



Al/Cu 复合材料 制备工艺及界面组织演变研究现状

关杰仁, 王秋平

(江苏科技大学 海洋装备研究院增材制造研发中心, 镇江 212003)

摘要: Al/Cu 复合结构是将纯 Al 和纯 Cu 通过特定的机械或冶金方法结合在一起的典型的层状双金属复合材料, 具有导电性能优异、质轻、价格低等特性, 已成为广泛的研究热点。本文介绍了 Al/Cu 复合材料金属间化合物的种类及物理性质, 阐述了界面扩散反应行为的影响因素。综述了国内外关于 Al/Cu 复合材料的制备工艺及界面组织性能的研究进展, 并对复合界面研究方向和采用增材制造技术制备 Al/Cu 复合结构的改进方向进行了展望, 为 Al/Cu 复合结构的制备提供关键的理论依据和技术支撑。

关键词: Al/Cu 复合; 扩散; 金属间化合物; 制备工艺; 界面; 激光增材制造

文章编号: 1004-0609(2022)-09-2510-11

中图分类号: TB331

文献标志码: A

引文格式: 关杰仁, 王秋平. Al/Cu 复合材料制备工艺及界面组织演变研究现状[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(9): 2510–2520. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42264

GUAN Jie-ren, WANG Qiu-ping. Research progress of preparation technique and interface microstructure evolution of Al/Cu composite materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(9): 2510–2520. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42264

随着 Cu 资源的消耗, 铜制备材料价格昂贵, 寻找理想的替代材料不仅能降低成本, 而且还能获得更优异的性能^[1]。Al/Cu 复合材料兼具铝较低的密度和铜较高的热导率、电导率以及可焊接性而被广泛研究, 主要应用于电子、电力和汽车行业^[2]。Al/Cu 界面结合是通过熔化和扩散两种结合方式, 形成具有一定厚度界面层的冶金结合。相关研究表明, Al/Cu 界面处存在多种金属间化合物^[3], 复合体的界面层是最容易发生断裂的位置^[4], 特别是金属间化合物的形成和宽化将促进裂纹生长, 对结合强度产生不利影响^[5], 因此, 对界面过渡层组织的研究至关重要, 而 Al/Cu 界面处的金属间化合物的形成机制和互扩散行为主要与加工工艺有关。传统

的成熟制备工艺包括电磁连铸法^[6]、离心浇铸法^[7]和拉拔法^[8]等, 本文基于 Al-Cu 金属间化合物性质和界面扩散行为, 综述了制备 Al/Cu 复合结构最新工艺及引起的界面组织和性能变化, 为 Al/Cu 复合结构的进一步研究提供借鉴与参考。

1 Al/Cu 金属间化合物

由 Al-Cu 二元相图可知^[9], 平衡状态下主要存在 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 、 $\eta_2(\text{AlCu})$ 、 $\zeta_2(\text{Al}_3\text{Cu}_4)$ 、 $\gamma_1(\text{Al}_4\text{Cu}_9)$ 等相, 其空间晶格结构如图 1 所示。实际上, 加工过程中形成的金属间化合物组分取决于加工温度和时间, AO 等^[10]在 150 °C 的工作温度下未发现金属间

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(20KJD430005); 江苏省高校高技术船舶协同创新中心自培育项目(HZ20200006)

收稿日期: 2021-09-01; **修订日期:** 2021-10-18

通信作者: 王秋平, 助理研究员, 博士; 电话: 13333856825; E-mail: a21096@163.com

化合物, 而更高的温度和保温时间促进了元素扩散, 在界面处形成了 Al_2Cu 相、 AlCu 及 Al_4Cu_9 等金属间化合物。LIU 等^[11]在不同保温时间范围内研究了 Al-Cu 扩散区域的组织及物相, 形成的四种金属间化合物 θ 相、 η_2 相、 ζ_2 相、 γ_1 相遵循抛物线式的增长模式, 其性能参数如表 1 所示, γ_1 相的弹性模量最大, 蠕变应力指数最小。CHEN 等^[12]计算了三种 Al-Cu 金属间化合物的形成能, 结果表明 AlCu 是三种金属间化合物中最稳定的相, 形成能最小的 $\text{Al}_2\text{Cu}(\Delta H_f = -15.036 \text{ kJ/mol})$ 相首先形成, 后续向 $\text{AlCu}(\Delta H_f = -20.656 \text{ kJ/mol})$ 和 $\text{Al}_4\text{Cu}_9(\Delta H_f = -20.466 \text{ kJ/mol})$ 转变。

除了形成能外, 金属间化合物的形成机制还与扩散相关, 界面处原子的扩散能力遵循经典的动力学理论, 原子的扩散系数(D)由温度(T)和激活能(Q)决定, 即^[13]

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中: R 为摩尔气体常数($8.314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$)。

HUG 等^[14]发现在 Cu、Al 扩散过程中沿径向存在浓度梯度, 易使界面附近的富 Cu 区产生柯肯达尔效应(Kirkendall effect), 形成空洞。由于 Cu 在 Al 中的扩散系数远大于 Al 在 Cu 中的扩散系数, 形成的界面反应层主要借助 Cu 向 Al 一侧的扩散^[15], 其

表 1 Al/Cu 金属间化合物的弹性模量(E)和硬度(H)^[11]

Table 1 Elastic modulus (E) and hardness (H) for different Al/Cu intermetallics^[11]

Al/Cu composite	H/GPa	E/GPa	Creep stress index
θ	6.88	112.45	14.94
η_2	11.74	227.91	17.09
ζ_2	11.94	228.73	11.38
γ_1	9.41	254.69	10.75

