—63.
- [22] 郭盈, 徐约黄, 杜凤牡. 磁声发射源及其机制的研究[J]. 武汉大学学报, 1990(4): 39—45.
- GUO Ying, XU Yue-huang, DU Feng-mu. Study on Acoustic Emission Source and Its Mechanism[J]. Journal of Wuhan University, 1990(4): 39—45.
- [23] 谷春瑞. 材料磁声发射技术研究[J]. 新技术新工艺, 2000(5): 29—30.
- GU Chun-rui. Study on Magnetic Acoustic Emission of Materials[J]. New Technology & New Process, 2000(5): 29—30.
- [24] 尹何迟, 颜焕元, 陈立功, 等. 磁巴克豪森效应在残余应力无损检测中的研究现状及发展方向[J]. 无损检测, 2008(1): 34—36.
- YIN He-chi, YAN Huan-yuan, CHEN Li-gong, et al. Researching State and Development of Magnetic Barkhausen Noise in Measurement of Residual Stress[J]. Nondestructive Testing, 2008(1): 34—36.
- [25] 卢诚磊, 倪纯珍, 陈立功. 巴克豪森效应在铁磁材料残余应力测量中的应用[J]. 无损检测, 2005(4): 176—178.
- LU Cheng-lei, NI Chun-zhen, CHEN Li-gong. Application of Barkhausen Noise to the Measurement of the Residual Stress of Ferromagnetic Materials[J]. Nondestructive Testing, 2005(4): 176—178.
- [26] 王存龙, 陈新力. 巴克豪森效应在无损检测领域的应用[J]. 兵器材料科学与工程, 1994(1): 63—68.
- WANG Cun-long, CHEN Xin-li. The Application of Barkhausen Effect in Non-destructive Testing Field[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1994(1): 63—68.
- [27] 赵亚楠. 焊接残余应力研究概况[C]// 中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第 13 届(ISSF-2012)学术交流会暨教学研讨会论文集, 2012.
- ZHAO Ya-nan. Survey of Welding Residual Stress[C]// Proceedings of The Thirteenth (ISSF-2012) Academic Exchange and Symposium on Structural Stability and Fatigue of China Steel Structure Association, 2012.
- [28] 姚钦. 球罐的磁性法残余应力测试[C]// 中国机械工程学会第六届全国压力容器学术会议压力容器先进技术精选集, 2005.
- YAO Qin. Test of Remaining Stress at the Magnetic Method for Spherical Tanks[C]// Proceedings of the Sixth National Symposium on Pressure Vessel, Advanced

- Technology of Pressure Vessel, China Institute of Mechanical Engineering, 2005.
- [29] 田浩, 于石生, 赵小莹. 利用巴克豪森效应测定钢轨纵向应力[J]. 材料科学与工艺, 2004(2): 196—198.
TIAN Hao, YU Shi-sheng, ZHAO Xiao-ying. Testing the Vertical Stress of Railroad by the Barkhausen Effect[J]. Materials Science and Technology, 2004(2): 196—198.
- [30] 马子奇. 基于临界折射纵波声弹效应的平面应力测量理论和方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
MA Zi-qi. Theory and Method Research on Plane Stress Field Measurement Based on Acoustoelastic Effect of Critically Refracted Longitudinal Wave[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [31] 王彦龙. 残余应力的超声波检测研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2005.
WANG Yan-long. Study on Ultrasonic Testing of Residual Stress[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2005.
- [32] 崔高健, 林玉霞, 滕加庄. 超声波检测和消除铝合金焊接残余应力的应用现状[J]. 轻合金加工技术, 2008(10): 1—4.
CUI Gao-jian, LIN Yu-xia, TENG Jia-zhuang. Present Situation of Detection and Elimination of Aluminum Alloy Welding Residual Stress with Supersonic Wave at Home and Abroad[J]. Light Alloy Processing Technology, 2008(10): 1—4.
- [33] 孙日明. 电磁超声应用于钢轨应力检测的研究和分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
SUN Ri-ming. The Research of Rail Stress Detection Based on Electromagnetic Acoustic Transducer[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [34] 董利明. 金属焊接残余应力的激光超声无损检测研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
DONG Li-ming. Study on Nondestructive Evaluation of Residual Stress on Welded Metal by Laser Ultrasonic Technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [35] 刘彬, 董世运. 基于临界折射纵波无损评价激光熔覆层应力[J]. 焊接学报, 2014, 35(9): 53—56.
LIU Bin, DONG Shi-yun. Nondestructive Evaluation of Laser Cladding Stress Based on Critical Refraction Longitudinal Wave[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(9): 53—56.
- [36] 李勇攀, 王寅观, 刘蕊. 超声反射纵波法检测钢轨应力的实验研究[J]. 力学季刊, 2008(2): 291—295.
LI Yong-pan, WANG Yin-guan, LIU Rui. Experimental Study on Rail Stress Measurement with Reflected Longitudinal Waves[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2008 (2): 291—295.
- [37] 魏勤, 董师润, 徐秉汉. 超声双折射法测试铝合金的内部应力[J]. 应用声学, 2008(5): 401—406.
