爆炸焊接 304/Q245 复合钢界面结构及剪切行为各向异性

付艳恕，王 震
(南昌大学，江西 南昌 330031)

摘 要：以 304 不锈钢/Q245 普碳钢焊接界面为研究对象，系统地探讨了界面结构不均匀性及其对服役行为的影响。研究过程中首先观察横截面、纵剖面结构的不均匀性，并基于非平衡运动方程，解释界面结构产生不均匀性的机理。进一步，针对界面波的方向特性，测试其剪切行为随定位角变化特征。最后利用 SEM 观察剪切断口形貌，认识界面结构对其断裂模式影响。研究表明，爆炸焊接装药爆轰压力脉动是导致界面结构不均匀性的根本原因，而界面波延展方向决定了断裂失效模式和损伤裂纹扩展行为；此外，获得了界面最优剪切强度承载方向，可指导爆炸复合材料应用于工程实践。

关键词：爆炸焊接；各向异性；界面结构；定位角；剪切断裂

中图法分类号：TG456.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-185X(2018)08-2458-07

爆炸焊接是利用炸药爆轰能量驱动金属板间发生高速碰撞而实施焊接的金属材料复合工艺。由于能实现众多异质金属大面积复合，在航空工业、核工业及石油化工管道等诸多领域得到广泛应用。

众所周知，爆轰产物驱动金属间高速碰撞会引起焊接界面压力和温度的骤变，导致十分复杂的冶金响应，使得界面附近原本均匀的组织、规整的结构发生显著变化。系列研究工作表明，在界面近邻区域存在显微硬度、化学组织及结构特征与基、复板不同的成分[1-3]。不仅如此，界面的形貌结构也在一定范围内复杂多变。孙宇新[4]利用 Helmholtz-Taylor 综合不稳定性理论对铝-铝爆炸焊接界面形貌进行相应分析，表明爆炸焊接界面是在失稳与弹粘性竞争机制下形成的，阐述了界面波的波谱特征。Wronka[5]还指出铜-钢爆炸焊接后在铜的一侧发生分层现象，且随着碰撞速度和铜板厚度增大，分层现象加剧。

以上所论述的焊接界面的组织结构、形貌特征响应也是界面工程服役行为的影响因素。韩丽青[6]研究了 316L 爆炸焊接前后的点蚀行为，指出爆炸焊接后 316L 耐点蚀性降低，焊缝和熔合区优先腐蚀。郭训忠[7]对 TA1/Al 复合管的试验表明界面结合强度不低于纯铝剪切强度，且可以承受大的塑性变形。对界面进行拉伸、剪切及搭接强度测试，表明断口发生在距离焊接界面一定位置的热熔化区域或力学性能较弱的金属侧，而非焊接界面上[2,8,9]。

对界面组织、形貌结构的认识及相应服役行为的了解，研究人员发现波状界面层间包含有强烈的各向异性，对强度不利的结构成分[10]。且无论是平直，或是波状的焊接界面，其横截面结构均包含有各向异性成分[11]。

Zhang[12]从晶粒结构和界面力学行为两方面讨论了焊接界面不均匀性及力学行为各向异性。观察到焊接横截面上的晶粒破碎细晶带区域，热影响粗晶带区域及晶粒塑性变形和再结晶区域等；相关力学行为实验研究也揭示了不同组织、结构对工程服役载荷的响应各异。Greenberg[13]利用分形理论对焊接界面组织成分和结构形貌的各向异性进行描述，发现多种分形结构的界面，并进行了计算，建立了分维与焊接性能关系。本研究作者前期的工作[14]亦观察到爆炸焊接界面在整体上沿爆轰波方向具有明显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，并基于分形几何理论对界面结构进行了定量描述。事实上，爆炸焊接界面形成是一个热力耦合过程，因而残余应力及不连续性（杂质、孔洞、裂缝、晶粒破碎与胀大）等非均匀性特征是界面的固有属性[15]。

以上研究系统地阐述了界面组织、形貌结构的不

收稿日期：2017-08-10
基金项目：国家自然科学基金（11662010, 11202093）
作者简介：付艳恕，男，1982 年生，博士，副教授，南昌大学机电工程学院，江西 南昌 330031，电话：0791-83969623，E-mail: yshfu1982@hotmail.com