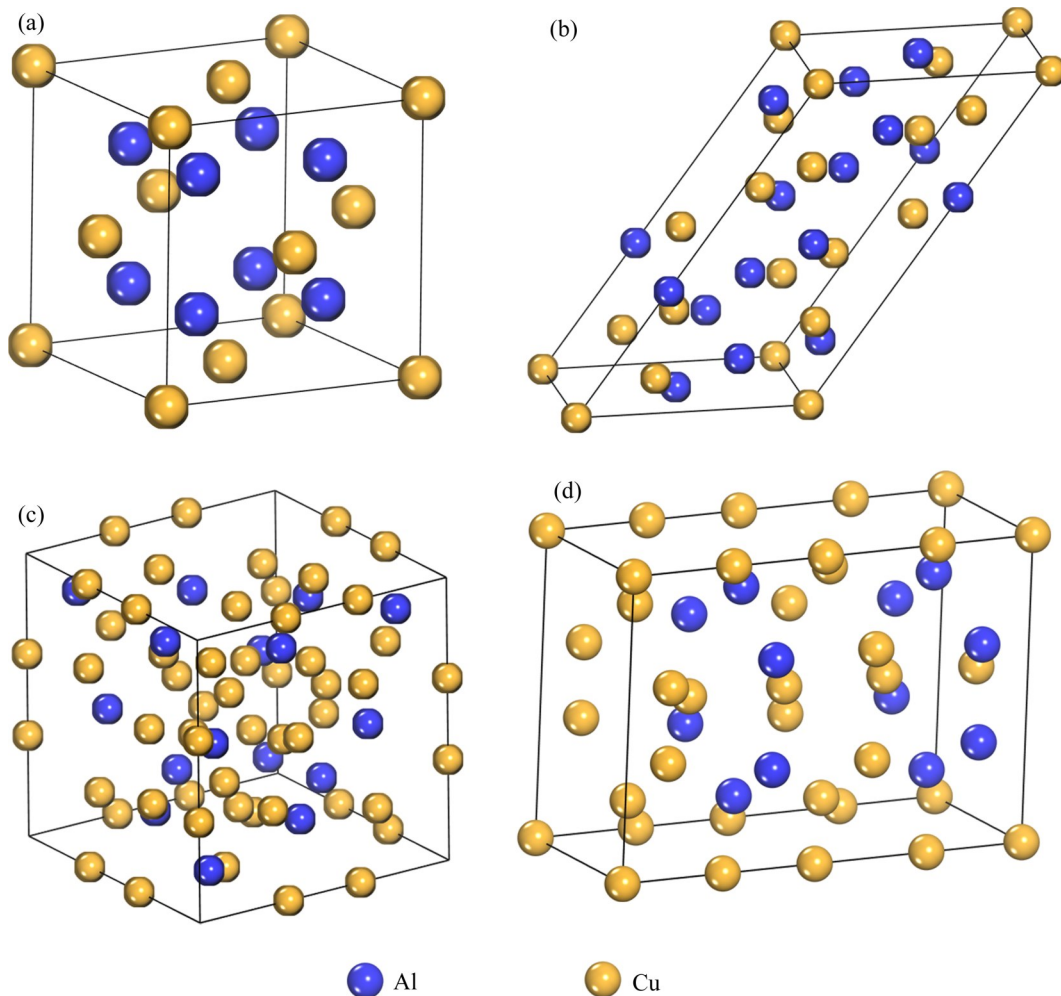


图 1 Al-Cu 金属间化合物空间结构

Fig. 1 Spatial structures of Al-Cu intermetallics: (a) Al_2Cu ; (b) AlCu ; (c) Al_4Cu_9 ; (d) Al_3Cu_4

扩散反应过程如图2所示,生成的界面反应层厚度遵循公式^[16]:

$$x = k_0 \sqrt{t} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

式中: k_0 为反应常数; t 为反应时间。界面反应时间越长,温度越高,越利于扩散层厚度增加。KIM等^[17]在340~500℃区间范围内研究了Al/Cu界面扩散行为,当温度升至400℃时,扩散层厚度显著增加, Al_4Cu_9 的增长速率高于 Al_2Cu , 低于400℃烧结温度下,采用粉末冶金法合成的Al-Cu复合体具有更好的力学和热学性能。HAN等^[18]研究了等温550℃条件下Al/Cu扩散结合对界面演变的影响,在真空和氩气的保护作用下,增加结合时间为15~25 min,界面区域生成 Al_4Cu_9 、 CuAl 、 Al_2Cu 等金属间化合物,相似的结论在ZARE等^[19]对Al/Cu的复合铸造研究中有报道,且从Cu侧向Al侧依次为 Al_4Cu_9 、 CuAl 、 Al_2Cu , 在这些相的附近形成了 $\alpha(\text{Al})$ 和 Al_2Cu 的共晶组织。为了提高材料的混合性,低温短时内在界面处获得均匀的组织,ZAHERI等^[20]将Cu、Al(+Fe纳米颗粒)、Zn等粉末混合,过渡层区域获得了更薄、更均匀的金属间化合物层。ZHAO等^[21]采用浸镀的方式将镍镀在纯铝

基体上,在450~550℃范围内用扩散复合的方法制备Al/Cu双金属材料,Ni中间层有效消除Al-Cu金属间化合物,Al/Ni界面由 Al_3Ni 和 Al_3Ni_2 组成,Ni/Cu界面处为Ni-Cu固溶体,复合材料的拉伸剪切强度有所提升。虽然,在Al、Cu界面结合处添加中间层能够抑制Al-Cu化合物的形成,但中间层的厚度、保温区间和保温时间对Al/Cu复合体力学性能的影响规律有待探究。

2 Al/Cu 复合结构工艺及界面组织性能

2.1 轧制法

轧制法是制备复合板材最常用的方法,受轧制力的影响,双金属产生塑性变形,导致金属接合表面氧化层破裂,新鲜的金属由裂口暴露出相互嵌入形成稳固接合,具有成本低、设备简单的优点。KIM等^[22]采用轧制的方法制备了Cu/Al/Cu层复合结构,Cu、Al层的相互作用变形促进界面强力结合,其伸长率高于纯铜板和纯铝板,相似的研究结论在LIU等^[23]的研究中也有报道,Cu和Al复合体