WEI Qin, DONG Shi-run, XU Bing-han. Measurement of Stress in Aluminum Alloy by Acoustic Birefringence[J]. Applied Acoustics, 2008(5): 401—406.
- [38] 刘蕊, 王寅观, 陈振宇. 利用临界折射纵波检测钢轨应力[J]. 声学技术, 2004(4): 246—249.
LIU Rui, WANG Yin-guan, CHEN Zhen-yu. Rail Stress Measurement with Critically Refracted Longitudinal Waves[J]. Technical Acoustics, 2004(4): 246—249.
- [39] 贺玲凤, 潘桂梅, 小林昭一. 利用激光超声测量 H 型钢梁的残余应力[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2001(7): 20—23.
HE Ling-feng, PAN Gui-mei, KOBAYASHI Shoichi. Measurement of Residual Stress in H Shaped Steel Beam Using Laser Ultrasonic[J]. Journal of South China University of Technology(Social Science Edition), 2001(7): 20—23.
- [40] 王茹, 万刚, 汪丽丽. 钢对接焊缝残余应力分布的临界折射纵波检测[J]. 无损检测, 2016(3): 66—70.
WANG Ru, WAN Gang, WANG Li-li. Critical Refraction Longitudinal Wave Detection for the Distribution of Residual Stress in Butt Weld of Steel[J]. Nondestructive Testing, 2016(3): 66—70.
- [41] 葛彪, 李国军, 李文聪. 消除大型铸锻件残余应力的几种时效工艺方法比较[J]. 热加工工艺, 2005, 34(10): 69—71.
GE Biao, LI Guo-jun, LI Wen-cong. Comparison of Several Ageing Methods to Remove Remain Stress in Large-size Parts[J]. Hot Working Technology, 2005, 34(10): 69—71.
- [42] 丁昌, 汤伯歌, 王三保. 不同热处理方法消除焊接残余应力的研究[J]. 郑州轻工业学院学报, 2005(4): 68—70.
DING Chang, TANG Bo-ge, WANG San-bao. Study on Relieving Residual Welding Stress with Different Heat Treatment Methods[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Light Industry, 2005(4): 68—70.
- [43] 王国庆, 贾宝全, 张智超. 热处理消除 Q235 钢焊接残余应力机理的研究[J]. 焊接技术, 2011(10): 56—57.
WANG Guo-qing, JIA Bao-quan, ZHANG Zhi-chao. Study on Mechanism of Heat Treatment to Eliminate Welding Residual Stress of Q235 Steel[J]. Welding Technology, 2011(10): 56—57.
- [44] 宋天民, 张国福, 尹成江. 振动时效机理的研究[J]. 吉林大学自然科学学报, 1995(1): 53—56.
SONG Tian-min, ZHANG Guo-fu, YIN Cheng-jiang. Study on the Mechanism of Vibratory Stress Relief[J]. Journal of Jilin University Natural Science, 1995(1): 53—56.
- [45] 芦亚萍, 马振宇, 贾权仕. 振动时效机理研究[J]. 机械科学与技术, 2001(4): 587—589.
LU Ya-ping, MA Zhen-yu, JIA Quan-shi. Study on the Mechanism of Vibratory Stress Relief[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2001 (4): 587—589.
- [46] 韩冬, 谭明华, 何闻. 振动时效技术的研究及发展[J]. 机床与液压, 2007(7): 225—228.
HAN Dong, TAN Ming-hua, HE Wen. Research and Development of Vibratory Stress Relief Technology[J]. Hydromechatronics Engineering, 2007(7): 225—228.

- [47] 王剑武, 何闻. 高频激振时效技术的研究[J]. 机床与液压, 2005(9): 9—11.
WANG Jian-wu, HE Wen. Research on the Technology of High Frequency Vibratory Stress Relief[J]. Hydromechatronics Engineering, 2005(9): 9—11.
- [48] 胡晓东. 振动时效技术的突破: 频谱谐波振动时效技术[C]// 全国机电企业工艺年会"新兴铸管杯"工艺论坛征文论文集, 2008.
HU Xiao-dong. Breakthrough of Vibratory Stress Relief Technology[C]// The Process of Mechanical and Electrical Enterprises Annual Meeting "Cup" Technology Forum on New Pipe Papers, 2008.
- [49] 陈立功. 振动时效与振动焊接技术在能源装备制造中的应用[C]// 中国机械工程学会及其焊接分会, 2005.
CHEN Li-gong. Application of Vibration Ageing and Vibration Welding Technology in Energy Equipment Manufacturing[C]// Proceedings of International Forum on Welding Technology in Energy Engineering, 2005.
- [50] 刘小渝, 姚文娟. 用超声冲击法消除锚拉板区域的焊接应力[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2008, 14(6): 646—651.
LIU Xiao-yu, YAO Wen-juan. Release Welding Residual Stress in Anchorage Area Using Ultrasonic Impact[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2008, 14(6): 646—651.
- [51] 侯国清, 马蓉, 王国安. 超声波冲击处理在消除装载机动臂焊缝残余应力中的应用[J]. 装备制造技术, 2015(12): 33—34.
HOU Guo-qing, MA Rong, WANG Guo-an. The Application of Ultrasonic Impact in Relieving Residual Stress in Wheel Loader Boom Weld[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2015(12): 33—34.