

基于三维 X 射线成像和 GTN 模型的激光复合焊接 7020 铝合金的损伤机制

段浩¹ 吴圣川¹ 徐忠伟¹ 张志良² 阚前华¹ 康国政¹ 付亚楠³

¹西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031

²挪威科技大学结构工程系, 特隆霍姆 N-7491, 挪威

³中国科学院上海应用物理研究所上海同步辐射光源, 上海 201204

摘要 利用高精度同步辐射 X 射线三维成像技术, 对激光-电弧复合焊缝的气孔率进行测定, 并将其作为 GTN 损伤模型中的初始孔洞体积分数。通过建立含余高与不含余高的复合焊接接头的细观损伤力学有限元模型, 得到了拉伸接头主应力和孔洞体积分数的分布。通过对拉伸断口金相组织进行分析, 发现了几何和材料的不连续性是导致接头失效的重要原因。

关键词 激光技术; GTN 细观损伤模型; 激光-电弧复合焊接; 7020 铝合金; 同步辐射 X 射线; 疲劳损伤

中图分类号 TG404; TG113.25

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1002005

Damage Mechanism of Hybrid Welded 7020 Aluminium Alloy Based on Three-Dimensional X-Ray Micro-Tomography and GTN Model

Duan Hao¹ Wu Shengchuan¹ Xu Zhongwei¹ Zhang Zhiliang² Kan Qianhua¹
Kang Guozheng¹ Fu Yanan³

¹State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

²Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim N-7491, Norway

³Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Institute of Applied Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China

Abstract By the high resolution synchrotron radiation X-ray three-dimensional micro-tomography technology, the porosity in laser-arc hybrid welds is characterized, which is taken as the initial void volume fraction in the GTN mesoscopic damage model. The finite element models of mesoscopic damage mechanics for hybrid welded joints with and without reinforcement are developed, and the principal stress and the void volume fraction distribution of tensile joints are obtained. Via the metallographic structure analysis of tensile fractures, it is shown that the geometrical and material discontinuity is the important reason for joint failure.

Key words laser technique; GTN mesoscopic damage model; laser-arc hybrid welding; 7020 aluminum alloy; synchrotron radiation X-ray; fatigue damage

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390; 100.6890

1 引言

7020 铝合金具有较高的比强度、较好的韧性、优良的耐腐蚀性和焊接性, 广泛应用于我国高速动车组铝合金车体、受电弓等部件中, 其中焊接接头是最容易发生损坏的部位。目前, 国内外学者对各种焊接接头的

收稿日期: 2016-05-13; **收到修改稿日期:** 2016-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(11572267)、牵引动力国家重点实验室开放基金(2015TPL-T07, TPL1505)

作者简介: 段浩(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事疲劳断裂方面的研究。E-mail: dhok321@163.com

导师简介: 吴圣川(1979—), 男, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事工程结构抗疲劳断裂设计及其仿真软件开发方面的研究。E-mail: wusc@swjtu.edu.cn(通信联系人)

损伤行为进行了大量的研究。邬华芝等^[1]建立了基于焊接接头宏观、微观疲劳失效特征参量的疲劳损伤演化模型。张国栋等^[2]对高温焊接接头残余应力作用下的蠕变损伤行为进行了有限元模拟。赵超凡等^[3]采用 X 射线-计算机断层扫描(CT)和电测技术同步记录焊接接头内部细观结构和宏观力学性能变化过程。Wang 等^[4]运用连续损伤力学研究了焊接接头热影响区(HAZ)的低周期疲劳损伤演化。Wang 等^[5]研究了点焊接头损伤区域与自然频率的关系。

1977 年, Gurson^[6]建立了多孔延性材料的细观损伤模型。此后, Tvergaard 等^[7]对模型进行修正和完善, 最终形成了著名的 GTN 损伤模型。在应用 GTN 模型时, 初始孔洞体积分数是一个极为重要的材料参数, 直接决定着模型准确性、合理性和可靠性。第三代同步辐射 X 射线光源具有高能量、高亮度、高准直性和高分辨率等显著优势, 可以非破坏性地得到金属材料内部微结构的尺寸及分布特征^[8-9]。