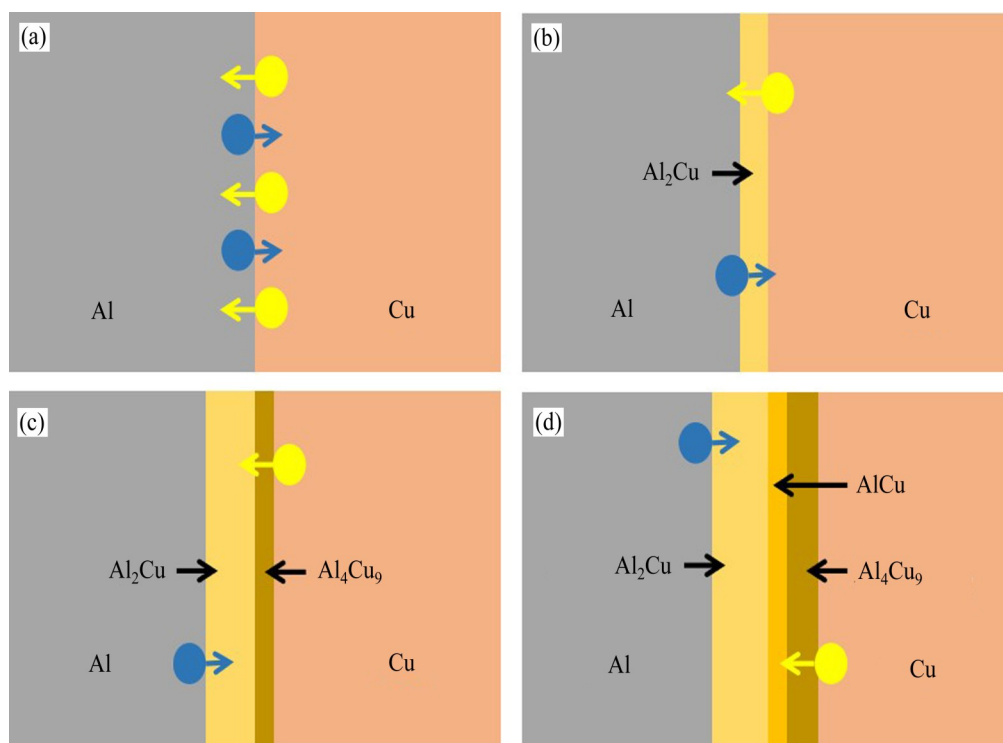


图2 Al/Cu界面扩散反应示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Al/Cu interface diffusion reaction: (a) Atom interface; (b) $2\text{Al} + \text{Cu} \rightarrow \text{Al}_2\text{Cu}$; (c) $2\text{Al}_2\text{Cu} + 7\text{Cu} \rightarrow \text{Al}_4\text{Cu}_9$; (d) $5\text{Al}_2\text{Cu} + \text{Al}_4\text{Cu}_9 \rightarrow 14\text{AlCu}$

的协同变形效应使得拉伸强度和伸长率均有升高。由于轧制过程中会出现加工硬化, 常需要进行退火热处理, 加速原子重排和减少晶格缺陷, 提高材料加工性能^[7]。CHEN等^[5]研究了冷轧双金属 Al/Cu 板的结合强度, 随着烧结温度和时间的增加, 结合强度先升高后降低, 扩散层呈现明显的层状分布, 主要有 Al_2Cu 、 AlCu 、 Al_3Cu_4 、 Al_4Cu_9 等相。LI等^[24]采用异步叠扎法制备 Al/Cu/Al 复合薄板, 350 °C 退火后界面发生元素扩散, 受不同轧辊转速的影响, 累积的变形能使 Cu/Al 界面优先发生扩散, 400 °C 退火后产生大量的金属间化合物, 三点弯曲变形过程中出现裂纹和分层。陈剑虹等^[15]采用累积叠扎结合多次退火处理的方式研究了 Al/Cu 界面反应的扩散机制, 由于 Cu 的扩散激活能高于 Al, 退火过程中 Cu 原子向 Al 侧扩散, 热力学不稳定的界面从 Al 侧至 Cu 侧生成 $\text{Al}_2\text{Cu} \rightarrow \text{AlCu} \rightarrow \text{Al}_4\text{Cu}_9$, 叠扎道次增加使 Al 基体晶粒持续细化, 8 次道间退火促进部分 Cu 原子固溶在 Al 晶格点阵中, 复合板的抗拉强度高达 176.8 MPa, 但伸长率较差。

2.2 爆炸复合法

爆炸复合法于 1944 年由美国学者卡尔提出,

利用爆炸形成的能量使待复合的金属板发生高速碰撞, 导致金属板间发生相互挤压摩擦, 金属发生塑性变形和原子间发生扩散反应形成牢固的冶金结合。王乐等^[25]采用爆炸复合工艺制备了 Al/Cu 板材, 波形结合界面存在部分锯齿状结构。CARVALHO等^[26]研究了不同爆炸焊接条件下 Al/Cu 结合的可焊接性, 当采用 Al 作为飞板焊接时, 更容易发生界面连续熔化。KUZ' MIN 等^[27]利用超声辅助爆炸焊的方法研究了 Al/Cu 接头的组织和性能, 熔融金属的含量显著减少, 界面呈现直线型轮廓, 焊接接头强度增加。爆炸复合法难以形成硬脆性金属间化合物, 不会产生明显的扩散, 但稳定性较差, 存在污染严重、安全性低等问题。

2.3 超声焊接法

相比于激光连接方法, 固态焊接法能够制备高质量的 Al/Cu 异质接头^[28-29]。作为一种固态焊接法, 超声焊接具有高效、变形小等优点, 可实现异种金属材料的连接^[30-31]。ZHANG 等^[32]采用超声焊接方法研究了 Al/Cu 接头的界面组织和物相, 除了机械互锁结构外, 在约 10 nm 的过渡层中发现了非晶相和纳米晶相, 如图 3 所示, 超声振动引发的固

