DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0050-07

基于分维理论的爆炸焊接界面形貌的定量表征*

夏 萌,付艳恕,曾效舒,张宾宾
(南昌大学机电工程学院,江西 南昌 330031)

摘要: 以爆炸焊接界面形貌为研究对象,利用分形理论研究其界面特征。运用三维超景深显微镜获得界面形貌图像,利用 Matlab 图像分析技术对界面形貌进行二值化处理,基于分形理论计算图像分维值以及多重分维谱。由分维值及多重分形谱的物理意义可知,轮廓分维值是对界面不规则程度宏观度量,而多重分形谱能定量表征界面的起伏程度及高度分布。因而,通过对界面结构进行分形几何分析,可实现界面形貌定量表征,弥补当前定性分析的不足。

关键词: 爆炸力学;定量表征;分维;界面形貌;爆炸焊接
中图分类号: O389;TG456.6 **国标学科代码**: 1303599 **文献标志码**: A

随着工业技术的发展和各种新技术、新产业的出现,对材料性能、材料尺寸(甚至特大面积的极限制造)等的要求日益提高,使可制备大面积金属复合材料的爆炸焊接技术得到深入的研究和广泛的应用。普遍认为焊接界面形貌与焊接质量直接相关,因此对其形貌的深入研究与理解可指导爆炸焊接参数设计。史长根等[1]通过研究炸药爆轰特性和爆轰荷载,认为爆轰反应区实际总的压力呈波状分布,而界面波的波幅取决于荷载的大小和基/复板材料的比强度,界面波的波长等于炸药爆轰反应区的宽度;王耀华等[2]将结合界面分为大波状、小波状及微波状 3 种形貌。付艳恕等[3]对铝-铝同质金属爆炸焊接进行实验,观察到界面在宏观上呈波状形貌,但细观形貌随装药比变化,甚至出现不连续现象。张越举等[4]结合界面宏观波状结合形态来判断复合板结合性能,认为界面波曲线越连续、越清晰,基复板的结合越紧密,强度就越高。也有人指出在宏观尺度上均能观察到爆炸焊接波状界面,但界面波不对称[5],且将波状界面形貌分为平直状、小波状和旋涡状[6-7]。各形貌的形成不仅与碰撞能量、碰撞角及基复板几何尺寸有关[5-7],还与金属板表面粗糙度和内部微孔隙等有关[8-9]。

早期的观点及近期发展出的结论,逐步将爆炸焊接界面波存在的不规则性及其对初始条件的依赖呈现出来,但仅限于定性分析。尚未定量分析失稳后界面是呈周期性分布还是发展为高度无规性的混沌和湍流状态;即使是将界面形貌分为大波状、小波状和微波状 3 种,也依然未能对不规则程度进行量化。据此,本文中,以爆炸焊接界面为研究对象,尝试利用分形理论提取界面形貌分维值,建立焊接界面形貌定量分析方法。

1 界面波形成的流体-塑性体模型

爆炸焊接阶段由于基、复板间的高速碰撞,使碰撞区域存在一个强冲击脉冲,导致基、复板结合面薄层发生热软化,并伴随有 Kelvin-Helmholtz 不稳定性[8-9];另外,界面波仅在碰撞及其邻近区域形成,为该区域因碰撞导致的高温、高压作用效果[10]。基于以上结论,建立一个简化的弹塑性-流体模型。该模型假设在碰撞点近邻区域,由于高速碰撞产生的冲击脉冲及爆轰波在复板内侧面的反射,使在复板内侧表面上存在厚度为 h 的热软化薄膜,它沿基体本身以常速 $\dot{\boldsymbol{u}}_0$ 滑动。又由于伴随发生不稳定性,设薄膜在来流入口处已经存在某种频率的法向小扰动,薄膜一面滑动,一面作法向振荡,如图 1 所示。

由图 1 可知,在爆轰波与冲击脉冲作用下,金属呈弹黏塑性流体状态,除了弹性应力外,还有黏性。

* **收稿日期**: 2014-07-10; **修回日期**: 2014-10-28
基金项目: 国家自然科学基金项目(11202093)
第一作者: 夏 萌(1990—),男,硕士研究生; **通讯作者**: 付艳恕,yshfu1982@hotmail.com。

