

残余应力对高速列车 A7N01 铝合金焊接接头疲劳行为的影响

丁叁叁^{1,2}, 李 强², 苟国庆³

(1. 南车四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266111; 2. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044;
3. 西南交通大学 材料科学与工程学院, 成都 610031)

摘 要: 研究了残余应力在疲劳加载过程中的应力松弛行为, 采用预拉伸、表面喷丸等表面预制残余应力的方法预制了表面残余应力, 并研究了焊接接头的疲劳性能。结果表明, 在经过 1×10^5 周次循环载荷后, 各个部位残余应力发生较大松弛, 在经过 2×10^5 周次后, 应力松弛较 1×10^5 周次时松弛幅度降低。在 2×10^5 周次后, 应力松弛不再明显, 最终残余应力分布在拉应力 20 ~ 40 MPa 之间。当引入残余应力后, 各种条件下的实际应力循环比发生了明显的变化, 当应力比 $R \geq 0$ 时, 随着 R 的增大, 平均应力增大, 试样的疲劳周次显著下降。残余压应力会使裂纹萌生的周期缩短, 同时加快疲劳裂纹扩展速率。

关键词: 残余应力; A7N01 铝合金; 疲劳; 预制残余应力

中图分类号: TG 404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)09-0023-06

0 序 言

A7N01 高强度铝合金具有优良的挤压性能, 能挤压成形状复杂的薄壁型材, 也具有优良的常温时效特性和焊接性能, 焊缝在焊接过程中因焊接热而产生的软化, 经过自然时效后可以得到恢复, 很适合制造焊接后不便进行热处理的焊接构件, 因此作为焊接结构材料而受到重视, 是高速列车底架等重要承载部件的主要焊接结构材料。高速列车底架等重要承载部件的主要制造工艺是焊接, 而由于焊接工艺的特殊作用机理, 不可避免地在焊接结构中存在较大的残余应力。

国内外的大量研究表明^[1-5], 高速列车铝合金焊接结构主要发生焊接热影响区开裂或焊缝开裂等疲劳失效, 而焊缝区等应力集中部位被视为可能发生疲劳破坏的危险部位。

路浩等人^[6,7]采用超声波法对高速列车车体侧墙典型对接接头残余应力进行了测试, 苟国庆等人^[8]采用 X 射线衍射法、盲孔法、数值模拟的方法分别对高速列车车体车顶典型对接接头残余应力进行了研究, 车顶焊接接头残余应力峰值可达到

146.3 MPa, 而铝合金焊接接头的焊缝疲劳的许用应力为 39 MPa^[9], 可以认为残余应力对焊接结构的疲劳强度有着非常显著的影响。闫德俊^[10]在研究焊接残余应力对疲劳裂纹扩展的影响中指出, 残余拉应力提高了应力水平, 改变了最大应力强度因子 K_{max} , 应力强度因子 ΔK 以及应力比 R , 进而提高了疲劳裂纹扩展速率。文中以高速列车铝合金焊接结构为主要对象, 研究残余应力在疲劳过程中的动态演变规律, 并通过热处理、预拉伸、表面处理等方法在铝合金焊接接头表面预制残余应力, 研究残余应力对铝合金焊接结构疲劳性能的影响。

1 试验方法

首先针对 A7N01 铝合金底架型材进行疲劳试验, 型材的形状尺寸见图 1 所示。对焊缝的测试位置帖上应变片, 并将此时应变仪清零; 将试样置于 MTS-793 结构疲劳试验机上, 进行循环交变载荷, 加

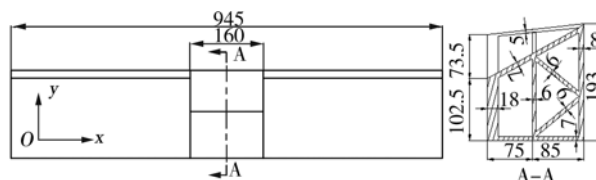


图 1 试件形状及尺寸 (mm)

Fig. 1 Dimension of samples of underframe

收稿日期: 2015-08-08

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (2015BAG12B01); 国家重点基础研究资助项目 (2014CB660807); 中央高校基本科研经费资助项目 (2682014CX003)。

载条件为:室温, $R = 0.1$, 加载力的变化按正弦曲线变化;采用 iXRD 残余应力测试系统测量循环 1×10^5 , 2×10^5 , 5×10^5 , 1×10^6 , 2×10^6 , 5×10^6 , 1×10^7 周次之后试件的残余应力. 循环交变载荷试验在 MTS793 疲劳试验机上进行, 试验机的加载频率为 10 Hz, 试验机的加载范围为 0 ~ 500 kN.

