

中间层材料对 Ti/Al 搅拌摩擦焊接头组织和性能的影响

张 鑫, 陈玉华, 王善林

(南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063)

摘 要: 以厚度 0.05 mm 的 Zn 或 Ni 箔作为中间层材料, 对 3 mm 厚的 2A14 铝合金和 TC4 钛合金进行搅拌摩擦焊接。研究了不同工艺参数下 Zn 和 Ni 对 Ti/Al 异种金属搅拌摩擦焊接头组织和性能的影响。结果表明: 当添加 Zn 中间层时, 在旋转速度为 375 r/min、焊接速度为 75 mm/min 时, 接头抗拉强度达到 237.3 MPa, 为铝合金母材抗拉强度的 56.7%。同样参数下, 添加 Ni 中间层后, 能显著减少接头中脆性相 $TiAl_3$, 接头抗拉强度提高到 285.3 MPa, 达到铝合金母材抗拉强度的 68%。接头断裂方式呈脆性+韧性混合型断裂。

关键词: Ti/Al 对接; 搅拌摩擦焊; 中间层材料; 金属间化合物

中图分类号: TG146.2; TG453+.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)05-1290-06

铝合金密度低、经济性好, 是目前航空航天、武器装备等高新技术领域中广泛应用的金属材料; 钛合金由于具有质轻、比强度高以及抗冲击等优点而成为航空航天重点发展的新材料之一^[1]。随着航空发动机和飞机结构设计对“减轻重量、提高推重比、增加有效载荷”的要求越来越高, 对铝合金与钛合金复合结构的需求越来越迫切^[2]。Ti/Al 复合构件具有强度/重量比高、抗疲劳性能好, 稳定性好及抗振极限较高等优良性能^[3], 在航空航天、武器装备、交通运输等领域拥有广阔的应用前景。但 Ti/Al 焊接时, 由于两者热物理性能差异大, 焊后接头残余应力大、易变形, 且在焊缝界面极易形成脆性相而使接头抗拉强度降低^[4]。

搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 是英国焊接研究所于 1991 年发明的一种固相连接技术。与传统的熔化焊相比, 其被焊材料不熔化, 接头焊后残余应力小、不易变形, 是制备轻合金构件的一种理想的焊接方法。目前, 国内外关于 Ti/Al 异种金属 FSW 的研究报道较少。陈玉华等^[5]对 Ti/Al 异种金属 FSW 搭接接头的组织结构进行了深入研究, 获得了焊缝成形良好、无孔洞和裂纹等缺陷的搭接接头。Aonuma 等^[6]研究了 AA2024-T3 及 AA7075-T651 铝合金分别与 TC4 的 FSW 接头的成形规律及力学性能, 发现在相同工艺参数下, TC4 与 AA2024 所形成的 Ti/Al 接头强度更高。在接头界面处存在一个钛合金和铝合金的混合区, 拉伸试验过程中, 接头容易

从此区域发生断裂。XRD 结果表明, 该区域存在 $TiAl_3$ 金属间化合物。Dressler 等^[7]对 TC4 钛合金和 AA2024-T3 铝合金的 FSW 对接进行了研究, 在旋转速度为 800 r/min、焊接速度为 80 mm/min 时, 接头抗拉强度达铝合金母材强度 73%。但 Y. C. Chen 等^[8]报道铝合金和钛合金的 FSW 搭接强度只有铝合金母材的 62%, 认为接头界面处由于 Ti/Al 扩散反应生成了金属间化合物 $TiAl_3$, 使得接头性能降低。同样, R. Jiangwei^[9-13]也发现 $TiAl_3$ 、 Ti_3Al 、 $TiAl$ 等金属间化合物的存在是降低 Ti/Al 异种金属接头性能的最主要因素。目前, 尚未有在 Ti/Al 异种金属接头中对金属间化合物进行控制的报道。因此, 本实验提出通过添加中间层材料抑制 TC4 钛合金和 2A14 铝合金异种金属焊缝中产生金属间化合物, 研究了中间层材料 (Zn、Ni) 对接头抗拉强度、接头物相的影响, 为促进 Ti/Al 异种金属 FSW 结构的工程应用提供实验依据。

