夹层爆炸焊接高强度铝合金与钛合金的界面特性和力学性能研究

陈翔[1,2]，朱桂春[1,2]，张程娇[3]，罗宁[4,5]，胡建华[6]，王新欢[6]，梁国峰[1,2]

1.江汉大学省部共建精细爆破国家重点实验室　湖北武汉　430056
2.湖北（武汉）爆炸与爆破技术研究院　湖北武汉　430056
3.易普力股份有限公司　湖南长沙　410000
4.中国矿业大学力学与土木工程学院　江苏徐州　221116
5.深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室　江苏徐州　221116
6.湖北弘睿鼎检测技术有限公司　湖北武汉　430056

摘要：为了实现高强度低熔点铝合金（A7075）与高强度钛合金（Ti-6Al-4V）的爆炸复合，提出了纯铝（A1060）作为夹层的设计思路，对不同焊接参数下的界面形貌和结构特征进行了研究。通过光学显微镜（OM）、扫描电子显微镜（SEM）和万能材料试验机等分析手段对复合板界面的微观组织特征和拉伸弯曲性能进行分析。在两组参数下均实现了A7075/A1060/Ti-6Al-4V金属复合板的夹层爆炸焊接，焊接界面无明显缺陷。不同爆炸焊接参数下，上下界面均观察到熔化区域存在。力学性能结果表明：使用2mm厚度A1060夹层制备出的复合板界面抗剪强度＞70.3MPa。弯曲表现方面，板件间隙参数为2mm和5mm的样品拥有更高的抗弯性能，最大抗弯性能为1209.9MPa，拉伸弯曲断裂均未出现在焊接界面上。本研究为该类复合板的爆炸焊接工艺提供了参考。

关键词：爆炸焊接；夹层；焊接界面；力学性能；铝/钛复合板

The study of interface characteristics and mechanical properties of explosive welding of high-strength aluminum alloy and high-strength titanium alloy

CHEN Xiang[1,2], ZHU Guichun[1,2], ZHANG Chengjiao[3], LUO Ning[4,5], HU Jianhua[6], WANG Xinhuan[6], LIANG Guofeng[1,2]

1. State Key Laboratory of Fine Blasting, Jianghan University, Wuhan 430056, Hubei, China
2. Hubei (Wuhan) Institute of Explosive and Blasting Technology, Wuhan 430056, Hubei, China
3. Yipuli Co., Ltd., Changsha 410000, Hunan, China
4. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China

基金项目：湖北省教育厅重点项目（D20234406）；国家自然科学基金（No.12302436）。

第一作者：陈翔，博士，副教授，从事爆炸与冲击动力学效应、爆炸加工理论及应用方向的研究，E-mail：chenxiang@jhun.edu.cn。

通信作者：梁国峰，硕士研究生在读，从事爆炸与冲击动力学效应、爆炸加工理论及应用方向的研究，E-mail：liangguofeng202306@163.com。

5. National Key Laboratory for Intelligent Construction and Health Maintenance of Deep Underground Engineering, Xuzhou 221116, Jiangsu, China
6. Hubei Hongrui Ding Testing Technology Co., Ltd., Wuhan 430056, Hubei, China

Abstract: To achieve explosive bonding of high-strength low-melting-point aluminum alloy (A7075) and high-strength titanium alloy (Ti-6Al-4V), this study proposes the use of pure aluminum (A1060) as an interlayer and investigates the interface morphology and structural characteristics under different welding parameters. The microstructural features and tensile-bending properties of the composite plate interface were analyzed using optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), and universal material testing machine. Explosive welding of the A7075/A1060/Ti-6Al-4V metal composite plates with interlayer bonding was successfully achieved under both sets of parameters, with no significant defects observed at the welding interface. Melted regions were found at both the upper and lower interfaces under different explosive welding parameters. Mechanical performance results show that the interface shear strength of the composite plate prepared with a 2mm thick A1060 interlayer is greater than 70.3MPa. In terms of bending performance, samples with interlayer gap parameters of 2mm and 5mm exhibited higher bending strength, with the maximum bending strength reaching 1209.9MPa. No fracture occurred at the welding interface during tensile bending tests. This study provides valuable insights into the explosive welding process for this type of composite plate.