通常可认为该状态下的金属流体具有不可压缩性，因而应力张量分量可写成：

$$\sigma_{ik}=-p\delta_{ik}+G\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k}+\frac{\partial u_k}{\partial x_i}\right)+\mu\left(\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_k}+\frac{\partial \dot{u}_k}{\partial x_i}\right) \tag{1}$$

式中：σ_{ik} 为应力张量分量，u_i 为位移矢量 $\boldsymbol{u}$ 的分量，$\boldsymbol{u}$ 对时间的微商是介质速度，以 $\dot{\boldsymbol{u}}$ 表示。右边第 1 项 p 为流体压力；第 2 项为弹性应力，$G=\dfrac{E}{2(1+\nu)}$，为介质的切变模量，E 为弹性模量，ν 为泊松比；第 3 项为黏性应力，μ 为动力黏性系数。

相应的动量方程可以写成：

$$\rho\ddot{\boldsymbol{u}}+\nabla p=G\Delta\boldsymbol{u}+\mu\Delta\dot{\boldsymbol{u}}+\rho\boldsymbol{g} \tag{2}$$

令 $\mu'=G+\mu\partial/\partial t$，则式(2)可化为：

$$\rho\ddot{\boldsymbol{u}}+\nabla p=\mu'\Delta\boldsymbol{u}+\rho\boldsymbol{g} \tag{3}$$

由图 1 可知，厚度为 L 的飞板在爆轰产物作用下呈流体态，它与空气交界，界面流体发生 Rayleigh-Taylor 不稳定性的密度呈上重下轻条件存在，且薄膜沿基本流以常速 $\dot{\boldsymbol{u}}_0$ 滑动，因而切向速度差存在，具有形成 Kelvin-Helmholtz 不稳定性的条件。由式(1)～(3)可知，流体失稳之后，金属流体表面存在弹性力和黏性力。综合作用效果是，将高频振荡波矢截断，从而抑制失稳的进一步发展，使失稳不会发展为湍流。因此，失稳与表面作用力对高频振荡波矢的竞争效果，最终体现在焊接界面上应该呈现分形特征。

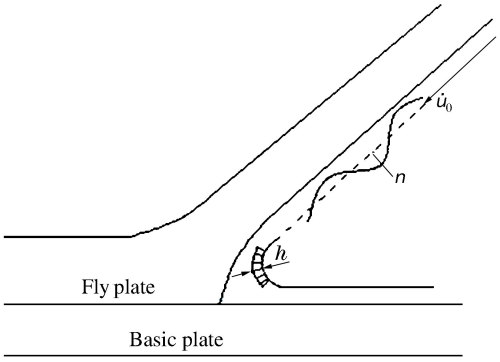

图 1 爆炸焊接界面的流体-塑性体模型

Fig. 1 The flow-plastic model of explosive welding

2　实验方法

实验分别采用上下两层同质 2024 铝薄板为基、复层板进行对称爆炸焊接。为便于焊接界面分开且又不损伤界面，对结合面并不进行细致打磨与清洗。焊接完成后将复合铝板分割成相同大小的样品，其尺寸为 70 mm×40 mm。将焊接界面用机械设备沿爆轰方向缓慢拉开，得到焊接波状界面，如图 2 所示。在样品正面，存在着清晰的边界区域，且中心区域波状明显。在样品侧面，呈现了焊接界面沿爆