研究不同的表面预制残余应力方法对疲劳性能的影响时, 采用高速列车常用的 A7N01P-T4 铝合金材料为焊接母材, 选取 ER5356 焊丝为焊接材料, 焊接工艺选择为双脉冲形式的脉冲 MIG 焊.

当采用预拉伸法进行试样处理时, 共选取 4 根试样, 选其中 1 根焊接接头先进行拉伸求得焊接接头的屈服强度为 200 MPa. 将剩下的 3 根焊接接头拉伸试样(编号为 YW-1 ~ YW-3)置于 DNS300 万能电子拉伸试验机上进行预拉伸, 预拉伸载荷取接头屈服强度的三分之二(133 MPa), 加载速度为 2 mm/s.

当采用表面处理法进行试样处理时, 共选取 6 根试样, 其中 3 根喷玻璃丸进行表面处理, 编号为 BW-1 ~ BW-3, 另外 3 根喷钢丸进行表面处理. 在选用玻璃丸进行处理时, 选取的玻璃丸直径 0.5 mm, 压力 0.6 MPa, 喷嘴与试件表面法线夹角为 15° , 喷嘴距离工件表面距离为 200 mm. 在选用钢丸进行处理时, 选取的钢丸直径 1 mm, 压力 0.6 MPa, 喷嘴

与试件表面法线夹角为 15° , 喷嘴距离工件表面距离为 200 mm.

对未预制残余应力的试样以及采用不同方法预制残余应力的试样, 分别选择其中 1 个试样, 采用 iXRD 残余应力系统对试样进行残余应力测试, 测试线垂直于焊缝, 平行于疲劳试验加载方向.

对所有试样采用 PLG-100 电磁共振疲劳试验机进行疲劳试验, 加载条件为室温, $R = 0$, 加载力的变化按正弦曲线变化, 试验机的加载频率为 90 ~ 110 Hz, 试验加载载荷取 5 ~ 7 个应力等级.

2 试验结果及讨论

在进行 A7N01 铝合金底架型材结构疲劳试验时, 分别取应力等级 50.1, 79.4 以及 110 MPa, 在此条件下测试残余应力的动态变化, 结果分别如图 2 ~ 图 4 所示.

由图 2 ~ 图 4 可以看出, 在不同的应力等级下, 在经过 1×10^5 周次循环载荷后, 各个部位残余应力发生较大松弛, 并且分布规律曲线近似相同. 在经过 2×10^5 周次后, 应力继续发生松弛, 但较 1×10^5 周次时松弛幅度降低. 在 2×10^5 周次后, 应力松弛不再明显, 残余应力分布趋于稳定, 最终残余应力分布