近年来, GTN 模型在材料的损伤行为研究中得到了广泛应用。孙慧敏等^[10]采用 GTN 损伤模型对转子钢焊接接头延性裂纹扩展进行了有限元模拟。王明正等^[11]采用反向标定法确定了 GTN 模型的损伤参数。陈志英等^[12]基于 GTN 模型, 对铝合金板材圆杯拉伸成形损伤破坏过程进行了数值模拟计算。He 等^[13]建立了铝合金薄板成形极限应力图预测模型。Shen 等^[14]采用同步辐射 X 射线成像技术将 AA6061 铝合金裂纹萌生及扩展过程进行了三维图像化显示。Nègre 等^[15]通过对铝合金激光焊接接头的母材区(BM)、HAZ、焊缝区(WM)进行微平面拉伸、断裂韧性试验, 并用 GTN 模型进行了数值模拟计算, 试验结果与模拟结果相吻合。Zhang 等^[16]通过结合 GTN 模型中的孔洞演变和塑性极限载荷模型^[17], 建立了完全 Gurson 模型。该模型的最大优势是无需事先选择或确定临界孔洞体积分数。本文使用的是完全 Gurson 模型。

本文基于上海同步辐射光源(SSRF)成像线站 13W1 和欧洲光源(ESRF)成像线站 ID19 开展了激光-电弧复合焊接 7020 铝合金的缺陷识别研究, 解析得到了母材和接头的气孔率等各项参数, 采用 GTN 损伤模型对焊接接头的拉伸过程进行了模拟。分别分析了含余高和无余高的复合焊接接头相关试验结果, 揭示了焊接结构的损伤失效机制。

2 GTN 损伤模型

2.1 GTN 模型简介

Tvergaard 和 Needleman 修正后的 GTN 模型屈服面方程为

$$\left(\frac{\sigma_{\text{eq}}}{\sigma_m}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{3q_2 \sigma_H}{2\sigma_m}\right) - (1 + q_3 f^{*2}) = 0, \quad (1)$$

式中 σ_m 为名义应力, σ_{eq} 为 Von-Mises 等效应力, σ_H 为静水压力; q_1, q_2, q_3 是由 Tvergaard^[18]引入的对原始 Gurson 模型的修正参数, 主要考虑孔洞间相互作用, 取 $q_1 = 1.5, q_2 = 1, q_3 = 2.25$; f^* 为总的等效孔洞体积分数, 是孔洞体积分数 f 的函数。

(1)式中 f^* 定义为

$$f^* = \begin{cases} f, & f \leq f_c \\ f_c + \frac{f_u^* - f_c}{f_F - f_c}(f - f_c), & f > f_c \end{cases}, \quad (2)$$

式中 f_u^* 表示应力承载能力为零时的极限孔洞体积分数, $f_u^* = 1/q_1$; f_c 为孔洞开始发生聚合时的临界孔洞体积分数; f_F 为材料破裂时的孔洞体积分数, $f_F = 0.15 + 2f_0$, f_0 为初始孔洞体积分数。当孔洞合并开始且 $f \leq f_c$ 时, 用 f^* 替换(2)式中的 f 。

损伤演化包括孔洞长大和孔洞形核引起的损伤变化, 即

$$\Delta f = \Delta f_{\text{growth}} + \Delta f_{\text{nuclation}}. \quad (3)$$

假设基体材料具有不可压缩性, 则孔洞增长速率可以表示为

$$\Delta f_{\text{growth}} = (1 - f) \boldsymbol{\varepsilon}^p : \mathbf{I}, \quad (4)$$

式中 $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ 是塑性应变张量, \mathbf{I} 是二阶单元张量, $:$ 为张量中双点积运算。

孔洞形核率公式为^[19]

$$\Delta f_{\text{nucleation}} = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_M^p - \epsilon_N}{S_N} \right)^2 \right] \epsilon_M^p, \quad (5)$$