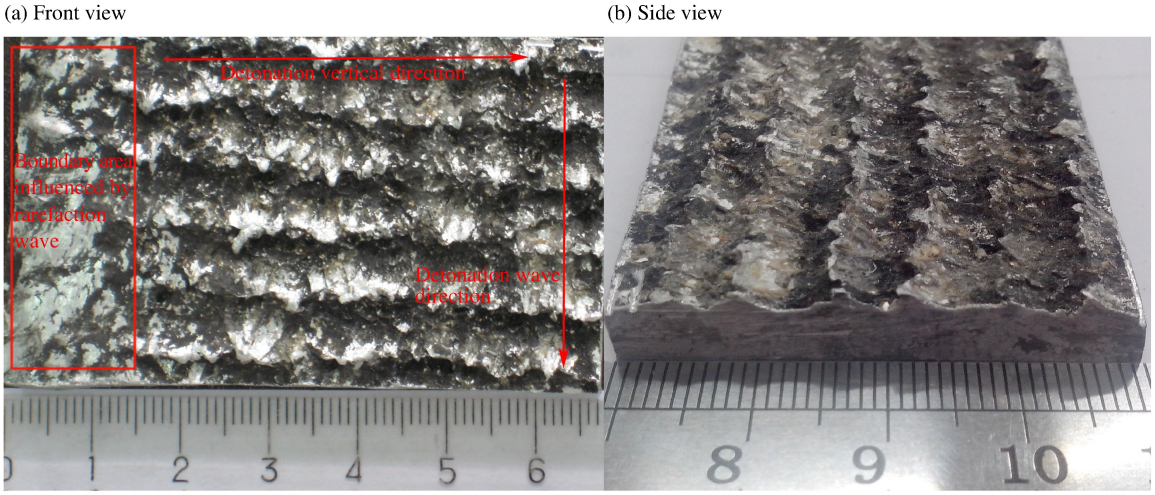

图 2 爆炸焊接界面形貌

Fig. 2 Morphology of explosive welding interface

轰方向的宏观波状特征。另外,样品经丙酮浸泡 24 h,并进行超声波清洗后绝大部分区域仍呈黑色,这是焊接设计时未进行细致打磨、清洗留下的烧蚀痕迹。有理由认为,本次实验得到的样品是焊接界面而非断口,因此对此样品进行分析所得数据可以描述本次研究对象焊接界面特征。

观察图 2 所示样品形貌,边侧稀疏波影响区域未能形成明显的波状特征,大部分区域在沿爆轰方向具有较清晰的波浪形貌。从整体看,沿爆轰波方向明显具有凹凸间隔相对规律的波状起伏特性;但从局部看,各区域的凹凸起伏又不尽相同,体现出具有更复杂精细的结构。

3 界面观察与分维值提取

由于界面具有宏观波状形貌和精细复杂的细观立体结构,需要利用三维超景深显微镜对图 2 所示样品进行观察。三维超景深显微观测表面不平坦的目标,只需把不同对焦位置的图像汇集起来,即可得到完全对焦的图像。三维显示能够从不同的角度观测表面的形状,实现宏观尺度的立体成像,可得到足够大的区域形貌,以保证其所含表面信息具有代表性。采用基恩士超景深三维显微系统 VHX-1000 拍摄焊接样品中心区域形貌,所得图像如图 3 所示,其中图像强度分布是表面真实形貌的直接反映。

观察图 3 可以发现,它体现了图 2 中的峰、谷形貌特征。利用其像素变化表征表面高低不同的形貌,得图 4。基于 Matlab 图像分析技术,对曲线 1、2 进行像素强度曲线提取,所取两条像素强度曲线路径如图 4 所示。其中线 1 位于波谷区域,线 2 位于横跨波峰、波谷的沿爆轰波方向,得到两条像素强度曲线的变化情况并将其进行二值化处理,如图 5 所示。