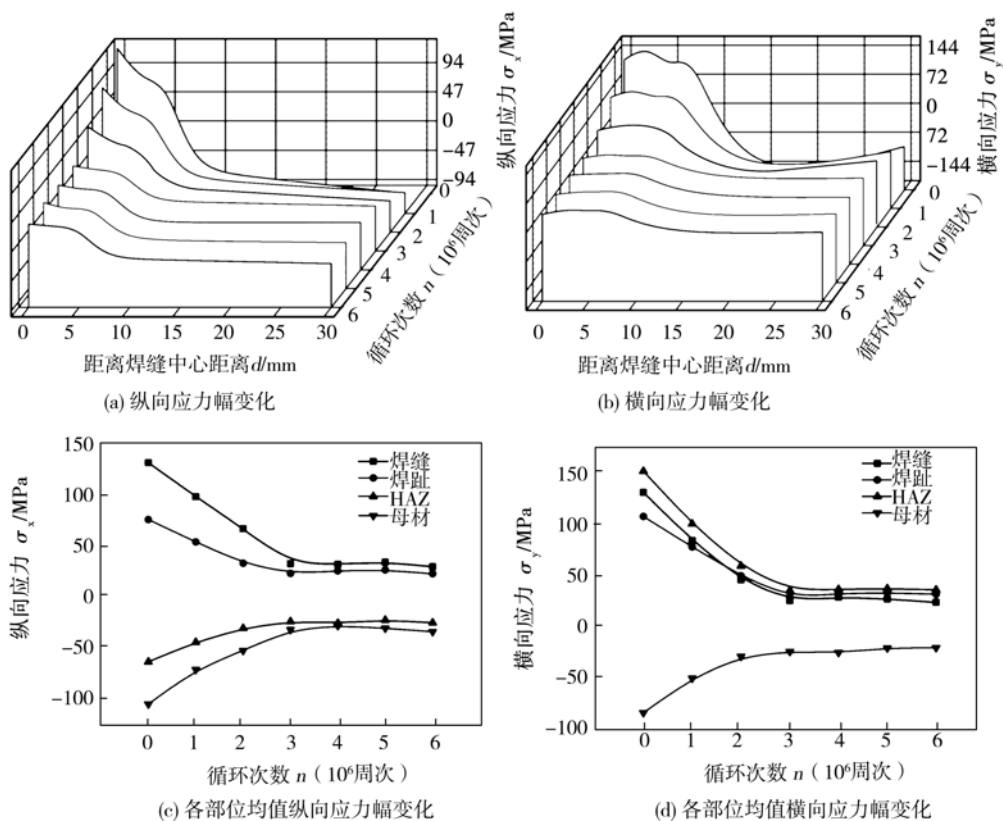


图 2 50.1 MPa 应力水平条件下, 循环交变载荷过程中应力幅变化

Fig. 2 Change of residual stress amplitude under cyclic alternating load of 50.1 MPa presetting load