Keywords: explosive welding; interlayer; welding interface; mechanical properties; aluminum/titanium composite plate

1 序言

在现代材料科学领域，复合材料凭借整合多种材料优异性能的独特优势，成为推动各行业发展的关键力量。通过巧妙组合不同组元，复合材料能够兼具诸如高强度、低密度、出色的耐蚀性，以及良好的导热性、导电性等特点，在航空航天、汽车制造、海洋工程等诸多高端工业领域展现出广阔的应用前景[1-3]。在航空航天产业中，其可使飞行器结构重量大幅减轻，进而显著提升燃油效率与飞行性能；在汽车工业方面，有助于增强车身部件强度，有效实现节能减排目标。

Al/Ti复合材料作为复合材料体系中的重要分支，成功融合了铝合金相对低密度、易于加工的特点，以及钛合金高强度、卓越的耐热耐蚀性等优势，因而成为高性能结构材料研究的热点方向[4-6]。过往研究在Al/Ti复合工艺探索之路上不断前行，从传统熔焊技术到新兴固相焊接方法，均投入了大量精力。然而，由于铝和钛在物理化学性质方面存在显著差异，包括熔点、热膨胀系数及晶体结构等方面的不同，在焊接过程中极易引发诸如裂纹、气孔、脆性金属间化合物生成等严重缺陷，这极大地限制了Al/Ti复合材料焊接质量的提升与大规模工业化应用进程[7]。

A7075作为高强度铝合金的典型代表，因其较高的Cu、Mg含量，拥有出色的强度与良好的机械加工性能，但其熔点相对较低[8]。Ti-6Al-4V钛合金则以高强度、优异的耐热性和耐蚀性而著称，广泛应用于航空发动机部件、高端医疗器械等对材料性能要求极为严苛的领域[9]。鉴于二者显著的特性差异，直接实现其可靠焊接面临着巨大挑战。传统焊接方法在处理这两种材料焊接时，往往难以克服因材料性能不匹配而导致的焊接缺陷问题。

爆炸焊接作为一种独特的固相焊接技术，与传统焊接方法存在本质区别[10-12]。在爆炸瞬间所产生的高温、高压极端环境下，金属板以高速相互碰撞，促使待焊界面原子间形成紧密结合。此过程无需使用填充材料，有效规避了熔焊过程中常见的冶金问题，如元素稀释、凝固裂纹等。而且，爆炸焊接所形成的接头具有较高的结合强度与良好的韧性。尤为重要的是，在面对高强度低熔点A7075铝金合与高强度Ti-6Al-4V钛合金的焊接难题时，本研究在飞板A7075和基板Ti-6Al-4V之间引入A1060夹层。A1060纯铝具有良好的塑性，在爆炸焊接过程中，能够缓冲A7075与Ti-6Al-4V之间因物理性能差

异而产生的应力集中，有效改善焊接界面的应力状态，从而扩大了这两种材料的焊接性窗口，成功实现了它们的爆炸复合[13]。鉴于此，本研究将重点围绕采用爆炸焊接工艺制备A7075/Ti-6Al-4V复合板展开探究，分析两组不同焊接参数对复合板界面特性与力学性能的影响。结果发现，随着板件间隙参数增加，下界面形貌由平直状向波浪状转变。两组参数复合板界面抗剪强度均＞70.3MPa，板件间隙参数更小的复合板拥有更高的抗弯性能，最大抗弯强度为1209.9MPa，拉伸弯曲测试过程中均未在焊接界面上出现开裂。

本研究在A7075飞板和Ti-6Al-4V基板间引入A1060纯铝夹层，根据夹层爆炸焊机理[14]，扩大了焊接参数的选取范围。攻克了两者直接焊接的难题，成功制备了A7075/Ti-6Al-4V复合板，为复合板在航空航天、汽车制造等对材料抗弯性能要求严苛的领域应用，提供了坚实的数据支撑与应用潜力。

2　试验材料与方法

2.1　试验材料

试验选用Al-7075、Al-1060、Ti-6Al-4V板材，分别作为复合板的飞板、夹层和基板，其中飞板与基板的尺寸为400mm×200mm×3mm；夹层的尺寸为400mm×200mm×2mm，其化学成分和力学性能分别见表1、表2。

表1　原材料的化学成分（质量分数）[15]　（%）

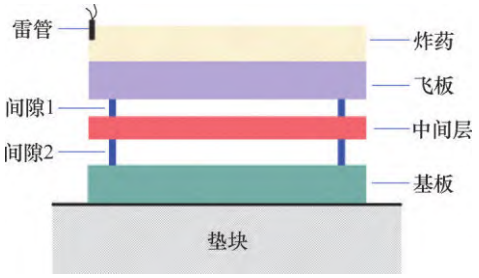
材料类型	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
A7075	≤0.4	≤0.5	1.2～2.0	2.1～2.9	0.18～0.28	5.1～6.1	0.2	余量
A1060	≤0.25	≤0.35	≤0.05	≤0.03	—	≤0.05	≤0.03	余量
Ti-6Al-4V	O	V	Al	Fe	H	C	N	Ti
	＜0.2	3.5	5.5	＜0.3	＜0.0015	＜0.08	＜0.05	余量

表2　原材料的力学性能[16]

材料类型	密度/（g/cm³）	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）
A7075	2.81	455	567	14
A1060	2.68	110	126	28
Ti-6Al-4V	4.51	872	1000	15