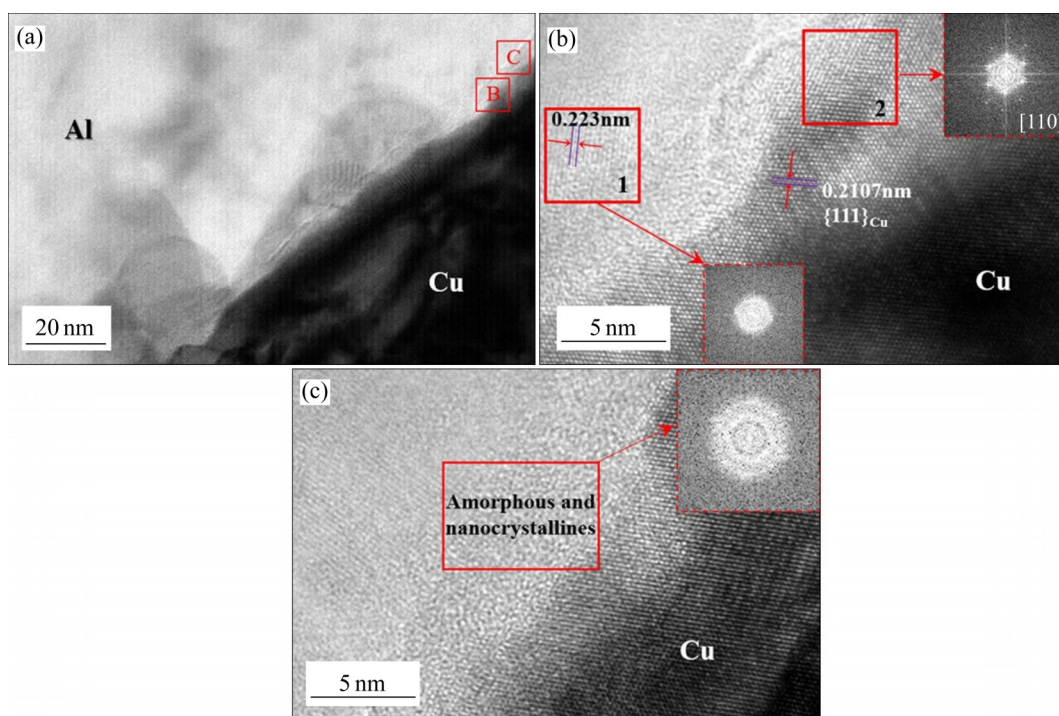


图3 Al/Cu过渡层低放大倍数的明场形貌^[32]

Fig. 3 Low magnification bright-field images of Al/Cu diffusion layer (a) and HRTEM images of transition layer taken from Fig. (a) ((b), (c))^[32]

态塑性变形增加了过渡层附近的位错和层错密度,加速了Al/Cu的元素互扩散。

MA等^[33]研究超声焊接Al-Cu接头的动态焊接演化过程,如图4所示,首先在Al侧高的表面凸起处形成微焊缝,随后在界面处的连续相对摩擦诱发剧烈的塑性变形,导致微焊缝交替的断裂和形成、微凸起的平整化、Al向Cu表面附着,当Cu侧表面凸起完全嵌入Al基体中,界面处主要为互锁模式。熊志林等^[34]对超声波焊接Cu/Al接头的界面反应行为开展研究,较小的焊接能量形成扩散反应区,焊接能力增大,Al/Cu界面处发生变形,形成高密度位错累积,元素快速扩散,逐渐析出 Al_2Cu 和 Al_4Cu_9 相,继续增大焊接能量使反应层变厚。LIU等^[35]采用电流辅助超声焊接的方法制备了Al/Cu异质材料,相比于超声焊接方法,沿着焊接界面处形成更薄的金属间化合物层,获得了更高的拉伸强度和断裂能,且界面过渡层中形成 Al_2Cu 相,与FUJII等^[36]的研究结论相似,在剧烈变形区域内,Cu向Al中的扩散速率增加。但界面处形成的连续金属间化合物会降低接头焊接强度,无法满足力学性能的要求^[10,37]。LI等^[38]使用Zn箔片作为中间媒介,采用超声点焊的方式在Al/Cu接头处获得 Cu_5Zn_8 、 Al_2Cu 两种金属间化合物,抑制了其它Cu/Al金属间化合物的形成,轴承加载能力显著提高。

上述工艺方法虽然能实现Al/Cu材料的复合成型,然而存在坯料制备过程复杂、工艺流程长、界面结合性能差等问题。为了实现Al/Cu复合材料大规模、高效率、低成本的生产需求,北京科技大学谢建新课题组^[39-40]采用连续定向凝固技术制备Cu-12%Al合金线材,已实现工业化生产,同时指出,

连续铸造工艺是生产复合板的主流方向^[41]。WANG等^[42]采用水平连续复合铸造的技术制备了Cu-Al双金属复合板,如图5所示,并研究了轧制变形行为和界面演化,为了避免分层开裂,冷轧条件下第一道次要求压下率超过60%,当温度升至200~300℃时,压下率可降至55%,最终拉伸强度达到180~191 MPa、伸长率达到8%~12%。然而,传统工艺只能实现简单结构的复合制备,对于复合材料三维空间复杂结构的制造受到严重制约。

2.4 激光增材制造法

增材制造技术具有强大的构建功能,在空间中,具有选择性地放置多材料的能力。作为增材制造技术中的一种,以激光为热源、粉末为原材料的粉床熔融技术能够直接成型出无需后处理、高致密度、表面质量优异、尺寸精度高的结构件,由于凝固速率高达 $10^6\sim 10^8\text{ }^\circ\text{C/s}$ ^[43],获得的组织细小,层间结合性强,力学性能与锻件相当^[44],金属粉末原材料可以回收再利用,节省成本,对于复杂结构具有高度制造柔性,根据规划路径选择性熔融,能够快速制造空间复杂结构,包括多孔、栅格、薄壁等^[45]。激光粉床熔融技术能够实现钛合金^[46-47]、高温合金^[48-49]、铝合金^[50-51]及铜合金^[52-53]的高性能一体化成型,已成功应用于航空航天、船舶海工、生物医疗、汽车工业等高精尖领域。随着不同材料成型工艺的日趋成熟,基于零件整体性能优化提升为目的,突破传统制造技术材料复杂性、层次复杂性和功能复杂性上的瓶颈,近年来研究广泛。新布伦瑞克大学的SHAKERIN等^[54]将热作模具钢块固定在成形基板上,采用EOSM290设备在模具钢(H13)