均匀性及工程服役行为各向异性。基于当前的研究成果，作者尝试对界面形貌结构不均匀性开展横、纵截面观察与分析，阐述其对界面损伤扩展、断裂位置及断裂强度的影响，并从各向异性力学行为中探寻最优的设计参数以指导工程实践。本研究内容从以下方面展开：（1）焊接界面横截面结构不均匀性；（2）焊接界面纵剖面结构各向异性；（3）结构不均匀性产生机理；（4）焊接界面结构对剪切力学行为各向异性的影响。

1　横截面结构不均匀性

以 304 不锈钢（复板）和 Q245 普碳钢(基板)爆炸焊接复合板为研究对象。为观察焊接界面横截面显微结构形貌，沿爆轰方向截取 8 mm×8 mm×20 mm 的试样，经细致打磨抛光后，采用 4% 硝酸乙醇溶液进行腐蚀。为了使试样表面洁净及不被立即氧化，腐蚀后用乙醇清洗，然后迅速风干。图 1 所示为爆炸焊接截取式样及界面的显微结构，图片显示界面波完整清晰，表明界面结合良好。

图 1a、图 1b 所示在界面处出现了类似正弦波的周期性特征，波长大约为 1100 μm，波幅大约为 400 μm。从显微结构分析可知，界面中心复合区出现的晶体特征大致可以分为 3 部分：细晶带、热影响区和原始组织区。在细晶带出现的碎晶粒平均直径约为 5 μm，根据文献[12]分析可知，这些细晶带是由于绝热剪切高速形变产生足够的热量引起的变形金属动态再结晶的结果，与温度、变形量和变形速率有着密切的关系，也可以由液态金属极冷而形成，与文献[9]所观察到的现象相似。在热影响区内，等轴晶粒粗大均匀，主要为铁素体（晶体颜色为亮白色和浅灰色，是因为化学腐蚀的时候，不同的铁素体晶粒的位向不同所造成），平均直径大约为 40 μm。在热影响区没有观察到与文献[16]所述的在靠近界面处因承受大的塑性变形而被拉长的扁平晶粒。本研究认为，由于焊接工艺条件的差异，在爆炸复合过程中，靠近界面的金属在摩擦热和变形热的作用下发生动态再结晶，此过程类似于界面金属的退火处理，然又由于热扩散的距离有限，恢复和再结晶的现象就仅限于如图 1c 所示热影响区。图 1b 所示在“波峰”右侧存在气孔缺陷，它们来自金属层间高压气体，在强烈的湍流作用下，被封闭在结晶致密的腔体内无法排除而导致[9]。图 1c、1d 显示的边界线凹凸不平，相互侵入交错，形成“半岛”形貌，增大了界面结合面积，有利于提高结合强度，但同时在结合处会产生缺陷，比如聚集物和气孔[17]。其形成机理是在爆炸焊接过程中，爆轰压力使射流组织和界面处的严重塑性变形金属(半流体)侵入到 304 不锈钢组织侧，当爆轰压力足够大时，还会出现“全岛”形貌[12]。另外，在“半岛”结构附近出现非常小的碳化物颗粒（见图 1d），这是原渗碳体的碳在铁素体内由于温度升高导致其过饱和的碳析出形成碳化物。

界面组织重新分布以及缺陷的产生是高能冲击作用下冶金产物。在爆炸冲击波的作用下，材料发生一切冶金过程几乎是在毫秒间完成，其理化性质发生了不可逆变的过程，也是界面材料由均匀性向不均匀性转变的过程，体现出了界面横截面结构各向异性的特点。