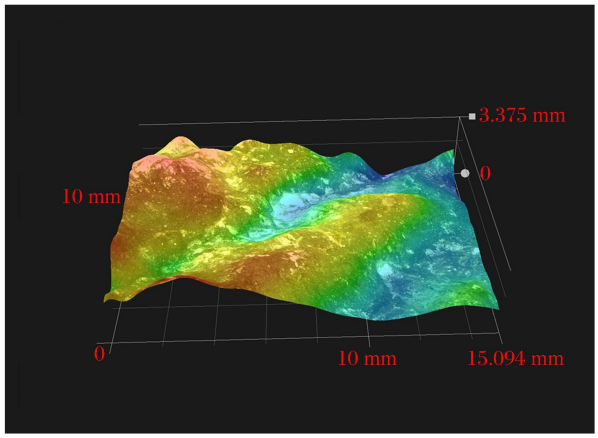

图 3 焊接界面三维形貌

Fig. 3 Three-dimensional morphology of the welding interface

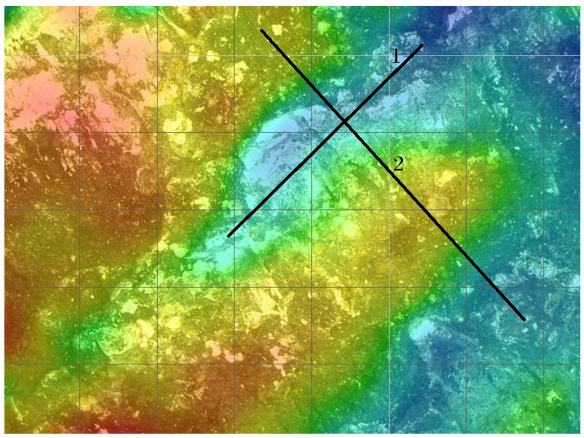

图 4 曲面及分析轮廓线俯视图

Fig. 4 Top view of interface and two profile lines for analysis

由图 5 可以发现,曲线变化特征均具有非稳定随机性,这也证实了焊接界面的不规则性。为了进行定量分析,对曲线 1(表征垂直爆轰方向)和横跨波峰波谷的曲线 2(表征沿爆轰方向)进行分维计算并对比。经 Matlab 处理后,用分形盒维数计算程序,对图 4 所示曲面及图 5 所示曲线进行分维值计算。具体做法是:设曲线 $F\subset\mathbf{R}^n$,记 $N_\varepsilon(F)$ 是可以覆盖 F 的、边长为 $\varepsilon(\varepsilon\leqslant 1$,若 $\varepsilon=1$,方格尺寸即为分形图像的尺寸)的 n 维立方体的最小个数,则 $D(F)$ 的定义(当极限存在时)为:

$$D(F)=\lim_{\varepsilon\to 0}\left(-\frac{\ln N_\varepsilon(F)}{\ln\varepsilon}\right) \tag{4}$$

式中:$D(F)$ 即为曲线 F 的盒维数。基于盒维数分析方法,对曲面照片象素求概率分布 $P_{ij}(\varepsilon)$:

$$P_{ij}(\varepsilon)\propto\varepsilon^{\alpha} \tag{5}$$

$$N_\alpha(\varepsilon)\propto -f(\alpha) \tag{6}$$

式中:α 反映分形上各个小块的奇异程度,也就是概率分布的不均匀性,$N_\alpha(\varepsilon)$ 为具有相同概率的大小为 ε 盒子数,$f(\alpha)$ 为 α 子集的分形维数。

对概率用 q 次方进行加权求和，得配分函数 $\chi_q(\varepsilon)$，其数学式为：

$$\chi_q(\varepsilon)=\sum P_{ij}^{q}(\varepsilon)=\varepsilon^{\tau(q)} \tag{7}$$

该配分函数和 ε 有幂函数关系，则可从 $\ln\chi_q$ 关于 $\ln\varepsilon$ 曲线的斜率，得到质量指数表达式：$\tau(q)=\dfrac{\ln\chi_q(\varepsilon)}{\ln\varepsilon}$。而 $\tau(q)$ 满足表达式 $\tau(q)=\alpha q-f(\alpha)$，另外由奇异指数 $\alpha=\dfrac{\mathrm{d}\tau(q)}{\mathrm{d}q}$，可以求得分形维数 $f(\alpha)$。对 $f(\alpha)$ 作图得到多重分形谱曲线，该曲线横坐标宽度 $\Delta\alpha=\alpha_{\max}-\alpha_{\min}$，可以定量表征金属表面的起伏程度，而纵坐标最大、最小概率子集维数的差别 $\Delta f=f(\alpha_{\min})-f(\alpha_{\max})$，可以统计表面高度最大、最小处的数目比例，实现焊接界面形貌分形表征[11-13]。基于以上理论编写计算程序，可获得轮廓曲线简单分维及曲面多重分形谱。