1 实 验

实验材料为 200 mm×80 mm×3 mm 的 TC4 钛合金和 2A14 (T4 态) 铝合金, 中间层材料为 0.05 mm 厚纯 Zn 箔及纯 Ni 箔。由于 TC4 钛合金具有熔点高、耐磨性好等特点, 为了减小搅拌头的磨损, 将搅拌针向 2A14 铝合金一侧偏置。因为铝合金熔点低、塑性好, 将铝合金置于返回边时, 有助于铝合金在搅拌针的搅拌作用下被带到 TC4 钛合金一侧而形成紧密结合^[14]。焊接过程

收稿日期: 2015-05-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51265042); 江西省自然科学基金 (20114BAB206006); 南昌航空大学卧龙之星培养计划项目 (201302)

作者简介: 张 鑫, 男, 1990 年生, 硕士生, 南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063, 电话: 0791-83863023, E-mail: zhangxin_nchkedu@163.com

中，钛合金和铝合金的相对位置如图 1 所示。搅拌头材料为 DZ125 高温合金，搅拌头轴肩直径为 18 mm，搅拌针直径为 6 mm，且表面加工有左螺纹。实验在 X53K 铣床改装的搅拌摩擦焊机上进行，搅拌头旋转速度为 375~950 r/min，焊接速度为 60~95 mm/min，搅拌头倾角为 2°、偏向铝合金侧的偏移量为 2.5 mm。

2 结果与分析

2.1 中间层材料 Zn 对接头组织和性能的影响

图 2 为不同工艺参数下添加 Zn 中间层的接头的抗拉强度。从图 2 中可以看出，在相同的焊接速度下，旋转速度越大，接头强度越低。接头抗拉强度由旋转速度为 375 r/min 时的 237.3 MPa 降低到旋转速度为 950 r/min 时的 10 MPa。认为焊缝存在的裂纹是接头抗拉伸强度低至 10 MPa 的原因。当旋转速度一定时，焊速越大，接头强度越高。焊缝最大抗拉强度 237.3 MPa 约为 2A14 铝合金母材的 56.7%。分析认为，由于随着旋转速度的增大，单位线能量增大，焊缝温度升高，可达 500 °C 左右^[15]。而 Zn 的熔点只有 419.5 °C，在热输入量大时 Zn

容易熔化，熔化的 Zn 将流出焊缝，在两板之间残留间隙，间隙将由焊缝中其它金属来填充，从而易导致焊缝组织不致密以至于接头力学性能下降^[16]。旋转速度过高，导致焊缝温度过高，促使 Ti 和 Al 之间的原子扩散速度加快，形成大量脆性相，在高的焊接残余应力作用下，接头容易出现裂纹。

图 3a 和 3b 是 Ti/Al 接头的断口形貌。断口光滑平整，未发现韧窝形貌，是典型的脆性断口。图 3c 和 3d 为添加中间层 Zn 的接头断口形貌。显然断口的中下部分光滑平整，而上部分出现韧窝，是塑性断裂+脆性断裂的混合型断裂^[17]。

由图 3a 及其方框内放大图 3b 可知，未添加中间层时接头断裂方式为脆性断裂。能谱分析结果说明接头中生成了 Ti-Al 金属间化合物（图 4a）。分析图 3d 可知，颗粒物由 Al、Cu 元素组成（图 4b），为铝基体中的强化相 Al₂Cu^[18]。由于焊接热作用，T4 态铝合金会析出强化相 θ 相（Al₂Cu）或者原有的强化相颗粒长大削弱了对基体的固溶强化效果。对比加入 Zn 中间层和不添加时的焊接接头拉伸断口可知，Zn 能在一定程度上减少接头中金属间化合物的产生，这样有利于防止裂纹的产生和接头脆性断裂，具体表现为加入中间层 Zn 后接头断裂方式转变为塑性断裂+脆性断裂的混合型断裂，且在断口韧窝区很少发现钛。