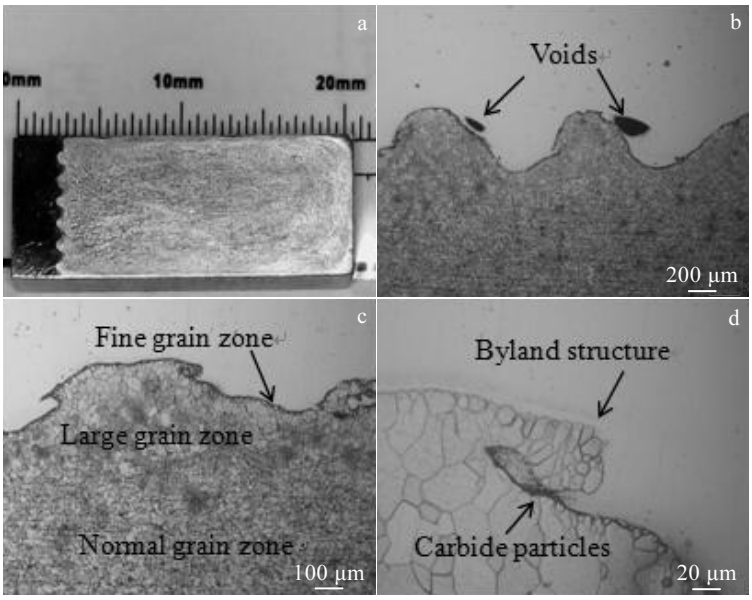


图 1　焊接界面横截面结构

Fig.1　Transverse section microstructures of welding interface

2　纵剖面结构不均匀性

当前工作对界面形貌结构的讨论大多基于图 1 所示的横截面进行[8-10]。毫无疑问，横截面展示的信息具有局限性，为了更系统深入地观察界面结构特征，捕捉更细致的界面波状形貌，进一步沿纵向剖开焊接界面，如图 2a 所示。从同一复板任取 3 处不同区域截取试样，经打磨、抛光和腐蚀后，采用数码显微镜(digital microscope)进行界面结构拍摄，如图 2b、2c 和 2d 所示，黑色条纹为 304 不锈钢，暗白色条纹为 Q245 普碳钢。

爆炸焊接界面纵剖面呈现出条带状，由黑白条纹交织组成，各自宽度大致相同，表明该纵剖面处于“波峰”与“波谷”的中间位置。图 2b 所示界面波波长 λ_1=1.09 mm，图 2c 所示界面波波长 λ_2=1.47 mm，图 2d 所示界面波波长 λ_3=1.86 mm。通过对比可知界面波波长各不相同，反映界面波在纵剖面上分布不均匀性。实验爆轰物理指出界面波长一般可根据式（1）进行计算[18]：

$$\lambda=\frac{\pi V_{\mathrm{p}} d}{2c}\left(\frac{c}{V_{\mathrm{c}}}-1\right)^2 \tag{1}$$

式中，V_{p} 为基板与复板之间的碰撞速度；d 为复板厚度；c 为金属的体积声速；V_{c} 为碰撞点的移动速度。因此，在同一爆炸焊接体系中，只有基、复板之间的碰撞速度 V_{p} 是影响波长的变量。

事实上，爆炸焊接装药通常由人工对粉末炸药进行野外现场铺设。简单便捷的装药工艺使得铺设厚度难以均匀，且粉末状炸药密实度在铺设面积内难以恒定，其综合效果必然导致爆轰波压力脉动，从而造成基板与复板各分段区间内碰撞速度差异，同时也导致界面微元处于非平衡受力状态，综合作用效果反映在焊接界面上则呈现出如图 2 所示特征。

3　界面波不均匀性形成机理

更细致地，在界面带状边缘，可以发现许多“突起”，甚至条纹间的错位、连接与断开（图 2c 所示），这些复杂多变的相互交叉嵌入结构增加复合界面粗糙度，有利于改善界面结合强度[11]。从界面整体形貌特征考虑，爆炸焊接产生的波状界面并不是理想的正弦结构，而是带有褶皱和缺陷的，使界面波呈现出不均匀性。其原因必然是由于作用于焊接界面的爆轰压力脉动所致，进一步可基于非平衡运动过程理论开展讨论。

复板受驱运动的爆炸焊接过程可以用爆轰波与金属壳表面相互作用理论进行描述[19]，具体运动参数可表示为如图 3 所示。爆轰波作用于复板上表面使其加速而获得转角 θ_2，同时传入 T_1T_2 折射波在复板下表面反射时，使自由表面加速获得转折角 θ_2，并在 T_2 处反射稀疏波 R'，此稀疏波和 T_1B_1 表面相互作用，并逐步使它具有同样的转折角 θ_2。

由图 3 可知，爆炸焊接过程中，复板表面及其内部均处于非平衡态，具有强烈的加速运动特性。据此考察如图 4 所示的面元ΔA_n，建立非平衡运动方程[20]。其单位法线向量为 $\vec{n}$，单位面积表面力为 $\overset{n}{T}$。设ΔA_n 与一个四面体单元的斜面重合，其余 3 个表面则平行

