

钛/铝/钛三层板的一次爆炸复合

范敏郁, 郭训忠, 崔圣强, 吴倩, 秦亮, 陶杰

(南京航空航天大学, 江苏 南京 211106)

摘要: 为评价一次爆炸复合工艺制备的钛/铝/钛三层复合板的界面结合性能, 利用 SEM、EDS 对钛/铝/钛复合板的双层界面组织形貌以及界面元素分布进行了表征; 对钛/铝/钛三层复合板进行了拉伸试验和弯曲变形试验。结果表明: 复合板界面主要由波状界面和平直状界面构成; 铝元素与钛元素在界面上发生了互扩散; 拉伸和弯曲变形结果表明, 一次爆炸复合工艺制备的钛/铝/钛三层复合板具有较大的抗拉强度和优良的界面结合性能, 可以承受后续较大的二次塑性变形。

关键词: 一次爆炸复合; 钛/铝/钛; 界面; 拉伸性能; 弯曲性能

中图分类号: TG456.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)03-0770-07

钛/铝/钛层状复合材料在航空、航天工业中具有极其重要的应用价值。将钛/铝/钛层状复合材料通过后续热处理, 可在界面上形成大量金属间化合物, 最终形成的 Ti/Al₃Ti/Ti 夹心层结构的复合材料具有优异的高温力学性能, 从而在航空、航天工业中的热端部件或隔热部件的实际应用中极具吸引力^[1]。

钛/铝/钛层状复合材料目前可能的制备方法包括: (1) 轧制法: 采取铸锭冶金法^[2]或粉末冶金法^[3]制坯, 在高温($\alpha+\gamma$)两相区进行等温轧制, 严格控制应变速率, 并防止 TiAl 基金板材的氧化^[4]。为降低变形抗力和改善应力状态, 往往需要采用等温轧制和包套轧制, 工艺复杂, 成本昂贵; (2) 箔冶金法: 利用高温元素扩散机理及超塑性原理, 将冷轧和退火处理后的钛箔和铝箔经叠层在真空热压炉中热压复合, 该方法可以实现界面的冶金结合, 但是目前尚未实现大面积制备^[5]。另外, 物理气相沉积法^[6]、机械合金化法^[7]以及快速凝固法^[8]最近也有所应用。

除了上述制备方法之外, 爆炸复合法是制备大面积层状金属复合材料极具前景的重要方法^[9-13]。采用爆炸复合法, 覆层材料与基板材料不仅可以实现冶金结合, 界面结合强度高, 而且能够实现大面积制备, 具有工程意义。

对于具有三层结构且基材厚度值较大的复合板, 爆炸复合工艺具有明显优势, 可以采用多次复合的方法进行制备。但是对于层厚小于 1 mm 的三层结构复合板, 由于每次复合的变形过大, 导致难以多次复合。

一次同时复合三层板坯, 就成为了比较可靠的选择。但是一次爆炸复合多层超薄板材的难度较大, 若复合工艺控制不当, 则会导致覆材与基材大面积断裂、剧烈弯曲变形、表面严重灼伤等重大缺陷。

鉴于三层结构的钛/铝/钛层状材料在航空、航天领域具有极其重要的应用价值, 且钛/铝/钛复合层板后续塑性加工多为弯曲成形, 但目前与其相关的研究工作尚进行较少^[14]。本研究对具有三层结构的 0.5 mm 厚的超薄钛板和超薄铝板同时进行了爆炸复合, 研究了双层界面的微观形貌及元素扩散特征, 并对钛/铝/钛三层复合板进行了拉伸实验和弯曲实验, 以评价复合板的塑性成形能力。

1 实验

选用的纯钛板坯 (TA1) 尺寸为 300 mm×350 mm×0.5 mm; 另外, 纯铝板坯的尺寸为 300 mm×350 mm×0.5 mm。为减少爆炸复合后层板的表面缺陷, 需在层板上下分别放置冲击板和垫板。冲击板选用纯铁 (含碳量小于 0.02%), 其尺寸为 300 mm×400 mm×10 mm; 垫板选用 45#钢, 其尺寸为 300 mm×350 mm×20 mm。