式中 f_N 为形核粒子的体积分数, ϵ_M^p 为等效塑性应变, ϵ_N 为孔洞形核时的平均应变, S_N 为形核应变的标准差。

2.2 GTN 模型参数的确定

图 1 所示为同步辐射 X 射线三维成像显微断层扫描的基本原理图。

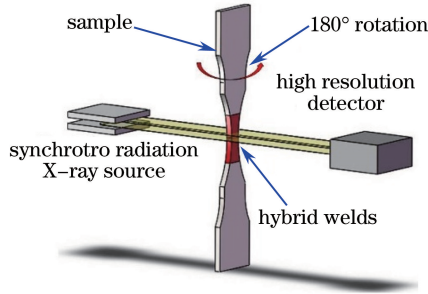


图 1 同步辐射 X 射线断层扫描示意图

Fig. 1 Schematic diagram of synchrotron radiation X-ray tomography

具体步骤如下。

1) 进行 X 射线显微断层扫描得到断层照片。主要试验参数为:光子能量约为 19 keV,试样与探测器探头的间距为 15 cm,扫描断层曝光时间为 2.0 s,拍摄照片为 900 张,空间分辨率为 1.85 μm ,每个体素的体积约为 6.33 μm^3 。

2) 使用 SSRF 开发的 P3 和 P3B 软件对断层照片进行相位恢复、重构及灰度转换等处理,获得试样的 8 位切片数据。

3) 基于商业三维重构软件 Amira 和开源软件 Image J 对切片中的气孔进行标记、分割和三维特征参数的测量。主要测量的参数包括气孔体积 V 、表面积 S 、椭球拟合参数等,通过测算得到接头的气孔率,作为初始孔洞体积分数。

4) 对所得到的气孔形貌及分布特征进行辨识和统计分析。在对气孔形貌的统计分析时,仅考虑含 21 个体积像素(约为 21 \times 6.33 μm^3)以上的微气孔。

图 2 所示为铝合金激光-电弧复合焊接接头内部三维气孔的形貌和分布情况。

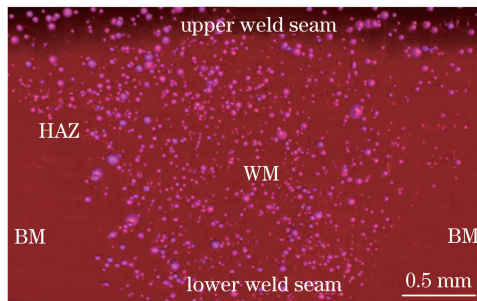


图 2 复合焊接接头中三维气孔分布

Fig. 2 3D pores distribution inside hybrid welded joints

统计发现,接头中的气孔总数约为 3332 个,大部分为冶金型气孔,即氢气孔,形貌多为规则的球形,内壁光滑洁净^[20-21]。由图 2 可观测到,接头中的气孔大小不一致,分布极其不均匀,上部气孔数量稀疏且尺寸较大,下部较为密集但尺寸较小。这表明焊缝下部在冷却时溢出的气孔未长大便发生凝固,导致气孔尺寸小、数量多;而上部气孔发生上浮、长大,尚未逃逸便遗留在焊缝中,导致气孔尺寸大、数量少。

使用 Amira 和 Image J 软件可直接测得含余高接头的气孔率,即 GTN 模型中所需要的初始孔洞体积分数 f_0 。而对于无余高接头需要作相应的处理,即将相同的断层扫描照片上部含余高区域切除(模拟去除

余高的打磨过程),再使用软件测得无余高接头的初始孔洞体积分数 f_0 。含余高、无余高接头各区域初始孔洞体积分数 f_0 见表 1。

表 1 含余高和无余高接头各区域初始孔洞体积分数

Table 1 Initial void volume fraction at each area of joints with and without reinforcement

	WM with reinforcement	HAZ with reinforcement	BM with reinforcement	WM without reinforcement	HAZ without reinforcement	BM without reinforcement
$f_0/\%$	0.26	0.25	0.24	0.32	0.28	0.24

在进行接头的有限元仿真时,多把接头分为 WM 和 BM 两部分,很少考虑位于中间的 HAZ。实际上,由于所经受的热循环过程极为复杂,HAZ 是一个具有较大组织梯度和性能梯度的非均匀体,因此很难精确测定其材料属性。研究发现 HAZ 的材料属性介于 WM 和 BM 之间,故 HAZ 的材料属性取 WM 和 BM 相关属性的平均值^[15,22]。