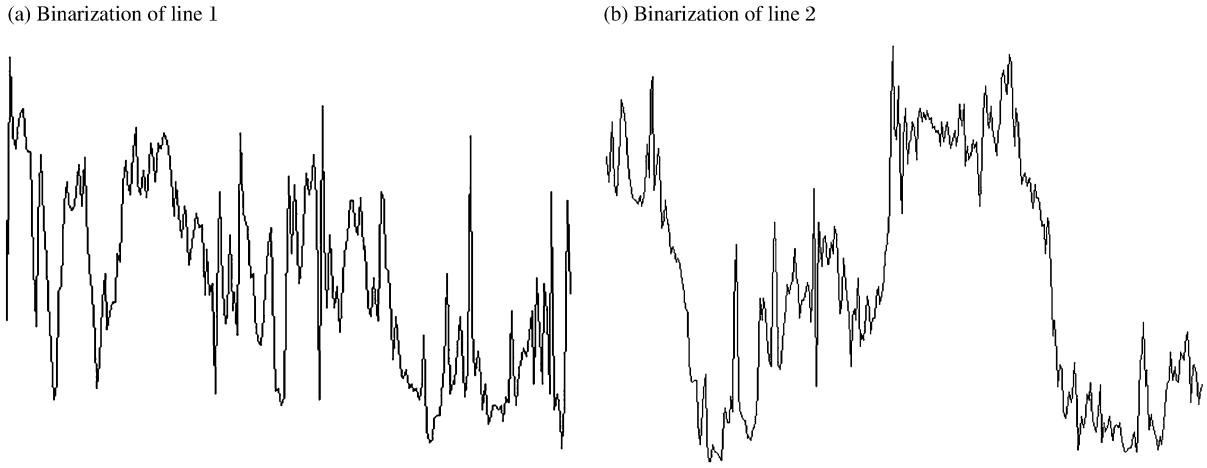

图 5　曲线二值化特征

Fig. 5　Binary characters of curves

4　分析讨论

计算得到图 5 中曲线的分维值和图 4 中曲面的分维谱分别如图 6～7 所示。图 6 中，两条曲线的斜率分别对应图 4 曲线 1、2 线维度值 D，具体数值为 $D_1=1.464\ 4$、$D_2=1.329\ 9$。基于分形维数可以表征几何体不规则性的物理意义，曲线越复杂，越倾向于充满平面，分形维数越接近于 2。因而可以推得垂

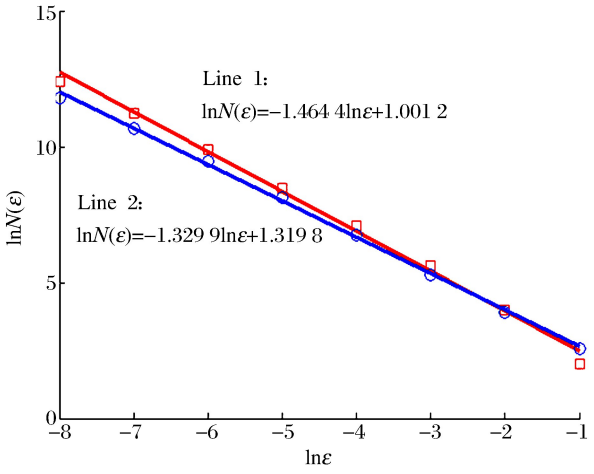

图 6　轮廓曲线分维图

Fig. 6　Fractal dimension of profile curves

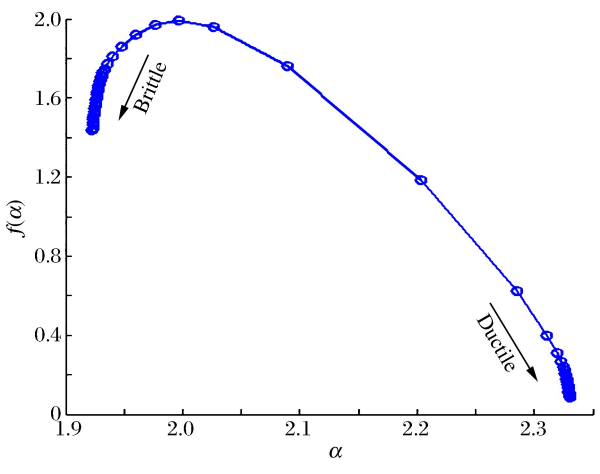

图 7　焊接界面多重分形谱

Fig. 7　Multi-fractal spectrum of welding interface

直爆轰方向曲线 1 比沿爆轰方向曲线 2 复杂。反映在爆炸焊接界面形貌特征上，说明沿爆轰方向和垂直爆轰方向的压力脉动及材料响应综合效果均具有不规则性，且垂直爆轰方向不规则程度较高。