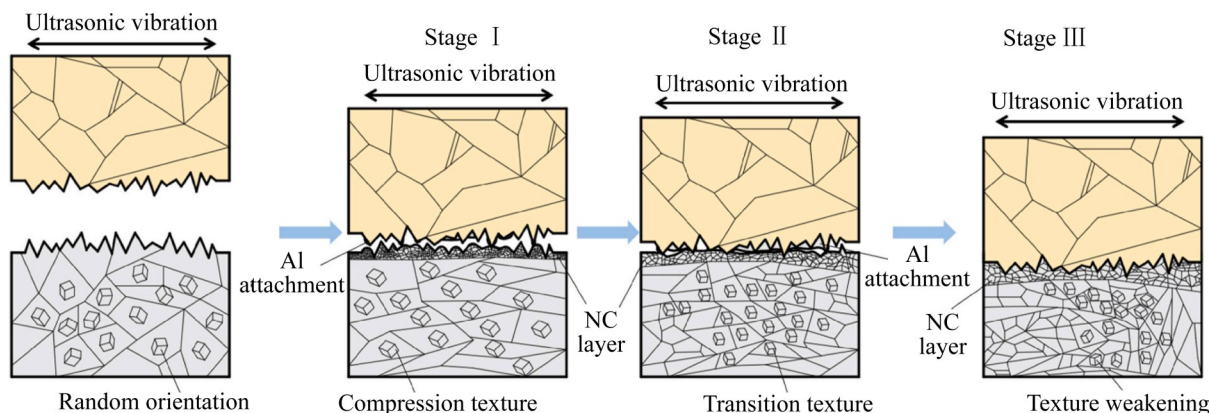


图4 超声焊接Al-Cu接头焊缝动态演变示意图^[33]

Fig. 4 Schematic diagram of dynamic weld evolution of ultrasonically welded Al-Cu joints^[11]

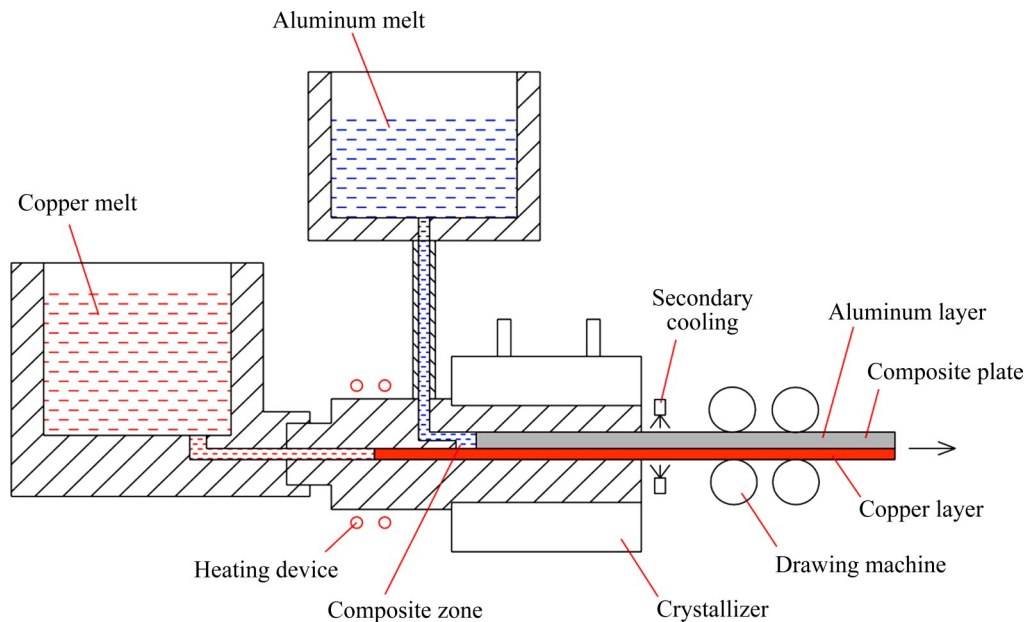


图5 水平连续复合铸造制备 Al-Cu 复合板的示意图^[42]

Fig. 5 Schematic diagram of horizontal continuous composite casting for fabricating Al-Cu composite plate

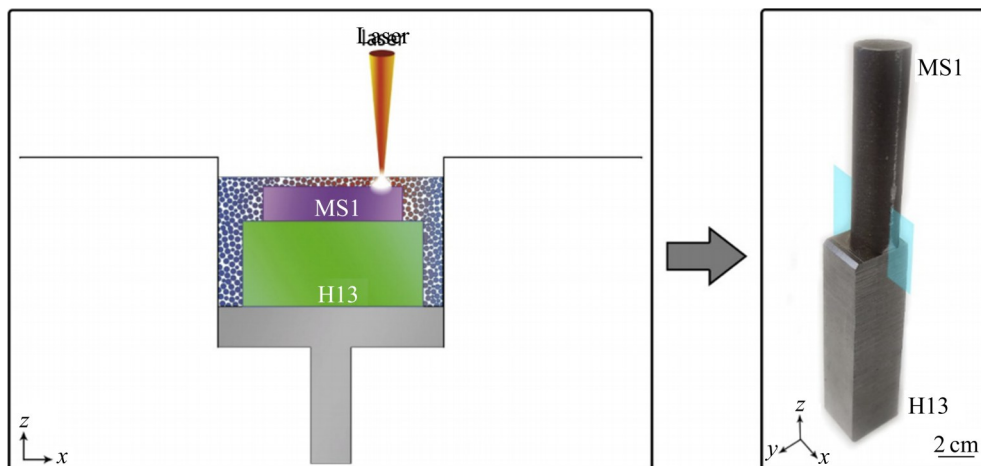


图6 LPBF 技术制备 MS1-H13 双金属结构示意图^[54]

Fig. 6 Schematic diagram of MS1-H13 bimetal manufactured by LPBF^[54]

表面成形马氏体钢(MS1)粉末,如图6所示,界面处无裂纹且连续,证明了激光粉床熔融技术成形多种材料的可行性。英国曼彻斯特大学 WEI 等^[55]基于 LPBF 和 LENS 技术原理,发展一种以超声振动为基础的精密送粉装置,如图7所示,已成功制备 Cu/钢异质合金结构。然而,该装置成型空间小,对于大型尺寸零件的加工存在耗时长、剩余粉末无法分离回收等问题。

近年来,王迪等^[56]致力于采用激光粉床熔融技术成型多金属材料,通过工艺调控实现异质材料界

面的性能控制。SING 等^[57]采用粉床熔融技术制备了 Al/Cu 复合结构,界面处形成 Al_2Cu 金属间化合物,未发现其他相,但由于两种材料的热膨胀系数不同,快速凝固过程中在界面处产生裂纹,受较高的反射率和热导率的影响,铜侧形成一定量的气孔。因此,需要采取合适的工艺调控途径降低缺陷。GUAN 等^[58]通过有限元模拟结果和基于粉床熔融成形工艺优化途径,制备了界面处无裂纹的 Al/Cu 双金属结构,如图8(a)~(d)所示,并结合柯肯达尔效应解释了元素间的扩散行为。基于超声焊接工