将 45#钢的垫板置于混凝土地基上, 然后将其上表面涂刷黄油; 将纯钛板置于垫板之上, 在其四角放置间隙固定片, 厚度 0.5~1 mm; 将纯铝板置于间隙固定片之上。按照相同的方法将第 2 块纯钛板置于铝板之上。在第 2 块纯钛板上放置纯铁冲击板, 冲击板与

收稿日期: 2016-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51475231, 51205196); 教育部博士点基金项目 (20123218120029)

作者简介: 范敏郁, 男, 1991 年生, 硕士生, 南京航空航天大学, 江苏 南京 211106, 电话: 025-52112911, E-mail: fanminyu@nuaa.edu.cn

纯钛板之间用黄油隔开, 以防焊合。然后在冲击板上表面铺放岩石粉状乳化炸药, 密度为 0.536 g/cm^3 , 装药厚度为 2.5 cm , 药量约为 2 kg , 爆速约为 2600 m/s 。采用三层复合板爆炸复合的装配体。通过电雷管引爆乳化炸药, 在冲击波以及爆炸产物的强力推动下, 最上层的冲击板与第 1 层纯钛板、第 2 层纯铝板以及第 3 层纯钛板依次产生撞击、塑性变形甚至局部融化, 短时间内在界面上实现冶金结合。

利用 TM3000-SEM, EDS 对钛/铝/钛复合板的双层界面组织及界面元素分布进行了表征。

2 结果与分析

一次爆炸复合后的钛/铝/钛复合层板具有双层界面, 如图 1 所示。为便于研究双层界面的各自特征, 将距离炸药较近的界面称之为第 1 层界面, 靠近垫板一侧的则称之为第 2 层界面。

2.1 第 1 层界面形貌及元素分布

图 2a 示出了钛/铝/钛复合层板第 1 层界面的波形特征形貌, 其波长约为 $500 \mu\text{m}$ 。其原因为炸药的爆轰作用力使钛板发生弯曲并且在向铝板飞行过程中, 受到爆轰产物膨胀效应的影响, 爆轰作用力由爆轰波头至碰撞点逐渐递减, 爆炸复合瞬间作用在钛板上的实际爆轰作用力呈波状分布。在波形界面附近的纯钛层与纯铝层界面结合良好, 纯铝层一侧无裂纹存在。在纯钛层一侧, 未出现破碎的钛颗粒, 这与封闭爆炸环境下的钛/铝复合管的界面局部存在破碎钛颗粒特征明显不同^[15], 与爆炸复合时的爆轰能量有关。复合板的爆炸复合, 能量散失相对较快, 在纯钛层一侧仅出现局部非连续区域, 主要为过渡层。

图 2b 为钛/铝/钛复合层板第 1 层界面的 Ti 元素与 Al 元素垂直于界面方向的 EDS 线扫描结果。从图中可知, 从纯钛基体到纯铝一侧, 钛元素含量 (原子分数) 由 100% 逐渐下降到 0, 在界面处呈梯度递减; 而铝元素的含量 (原子分数) 则由 0 逐渐增加到 100%,

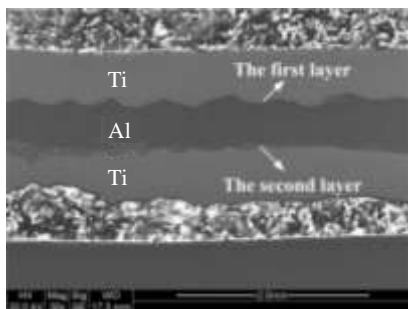


图 1 Ti/Al/Ti 复合层板的双层界面结构
Fig.1 Bonding interface of Ti/Al/Ti laminates

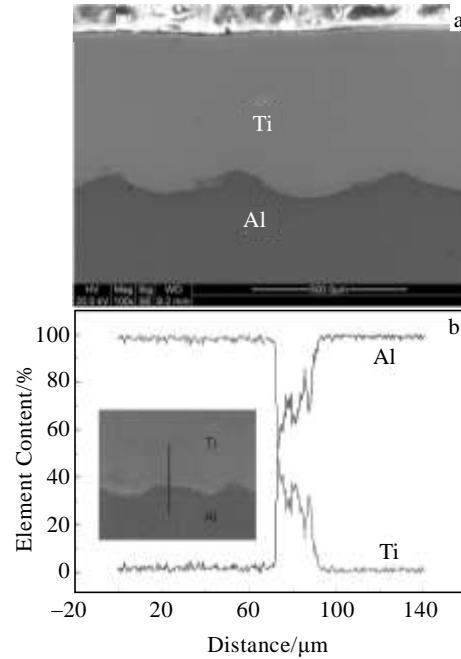


图 2 Ti/Al/Ti 复合层板第 1 层界面形貌及 EDS 元素线扫描
Fig.2 Morphology (a) and EDS element line distributions (b) of the first bonding interface for Ti/Al/Ti laminates