一般地,可以通过拉伸试验得到母材和接头的拉伸曲线,并取介于两者之间的数据折算出 HAZ 的拉伸数据,三个区域的应力-应变曲线如图 3 所示。

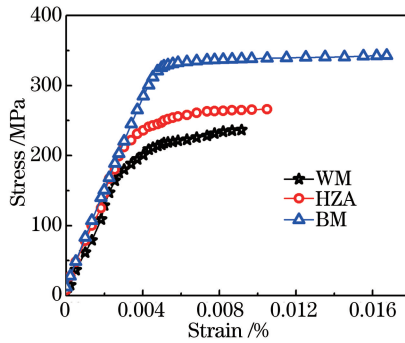


图 3 WM、HAZ 和 BM 应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves at WM, HAZ and BM

图 2 中各区域的拉伸性能数据见表 2。

表 2 焊接接头 WM、HAZ 和 BM 拉伸性能

Table 2 Tensile properties at WM, HAZ and BM of welded joints

	Young modulus / (10^4 MPa)	Tensile strength / (10^2 MPa)
WM	7.3399	2.6171
HAZ	7.1038	3.0784
BM	6.8678	3.6278

2.3 接头有限元模型

模型实际结构如图 4 所示,即试验中拍摄的 7020 铝合金激光-电弧复合焊接接头金相图。由图 4 可知,焊缝下端截面窄小,上端截面相对宽大,焊缝边界近似于一条双曲线,整个接头截面呈漏斗形。在建立含余高接头模型时,需要将各尺寸数据调整成与实际结构尺寸一致,而无余高接头将余高部分切除即可,其他尺寸保持一致。这样建立的模型更接近真实试验中的焊缝,其结果也更准确,可信度更高。

针对含余高和无余高两种接头,分别采用三维实体模型模拟内部缺陷变化情况以及二维平面模型模拟

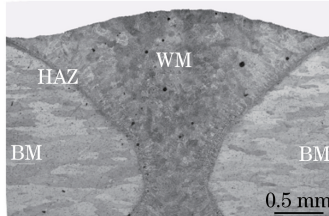


图 4 复合焊接接头的显微组织

Fig. 4 Microstructure of hybrid welded joints

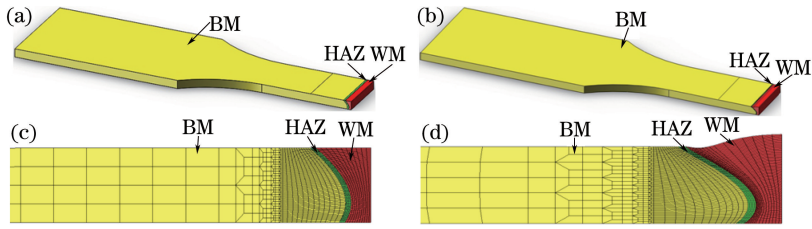


图 5 7020 铝合金复合焊接接头各类有限元模型。(a) 三维无余高接头模型;

(b) 三维含余高接头模型;(c) 二维无余高接头网格模型;(d) 二维含余高接头网格模型

Fig. 5 All kinds of finite element models of hybrid welded joints of 7020 aluminum alloy.

(a) 3D model of joint without reinforcement;(b) 3D model of joint with reinforcement; (c) 2D mesh model of joint without reinforcement; (d) 2D mesh model of joint with reinforcement

应力分布情况,模型结构如图 5 所示。

三维接头模型的尺寸与真实拉伸试样尺寸一致,试样半长为 80 mm,焊缝宽为 12 mm,夹持端宽为 24 mm,圆弧过渡半径为 30 mm。三维模型中的网格单元类型为 C3D8 单元,二维模型中的网格单元类型为 CPE4 单元。为保证模拟计算的准确性及高效性,对 WM、HAZ 和 BM 三者交汇处的网格进行细密剖分,而将 BM 其他区域剖分为较粗大的网格。

由于模型均采用对称半模型结构,故在焊缝中心处施加对称固定约束,试样夹持端通过控制一定的位移量来施加载荷。最后,使用完全 Gurson 模型 UMAT 子程序进行模拟计算。