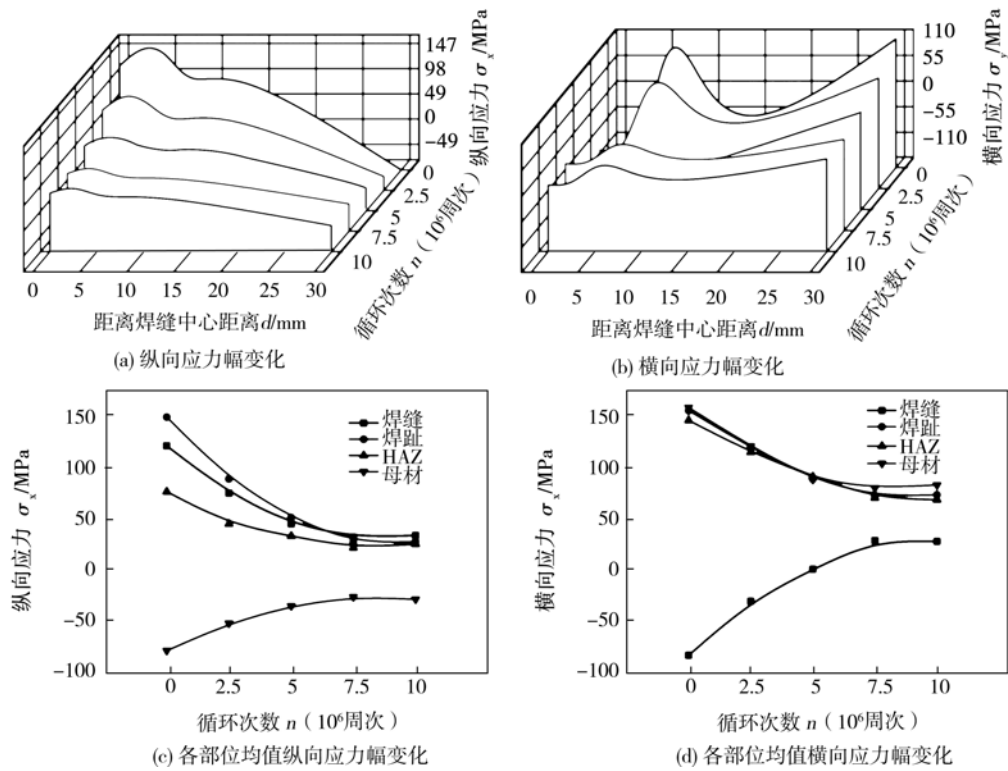


图3 79.4 MPa 应力水平条件下,循环交变载荷过程中应力幅变化

Fig. 3 Change of residual stress amplitude under cyclic alternating load of 79.4 MPa presetting load

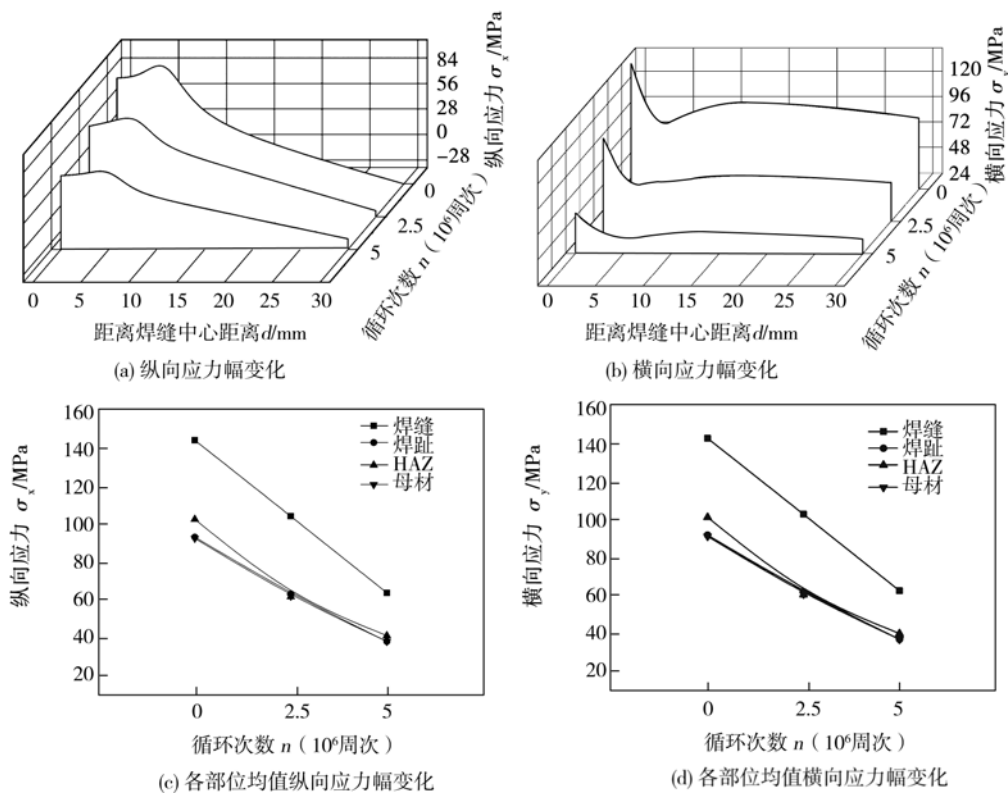


图4 110 MPa 应力水平条件下,循环交变载荷过程中应力幅变化

Fig. 4 Change of residual stress amplitude under cyclic alternating load of 110 MPa presetting load

在拉应力 20 ~ 40 MPa 之间. 残余应力松弛不但与内部位错运动有关, 同时与材料内部弹性存储能的大小有关, 从热力学角度考虑, 合适条件下处于高能态的组织必将趋于平衡态, 残余应力松弛是其外在表现之一.

图 5 是试样预拉伸前后, 试样表面的残余应力分布规律. 图 6 是试样预拉伸前后, 试样的疲劳 S-N 曲线分布.