界面处呈梯度递增。元素呈梯度变化的宽度约为 $30 \mu\text{m}$, 说明在此区域内, 铝元素与钛元素发生了互扩散, 界面形成冶金结合。

2.2 第 2 层界面形貌及元素分布

图 3a 为钛/铝/钛复合层板的第 2 层界面形貌。可见其明显不同于第 1 层界面形貌。第 2 层的界面不存在有规律的波形, 主要由近平直界面构成。钛/铝/钛复合层板在爆炸复合的过程中, 爆轰能量通过爆轰产物直接作用于冲击板上, 冲击板与第 1 层的钛板发生高速撞击, 钛板在冲击板的作用下与第 2 层的纯铝发生碰撞, 导致元素扩散形成明显的波状界面。中间纯铝层相对较软, 在强烈的撞击作用下厚度明显减小 (如图 1 中所示), 吸收了较多的爆轰能量。因而, 中间纯铝层与第 3 层纯钛撞击能量大幅降低, 第 2 层界面相对平直。

图 3b 为第 2 层界面垂直于界面方向上的 EDS 元素线扫描结果。可见, 在第 2 层的界面局部出现了较厚的过渡层, 其厚度明显大于第 1 层界面。实验结果表明, 第 2 层界面形成了明显的元素扩散, 界面为冶金结合。

2.3 拉伸性能评价及断口分析

根据 GB/T 228.1-2010 金属材料室温拉伸试验标准制备拉伸试样, 并在万能材料试验机上进行拉伸试验, 测得抗拉强度为 412 MPa , 远高于纯铝, 与纯钛的抗拉强度非常接近。其原因为爆炸复合造成强烈的

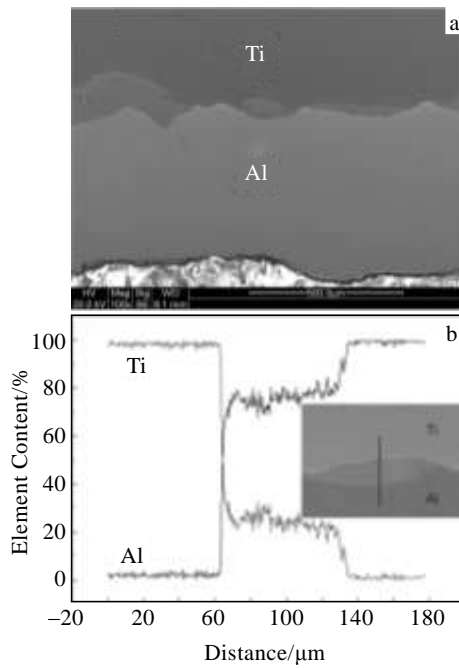


图 3 Ti/Al/Ti 复合层板第 2 层界面形貌及 EDS 元素线扫描
Fig.3 Morphology (a) and EDS element line distributions (b) of the second bonding interface for Ti/Al/Ti laminates

加工硬化，位错密度大幅增加，位错在运动时的相互交割作用加剧产生大量固定割阶、位错缠结等障碍，增加位错运动阻力，引起变形抗力增加，从而大幅提高复合层板的强度。另外，在爆炸复合过程中，金属的变形速率可达 $10^6 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$ ，应变率极高，钛中孪晶密度大幅提高，孪晶的影响主要表现为硬化效应，即孪晶会细化晶粒而使位错运动的有效距离减小，从而提高塑性流动的硬化率^[16]。铝层韧性较好，处于两钛层之间，起到较好的缓冲作用，在拉伸时铝层与钛层相互牵引，在一定程度上提高抗拉强度。