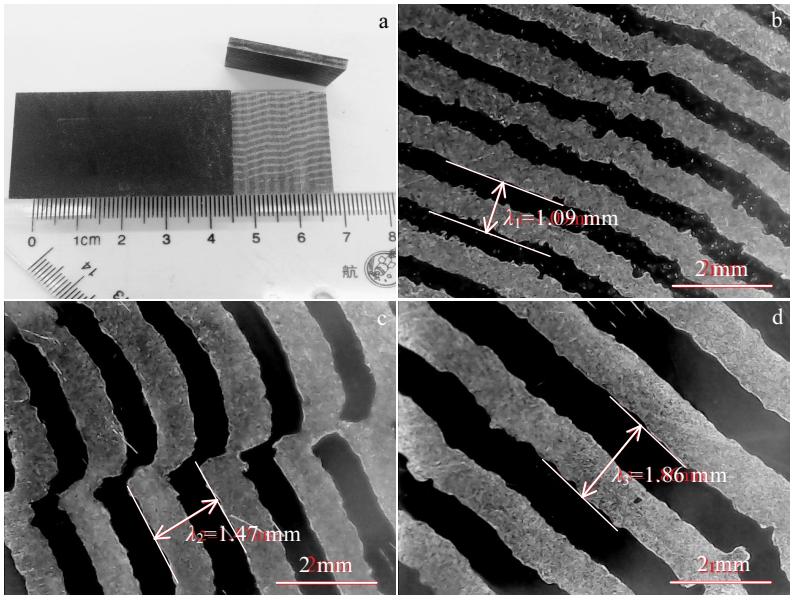


图 2　焊接界面纵剖面结构

Fig.2　Longitudinal section microstructures of welding interface

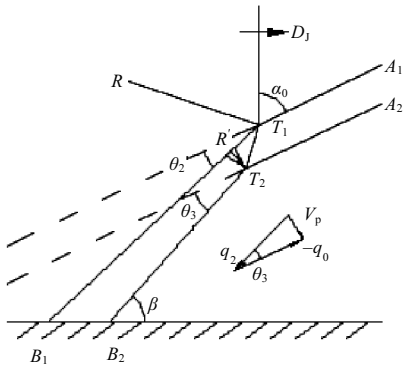


图 3　爆轰波和金属壳相互作用

Fig.3　Mutual interaction between shock wave and flyer plate

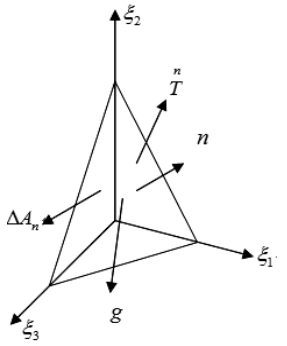


图 4　四面体单元受力分析

Fig.4　Free-body diagram for an element

于坐标轴 ξ_i。由于加速特性的存在，因而惯性力和体积力分别由 $\Delta m\ddot{u}$ 和 Δmg_i（$i=1, 2, 3$）代表，其中圆点表示对时间的微分。在 3 个与坐标平行的表面 $\Delta A_j=\Delta A_n n_j$ 上，作用有 9 个应力分量 $\sigma_{ij}(i,j=1, 2, 3)$，其中 $n_j=(1, 2, 3)$代表单位法线向量 n 的分量。利用下标重复求和记号，则力平衡条件可由下式表达：

$$T_i^n \Delta A_n + \Delta mg_i = \sigma_{ij} n_j \Delta A_n + \Delta m\ddot{u}_i，i=1, 2, 3 \quad (2)$$

以 ρ 代表材料质量密度且$\Delta m=\rho\Delta V$，则上式可改写为：

$$\frac{T_i^n - \sigma_{ij}}{\rho\gamma_i} + g_i = \ddot{u}_i，i=1, 2, 3 \quad (3)$$

其中，$\gamma_i=\Delta V/\Delta A_n$。由冲量与加速度可得单元受驱动能：

$$W = \int F\mathrm{d}x = \int mv\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}\mathrm{d}x = \int I_d\ddot{u}_i\mathrm{d}t \quad (4)$$