2.2　试验方法

爆炸焊接原理和试验装置如图1所示。由图1可知，试验设计为平行搭接结构，整体复合板装置放置在钢垫块上。Ti-6Al-4V钛合金作为基板与垫块接触，飞板A7075和夹层A1060依次放置在基板Ti-6Al-4V钛合金上。采用粉状乳化炸药加稀释剂制备低爆速焊接炸药，将爆速控制在2300m/s。3层金属板之间采用不同的间隙参数，其中间隙1为上板间距，间隙2为下板间距，具体试验参数见表3，探究不同间隙参数下对爆炸焊接复合板结合性能的影响。



a）爆炸焊接原理

b）试验装置

图1　爆炸焊接原理和试验装置

表3　试验参数及结果　（mm）

样品	材料		炸药厚度	间隙1	间隙2	焊接结果
	种类	厚度				
1	A7075	3	30	2	5	焊接成功
	A1060	2				
	Ti-6Al-4V	3				
2	A7075	3	30	5	10	焊接成功
	A1060	2				
	Ti-6Al-4V	3				

2.3　试样制备

爆炸焊接的复合板实物及制样区域如图2所示。沿爆轰方向在远离起爆端一侧切取金相分析和拉伸剪切试样。金相试样尺寸为10mm×10mm，

拉伸弯曲试样尺寸为100mm×10mm。在观察金相试样之前，分别使用400目、800目和1500目等不同粒度的砂纸和抛光膏对其打磨抛光。通过金相显微镜（ZEISS Axiolab 5）和冷场发射扫描电子显微镜（HitachiSU8010）对结合界面的组织形貌进行观察。同时，使用万能材料试验机对试样进行拉伸和弯曲性能测试，并通过电子显微镜对拉伸断口进行表征。

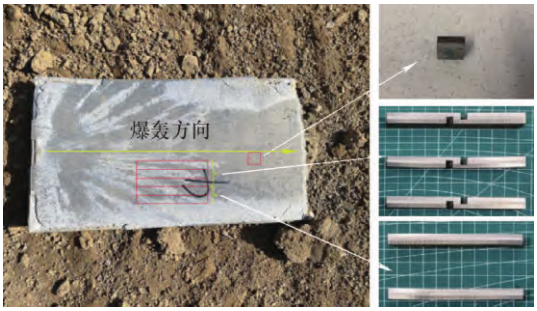
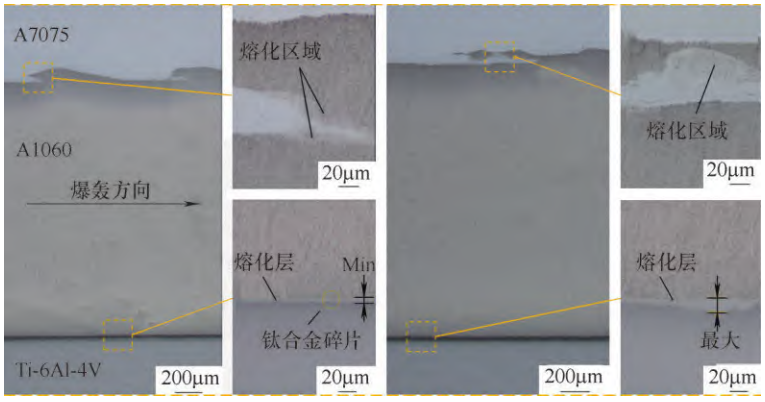


图2　爆炸焊接的复合板实物及制样区域

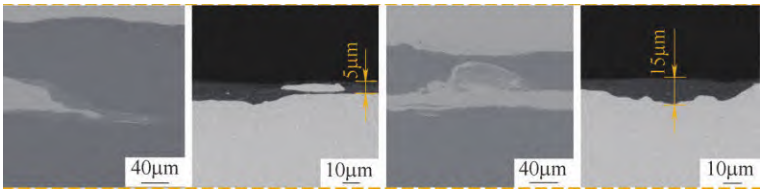
3　试验结果与讨论

3.1　界面形貌与微观组织分析

样品1、样品2的光学显微图像和扫描电子显微镜图像如图3、图4所示。从图3a可发现，A7075/A1060界面呈现出波浪状的形貌特征，波长超过200μm，振幅约为100μm；A1060/Ti-6Al-4V界面呈现平直特征。从图4a可发现，样品2上下界面均呈现连续的波浪状界面。结合界面处没有明显的裂纹或孔洞等缺陷，整体结合质量较好。对比发现，波长和振幅随着间隙的增加而增加，这一观察结果与LIVNE和DURGUTLU等[17, 18]的研究发现一致。且Al/Ti结合界面从平直形状变成波浪状，这归因于更大的板件间隙使得结合界面积累了更多的冲击能量，导致夹层高速撞击基板时在碰撞点附近施加非常高的压力。该压力超过材料屈服强度，使碰撞点附近塑性变形增大且待连接材料发生准液体流动，高压与流体状流动在碰撞点前形成局部驼峰，持续作用下从而形成了波状界面[19,20]。图3、图4所示放大区域展示了焊接界面的结合情况，通过光学显微镜和对应的扫描电子显微镜图像可以观察到界面处存在两种材料颜色过渡的区域，这是由于在爆炸焊接过程中，高速碰撞引发的能量聚集，使金属达到熔点后熔化形成了熔化层。此外，由于爆炸焊接的瞬时性，材料不同区域在界面的相互扩散混合很难达到完全均匀的状态。同时，不同材料凝固速度和方式存在差异，这也进一步影响了熔化层的特征，使其在微观层面呈现出不均匀的状态。对A1060/Ti-6Al-4V界面分析发现，样品1呈现出较为平坦均匀的熔化层，且在熔化区域发现有金属钛碎块，熔化层厚度为5～15μm（见图3b）；样品2波前区和波后区呈现出不同的结构特征，其中波前区界面表现出