在图 7 中，由于 $\varepsilon<1$，$\alpha_{\min}$ 代表了最大概率（$P_{\max}\propto\varepsilon^{\alpha_{\min}}$），$\alpha_{\max}$ 代表了最小概率（$P_{\min}\propto\varepsilon^{\alpha_{\max}}$），而 $\Delta\alpha$ 表征了最大最小概率间的差别（$P_{\max}/P_{\min}\propto\varepsilon^{-\Delta\alpha}$），$\Delta\alpha$ 越大，界面的概率分布越广，则界面形貌越复杂。$\Delta\alpha=0.41$，代表金属界面的起伏程度，该结果可以取代当前文献中以大波状、小波状及微波状概念来描述焊接界面波状形貌幅值，从而实现定量化。α 两端概率点较集中，说明两极化的概率较多，对应着波峰波谷，而中间过渡区较宽概率点较分散，说明从波峰到波谷形貌差异明显。通过对不同形貌的界面分析，获得其 $\Delta\alpha$ 并比较大小，可定量描述界面形貌起伏与界面复杂程度的差别。

$f(\alpha)$ 可以用来描述界面的覆盖率，一般二维空间的概率集的 $f(\alpha_{\max})$ 最大值在 1～2 之间，在图 7 中，$f(\alpha_{\max})=2$，说明所分析图像每一个像素点都有一定的概率分布（$P\neq0$）。$f(\alpha)$ 也表示相同 α 的子集的分形维数，$f(\alpha_{\min})$ 代表了最大概率可能性的盒子数（$N_{P_{\max}}(\varepsilon)=N_{\alpha_{\min}}(\varepsilon)\propto\varepsilon^{-f(\alpha_{\min})}$）的分形维数，$f(\alpha_{\max})$ 代表了最小概率可能性的盒子数（$N_{P_{\min}}(\varepsilon)=N_{\alpha_{\max}}(\varepsilon)\propto\varepsilon^{-f(\alpha_{\max})}$）的分形维数。$\Delta f=f(\alpha_{\min})-f(\alpha_{\max})=-\dfrac{\ln(N_{P_{\max}}/N_{P_{\min}})}{\ln\varepsilon}$，因此 Δf 还可以表征最大最小概率单元数目间的比例：$N_{P_{\max}}(\varepsilon)/N_{P_{\min}}(\varepsilon)=\varepsilon^{-\Delta f}$，在金属界面中反映了表面粒子沉积在波谷波峰各位置数目的比例，从而反映表面的复杂程度。$\Delta f=f(\alpha_{\min})-f(\alpha_{\max})=1.38$，$f(\alpha)$ 呈向左的钩状，体现了试样中波状界面概率大的子集（$\alpha_{\min}$）占据主导地位，即 α 左侧概率点较密集部分占主导地位。由于 $\varepsilon<1$，$\Delta f>0$，说明概率最大子集的数目大于概率最小子集的数目（$N_{P_{\max}}(\varepsilon)>N_{P_{\min}}(\varepsilon)$），相应的波峰波谷比较尖锐。另外，从图 7 还可看出，曲面多重分形谱主要落在左右两端，只有少量段落在中间区域。根据 R. E. Williford[14] 对多重分形谱的解释，脆性材料的 $f(\alpha)$ 随 α 的增加而增加，而韧性材料 $f(\alpha)$ 随 α 的增加而减小。因而，图 7 反映了焊接界面在被分离时的脆性与韧性两极行为特征。

观察图 8 所示的焊接界面扫描电镜照片，可以发现界面具有更精细的形貌结构，而且存在丰富的微裂纹。微裂纹反映了材料的脆性行为，体现在多重分维谱上（见图 7）即落在左半支；当然，SEM 图还含有丰富的光滑区域，反映了材料的韧性行为，体现在多重分维谱上即落在右半支。

从图 8 也可以看出，界面的细观形貌具有非常复杂、精细的结构，须通过统计方法才能对其进行定量描述，而分形维数即是基于统计分布而获得。因而，图 8 证明了图 6～7 所示结果的合理性。