由式（3）可知，只要物质表面具有区别于体积力的加速度（重力场中为重力加速度），即 $\ddot{u}_i \neq g_i$，则体积相对于表面积的变化率 γ_i 必不为零。而由图 3 可知，在爆炸焊接过程中爆轰波的作用必然使复板获得显著加速度而飞向基板，因而 $\ddot{u}_i \neq g_i$，使得 $\gamma_i\neq 0$。此即表明，爆轰压力驱动物质元ΔV 参与焊接界面相互结合，必然伴随表面积变化$\Delta A\neq 0$。对式（3）进行时间积分，可获得复板表面（边界）凹凸不平特征。其原因体现在 2 个方面，一是爆炸焊接装药爆轰压力脉动使得复板微元 $\ddot{u}_i$ 并不处处相等，其二是边界条件差异使得基、复板微元加载的积分时间并不处处相等，综合效果导致界面的波动。式（4）描述了由冲量、加速度及作用时间决定的物质元ΔV 受驱动能，除热损失外，其最终将以界面塑性变形的模式沉积在焊接界面上，在各区域间的差异导致界面结构各异。另外，非平衡态热力学理论指出，在外界能量输入作用下，体系必然发生熵增响应而导致能量状态改变。晶粒细化，甚至相变导致的内能，波状界面伴随的表面积增加而存储的表面能等均是熵增响应的体现形式。

因而图 1 和图 2 反映的界面结构在横截面上的不规则波状，在纵剖面上的条纹交错、凹凸、卷曲甚至嵌入等特征，均是式（3）、（4）对时间积分结果在 3 个方向的具体体现。

4　界面结合强度（剪切强度）不均性分析

4.1　界面波的方向特性

界面波作为界面一种不均匀因素，具有方向性，如图 5 所示，定义载荷 F_x 和 F_y 的方向分别为垂直爆轰方向和沿爆轰方向。当仅有载荷 F_x 作用于复板时，界面承受剪切模式为主，如图 6a 所示；当有任何异于 F_x 的载荷 F_y 作用于复板时，在界面处的应力分布比较复杂，波峰和波谷处只受剪切应力，而在波面不仅受到剪切应力，还伴随着相应的压应力或拉应力，如图 6b 所示。界面波的方向性将导致其力学行为的各向异性，故开展相应剪切实验研究。

4.2　取样与样品制备

文献[21]通过测试 3 个定位角（0°、45°、90°）剪切性能来研究爆炸焊接界面力学行为各向异性。为了获得系统的认知，采用如图 7 所示方案，每隔 15°取样，共 7 组进行界面剪切行为研究。定义如图 7 所示的 X 轴方向为界面波 0°方向，Y 轴方向为界面波 90°方向，后文以此为参考基准，对样板进行系列取样。

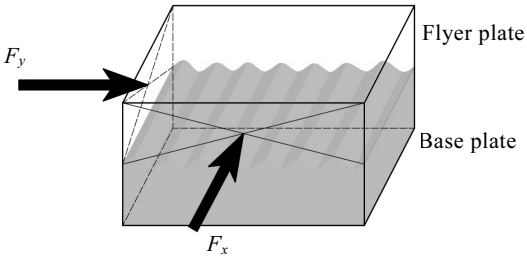


图 5　界面加载模式

Fig.5　Loading scheme on welding interface

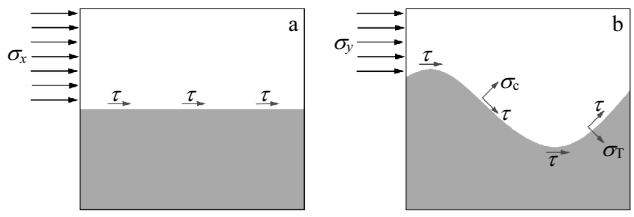


图 6　界面应力分布

Fig.6　Stress distributions varied with interface direction: (a) planar interface and (b) wavy interface

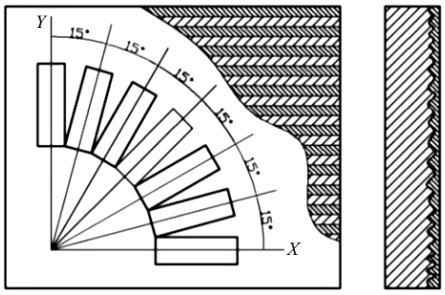


图 7　剪切试样取样示意图

Fig.7　Schematic diagram of sampling positions of shear specimen

为确保实验的可靠性和精确性，应该在平整部位截取剪切试样，避免在弯曲、翘曲、歪斜和虚焊区域取样。

遵照 GB/T 6396-2008[22]给出的方案制备剪切试样如图 8 所示，基、复板焊接界面沿中间位置经线切割分离后，残存在基板上的界面呈现两种材料的混合条纹状，且条纹交错较均匀，表明所得爆炸焊接样品质量良好。