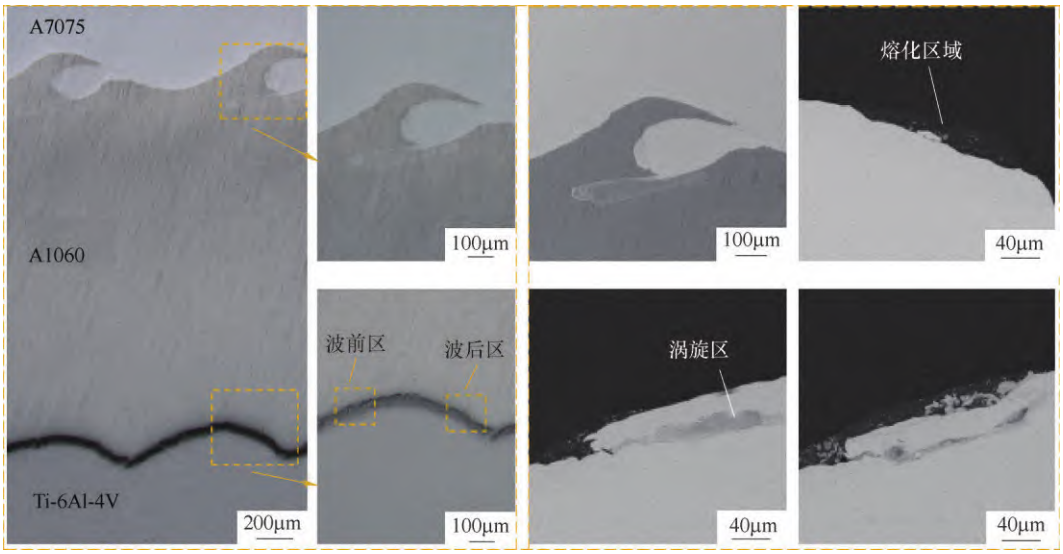
a）光学显微图像



b）扫描电子显微镜图像

图3　样品1的光学显微图像和扫描电子显微镜图像

更加强烈的混合扩散，并在熔化区域中伴随有大的涡旋和材料碎块的产生（见图4）。而在波后区结合界面几乎观察不到大的熔化区，这种现象在其他爆炸焊接金属材料中也有发现[21-23]。PAUL等[24]在对Ti/Al的爆炸焊接界面研究中发现，波的形成与熔化区的出现相一致。大片熔化区域优先位于波浪前坡附近或波浪涡旋内，在波峰处形成的程度较小。在某些情况下，爆炸焊接形成过程中的复杂力相互作用，将固体材料局部推入到界面熔融的液态或半液态区域中。因此，会观察到母体材料（Al或Ti）被封闭在界面熔化区域内的情况。



a）光学显微图像　　b）扫描电子显微镜图像

图4　样品2的光学显微图像和扫描电子显微镜图像

3.2　力学性能测试分析

为了评估微观结构对界面力学性能的影响，在A7075/A1060/Ti-6Al-4V复合板中沿爆轰方向切取了5组试样，分别对样品1、样品2复合板结合界面进行了准静态拉伸行为测试和3点弯曲测试。其中，拉伸剪切试样3组，弯曲测试2组。拉伸剪切和弯曲试验分别按GB/T 6396—2008《复合钢板力学及工艺性能试验方法》和YB/T 5349—2014《金属弯曲力学性能试验方法》进行[25, 26]，仪器设备加载速率均为1mm/min。