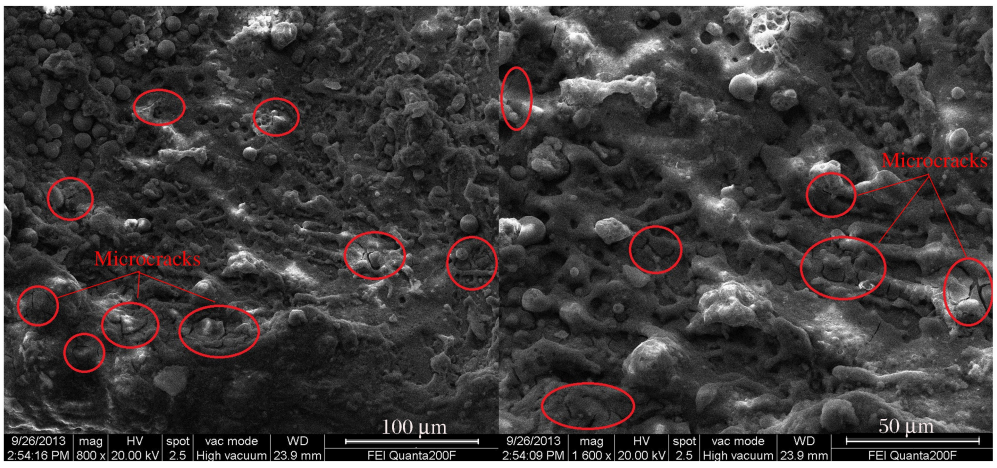

图 8 SEM 下焊接界面的微裂纹

Fig. 8 Micro-cracks on the welding interface under SEM

图 6 所示轮廓曲线简单分维体现了界面的复杂性，而图 7 所示多重分形谱揭示了焊接界面均匀性方面存在明显的差别。通过简单分维数的计算与分维谱的分析，可以清楚揭示焊接界面形貌的空间分布方式和均匀性，这不仅有助于深入了解界面形貌及其影响因素，指导爆炸焊接参数设计，同时也有助于对焊接质量进行定量评价。

当前的研究结论表明，爆炸焊接界面形貌对金属复合材料损伤、断裂行为有重要影响，且指出小波状焊接界面性能优于大波状；而线弹性断裂力学结论指出，材料断裂面结构越复杂，实际断裂时所消耗的能量越大。据此，将基于分形理论进一步对焊接界面损伤、断裂行为开展系列研究，尝试建立界面形貌对焊接质量影响的定量分析与评价理论。

5　结　论

运用三维超景深显微镜拍摄了焊接界面形貌，利用 Matlab 对界面形貌进行图像处理，并基于分形理论对其分析，得出结论如下。

(1)通过对轮廓曲线的分析表明，沿爆轰方向与垂直爆轰方向的分形维数稍有差异，且垂直轰爆方向分维值比沿爆轰方向的略大，而分维是熵的度量的物理意义，可以认为垂直爆轰方向复杂程度稍大。

(2)由轮廓曲线分维可以推出，本次研究对象的焊接界面具有分维特征，表明其具有复杂且精细的结构，仅从波状大小来判定界面特征不足以描述其形貌。

(3)提取多重分维谱可以进一步揭示界面起伏程度及分布比例，从而实现波状形貌的定量分析；且从多重分形谱可以判断界面的韧、脆性行为。

简单分形维数是对表面形貌的整体表征，而多重分形谱全面反映了表面起伏程度及概率的分布。将分维和多重分形谱引入到焊接界面形貌研究中，可克服当前对爆炸焊接界面形貌定性分析的缺点，实现界面形貌特征描述的定量化，使所得结论更客观、明确。

基于界面分形特征，建立界面形貌与焊接复合材料性能、爆炸焊接设计参数之间的量化关系。有望根据工程实践提出的性能指标，反推所要求的复合界面形貌，并根据界面形貌与爆炸焊接设计参数之间的量化关系，指导设计，促进爆炸焊接参数化设计。

参考文献：

[1] 史长根，王耀华，李子全，等. 爆炸焊接界面成波机理初探[J]. 爆破器材，2004，33(5)：25-28.
Shi Changgen, Wang Yaohua, Li Ziquan, et al. Study on the technique of blasting demolishing the long aqueduct with the control of domino effect[J]. Explosive Materials, 2004,33(5):25-28.