试验过程中，在室温条件下，利用微机控制电子万能试验机对试件进行剪切实验。试验机对试样平稳施加载荷，加载速率为 1 mm/min，将复材从基材上沿结合面剪切下来，记录试样在不同界面波方向上的载荷-位移数据。

4.3　实验结果及分析

4.3.1　剪切断口强度分析

试样沿不同界面波方向发生剪断破坏的位移载荷曲线如图 9 所示，整体来说，剪切破坏发展模式一致。曲线发展可以分为 4 个阶段：第 1 阶段(0~0.3 mm)，载荷随位移增长缓慢，此阶段为预紧阶段；第 2 阶段(0.3~1.0 mm)，载荷随位移呈线性发展趋势，此阶段为弹性阶段。此外，该阶段不同方向的试样对应曲线发展路线近似相同，表明该区间焊接界面刚度与定位角的关系并不敏感，区间末端没有出现屈服现象；第 3 阶段，（1 mm~载荷最大对应位移）强化阶段，该阶段内载荷达到最大值，曲线发展路线开始出现分歧，说明在此区间的界面刚度受界面波定位角的影响较大，最大载荷值为 35.125 kN，最小载荷值为 27.418 kN；第 4 阶段，断裂阶段，当载荷超过最大值后，材料发生损伤，受剪部位出现刚度软化现象，载荷迅速衰减，直至分离。

将图 9 所示剪力最大值与对应界面定位角绘制成图 10 所示柱状，可以发现，爆炸焊接界面剪切力学性能呈现随定位角波动特征，具体表现为从 0°~60°呈单调递增，60°~90°呈单调递减特征，定位角为 60°时剪切强度值达到最大。