2.2 中间层材料 Ni 对接头组织和性能的影响

中间层 Zn 的加入能在一定程度上减少 Ti/Al 接头中金属间化合物的产生，但接头抗拉强度较低，无法满足工程应用要求。在此基础上，进行了添加 Ni 中间层的相关研究。图 5 为搅拌头旋转速度 375 r/min、焊接速度 75 mm/min 时接头横截面宏观形貌。由图可知，钛侧在搅拌针的搅拌作用下形成“C”型界面，且被搅拌针搅碎的钛随搅拌针的旋转以颗粒状分布于焊核，呈洋葱环状。由于中间层 Ni 的熔点较高，在搅拌摩擦焊过程中 Ni 没有发生熔化现象，同样以颗粒状分布于焊缝中。

图 6 为图 5 中各区域局部放大图。由柯黎明等^[19]提出的“抽吸-挤压”理论可知，焊缝中搅拌针根部由于会形成一个瞬时空腔，需要由其它部位的金属来填充，属于缺陷形成高发区。图 6a 为图 5 中区域 B 放大图，由图可看出，界面处结合致密，塑性金属在搅拌针的作用下，铝侧出现明显流线。图 6b 为图 5 中区域 A 放大图，由图可知，此参数下搅拌针根部界面处金属结合良好，无明显缺陷。图 6c 为图 5 中区域 C 放大图，由图可知，接头底部存在未受搅拌针作用而发生破碎的中间层材料 Ni，且 Ti/Ni 界面并未形成冶金结合，存在一定间隙。这是因为搅拌摩擦焊过程中，搅拌针端部与接头底面存在一定距离，使得中间层材料 Ni 底部小段所受搅拌针作