利用扫描电镜观察拉伸断口形貌，结果如图 4 所示。第 1 层界面结合良好，未出现分离，第 2 层界面出现明显分离。其原因为第 1 层界面在爆炸复合时受到的爆轰能量较大，界面呈波纹状，界面结合优良；复合板的第 2 层纯铝吸收了大量爆轰能量，造成第 2 层界面呈平直状，界面结合弱于第 1 层界面。中间铝层出现了明显的牵引变形，验证了上述铝层具有缓冲作用的推断。微观断口钛层和铝层均存在大量韧窝，呈现明显的韧性断裂特征。韧窝存在一定的方向性，基本朝向断口下方，符合宏观断口与拉伸轴成 45° 的剪切断裂特征，是切应力作用下的剪切韧窝，说明复合板是从断口下方的钛层开始断裂的。纯铝塑性明显优于纯钛，因而铝层形成的韧窝较大、较深，钛层形成的韧窝较小、较浅。

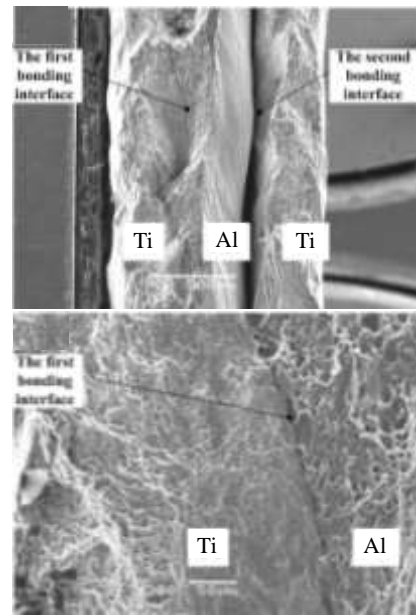


图 4 Ti/Al/Ti 复合层板拉伸断口形貌
Fig.4 Tensile fracture morphologies of Ti/Al/Ti laminates

2.4 弯曲性能实验

由于钛/铝/钛复合层板后续塑性加工多为弯曲成形，故对其弯曲性能进行了评价与分析。采用三点弯曲试验装置对钛/铝/钛复合层板的弯曲性能进行评价，弯曲模头部弯曲半径为 3 mm。钛/铝/钛复合层板弯曲角度约为 130° 时，界面无任何宏观分层。将钛/铝/钛复合层板置于两平行压板之间，对其两端连续施加压力使其进一步弯曲，直至两端直接接触。至此，将钛/铝/钛复合层板分别弯曲至 130° 、 140° 、 150° 、 160° 、 170° 、 180° 等 6 个角度，试验结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出，钛/铝/钛复合层板经过 180° 角弯曲，界面仍然无任何宏观分层，说明复合层板界面结合优良。选用 1.5 mm 厚的钛板，采用相同的三点弯曲装置按相同步骤弯曲至 130° 、 140° 、 150° 、 160° 、 170° 、 180° 等 6 个角度，以对比验证钛/铝/钛复合层板的弯曲性能。

利用 TM3000 扫描电子显微镜对钛/铝/钛复合层板的 130° 、 140° 、 150° 、 160° 、 170° 、 180° 6 个角度弯曲试样进行观察，以评价钛/铝/钛复合层板的弯曲性能。

钛/铝/钛复合层板 130° 、 140° 、 150° 3 个弯曲角度试样如图 6 所示。从图中可以看出，钛层、铝层、两层界面结合处均无微观裂纹，界面结合良好，说明钛/铝/钛复合层板可以弯曲至 150° 。钛/铝/钛复合层板弯曲至 150° 未出现微观裂纹，是由于钛/铝/钛复合层板中铝层较软，在弯曲变形时可以起到缓冲作用，减少了应力集中，从而抑制了微裂纹核心的形成和长大。

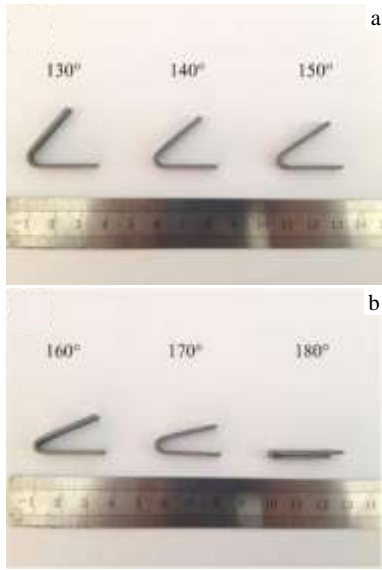


图 5 Ti/Al/Ti 复合层板经弯曲变形后的形貌

Fig.5 Morphologies of Ti/Al/Ti laminates after bending deformation: (a) 130°, 140° and 150°; (b) 160°, 170° and 180°