A7075/A1060/Ti-6Al-4V爆炸焊接复合板的抗拉强度通过拉伸试验测量，由以下公式计算，即

$$\tau_{max}=\frac{F_{max}}{S} \tag{1}$$

式中　τ_{max}——最大拉伸应力（MPa）；

F_{max}——拉伸试验中的最大力（MPa）；

S——试样结合界面的接触面积（mm^2）。

弯曲强度计算公式为

$$\sigma_{max}=\frac{3FL}{2bh^2} \tag{2}$$

式中　σ_{max}——最大弯曲应力（MPa）；

F_{max}——弯曲断裂时施加的最大力（N）；

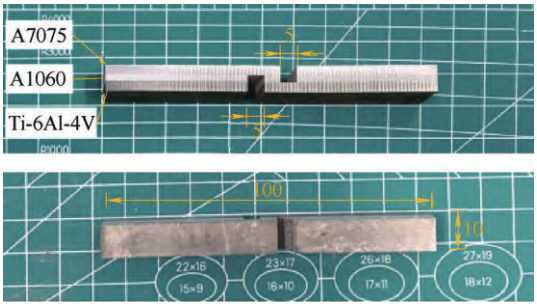
L——测试过程中施加载荷的两个支撑点之间的距离（mm）；

b——试样的宽度（mm）；

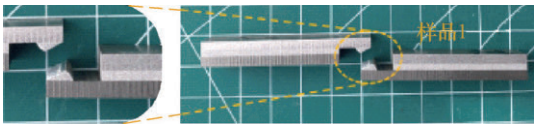
h——试样的厚度（mm）。

（1）拉伸剪切试验　拉伸剪切试样如图5所示，试验结果见表4。结果显示，样品1焊接界面的平均抗剪强度为70.4MPa，样品2界面的平均抗剪强度为70.3MPa。由此可知，两者的最大抗剪强度几乎一致，且断裂界面均表现出沿中间层A1060对角线剪切破坏。值得注意的是，未经过加工工艺处理的A1060纯铝的抗剪强度约为75MPa，因此造成样品1和样品2抗剪强度最大的原因可能是接近A1060夹层的极限抗剪强度。同时，这也验证了上下焊接界面抗剪强度＞70.4MPa。

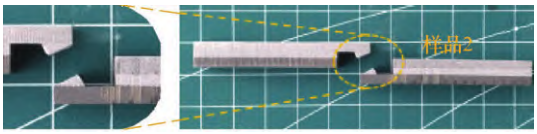
（2）弯曲试验　本研究通过3点弯曲试验来检测复合材料的抗弯性能，3点弯曲试样如图6所示，极限抗弯强度试验结果见表5。在端面弯曲试验中，压头直径为10mm，跨距为50mm。从表5可知，样品1的Al/Ti两侧弯曲的极限抗弯强度值均略高于样



a）拉伸剪切试样尺寸



b）样品1拉伸剪切试验结果



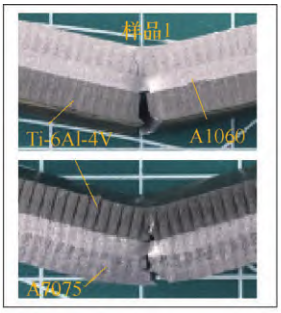
c）样品2拉伸剪切试验结果

图5　样品1、样品2的拉伸剪切试样

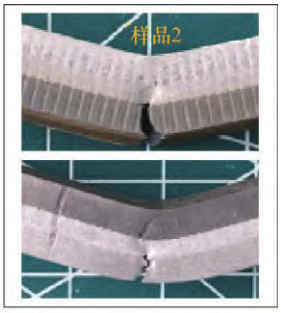
表4　拉伸剪切试验结果　（MPa）

项目	抗剪强度		
	1	2	3
样品1	67.4	76.0	67.8
样品2	69.7	71.5	69.7

a）3点弯曲试样



b）样品1的3点弯曲试验结果



c）样品2的3点弯曲试验结果

图6　样品1、样品2的3点弯曲试样

表5　极限抗弯强度试验结果　（MPa）

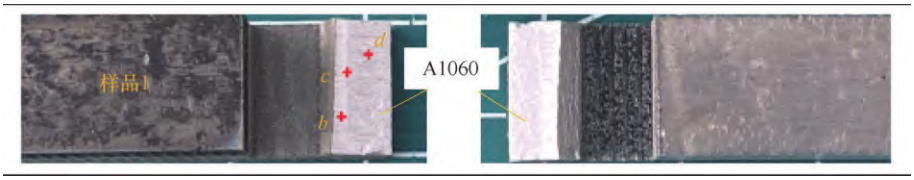
项目	极限抗弯强度	
	钛侧	铝侧
样品1	1209.9	1275.5
样品2	1181.1	1271.6

品2，这可能是由于波状界面产生更多的脆性金属间化合物，使复合板的抗弯强度降低。同时，还发现同一样品往钛侧弯曲的屈服强度均小于铝侧屈服强度，这是由于高强度Ti-6Al-4V钛合金的可塑性较差，而A7075铝合金相较而言有更好的韧性，因此向铝侧弯曲时更不容易断裂。此外，从图6b、c可发现，样品1和样品2在向两侧弯曲过程中，在飞板和基板两侧均出现裂纹，且裂纹沿垂直于焊接界面扩散，上下结合界面未出现开裂现象，这也说明了焊接界面的结合强度高。