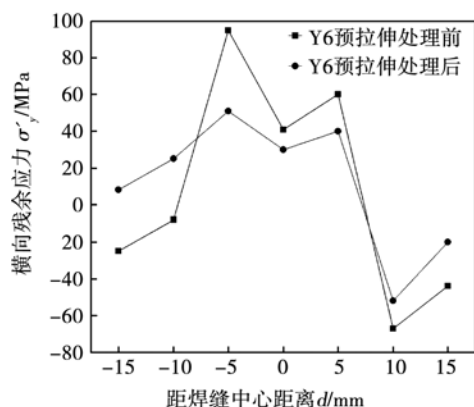


图 5 预拉伸前后 Y6 试样残余应力分布曲线

Fig. 5 Distribution of residual stress of Y6 sample that was treated before and after with pre tension

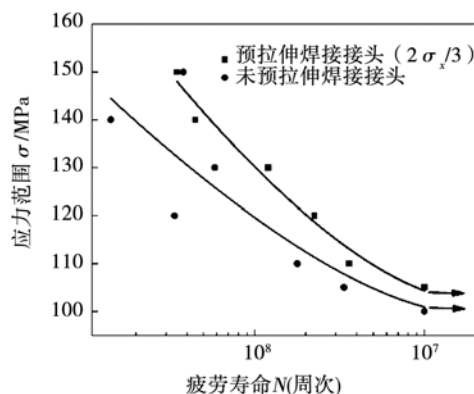


图 6 预拉伸前后焊接接头 S-N 曲线

Fig. 6 S-N curves of the welded joints that were treated before and after with pre tension

从图 5 发现, A7N01P-T4 焊接接头预拉伸处理后横向残余拉应力值变小了, 残余应力峰值预拉伸处理前为 98.63 MPa, 出现在熔合线上, 热处理后降为 53.62 MPa, 也是预拉伸处理后的接头极大值; 预拉伸处理后接头残余应力分布更为均匀和平缓了, 预拉伸起到了类似热处理降低残余应力峰值和均匀化残余应力分布的作用.

从图 6 以看出, A7N01P-T4 焊接接头预拉伸处理前后的条件疲劳极限分别为 100 MPa 和 105

MPa, 说明预拉伸处理使焊接接头疲劳极限有所提高, 提高了 5%. 这是由于焊接接头焊缝及其附近本身存在一定的残余拉应力, 经过预拉伸处理后, 残余拉应力值降低了 (图 5), 使得在疲劳试验过程中的平均应力降低, 从而提高了焊接接头的疲劳极限.

图 7 是试样表面处理前后, 试样表面的残余应力分布规律. 图 8 是试样表面处理前后, 试样的疲劳 S-N 曲线分布.

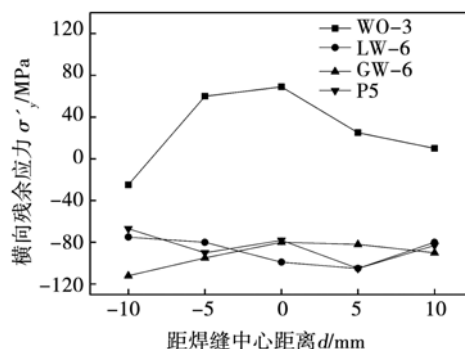


图 7 表面处理前后 Y6 试样残余应力分布曲线

Fig. 7 Distribution of residual stress of samples that was treated before and after with surface treatment

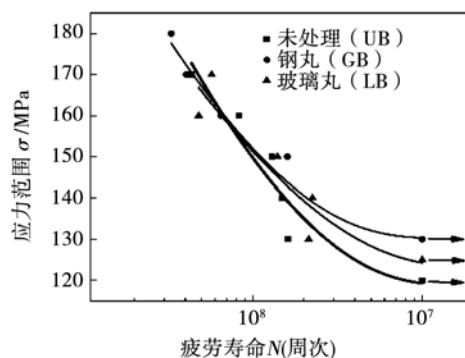


图 8 表面处理前后焊接接头 S-N 曲线

Fig. 8 S-N curves of welded joints that were treated before was and after with surface treatment

从图 7 可以发现, 不管是母材还是焊接接头, 经过喷砂和喷丸处理, 均为残余压应力, 而且分布在 -70 ~ -110 MPa 之间. 从图 8 可以发现, A7N01P-T4 焊接接头经过喷玻璃丸和钢丸处理与未处理焊接接头的条件疲劳极限分别为 110, 110 和 100 MPa. 相比于未处理焊接接头, 疲劳极限提高 10%.