钛/铝/钛复合层板 160° 弯曲试样如图 7 所示，从图中可以看出，钛层和铝层基体均未出现微观裂纹，

但在两层界面结合处出现大量微观裂纹，且裂纹扩展方向与加载方向基本一致。微观裂纹扩展至钛层和铝层基体处长度不再增加，但微观裂纹间的空隙尺寸增大。

钛/铝/钛复合层板 170° 弯曲试样如图 8 所示。从图中可以看出，钛层和铝层基体均未出现微观裂纹，但在两层界面结合处的中心漩涡区出现微观裂纹，且裂纹扩展方向与加载方向基本一致。从图 8c 中可以看出，在中心漩涡区出现明显的微观裂纹源，其形态与周围过渡层明显不同，且在微观裂纹源周围呈现出辐射状的微观裂纹，裂纹扩展方向与加载方向基本一致。

钛/铝/钛复合层板 180° 弯曲试样如图 9 所示。从图中可以看出，铝层基体未出现微观裂纹，但在钛层基体、两层金属界面结合处、中心漩涡区均出现大量微观裂纹，且裂纹扩展方向与加载方向基本一致。界面结合处和中心漩涡区的微观裂纹均扩展至钛层和铝层基体处长度不再增加，但微观裂纹间的空隙尺寸增大，且由于试样磨制抛光过程中会产生大量碎屑，因而裂纹空隙中填充了大量杂质。

钛/铝/钛复合层板弯曲角度大于 160° 时在界面结合处和漩涡中心处产生裂纹，且裂纹方向与加载方向一致，裂纹扩展，扩展至基体金属处长度不再增加，但是微观裂纹间的空隙尺寸增大。因此，钛/铝/钛复合

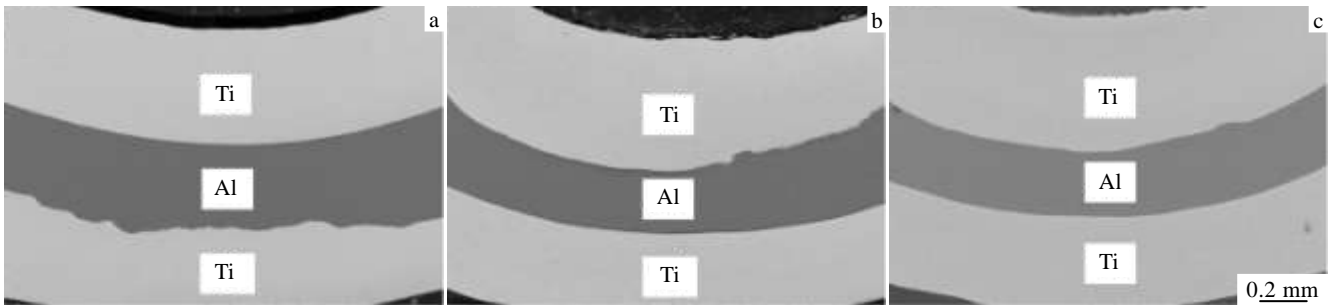


图 6 Ti/Al/Ti 复合层板经弯曲变形后的截面形貌

Fig.6 Morphologies of Ti/Al/Ti laminates after bending deformation: (a) 130°, (b) 140°, and (c) 150°