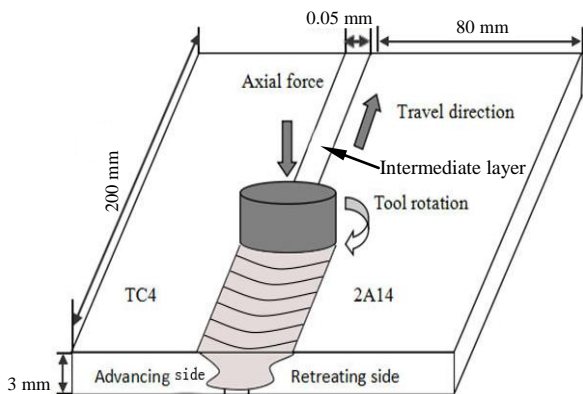


图 1 钛合金、铝合金与中间层材料相对位置示意图

Fig.1 Sketch of relative position for Ti alloy, intermediate layer and Al alloy

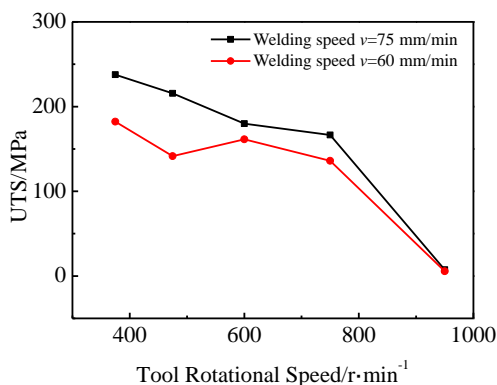


图 2 添加 Zn 中间层的接头的抗拉强度

Fig.2 Tensile strength of the joint with Zn

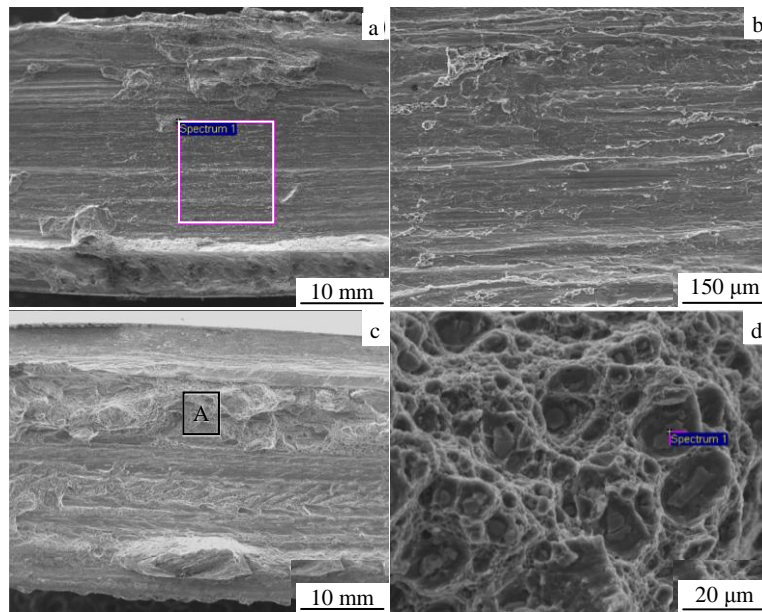


图 3 接头断口形貌分析

Fig.3 SEM images of fracture surface: (a, b) fracture surface without Zn; (c, d) fracture surface with Zn

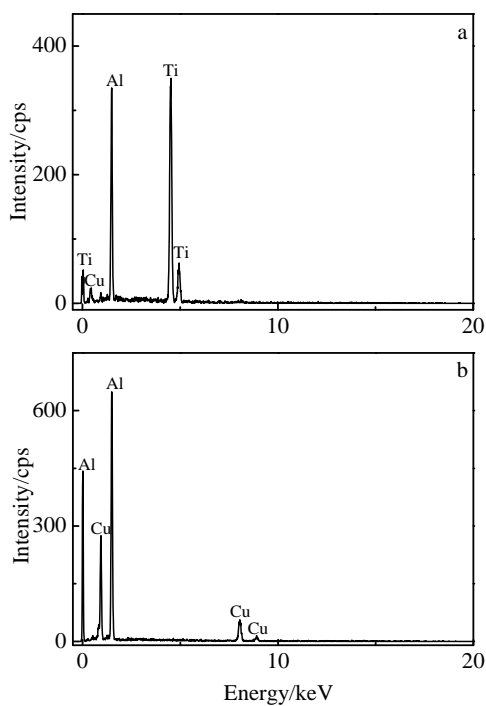


图 4 图 3 中所示位置的能谱分析结果

Fig.4 EDS spectrum in Fig.3a (a) and EDS spectrum in Fig.3d (b)

用不大，只是发生了较大程度的变形，而并未像其它部位一样被搅拌针搅拌破碎。

图 7 为接头铝侧断口扫描电镜照片。图 7b 为图 7a 中区域 A 放大图，图 7c 为区域 B 放大图。由图 7b 可看出，断口区域 A 中出现一亮色带状区域，且带状区与右



图 5 添加 Ni 中间层的接头横截面宏观形貌

Fig.5 Macro-morphology of cross-section of the joint with Ni

侧结合致密，但与左侧结合界面处出现孔洞缺陷。此区域断裂表面光滑平整，属脆性断裂。而图 7c 区域 B 中的沟槽部分经过放大后可看出属于韧性断裂。综合可知，此参数下接头断裂方式为韧性+脆性混合型断裂方式。韧性断裂保证了接头具有一定的韧性，脆性断裂保证了接头的强度。

图 8 为图 7 断口中不同区域的能谱分析。由图 8a 亮带区能谱分析可知，亮色带状区域中主要元素为 Ni，含有少量 Ti，说明亮色带为所加入中间层材料 Ni，结合接头横截面可知，在接头底部存在未被搅拌针搅碎的 Ni，且与铝合金侧形成致密结合，而 Ni 与钛合金未完全形成冶金结合，在进行抗拉强度试验时，Ni 与钛合金侧断裂，在断口上形成上面所示的亮色带状区。由图 8b 可知，韧窝区的韧窝小而浅，且韧窝中存在较大颗粒状物质。由图 8e 的能谱结果可知，颗粒物中含有 Al、Cu、Si、Ti 等元素，其中 Cu、Si 元素为 2A14 铝合金所含元素，由峰值强度可知，颗粒中所含 Ti 非常少，不属于 Ti-Al 金属间化合物。故颗粒物可能是铝合金在热作用下析出的强化相与 Ti 的混合物。Spectrum 2 说明此区域物质为基