3 结果与分析

3.1 主应力分布

图 6 给出了为无余高和含余高接头模型的平面应力分布情况。

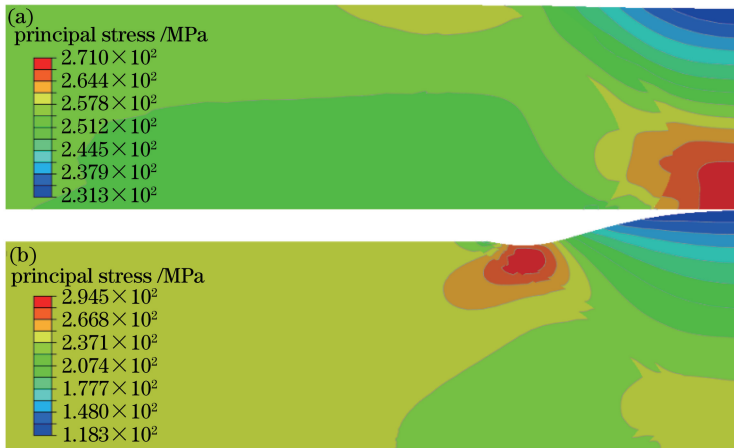


图 6 有无余高接头内的主应力分布云图。(a) 无余高;(b) 含余高

Fig. 6 Cloud pictures of principal stress distributions in joints with and without reinforcement.

(a) Without reinforcement; (b) with reinforcement

由图 6 可知,在无余高接头中,从 BM 到 HAZ 再到 WM,应力逐渐增大,最大值位于焊缝偏下侧或背面的焊根附近。应力峰值约为 271.00 MPa,与试验所测焊缝处的抗拉强度(261.71 MPa)接近,这表明在外部加载条件下,此处会形成应力集中点,从而导致焊接接头断裂。

结合复合焊接接头的金相观测结果,发现背面焊根处存在明显的层状热裂纹,如图 7 所示。在含余高接头中,从焊缝上端到下端应力逐渐减小,而应力峰值位于正面焊趾处,靠近 HAZ。最大值约为 296.50 MPa,与试验所测得 HAZ 的抗拉强度(307.84 MPa)接近。由此可知,在含余高接头的焊趾处,存在明显的应力集中现象,更易萌生裂纹。

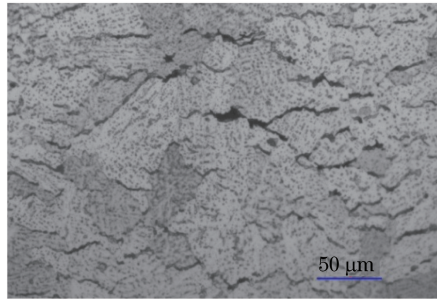


图 7 焊根处金相图

Fig. 7 Metallography of weld root

3.2 孔洞体积分数

孔洞体积分数表示均质或非均质材料内部微孔洞的体积占焊缝总体积的百分比,是一种外力加载下焊缝损伤的具体形式。在定义初始孔洞体积分数 f_0 时,WM 的孔洞体积分数最大,HAZ 次之,BM 最小。相应地,在模拟拉伸试验过程中,接头区域的整体孔洞分布也遵循这样的趋势。图 8 为无余高接头与有余高接头的三维孔洞体积分数的分布云图。

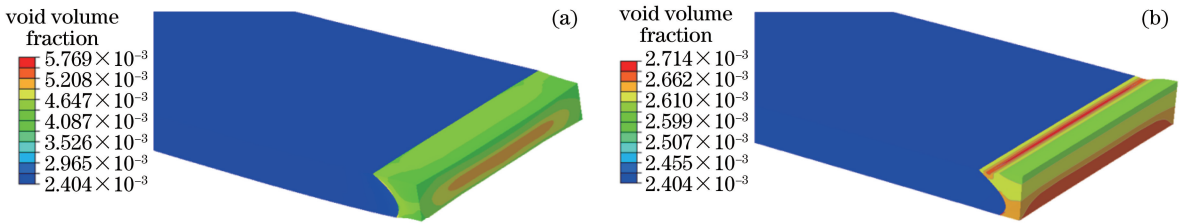


图 8 有无余高接头内的三维孔洞体积分数分布云图。(a)无余高;(b)含余高

Fig. 8 Cloud pictures of 3D void volume fraction distributions in joints with and without reinforcement.