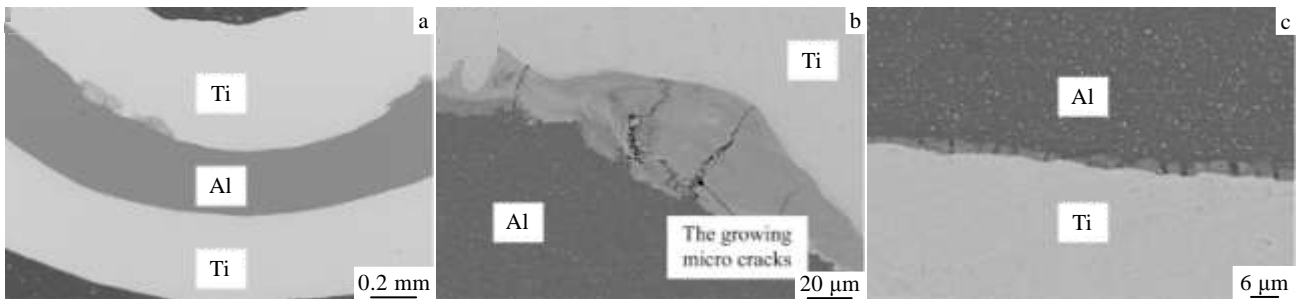


图 7 Ti/Al/Ti 复合层板经 160° 弯曲变形后的截面形貌

Fig.7 Morphologies of Ti/Al/Ti laminates after bending deformation of 160°. (a) double interfaces, (b) microcracks at the inner layer interface, and (c) microcracks at the outer layer interface

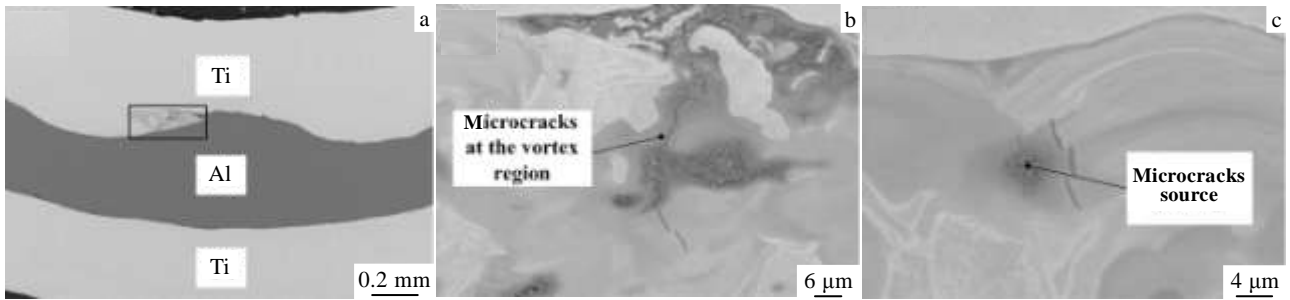


图 8 Ti/Al/Ti 复合层板经 170° 弯曲变形后的截面形貌

Fig.8 Morphologies of Ti/Al/Ti laminates after bending deformation of 170°: (a) double interfaces, (b) microcracks at the vortex region, and (c) microcracks source

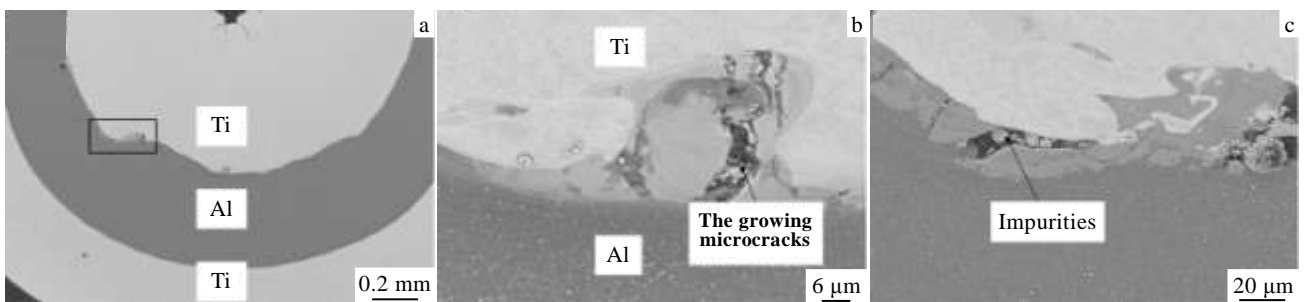


图 9 Ti/Al/Ti 复合层板经 180° 弯曲变形后的截面形貌

Fig.9 Morphologies of Ti/Al/Ti laminates after bending deformation of 180°: (a) double interfaces, (b) vortex region, and (c) inner layer interface