经过喷丸处理, 焊接接头形成一层表面压应力层, 压应力的存在, 降低了疲劳加载过程中原有的平均应力, 从而提高了焊接接头的疲劳强度.

3 残余应力对疲劳的影响机理分析

当构件中存在残余应力时,残余应力叠加到工作载荷上,直接改变载荷的大小,进而改变应力比、应力强度因子幅值等疲劳裂纹扩展重要参量的大小,但在循环载荷的作用下,残余应力会产生松弛现象.并且由于残余应力是个分布值,在截面上各个部位的应力值并不相等,因此随着疲劳过程的进行,残余应力发生重分布,残余应力值还在不断变化.

这些变化导致在疲劳试验过程中,实际应力比(或称有效应力比 R_{eff})不断变化.

因此应该考虑疲劳试验过程中的实际应力比,分析认为,实际应力比为

$$R_{\text{eff}} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_{\min} + \sigma_r}{\sigma_{\max} + \sigma_r} \quad (1)$$

式中: R_{eff} 为实际应力比; σ_r 为残余应力值; σ_{\min} 为循环加载最小应力幅; σ_{\max} 为循环加载最大应力幅.

当分别采用热处理法、预拉伸法、表面处理法进行表面残余应力预制时,实际应力比如表1所示.

表1 不同表面残余应力预制方法下的实际应力比

Table 1 Real stress ratio under different surface pre-residual stress technology

处理方法	处理状态	原始应力比 R	选定加载应力 σ_1/MPa	选定位置距焊缝中心 距离 d/mm	表面残余应力 状态 σ'_1/MPa	实际应力比 R_{eff}
热处理	热处理前	0	140	0	62.92	0.31
	热处理后	0	140	0	27.77	0.17
预拉伸	预拉伸前	0	140	0	45.37	0.24
	预拉伸后	0	140	0	31.96	0.19
表面处理	未处理	0	140	0	75.24	0.35
	玻璃丸处理	0	140	0	-89.24	-
	钢丸处理	0	140	0	-73.41	-

由表1分析可知,当引入残余应力后,各种条件下的实际应力循环比发生了明显的变化,当 $R \geq 0$ 时,随着 R 的增大,试样的疲劳周次显著下降.

在进行 Goodman 曲线研究时,可以认为残余应力与疲劳强度存在一定的线性关系,即

$$\sigma_a = \sigma_D - \frac{\sigma_D}{R_m}(\sigma_m + \sigma_R) \quad (2)$$

式中: σ_a 为许用应力幅; σ_m 为平均疲劳应力; σ_D 为代表条件疲劳极限(即不存在残余应力时的疲劳极限); R_m 为材料的断裂拉伸强度; σ_R 为加载应力方向的残余应力.

当在疲劳试验过程中存在裂纹时,对于疲劳试样的裂纹扩展阶段,残余应力会促使裂纹萌生的周期缩短,同时会改变裂纹扩展的速度.而对于脆性断裂,残余应力 σ_R 叠加加载应力 σ_s , $\sigma_s + \sigma_R = \sigma_f$, 当实际加载应力 σ_f 超过临界值时,裂纹首先在一个晶粒内部产生,并迅速在这个晶粒周围的晶粒延续扩展,从而导致脆性断裂.

4 结 论

(1) 在不同循环加载载荷后,残余应力发生松弛并最终分布趋于稳定,拉应力在 20 ~ 40 MPa 之间.残余应力松弛不但与内部位错运动有关,同时

与材料内部弹性存储能的大小有关,合适条件下处于高能态的组织必将趋于平衡态.