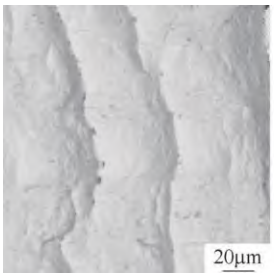
（3）扫描电子显微镜断裂分析　拉伸剪切试验表明，A7075/A1060/Ti-6Al-4V复合板焊接界面剪切强度高，剪切断裂主要发生在A1060夹层内部。样品1、样品2的拉伸断口形貌图7所示。

样品1和样品2拉伸剪切断裂的宏观形态如图7a、e所示。分析选取了断裂界面3个不同区域的形貌特征，高分辨力扫描电子显微镜微观形貌如图7b～d、f～h所示。在远离上下焊接界面的A1060内部均观察到许多大小尺寸不一的延性凹坑（见图7d、h），这是韧性断裂的典型特征。图7b、f所示为劈裂断裂的明确特征，在靠近上下界面的断裂区域呈现明显的解理台阶和河流花样。YANG等[27]研究表明，因为高度的冲击硬化，所以在焊接界面附近可以观察到韧性材料的脆性断裂，这是由于该区域的延展性低，界面存在的熔化区域和严重变形的晶粒，因此靠近界面区域产生一些裂纹，并沿拉伸方向扩展。

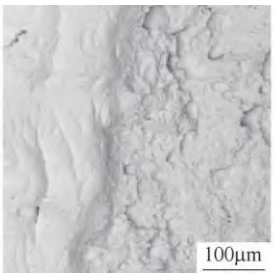
（4）焊接界面硬度分析　图8所示为样品1和样品2焊接界面在200N荷载下的显微硬度分布。在样品1和样品2中，A7075、A1060和Ti-6Al-4V从第一测量点到界面的距离分别为50μm、100μm和30μm。每行测量点之间的间隔为500μm。图8中的红色虚线表示材料的初始硬度，其中A7075、A1060和Ti-6Al-4V的初始硬度分别为140HV、39HV和348HV[15]。根据测试结果，样品1和样品2爆炸焊接后硬度普遍大于原始材料的硬度。其中，样品1中的A7075平均硬度为191.6HV，高出原材料36.9%，样品2中的A7075平均硬度为188.1HV，高出原材料