层板弯曲变形时弯曲角应小于 160°。

钛板和铝板的塑性差异较大,使得钛/铝/钛复合层板在弯曲变形过程中表现出不均匀性。且主要在界面结合处协调受力变形,因此微观裂纹容易在界面结合处萌生。此外,由于钛和铝 2 种金属晶体结构不同,钛是密排六方结构,而铝是面心立方结构,2 种金属的弹性模量和剪切模量差异较大,使钛/铝/钛复合层板在弯曲变形时,界面上产生附加切应力^[17]。钛/铝/钛复合层板两层界面结合处同时产生微观裂纹(如图 7 所示),其主要原因是复合层板为钛/铝/钛三层结构,铝层对内外层都起到了缓冲作用,两层界面的抗裂纹扩展能力差异性较小。

爆炸复合时 Ti 和 Al 2 种金属流在如图 8 所示的漩涡区被绝热压缩,并快速冷却,因此其成分极其不均匀,相组成不能按照 Ti 和 Al 的二元相图判断,极有可能产生脆性的金属间化合物或形成杂质点^[18],脆性金属间化合物或杂质点冷却时产生应力集中,弯曲时则成为微观裂纹核心,应力集中加剧,2 次应力集中的叠加作用造成漩涡区产生微观裂纹,且漩涡区比界面结合处更易产生微观裂纹。从图 8c 中可以看出,

漩涡区存在一明显的微观裂纹核心,且周围呈现出辐射状的微观裂纹,裂纹扩展方向与加载方向基本一致。

利用 TM3000 扫描电子显微镜对钛板的 130°、140°、150°、160°、170°、180° 6 个角度弯曲试样进行观察,以对比验证钛/铝/钛复合层板的弯曲性能。

钛板 130° 弯曲试样如图 10 所示。从图中可以看出,钛板已经出现少量的微观裂纹,裂纹扩展方向与加载方向基本一致。

钛板经 180° 弯曲后(如图 11),钛板中部开始产生贯穿的微观裂纹,部分钛板甚至呈三角状脱离钛板基体,裂纹的长度和宽度远大于上述弯曲试样,且裂纹扩展方向与加载方向基本一致。

钛/铝/钛复合层板经过 150° 弯曲后,未出现微观裂纹,而相同厚度的钛板经 130° 弯曲(图 10)已产生微观裂纹,说明爆炸复合工艺制备的钛/铝/钛复合层板具有良好的弯曲性能,经大角度弯曲后,界面无任何宏观分层产生,且无微观裂纹,性能明显优于单一的钛板。其主要原因为铝层韧性较好,处于两钛层之间,起到较好的缓冲作用,减少应力集中,从而抑制了微观裂纹核心的形成和长大。将钛/铝/钛复合层板成形为具有复杂形状的弯曲零件的成形工艺和成形缺陷控制,