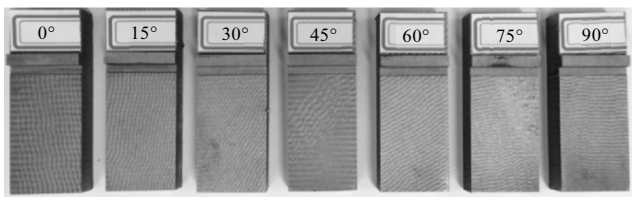


图 8　剪切试样示意图

Fig.8　Schematic diagram of shear specimens

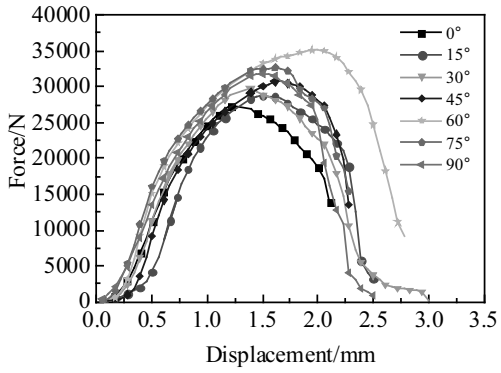


图 9　试件载荷-位移曲线

Fig.9　Load-displacement curves of shear specimens

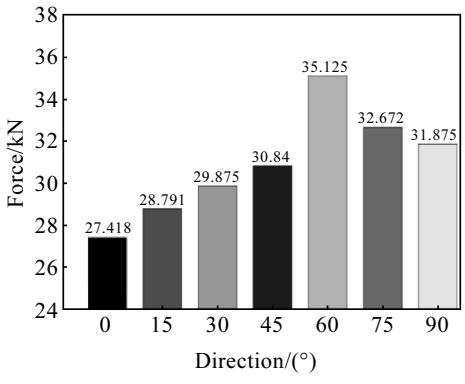


图 10　最大载荷随定位角变化特征

Fig.10　Maximum load varied with orientation angles

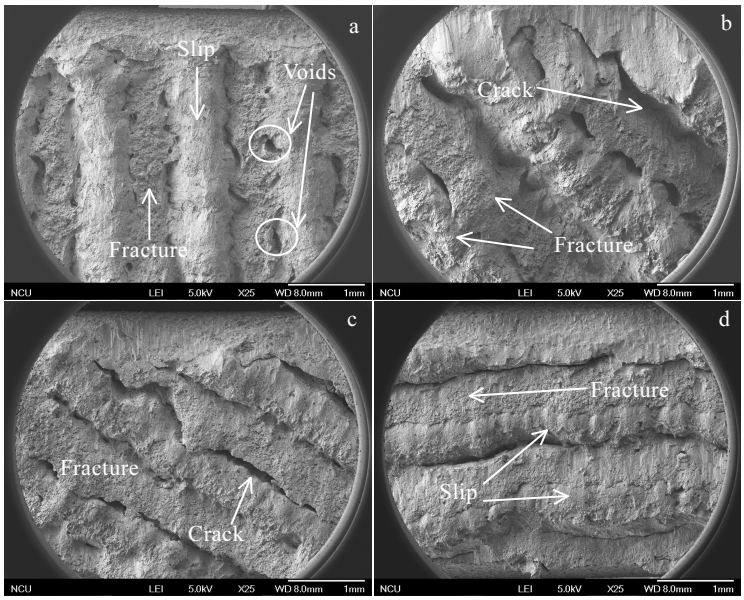


图 11　试件断口扫描电镜图

Fig.11　SEM images of fracture surface of shear specimens: (a) 0°, (b) 45°, (c) 60°, and (d) 90°

由图 10 可知，实验结果表明各定位角对应的样品损伤承载能力 $F_{60°}>F_{90°}>F_{45°}>F_{0°}$，所得结果与文献[21]观察到的现象 $F_{90°}>F_{45°}>F_{0°}$相同，但由于本工作更细致，获得了更优的承载能力定位角，即 $F_{60°}>F_{90°}$。

4.3.2　剪切断口宏观形貌

为进一步探求界面波在试件剪切破坏过程中的变化和试件断裂模式，采用扫描电镜 JSM-6701F 对界面断口形貌进行观察，其中 4 个定位角对应样品剪切断口形貌如图 11 所示。

从图 11 中不同定位角剪切断口形貌可以看出，断口特征有 3 种：（1）表面略显完整的滑移特征，是界面波滑移破坏的结果；（2）表面上粗糙的截断特征，是界面波相互剪断的结果；（3）夹杂在滑移区和截断区之间的“缝隙”和“孔洞”。从图 11 中所标识的断口特征区域可判断，当受剪定位角从 0°向 60°方向变化时，界面波受由滑移破坏向截断破坏转变，超过 60°后又有向滑移破坏转变趋势。结合图 6 分析可得，各定位角下断裂模式的不同是界面波结构导致应力分布差异的必然结果。

进一步观察，并结合图 1 可知，在基板 Q245 钢的断裂位置均处于晶粒相对粗化区域。这是由于晶粒粗化区域强度低于结合界面处晶粒细化区域，亦低于未受热影响的基体强度所致。

简言之，界面波结构的不均匀性导致界面应力分布的复杂化，使其力学行为呈各向异性，且受剪断裂模式各异。另外，图 9、图 10 展示的实验结果揭示出波状界面各向异性的力学行为中，存在一个最优值（无论是破坏能量或失效强度），该现象可用于指导工程实践。

5　结　论

1) 爆轰驱动基、复板发生高速碰撞，伴随的热、力效应对材料冶金行为的影响随厚度增加而变化，该过程发生时间极短（毫秒量级内完成）及不可逆性，必然导致界面沿厚度方向的不均匀性。体现在焊接横截面组织上则呈现出碰撞晶粒细化区域、热影响晶粒粗化区域及无影响区域等，且热影响晶粒粗化区域也决定了焊接界面工程服役剪切断口位置。

2) 爆炸焊接装药厚度、密实度及边界条件的不均匀性伴随着爆轰压力脉动及爆轰产物对复板作用时间、作用冲量的不等性，进而导致参与焊接的金属微元在各个方向皆处于非平衡状态，其结果体现在焊接横截面上呈不规则波状，而在纵剖面上则是相互条纹凹凸、卷曲，甚至相互嵌入等不均匀性结构。

3) 爆炸焊接界面波状延展方向影响着界面在外载作用下的应力响应特征，随之决定了断裂失效模式和损伤裂纹扩展行为。综合体现在剪切行为上则是剪切强度、断裂能量及断口形貌特征的各异。