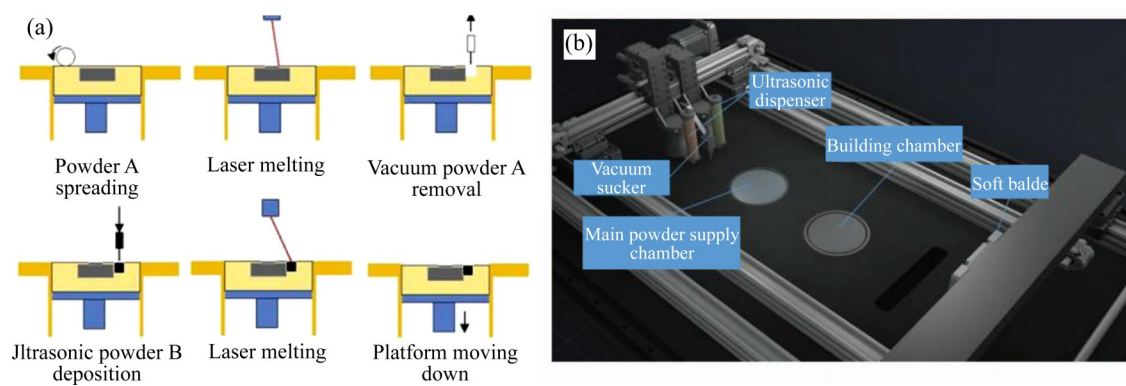


图7 多材料成型过程示意图以及装置结构示意图^[55]

Fig. 7 Schematic diagram of multi-materials process(a) and relevant schematic diagram of setup(b)^[55]

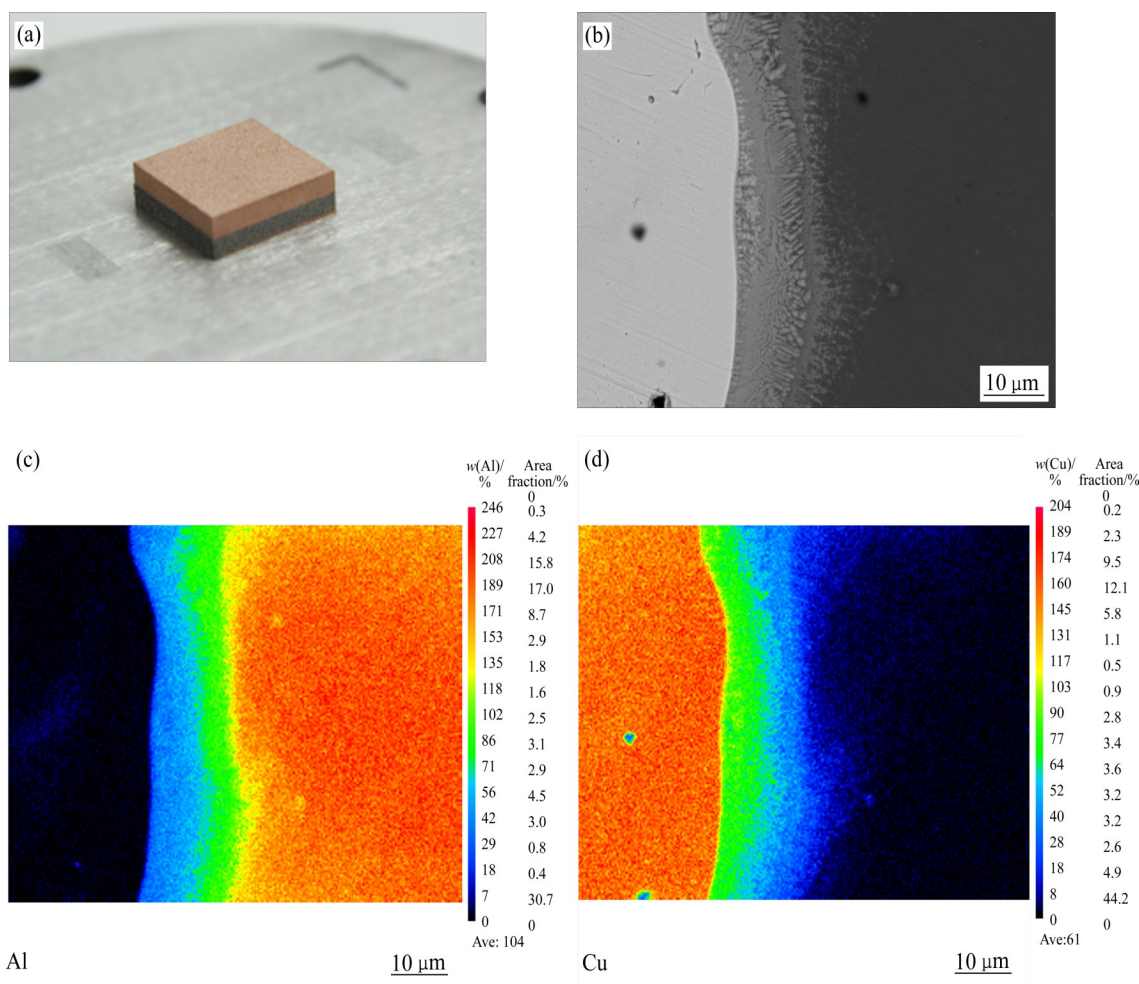


图8 采用激光粉末床熔融技术制备的Al/Cu双金属复合结构^[58]

Fig. 8 Al/Cu bimetal composite fabricated by laser powder bed fusion technique^[58]: (a) Macro appearance; (b) Interface microstructure; (c) Al element distribution; (d) Cu element distribution

艺原理, 美国航天局(NASA)喷气推进实验室(JPL)提出“超声波增材制造”, 连续焊接金属片, 结合增材和减材处理能力, 实现铝-铜多材料一体化制造, 并已用于探索如何生产高效的热交换器。