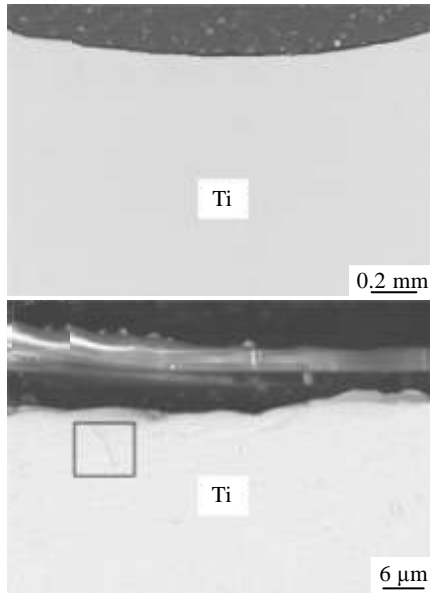


图10 钛板经130°弯曲变形后的截面形貌

Fig.10 Morphologies of Ti plates after bending deformation of 130°

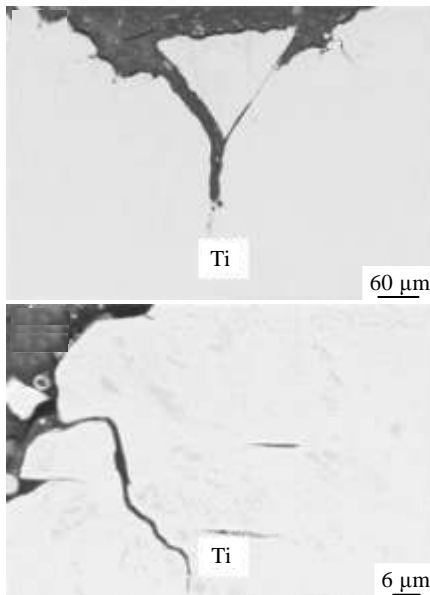


图11 钛板经180°弯曲变形后的截面形貌

Fig.11 Morphologies of Ti plates after bending deformation of 180°

需进一步开展相关研究工作。

3 结论

1) 通过一次爆炸复合工艺, 可以成功制备具有三层结构的钛/铝/钛复合层板。钛/铝/钛复合层板的两层

界面具有不同特征: 临近炸药一侧界面明显形成有规律波状结合, 而另一侧界面则无明显波形, 且大多呈平直状。

2) 一次爆炸复合制备的钛/铝/钛复合层板抗拉强度达到 412 MPa, 远高于纯铝, 与纯钛抗拉强度非常接近, 微观断口形貌呈现明显的韧性断裂特征, 第 1 层界面结合良好, 第 2 层界面出现明显的分离。

3) 钛/铝/钛爆炸复合层板具有良好的弯曲性能, 经大角度弯曲后, 界面无任何宏观分层或微观裂纹产生, 说明钛/铝/钛复合层板具有可以成形为复杂弯曲件的可能性。

参考文献 References

- [1] Ma M, Huo P, Liu W C *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2015, 636: 301
- [2] Kothari K, Radhakrishnan R, Wereley N M. *Progress in Aerospace Sciences*[J], 2012, 55: 1
- [3] Rao K P, Prasad Y, Suresh K. *Materials and Design*[J], 2011, 32(10): 4874
- [4] Chaudhari G P, Acoff V L. *Intermetallics*[J], 2010, 18(4): 472
- [5] Konieczny M. *Composites Theory and Practice*[J], 2013, 13(2): 102
- [6] Ben Cheikh Larbi A, Tlili B. *Surface and Coatings Technology* [J], 2006(3-4): 1511
- [7] Nayak S S, Pabi S K, Murty B S. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2010, 492(1-2): 128
- [8] Nayak S S, Pabi S K, Kim D H *et al.* *Intermetallics*[J], 2010, 18: 487
- [9] Akbari Mousavi S A A, Barrett L M, Al-Hassani S T S. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2008, 202(1-3): 224
- [10] Findik F. *Materials and Design*[J], 2011, 32: 1081
- [11] Honarpisheh M, Asemabadi M, Sedighi M. *Materials and Design*[J], 2012, 37: 122
- [12] Gong S, Li Z, Xiao Z *et al.* *Materials and Design*[J], 2009, 30: 1404
- [13] Akbari Mousavi S A A, Farhadi Sartangi P. *Materials and Design*[J], 2009, 30: 459
- [14] Bataev I A, Bataev A A, Mali V I *et al.* *Materials and Design*[J], 2012, 35: 225
- [15] Guo Xunzhong (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
- [16] Gray G T. *J Phys*[J], 1997, 7: 423
- [17] Rozumek D, Bański R. *Materials and Design*[J], 2012, 38: 139

- [18] Pei Darong(裴大荣), Guo Yuexia(郭悦霞). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1995, 24(6): 48

One-Step Explosive Bonding Preparation of Titanium/Aluminum/Titanium Laminates with Three Layers

Fan Minyu, Guo Xunzhong, Cui Shengqiang, Wu Qian, Qin Liang, Tao Jie
(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: The morphology and element distribution of the bonding interface were investigated by SEM and EDS to evaluate the interface bonding property of titanium/aluminum/titanium with three layers prepared by a one-step explosive bonding method. The tensile property and the bending property were also investigated. The results indicate that the linear and the wavy bonding interfaces coexist and element diffusion occurs in the interfacial zone. Meanwhile, the as-prepared Ti/Al/Ti laminates have a high strength and excellent bonding property and could endure a large secondary plastic deformation.

Key words: one-step explosive bonding method; titanium/aluminum/titanium; interface; tensile property; bending property

Corresponding author: Tao Jie, Professor, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, P. R. China, Tel: 0086-25-52112911, E-mail: taojie@nuaa.edu.cn