(a) Without reinforcement; (b) with reinforcement

由图 8 可知,母材的孔洞体积分数基本与初始孔洞体积分数接近,即在拉伸过程中,母材内部微孔洞未发生明显变化。而焊接接头内部的初始孔洞体积分数比母材的初始孔洞体积分数大,为一种初始损伤状态,在外加载荷作用下气孔发生变形、聚合,从而导致 WM 在宏观上产生颈缩和断裂现象。图 8 中孔洞体积分数增长表示微孔洞的体积变大、内部损伤增加,故认为原始接头在外力作用下产生损伤和破坏^[23]。

对于无余高接头,焊缝发生较为明显的颈缩。孔洞体积分数较高的区域主要集中在焊缝附近,且峰值位于焊缝下侧部位,数值约为 0.52%。与图 6(a)中的无余高接头应力峰值相比,两者位置接近。对于含余高接头,孔洞体积分数较高的区域同样集中在焊缝附近,峰值位于焊趾处及焊缝下侧。其中,焊趾处的孔洞体积分数更大,约为 0.27%。与图 6(b)的含余高应力分布云图相比,孔洞体积分数峰值分布情况与最大应力区域情况均基本重合。图 9 给出了拉伸断口上的气孔分布,由图可见大量气孔。

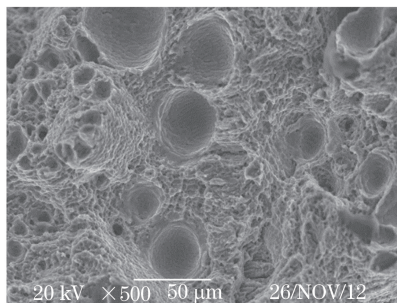


图 9 拉伸断口中的气孔显微结构

Fig. 9 Microstructure of pores inside tensile fracture

对比图 6 和图 8 可知,在无余高接头中,应力集中在焊缝下侧或焊根附近,容易萌生裂纹;在含余高接头

中,虽然焊缝是整个接头中硬度最低的区域,但几何不连续的缺陷可能对接头性能影响更大,即焊趾是应力集中区和最易萌生裂纹的位置。这一点已被 Sato 等^[24]证明,在气孔和余高同时存在时,疲劳裂纹多从焊趾处萌生和扩展。

裂纹萌生是一种典型的表面行为,一般来说,接头处裂纹优先于焊趾处萌生。当去除焊缝上下余高时,内部气孔有可能暴露于表面,此时裂纹往往从被切割的气孔处萌生。气孔与焊趾在萌生裂纹方面的竞争行为,取决于焊缝形貌、加载情况等。

4 结 论

采用高精度同步辐射三维 X 射线成像技术对激光-电弧复合焊缝的气孔率进行了测定,并将其作为 GTN 损伤模型的初始孔洞体积分数,建立了实际接头的细观损伤有限元模型,得到了拉伸接头主应力和孔洞体积分数的分布。接头内孔洞体积分数的变化表明,含余高和无余高的复合焊接接头首先在焊趾处和焊根处萌生裂纹,这是导致接头断裂的重要原因。焊接接头的几何不连续性对接头的性能影响较大,若条件允许,在实际工程中建议去除焊缝余高并打磨焊根,以降低应力集中效应。