[2] 王耀华，洪津，史长根. SA266-304 爆炸复合板的三种结合界面[J]. 材料科学与工艺，1998，6(4)：35-38.
Wang Yaohua, Hong Jin, Shi Changgen. Three bond interface of explosive welding of steel SA266/304[J]. Materials Science and Technology, 1998,6(4):35-38.

[3] 付艳恕，孙宇新，陈志华，等. 铝-铝爆炸焊接界面的实验研究[J]. 实验力学，2011，26(1)：49-53.
Fu Yanshu, Sun Yuxin, Chen Zhihua, et al. An experimental investigation on Al-Al explosive welding interfaces [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011,26(1):49-53.

[4] 张越举，杨旭升，李晓杰，等. 钛/钢复合板爆炸焊接实验[J]. 爆炸与冲击，2012，32(1)：103-107.
Zhang Yueju, Yang Xusheng, Li Xiaojie, et al. An experimental research on explosive welding of titanium/steel clad plate[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(1):103-107.

[5] Zhang Y, Babu S S, Prothe C, et al. Application of high velocity impact welding at varied different length scales [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011,211(5):944-952.

[6] Chizari M, Al-Hassani S T S, Barrett L M. Effect of flyer shape on the bonding criteria in impact welding of plates [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009,209(1):445-454.

[7] Akbari-Mousavi S A A, Barrett L M, Al-Hassani S T S. Explosive welding of metal plates[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008,2029(1):224-239.

[8] Drennov O B, Mikhailov A L, Nizovtsev P N, et al. Instability of an interface between steel layers acted upon by an oblique shock wave[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,32(1):161-172.

[9] Drennov O B, Davydov A I, Mikhailov A L, et al. Shear instability at the "explosion product-metal" interface for sliding detonation of an explosive charge[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,32(1):155-160.

[10] Ben-Artzy A, Stern A, Frage N, et al. Wave formation mechanism in magnetic pulse welding[J]. International

Journal of Impact Engineering, 2010,37(4):397-404.

[11] 孙霞,吴自勤.规则表面形貌的分形和多重分形描述[J].物理学报,2001,50(11):2126-2131.
Sun Xia, Wu Ziqin. Fractal and multifractal description of surface topography[J]. Acta Physica Sinica, 2001,50(11):2126-2131.

[12] Sun X, Fu Z X, Wu Z Q. Multifractal analysis and scaling range of ZnO AFM images[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2002,311(3):327-338.

[13] Chen Z W, Lai J K L, Shek C H. Multifractal spectra of scanning electronmicroscope imagesof SnO_2 thin films prepared by pulsed laser deposition[J]. Physics Letters A, 2005,345(1):218-223.

[14] Williford R E. Multifractal fracture[J]. Scripta Metallurgica, 1988,22(11):1749-1754.

Quantitative characterization of morphology of explosive welding interfaces based on fractal theory

Xia Meng, Fu Yanshu, Zeng Xiaoshu, Zhang Binbin

(*School of Mechanical & Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang* 330031, *Jiangxi, China*)

Abstract: Explosive welding interface structure determines the quality of composite materials. However, analyses on the interfaces morphology so far remain limited on the qualitative level and quantitative analysis methods have not been well established. In our work we took explosive welding interface morphology as research subject, extracted the fractal dimensions and multi-fractal spectrums of interface based on the fractal theory to understand its morphological characteristics. First, we obtained the interface structure by three-dimensional ultra-depth microscopy. Then we dealt with it by picture analysis techniques to gain its binary image. Furthermore, we calculated the fractal dimensions and multi-fractal spectrum of the images by fractal geometry. Following the fractal theory, the fractal dimension is the macroscopic characteristics of the welding interfaces and the multi-fractal spectrum reflects their degree of fluctuation and the ratio of distribution. Thus taking fractal dimension and multi-fractal spectrum into account when describing welding interface structure can make up for what is lacking in the qualitative analysis and achieve the quantitative analysis.

Key words: mechanics of explosion; quantitative characterization; fractal dimensions; interface morphology; explosive welding

(责任编辑 丁 峰)