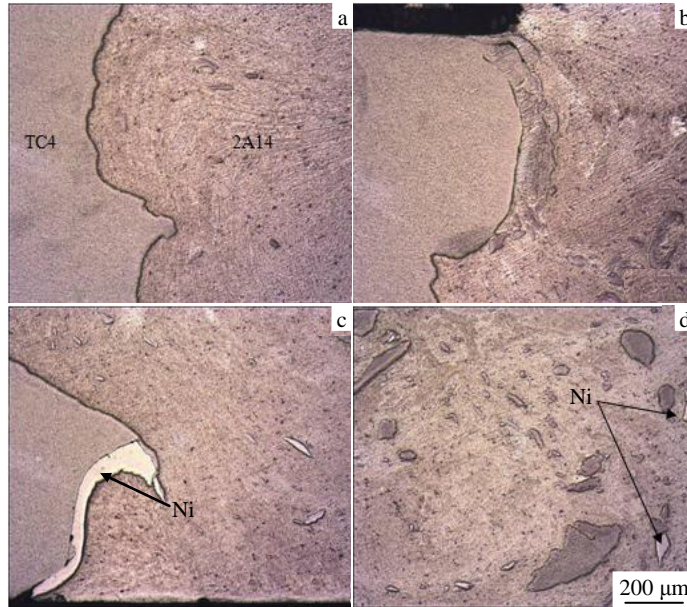


图 6 图 5 中各区域局部放大图

Fig.6 Micro-morphologies of different regions in Fig.5: (a) region B, (b) region A, (c) region C, and (d) region D

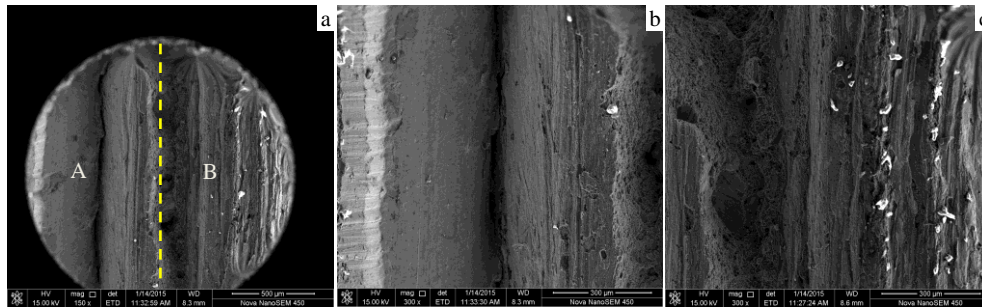


图 7 添加 Ni 中间层的接头铝侧断口扫描电镜照片

Fig.7 SEM images of fracture surface of the joint with Ni: (a) fracture surface of aluminium alloy side, (b) magnified views of the region A in Fig.7a, and (c) magnified view of the region B in Fig.7a

体铝。由图 8c 中线扫描结果可知，在中间层 Ni 与铝合金界面处存在一 Ti-Al 金属间化合物，初步分析应为 Ti_3Al 。Ni 层右边本应为铝合金基体，但线扫描结果显示含 Al 极少，Ti 同样含量很少，而 Ni 元素却较稳定。这说明，中间层 Ni 对 Ti/Al 界面起到了阻隔的作用。对图 8d 中大颗粒状物质进行元素分析，结果见 8f。由图 8f 可知，Al 和 Ti 的原子比接近 1:1，应属于金属间化合物 TiAl，而 Si、Cu 属于铝合金所含元素，V 属于钛合金所含元素，说明颗粒状物质应为金属间化合物 TiAl 与 Ti 的混合物。

图 9 为在焊接速度 75 mm/min、偏移量 2.5 mm、下压量 0.2 mm、焊接角度 2° 时，在不同旋转速度下分别加入中间层 Zn 和 Ni 时接头抗拉强度对比图。由图可知，加入中间层 Zn 后接头强度随旋转速度变化而变化的规律明显，加入中间层 Ni 后接头强度变化趋势无明显规律