参 考 文 献

- 1 Wu Huazhi, Guo Haiding, Gao Deping. Fractal damage evolution model of low-cycled fatigue in welded joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(1): 88-90.
邬华芝, 郭海丁, 高德平. 焊接接头低周疲劳损伤分形演化模型 [J]. 焊接学报, 2003, 24 (1): 88-90.
- 2 Zhang Guodong, Zhou Changyu. Finite element simulations of welding residual stress and creep damage for welded joint [J]. Acta Metallurgical Sinica, 2008, 44(7): 848-852.
张国栋, 周昌玉. 焊接接头残余应力及蠕变损伤的有限元模拟 [J]. 金属学报, 2008, 44(7): 848-852.
- 3 Zhao Chaofan, Li Zhaoxia. Fractal behavior of cracking in damaged zone of welded structures and its multi-scale characterization [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013, 43(5): 1039-1044.
赵超凡, 李兆霞. 焊接结构损伤区细观裂纹扩展的分形特征及其多尺度损伤表征 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43(5): 1039-1044.
- 4 Wang T J, Lou Z W. A continuum damage model for weld heat affected zone under low cycle fatigue loading [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 37(4): 825-829.
- 5 Wang R J, Shang D G, Li L S, *et al.* Fatigue damage model based on the natural frequency changes for spot-welded joints [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(6): 1047-1055.
- 6 Gurson A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I—Yield criteria and flow rules for porous ductile media [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1977, 99(1): 2-15.
- 7 Needleman A, Tvergaard V. An analysis of ductile rupture in notched bars [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1984, 32(6): 461-490.
- 8 Wang Shaogang, Wang Sucheng, Zhang Lei. Application of high resolution transmission X-ray tomography in material science [J]. Acta Metallurgical Sinica, 2013, 49(8): 897-910.
王绍刚, 王苏程, 张 磊. 高分辨透射 X 射线三维成像在材料科学中的应用 [J]. 金属学报, 2013, 49(8): 897-910.
- 9 Gao Hongyi, Xie Honglan, Chen Jianwen, *et al.* Experimental research on hard X-ray phase-contrast imaging [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(2): 167-169.
高鸿奕, 谢红兰, 陈建文, 等. 硬 X 射线相位衬度成像的实验研究 [J]. 中国激光, 2005, 32(2): 167-169.
- 10 Sun Huimin, Wang Guozhen, Xuan Fuzhen, *et al.* Numerical simulation of ductile crack propagation in weld joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(8): 105-108.
孙慧敏, 王国珍, 轩福贞, 等. 焊接接头延性裂纹扩展的数值模拟 [J]. 焊接学报, 2010, 31(8): 105-108.
- 11 Wang Mingzheng, Li Xiaoyan. Study on GTN damage model of TC4 titanium alloy by an inverse approach [J]. Rare metal materials and engineering, 2012, 41(5): 795-799.
王明正, 李晓延. TC4 钛合金 GTN 损伤模型反向标定法研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(5): 795-799.
- 12 Chen Zhiying, Dong Xianghuai. Ductile damage analysis for fracture in sheet metalforming based on GTN mesoscopic damage model [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(7): 238-244.
陈志英, 董湘怀. 基于 GTN 细观损伤模型的板料成形过程损伤分析 [J]. 工程力学, 2009, 26(7): 238-244.

- 13 He M, Li F G, Wang Z G. Forming limit stress diagram prediction of aluminum alloy 5052 based on GTN model parameters determined by in situ tensile test[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(3): 378-386.
- 14 Shen Y, Morgeneyer T F, Garnier J, *et al.* Three-dimensional quantitative *in situ* study of crack initiation and propagation in AA6061 aluminum alloy sheets via synchrotron laminography and finite-element simulations[J]. Acta Materialia, 2013, 61(7): 2571-2582.
- 15 Nègre P, Steglich D, Brocks W. Crack extension in aluminium welds: A numerical approach using the Gurson-Tvergaard-Needleman model[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71(16-17): 2365-2383.
- 16 Zhang Z L, Thaulow C, Ødegård J. A complete Gurson model approach for ductile fracture[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 67(2): 155-168.
- 17 Thomason P F. A three-dimensional model for ductile fracture by the growth and coalescence of micro-voids[J]. Acta Metallurgical, 1985, 33(6): 1087-1095.
- 18 Tvergaard V. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions[J]. International Journal of Fracture, 1981, 17(4): 389-407.
- 19 Chu C C, Needleman A. Void nucleation effects in biaxially stretched sheets[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1980, 102(3): 249-256.
- 20 Zhao Lin, Tsukamoto Susumu, Arakane Goro, *et al.* Influence of welding parameters on weld depth and porosity in high power fiber laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103004.
赵琳, 塚本进, 荒金吾郎, 等. 大功率光纤激光焊接过程中工艺参数对熔深和气孔的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103004.
- 21 Zhou Wansheng, Yao Junshan. The welding of aluminum and its alloy[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 48-49.
周万盛, 姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 48-49.
- 22 Qiao Jisen, Chen Jianhong, Zhu Liang. Development of large deformation behavior of aluminium alloy 6063 welded joints and basic components[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(S3): 196-201.
乔及森, 陈剑虹, 朱亮. 6063 铝合金焊接接头及部件大变形力学行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(S3): 196-201.
- 23 Wu S C, Yu C, Zhang W H, *et al.* Porosity induced fatigue damage of laser welded 7075-T6 joints investigated via synchrotron X-ray microtomography[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2015, 20(1): 11-19.
- 24 Sato S, Matsumoto J, Okoshi N. Effects of porosity on the fatigue strength of 5083 alloy butt-welds[J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 1976, 26(8): 393-405.