4) 系统地阐述了爆炸焊接界面的不均匀性，并揭示了界面剪切行为随定位角的变化特征，给出界面最大强度承载方向，可用于指导工程实践对于爆炸复合材料的运用。

参考文献 References

[1] Gloc M, Wachowski M, Plocinski T *et al*. *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2016, 671: 446

[2] Borchers C, Lenz M, Deutges M *et al*. *Materials & Design*[J], 2016, 89: 369

[3] Fronczek D M, Wojewoda-Budka J, Chulist R *et al*. *Materials & Design*[J], 2015, 91: 80

[4] Sun Yuxin(孙宇新), Fu Yanshu(付艳恕). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(10): 2486

[5] Wronka B. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2011, 38(5): 309

[6] Han Liqing(韩丽青), Lin Guobiao(林国标), Wang Zidong(王自东) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(3): 492

[7] GuoXunzhong(郭训忠), Tao Jie(陶 杰), Yuan Zheng(袁 正) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(1): 139

[8] Kahraman N, Gülenç B. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2005, 169(1): 67

[9] Mastanaiah P, Reddy G M, Prasad K S *et al*. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2014, 214(11): 2316

[10] Wronka B. *Journal of Materials Science*[J], 2010, 45(13): 3465

[11] Greenberg B A, Ivanov M A, Rybin V V *et al*. The *Physics of Metals & Metallography*[J], 2012, 113(2): 176

[12] Zhang L J, Pei Q, Zhang J X *et al*. *Materials & Design*[J], 2014, 64: 462

[13] Greenberg B A, Ivanov M A, Inozemtsev A V *et al*. *Metallurgical & Materials Transactions A*[J], 2015, 46(8): 3569

[14] Xia Meng(夏 萌), Fu Yanshu(付艳恕), Zeng Xiaoshu(曾效舒) *et al*. *Explosion and Shock Waves*(爆炸与冲击)[J], 2016, 36(1): 50

[15] Hutchinson J W, Suo Z. *Advances in Applied Mechanics*[J], 1991, 29: 63

[16] Liao Dongbo(廖东波), ZhaWusheng(查五生), Li Wei(李 伟). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2012, 33(5): 99

[17] Fronczek D M, Wojewoda-Budka J, Chulist R *et al*. *Materials & Design*[J], 2016, 91: 80

[18] Sun Jinshan(孙锦山), Zhu Jianshi(朱建士). *Theoretical Detonation Physics*(理论爆轰物理)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995: 356

[19] Wang Jihai(王继海). *Two Dimensional Unsteady Flow and Shock Wav*e(二维非定常流和激波)[M]. Beijing: Science Press, 1994: 492

[20] XueChangming(薛昌明), Lu Tianjian(卢天健). *Advances in Mechan*ics(力学进展)[J], 1989, 19(2): 158

[21] Xie M X, Zhang L J, Zhang G F *et al*. *Materials & Design*[J], 2015, 87: 181

[22] GB/T 6396-2008[S], 2008

Heterogeneity on Interface Structure and Shear Performance for the 304 Stainless Steel/Q245 Steel Explosive Welding Plate

Fu Yanshu, Wang Zhen

(Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: The 304 stainless steel/Q245 carbon steel explosive welding interface was taken as the research object to detect the structure heterogeneity and its effect on the shear behavior in engineering application. First, characteristics on the transverse section and longitudinal section of the welding interface were detected. And based on the non-equilibrium theory, the mechanism of the heterogeneity on the welding interface was explained. Furthermore, taking into account the wavy structure and its undulance along the detonation direction, shear performances varied with orientation angles were measured according to the national standard (GB/T 6396-2008). Finally, the morphologies of fracture surface were observed by SEM to understand the influence of welding interface structure on the failure mode. Results show that the explosive detonation pressure fluctuation is the fundamental cause of the inhomogeneity on the welding interface, and the failure mode and cracks developments are determined by the undulation characteristics of wavy interface. Besides, an optimal orientation angle, on which samples have the maximum shear strength, was revealed. All of them can be used to guide the engineering application for explosive welding plates.

Key words: explosive welding; heterogeneity; interfacial structure; orientation angle; shear fracture

Corresponding author: Fu Yanshu, Ph. D., Associate Professor, School of Mechatronics Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, P. R. China, Tel: 0086-791-83969623, E-mail: yshfu1982@hotmail.com