性，但与加入 Zn 时一样，总体呈下降趋势。接头抗拉强度在加入中间层材料 Ni 后整体优于加入 Zn，使其抗拉强度达 285.3 MPa，为铝合金母材的 68%。

图 10 为在旋转速度 375 r/min、焊接速度 75 mm/min 时接头过渡区的 XRD 图谱。由图可看出，未添加中间层材料时，接头中产生了 $TiAl_3$ 、TiAl 等金属间化合物及析出的铝合金强化相 Al_2Cu 。当加入中间层材料 Zn 后，接头中仍存在 $TiAl_3$ 和 TiAl 相，但相较于未添加中间层材料时，生成了新的金属间化合物 Ti_3Al 、 $TiAl_2$ 以及 $TiZn_{16}$ 。当加入中间层材料 Ni 时，接头中金属间化合物种类较简单，除生成共有的 $TiAl_3$ 相外，和加入中间层材料 Zn 一样，生成了 Ti_3Al 相，此外，被搅拌针搅拌破碎的 Ni 颗粒与焊缝中铝合金生成 Al_3Ni_2 相。由图 5，6 中横截面形貌图可知，Ni 颗粒在焊缝中呈弥散状分布，

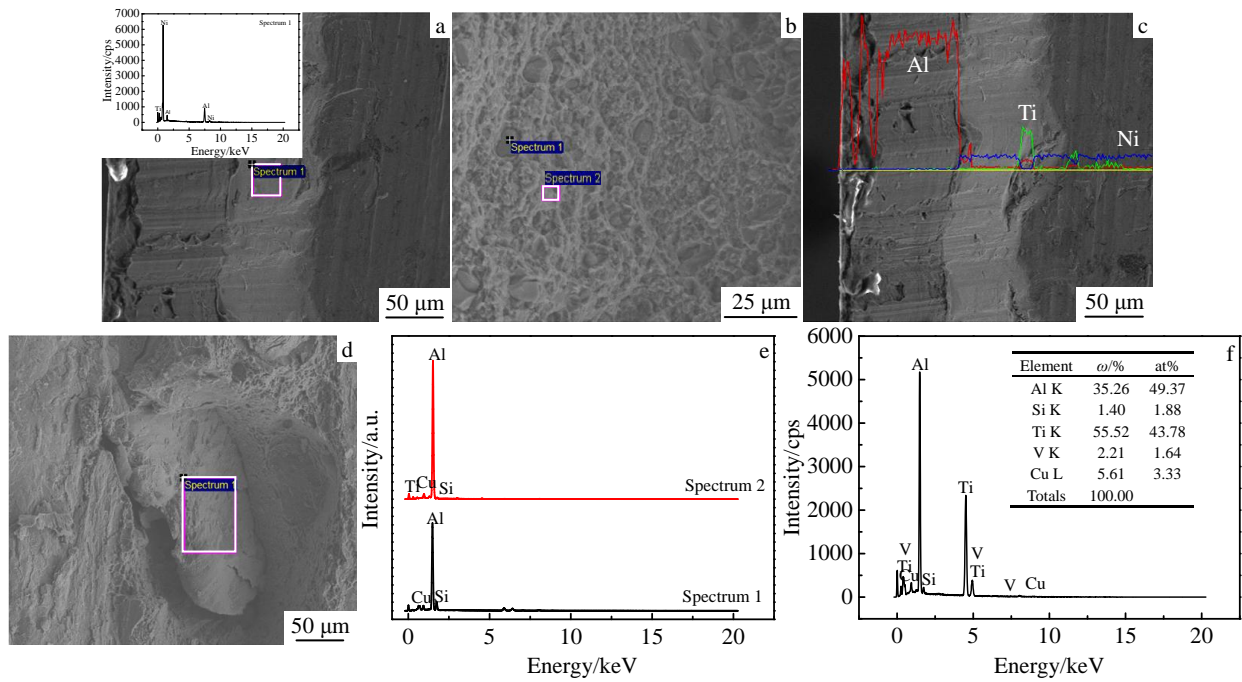


图 8 图 7 断口中的能谱分析

Fig.8 EDS analysis of fracture surface in Fig.7: (a) brightly zonal region and EDS spectrum, (b) local amplification of ditch region in Fig.7a-B, (c) result of EDS line scanning, (d) magnified view of spalling large particle area, (e) EDS spectrum in Fig.8b, and (f) EDS spectrum in Fig.8d