3 未来研究方向

1) 目前, 基于Al/Cu复合结构制备工艺的探索

主要集中于讨论扩散引起的金属间化合物形成、界面层厚度及力学性能变化等方面,缺乏对 Al/Cu 复合材料界面微域变形行为的深入研究。CHEN 等^[59]采用分子动力学方法研究了压缩加载条件下 Al/ Al_2Cu /Cu 的界面特性和塑性变形机制,在 Cu(111)/ $\text{Al}_2\text{Cu}(\bar{1}10)$ 界面产生的位错阻碍了变形过程,导致界面构型呈现韧性断裂特征。实际上,不同保温时间下将生成其他 Al-Cu 金属间化合物,从原子层次上考虑,不同物相晶格晶面的相互作用对于变形行为影响的研究有待系统阐述。

2) 从抑制金属间化合物生成、控制界面层厚度角度出发,在不引入外部干预和中间层媒介的条件下,采用激光增材制造技术可以获得最少的 Al-Cu 相,且能满足零件结构形状、尺寸精度的要求。但受 Al、Cu 热物理性能的影响,需要严格控制成型工艺,降低界面处形成的缺陷,保证良好的冶金结合。

3) 现阶段,国内基于粉床熔融技术的设备只能成型同一种粉末材料,一旦开舱换粉将影响成型的连续性,不利于性能的保障。因此,亟需开发多材料的成型装备,合理规划软硬件的协同加工方式,为 Al/Cu 复合结构的制备提供新技术支持并奠定新理论基础。

REFERENCES

- [1] SAEID T, ABDOLLAH-ZADEH A, SAZGARI B. Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum-copper lap joints made by friction stir welding[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 490(1/2): 652–655.
- [2] SHENG L Y, YANG F, XI T F, et al. Influence of heat treatment on interface of Cu/Al bimetal composite fabricated by cold rolling[J]. *Composites Part B Engineering*, 2011, 42(6): 1468–1473.
- [3] WANG B, PING L, LIU X K, et al. Microstructures and mechanical properties of Cu/Al compound materials during thermal cycle[J]. *Rare Metals*, 2022, 41(11): 3911–3918.
- [4] ZHANG J, LUO G Q, SHEN Q, et al. Characterization of diffusion-bonded joint between Al and Mg using a Ni interlayer[J]. *Rare Metals*, 2016, 35(7): 537–542.
- [5] CHEN C Y, CHEN H L, HWANG W S. Influence of interfacial structure development on the fracture mechanism and bond strength of aluminum/copper bimetal plate[J]. *Materials Transactions*, 2006, 47(4): 1232–1239.
- [6] YAMAMURA H, TOH T, HARADA H, et al. Optimum magnetic flux density in quality control of casts with level DC magnetic field in continuous casting mold[J]. *Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan*, 2007, 41(10): 1229–1235.
- [7] 李 慧, 龙 萍, 牛永胜, 等. Al/Cu 复合材料制备中理论与工艺研究进展[J]. *材料导报*, 2016, 30(7): 148–153.
LI Hui, LONG Ping, NIU Yong-sheng, et al. Fabrication of Al/Cu composite: Theoretical and technological progresses[J]. *Materials Review*, 2016, 30(7): 148–153.
- [8] 王秋娜, 刘新华, 刘雪峰, 等. 冷拉拔铜包铝细丝的退火工艺与组织性能研究[J]. *材料工程*, 2008, 36(7): 30–35.
WANG Qiu-na, LIU Xin-hua, LIU Xue-feng, et al. Study on annealing process and microstructure and properties of cold-drawing copper cladding aluminum thin wires[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2008, 36(7): 30–35.
- [9] ZOBAC O, KROUPA A, ZEMANOVA A, et al. Experimental description of the Al-Cu binary phase diagram[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2019, 50(8): 3805–3815.
- [10] AO S S, LI C J, ZHANG W, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of Al/Cu ultrasonic spot welded joints during thermal processing[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 41: 307–314.
- [11] LIU K, YU H C, LI X, et al. Study on diffusion characteristics of Al-Cu systems and mechanical properties of intermetallics[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 874: 159831.
- [12] CHEN J, LAI Y S, WANG Y W, et al. Investigation of growth behavior of Al-Cu intermetallic compounds in Cu wire bonding[J]. *Microelectronics Reliability*, 2011, 51(1): 125–129.
- [13] WANG T, GAO X Y, ZHANG Z X, et al. Interfacial bonding mechanism of Cu/Al composite plate produced by corrugated cold roll bonding[J]. *Rare Metals*, 2021, 40(5): 1284–1293.
- [14] HUG E, BELLIDO N. Brittleness study of intermetallic (Cu, Al) layers in copper-clad aluminium thin wires[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(22/23): 7103–7106.
- [15] 陈剑虹, 于洋泊, 张晓波. 累积叠轧 Al/Cu 复合板界面反应层核-壳结构形成机制[J]. *兰州理工大学学报*, 2020, 46(1): 1–6.
CHEN Jian-hong, YU Yang-bo, ZHANG Xiao-bo. Formation mechanism of core-shell structure in interface reaction layer of accumulative pack-rolled Al/Cu composite