(2) 预拉伸、表面喷丸等处理方法均可以从一定程度上降低残余应力,并提高了焊接接头的疲劳强度,但并未改变接头的断裂性质.

(3) 当引入残余应力后,各种条件下的实际应力循环比发生了明显的变化,当 $R \geq 0$ 时,随着 R 的增大,试样的疲劳周次显著下降.

(4) 对于疲劳试样的裂纹萌生阶段,残余应力会促使裂纹萌生的周期缩短,同时会改变裂纹扩展的速度.

参考文献:

- [1] Smith R A. 疲劳裂纹扩展—30 年来的发展[M]. 顾海澄,译. 西安交通大学出版社, 1988.
- [2] Jun HyunKyu, Jung Hyunseung, Lee Dong-Hyung, et al. Fatigue crack evaluation on the underframe of EMU carbody[J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1): 893-900.
- [3] Clormann U H, Seeger T. Local stresses and strains in weldments as a basis of the proof of fatigue strength[M]. Low Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behaviour of Materials, Springer Netherlands, 1987.
- [4] Diaye AN', Hariri S, Pluvineau G. Stress concentration factor analysis for notched welded tubular T-joints[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(8): 1554-1570.

- [5] 苟国庆, 黄楠, 陈辉, 等. 高速列车 A7N01S-T5 铝合金焊接接头盐雾腐蚀行为分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(10): 17-20.
Gou Guoqing, Huang Nan, Chen Hui, *et al.* Analysis on corrosion behavior of welded joint of A7N01S-T5 aluminum alloy for high-speed train [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(10): 17-20.
- [6] 路浩, 马子奇, 刘雪松, 等. 300 km/h 高速列车车体残余应力超声波法无损测量[J]. 焊接学报, 2010, 31(8): 29-32.
Lu Hao, Ma Ziqi, Liu Xuesong, *et al.* Ultrasonic residual stress measurement of 300 km/h high speed train body [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(8): 29-32.
- [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] 苟国庆, 黄楠, 陈辉, 等. X 射线衍射法测试高速列车车体铝合金残余应力[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(4): 618-622.
Gou Guoqing, Huang Nan, Chen Hui, *et al.* Detection of residual stress in aluminum alloy carbody of high speed train using X-ray diffraction technology [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(4): 618-622.
- [9] European Committee for Standardization (CEN). DD ENV 1999-2:2000. Design of aluminum structures; part 2: structures susceptible to fatigue brussels [S]. Brussels, Belgium. European Standards (ES), 1998.
- [10] 闫德俊. 高速列车底架用铝合金焊接接头疲劳裂纹扩展特性 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2011.

作者简介: 丁叁叁, 男, 1967 年出生, 博士研究生, 教授级高级工程师. 长期从事机车/地铁/动车组产品研发工作. 发表论文 20 余篇. Email: sf-dingsansan@cqsf.com

通讯作者: 李强, 男, 教授, 博士研究生导师. Email: 15816314@qq.com

书 讯



书号: 978-7-111-53876-9
作者: 中国机械工程学会焊接学会 编
机电工程数字化手册编制组 制作
定价: 499.00 元

◇ 方便快捷查询

◇ 曲线对线取值

◇ 自行创建资源

《焊接数字化手册——焊接结构》

本数字化手册收录了近几年国内外焊接生产技术飞速发展的成果、现行的国内外标准, 以数据表、网页表、图片、曲线的方式, 展现了包括焊接结构基础、典型焊接结构设计和焊接结构生产等方面的标准技术资料。焊接结构基础主要包括接头设计、力学性能、变形、疲劳、环境效应等; 典型焊接结构设计涵盖了机械、建筑、铁路、船舶、汽车、航空航天等行业中典型焊接结构的形式及焊接参数的设计; 焊接结构生产主要包括焊接制造工艺、检测、组织与经济、车间设计、安全防护等。

编辑热线: 010-88379644 购书热线: 010-88379425 传真: 010-68351729 焊接微信公众号: 进入微信搜索“好焊悦读”
传真购书请注明: 姓名、详细地址、邮编、联系电话、传真、E-mail、所购图书书名、书号、数量、是否需要发票及发票抬头