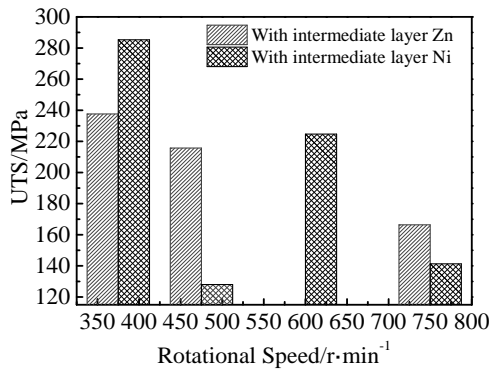


图 9 添加中间层 Zn 和 Ni 的接头强度对比图

Fig.9 Comparison of tensile strength for the joints with Zn and Ni

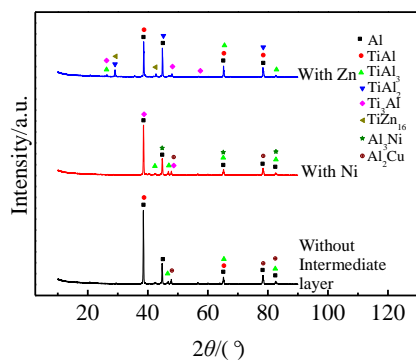


图 10 添加中间层 Zn 和 Ni 的接头过渡区 XRD 图谱

Fig.10 XRD patterns of transitional layer of the joints with Zn and Ni

对接头强度起到一定的增强作用。

研究发现,不同原子在相互扩散时,晶体结构是重要的影响因素之一。晶体结构越相似,则互扩散系数越大。Al 与 Ni 的晶体均属于面心立方结构,而 TC4 为密排六方+体心立方结构,说明 Al 与 Ni 互溶性较好,互扩散系数大^[20]。二者通过原子互扩散发生如下反应: $3Al+Ni \rightarrow Al_3Ni$ 、 $Al_3Ni+Ni \rightarrow Al_3Ni_2$, 生成 Al_3Ni 和 Al_3Ni_2 相,由于 Al_3Ni 相不稳定,故绝大多数 Al-Ni 金属间化合物以稳定的 Al_3Ni_2 相形式存在。Ni 在替代 Ti 与 Al 优先进行互扩散时,会使 Ti 与 Al 通过原子扩散形成的 $TiAl_3$ 相减少。而 $TiAl_3$ 相数量是影响 Ti/Al 接头强度的主要因素,故 $TiAl_3$ 相的减少有助于提高接头的强度。

为验证 $TiAl_3$ 相对接头力学性能的影响,进行了此参数下不添加中间层材料时接头抗拉强度试验,得到接头平均抗拉强度为 257.6 MPa,高于添加中间层材料 Zn 时,但低于添加中间层材料 Ni。加入中间层材料 Zn 后接头强度出现下降的原因是因为接头中出现了种类较多的金属间化合物,且 Zn 在 FSW 过程中发生熔化,使接头出现缺陷。

3 结论

1) 低熔点的中间层材料 Zn 对接头中金属间化合物具有一定的调控作用,但在 FSW 过程中易发生熔化,使接头产生缺陷,对 Ti/Al 接头强度未起到增强作用。

在旋转速度为 375 r/min、焊速为 75 mm/min 时, 接头抗拉强度达 237.3 MPa, 为 2A14 铝合金母材的 56.7%。

2) 中间层材料 Ni 对接头强度起到增强的作用, 在旋转速度 375 r/min、焊速 75 mm/min 时, 接头平均抗拉强度达到 285.3 MPa, 为铝合金母材抗拉强度的 68%。