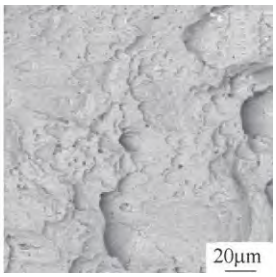
a）样品1拉伸剪切断口



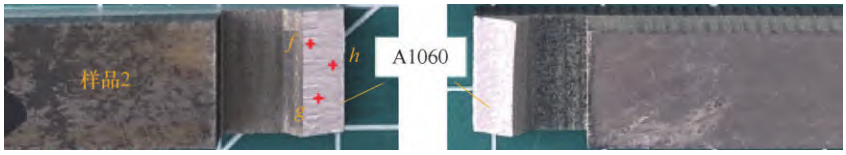
b）断口*b*点微观形貌



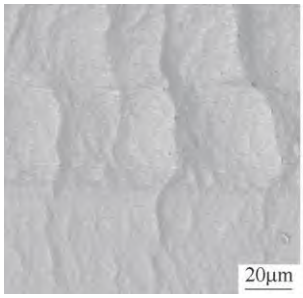
c）断口*c*点微观形貌



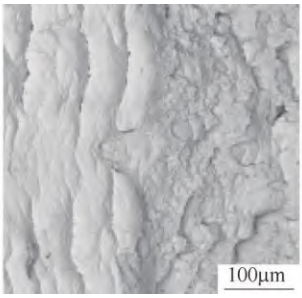
d）断口*d*点微观形貌



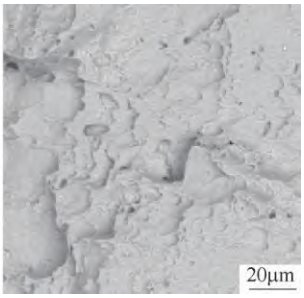
e）样品2拉伸剪切断口



f）断口*f*点微观形貌

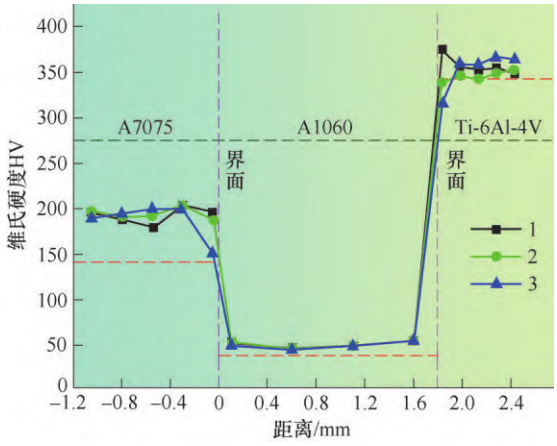


g）断口*g*点微观形貌

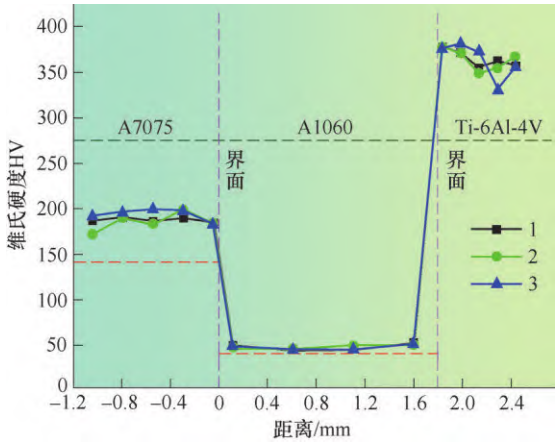


h）断口*h*点微观形貌

图7　样品1、样品2的拉伸断口形貌



a）样品1



b）样品2

图8　样品1、样品2的焊接界面硬度

34.3%。在爆炸焊接过程中，A7075焊接界面发生较大的塑性变形，从而导致其硬度显著增加[28]。爆炸焊接后A1060的硬度增加不明显，这是因A1060对于加工硬化不敏感而导致的。Ti-6Al-4V硬度值在初始材料硬度上下波动，这可能是因为Ti-6Al-4V属于具有α相和β相的双相钛合金，而α相和β相具有不同的

硬度值。

4 结束语

本研究的目的是研究和分析不同间隙参数对使用爆炸焊接工艺制备A7075/A1060/ Ti-6Al-4V复合板的界面形态（微观结构）及力学性能的影响，得出如下结论。

1）通过对焊接参数的精细控制，所有样品均实现了A7075/A1060/Ti-6Al-4V复合板的爆炸复合，焊接界面没有发现微孔和裂纹等缺陷。

2）随着间隙的增加，观察到下界面由平直状到波浪状的转变，且上界面波长和振幅也随之变大。上下界面处均发现有连续熔化层。

3）A7075/A1060/Ti-6Al-4V复合板的最大抗剪强度为70.3MPa，这与A1060自身的剪切强度有关。同时，剪切断口均位于夹层A1060内，呈对角线断裂状态，断口表现出脆性-韧性混合断裂。

4）弯曲测试结果表明，间隙参数为2mm和5mm的样品有更好的抗弯性能，其中铝侧抗弯强度为1209.9MPa，钛侧抗弯强度为1275.5MPa。过高的间隙参数不利于复合板抗弯性能的提升。

参考文献：

[1] 陈松，李晓杰. 异种金属爆炸焊接的研究与发展[J]. 爆破，2023，40（2）：144-152.

[2] 李豪，杨洋，赵惠，等. 新型铝-钢复合材料制备工艺研究[J]. 金属加工（热加工），2024（1）：57-59，64.

[3] SUN Z，SHI C，WU X，et al. Comprehensive investigation of effect of the charge thickness and stand-off gap on interface characteristics of explosively welded TA2 and Q235B[J]. Composite Interfaces，2020，27（11）：977-993.

[4] 韩建超，刘畅，贾燚，等. 钛铝复合板的研究进展[J]. 中国有色金属学报，2020，30（6）：1270-1280.

[5] 范敏郁，郭训忠，崔圣强，等. 钛/铝/钛三层板的一次爆炸复合[J]. 稀有金属材料与工程，2017，46（3）：770-776.

[6] FRONCZEK D M，WOJEWODA-BUDKA J，CHULIST R，et al. Structural properties of Ti/Al clads manufactured by explosive welding and annealing[J]. Materials & Design，2016，91：80-89.

[7] 房中行，史长根，冯柯，等. TA2-1060-TA2复合板爆炸焊接试验及性能测试[J]. 焊接学报，2019，40（9）：87-92，165.

[8] ALTIPARMAK S C，YARDLEY V A，SHI Z，et al. Challenges in additive manufacturing of high-strength aluminium alloys and current developments in hybrid additive manufacturing[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture，2021，4（2）：246-261.

[9] CUI C，HU B M，ZHAO L，et al. Titanium alloy production technology，market prospects and industry development[J]. Materials & Design，2011，32（3）：1684-1691.

[10] 夏鸿博，王少刚，翟伟国，等. 金属爆炸焊接技术研究进展[J]. 热加工工艺，2013，42（5）：203-206.

[11] 朱桂春，刘中枢，梁国峰，等. 不锈钢06Cr18Ni11Ti与铸钢20Mn的爆炸焊接研究[J/OL].爆破，1-16[2024-12-27]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.tj.20240920.1756.002.html.

[12] JIANG S，SHEN J，NAGASAKA T，et al. Interfacial characterization of dissimilar-metals bonding between vanadium alloy and Hastelloy X alloy by explosive welding[J]. Journal of Nuclear Materials，2020，539：152322.