3) $TiAl_3$ 相对 Ti/Al 接头强度影响最大。当加入中间层材料 Ni 后, 由于 Al 与 Ni 之间的高扩散系数, 使得 Al-Ni 金属间化合物优先形成, 导致 Ti 与 Al 在热作用下发生扩散的时间缩短, 从而抑制了 $TiAl_3$ 相的生成, 提高接头强度。

参考文献 References

- [1] Chen Yuhua, Ni Quan, Ke Liming *et al.* *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*[J], 2010, 20(1): 211
- [2] Chen Yuhua(陈玉华). *Aeronautical Manufacturing Technology* (航空制造技术)[J], 2012, 21: 42
- [3] Zhu Zhengqiang(朱政强), Zeng Chun(曾纯), Zhang Yifu(张义福) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2011, 40(7): 118
- [4] Wang Yarong(王亚荣), Teng Wenhua(滕文华), Yu Yang(余洋) *et al.* *Chinese Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2012, 48(20): 88
- [5] Chen Yuhua(陈玉华), Ni Quan(倪泉), Huang Chunping(黄春平) *et al.* *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2011, 32(9): 73
- [6] Aonuma M, Nakata K. *Materials Transactions*[J], 2011, 52(5): 948
- [7] Dressler U, Biallas G, Alfaro Mercado U. *Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 526(1): 113
- [8] Chen Y C, Nakata K. *Materials & Design*[J], 2009, 30(3): 469
- [9] Jiangwei R, Yajiang L, Tao F. *Materials Letters*[J], 2002, 56(5): 647
- [10] Fuji A. *Science and Technology of Welding & Joining*[J], 2002, 7(6): 413
- [11] Chen Yukun, Ni Quan, Ke Liming. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2012, 22(2): 299
- [12] Chen Shuhai(陈树海), Li Liqun(李俐群), Chen Yanbin(陈彦宾). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(1): 32
- [13] Yao Wei(姚为), Wu Aiping(吴爱萍), Zou Guisheng(邹贵生) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(4): 700
- [14] Li B, Zhang Z, Shen Y *et al.* *Materials & Design*[J], 2014, 53: 838
- [15] Wang Xijing(王希靖), Guo Ruijie(郭瑞杰), A Rong(阿荣) *et al.* *Electric Welding Machine*(电焊机)[J] 2004, 34(1): 22
- [16] Huang Hua(黄华), Dong Shijie(董仕节), Wu Yong(吴勇) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2006, 35(3): 1
- [17] Lv Shixiong(吕世雄), Yang Tao(杨涛), Huang Yongxian(黄永宪) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(3): 478
- [18] Wang Yarong(王亚荣), Teng Wenhua(滕文华), Yu Yang(余洋) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2012, 22(12): 3307
- [19] Ke Liming(柯黎明), Pan Jiluan(潘际銮), Xing Li(邢丽) *et al.* *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2009, 45(4): 89
- [20] Askew J R, Wilde J F, Khan T I. *Materials Science and Technology*[J], 1998, 14(9-10): 920

Effect of Intermediate Layer on Microstructure and Mechanical Properties of Ti/Al Joint Welded by Friction Stir Welding

Zhang Xin, Chen Yuhua, Wang Shanlin

(National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Ti/Al joints were fabricated by friction stir welding (FSW) 3 mm thick 2A14 aluminium alloy and TC4 titanium alloy with Zn and Ni ribbons of 0.05 mm thickness as intermediate layer. Effects of Zn and Ni on the microstructure and mechanical properties of the joints were studied. The results indicate that the tensile strength of the joint with Zn is up to 237.3 MPa, nearly 56.7% of that of the aluminum alloy when the welding velocity is 75 mm/min and the rotation speed 375 r/min. Under the same processing parameters, the tensile strength of the joint with Ni as intermediate layer reaches 285.3 MPa, nearly 68% of that of the aluminum alloy. Ni as intermediate layer can reduce brittle phase $TiAl_3$, and the fracture mode is brittle/ductile fracture.

Key words: Ti/Al butt joint; friction stir welding (FSW); intermediate layer; intermetallic compound

Corresponding author: Chen Yuhua, Ph. D., Professor, National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, Tel: 0086-791-83863023, E-mail: ch.yu.hu@163.com