[13] LIANG G F，HUANG J W，ZHOU D P，et al. Study on explosive welding A7075 and Ti-6Al-4V with aluminum or copper interlayer[J]. Journal of Materials Science，2024，59（33）：15883-15903.

[14] CHEN X，XIE X，HU J，et al. Experimental and numerical study on the mechanism of interlayer explosive welding[J]. Journal of Materials Research and Technology，2024，30：5529-5546.

[15] LIANG G，HUANG J，ZHOU D，et al. Study on explosive welding of A7075/A1060/Ti-6Al-4V and its mechanical properties[J]. JOM，2024：1-15.

[16] 梁国峰，黄佳雯，胡家念，等. 爆炸焊接A7075/A1060/Ti-6Al-4V三层金属板研究[J]. 工程爆破，2024，30（6）：138-144.

[17] LIVNE Z，MUNITZ A. Characterization of explosively bonded iron and copper plates[J]. Journal

of Materials Science，1987，22：1495-1500.

[18] DURGUTLU A，HASAN O，Investigation of effect of the stand-off distance on interface characteristics of explosively welded copper and stainless steel[J]. Materials & Design，2008，29（7）：1480-1484.

[19] MENDES R，RIBEIRO J B，LOUREIRO A. Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration[J]. Materials & Design，2013，51：182-192.

[20] ATHAR，HOSEINI M M，TOLAMINEJAD B. Weldability window and the effect of interface morphology on the properties of Al/Cu/Al laminated composites fabricated by explosive welding[J]. Materials & Design，2015，86：516-525.

[21] PAUL H，MISZCZYK M M，CHULIST R，et al. Microstructure and phase constitution in the bonding zone of explosively welded tantalum and stainless steel sheets[J]. Materials & Design，2018，153：177-189.

[22] CHU Q，MIN Z，LI J，et al. Experimental and numerical investigation of microstructure and mechanical behavior of titanium/steel interfaces prepared by explosive welding[J]. Materials Science and Engineering：A，2017，689：323-331.

[23] FRONCZEK D M，WOJEWODA-BUDKA J，CHULIST R，et al. Structural properties of Ti/Al clads manufactured by explosive welding and annealing[J]. Materials & Design，2016，91：80-89.

[24] PAUL H，SKUZA W，CHULIST R，et al. The Effect of interface morphology on the electro-mechanical properties of Ti/Cu clad composites produced by explosive welding[J]. Metallurgical and Materials Transaction A，2020，51：750-766.

[25] 全国钢标准化技术委员会. 复合钢板力学及工艺性能试验方法：GB/T 6396—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2008.

[26] 全国钢标准化技术委员会. 金属弯曲力学性能试验方法：YB/T 5349—2014[S]. 北京：冶金工业出版社，2014.

[27] YANG M，MA H，SHEN Z，et al. Study on explosive welding for manufacturing meshing bonding interface of CuCrZr to 316L stainless steel[J]. Fusion Engineering and Design，2019，143：106-114.

[28] SHAKIL M，TARIQ N H，AHMAD M，et al. Effect of ultrasonic welding parameters on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints[J]. Materials & Design，2014，55：263-273.

MW 20250116

（上接第101页）

信随着技术发展和生产制造对高熔敷、高效率的持续追求，越来越普及的应用，金属粉芯应用成本会进一步降低，未来一定会在工程机械领域具备更好的应用前景。

参考文献：

[1] 李德明，韦嘉伟，杨红刚，等. 推土机机架方盒焊接变形工艺探讨[J]. 金属加工（热加工），2014（22）：48-49.

[2] 刘奔，徐勤官，王先锋. 金属粉芯型药芯焊丝开发与应用现状[J]. 金属加工（热加工），2020（3）：28-29.

[3] 张剑利，吕志军，田雷，等. 金属粉芯焊丝气体保护焊在LNG工程中的应用[J]. 焊接技术，2023，52（11）：77-80.

[4] 郑州煤矿机械集团股份有限公司. 金属粉芯焊丝在液压支架结构件立向上焊接的方法：CN202010872209.2[P]. 2023-06-09.

[5] 栾宗锋，邸新杰，利成宁，等. Al和Mg元素对吉帕级熔敷金属组织和力学性能的影响[J]. 焊接学报，2022，43（12）：20-26.

[6] 昆山京群焊材科技有限公司. 一种金属粉芯型焊丝及其应用：CN202311798179.5[P]. 2024-02-23.

[7] 李德明，吴月，孟国强，等. HD-Pulse超低飞溅焊接技术在工程机械领域的应用研究[J]. 金属加工（热加工），2016（24）：60-63.

[8] 苏衍福，任胜汉，刘斌，等. 一种国产金属粉芯焊丝封底焊焊接工艺开发[J]. 金属加工（热加工），2020（7）：56-59.

[9] 李德明. 工程机械用长方盒类构件焊接工艺研究及应用[D]. 济南：山东大学，2018.

MW 20241212