- sheet[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2020, 46(1): 1–6.
- [16] 谷晓燕, 刘婧, 刘东锋, 等. 焊接能量对Mg/Al超声波焊接接头微观组织与力学性能的影响[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 23–31.
- GU Xiao-yan, LIU Jing, LIU Dong-feng, et al. Effect of welding energy on microstructure and mechanical properties of Mg/Al joints welded by ultrasonic spot welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6): 23–31.
- [17] KIM D, KIM K, KWON H. Interdiffusion and intermetallic compounds at Al/Cu interfaces in Al-50vol.% Cu composite prepared by solid-state sintering[J]. Materials, 2021, 14(15): 4307.
- [18] HAN Y Q, BEN L H, YAO J J, et al. Investigation on the interface of Cu/Al couples during isothermal heating[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2015, 22(3): 309–318.
- [19] ZARE G R, DIVANDARI M, ARABI H. Investigation on interface of Al/Cu couples in compound casting[J]. Materials Science and Technology, 2013, 29(2): 190–196.
- [20] ZAHERI A, FARAHANI M, SADEGHI A, et al. Transient liquid phase bonding of Cu and Al using metallic particles interlayers[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2021, 235(9): 1518–1528.
- [21] ZHAO Jia-lei, JIE Jin-chuan, CHEN Fei, et al. Effect of immersion Ni plating on interface microstructure and mechanical properties of Al/Cu bimetal[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(6): 1659–1665.
- [22] KIM W N, HONG S I. Interactive deformation and enhanced ductility of tri-layered Cu/Al/Cu clad composite[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 65(1): 976–986.
- [23] LIU S Y, WANG A Q, TIAN H W, et al. The synergetic tensile deformation behavior of Cu/Al laminated composites prepared by twin-roll casting technology[J]. Materials Research Express, 2018, 6(1): 016530.
- [24] LI X B, ZU G Y, WANG P. Asymmetry in interface and bending property of Al/Cu/Al bimetallic laminates[J]. Rare Metals, 2014, 33(5): 556–562.
- [25] 王乐, 李琼, 边旭来, 等. 爆炸复合Cu/Al层状复合材料界面结合特性研究[J]. 天津化工, 2018, 32(5): 23–24.
- WANG Le, LI Qiong, BIAN Xu-lai, et al. Explosive composite Cu/Al layered composite material interface bonding characteristics research[J]. Tianjin Chemical Industry, 2018, 32(5): 23–24.
- [26] CARVALHO G, GALVÃO I, MENDES R, et al. Weldability of aluminium-copper in explosive welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(5/6/7/8): 3211–3221.
- [27] KUZ'MIN E V, PEEV A P, KUZ'MIN S V, et al. Structure formation and properties of a copper-aluminum joint produced by ultrasound-assisted explosive welding[J]. Physics of Metals and Metallography, 2017, 118(8): 820–826.
- [28] GALVAO I, LOUREIRO A, RODRIGUES D M. Critical review on friction stir welding of aluminium to copper[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2016, 21(7): 523–546.
- [29] SHI W Q, WANG W H, HUANG Y L. Laser micro-welding of Cu-Al dissimilar metals[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1/2/3/4): 185–189.
- [30] FUJII H T, GOTO Y, SATO Y S, et al. Microstructure and lap shear strength of the weld interface in ultrasonic welding of Al alloy to stainless steel[J]. Scripta Materialia, 2016, 116: 135–138.
- [31] DING Y L, WANG J G, ZHAO M, et al. Effect of annealing temperature on joints of diffusion bonded Mg/Al alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(2): 251–258.
- [32] ZHANG Z, WANG K, LI J, et al. Investigation of interfacial layer for ultrasonic spot welded aluminum to copper joints[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 12505.
- [33] MA Q C, SONG C, ZHOU J L, et al. Dynamic Weld evolution during ultrasonic welding of Cu-Al joints[J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 823: 141724.
- [34] 熊志林, 张义福, 陈朵云, 等. 焊接能量对铜铝超声波焊接接头界面元素互扩散的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(17): 118–121, 131.
- XIONG Zhi-lin, ZHANG Yi-fu, CHEN Duo-yun, et al. Effect of welding energy on interdiffusion behavior of interfacial elements in Cu/Al joints welded by ultrasonic welding[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(17): 118–121, 131.
- [35] LIU J, CAO B. Microstructure characteristics and mechanical properties of the Cu/Al dissimilar joints by electric current assisted ultrasonic welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 297: 117239.
- [36] FUJII H T, ENDO H, SATO Y S, et al. Interfacial microstructure evolution and weld formation during ultrasonic welding of Al alloy to Cu[J]. Materials Characterization, 2018, 139: 233–240.
- [37] NI Z L, YANG J J, HAO Y X, et al. Ultrasonic spot welding

- of aluminum to copper: A review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107 (1/2): 585–606.
- [38] LI C, AO S, WANG A, et al. Mechanical behavior and microstructure of ultrasonic-spot-welded Al/Cu dissimilar joints with Zn interlayer[J]. Transactions of Tianjin University, 2020, 26(4): 305–313.
- [39] 刘锦平, 刘雪峰, 黄海友, 等. Cu-12%Al合金线材的马氏体结构及其对力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(5): 1052–1059.
- LIU Jin-ping, LIU Xue-feng, HUANG Hai-you, et al. Martensite structure of Cu-12%Al alloy and its effect on mechanical properties[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(5): 1052–1059.
- [40] 刘锦平, 刘雪峰, 黄海友, 等. Cu-12%Al线材连续定向凝固最大稳态拉坯速度[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(1): 171–178.
- LIU Jin-ping, LIU Xue-feng, HUANG Hai-you, et al. Maximum steady-state drawing velocity of Cu-12%Al wires during OCC[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(1): 171–178.
- [41] 刘新华, 付华栋, 何兴群, 等. Cu-Al复合材料连铸直接成形数值模拟研究[J]. 金属学报, 2018, 54(3): 470–484.
- LIU Xin-hua, FU Hua-dong, HE Xing-qun, et al. Numerical simulation analysis of continuous casting cladding forming for Cu-Al composites[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(3): 470–484.
- [42] WANG J, ZHAO F, XIE G L, et al. Rolling deformation behaviour and interface evaluation of Cu-Al bimetallic composite plates fabricated by horizontal continuous composite casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 298: 117296.
- [43] LI Y, GU D. Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder[J]. Materials & Design, 2014, 63: 856–867.
- [44] SONG B, DONG S, LIAO H, et al. Process parameter selection for selective laser melting of $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ based on temperature distribution simulation and experimental sintering[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 61(9/10/11/12): 967–974.
- [45] 朱小刚, 孙靖, 王联凤, 等. 激光选区熔化成形铝合金的组织、性能与倾斜面成形质量[J]. 机械工程材料, 2017, 41(2): 77–80.
- ZHU Xiao-gang, SUN Jing, WANG Lian-feng, et al. Microstructure, properties and inclined plane forming quality of aluminum alloy by selective laser melting[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(2): 77–80.
- [46] LIU Y J, REN D C, LI S J, et al. Enhanced fatigue characteristics of a topology-optimized porous titanium structure produced by selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 101060.
- [47] 李海亮, 贾德昌, 杨治华, 等. 选区激光熔化3D打印钛合金及其复合材料研究进展[J]. 材料科学与工艺, 2019, 27(2): 1–15.
- LI Hai-liang, JIA De-chang, YANG Zhi-hua, et al. Research progress on selective laser melting 3D printing of titanium alloys and titanium matrix composites[J]. Materials Science and Technology, 2019, 27(2): 1–15.
- [48] MUMTAZ K, HOPKINSON N. Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2009, 15(2): 96–103.
- [49] BEAN G E, MCLOUTH T D, WITKIN D B, et al. Build orientation effects on texture and mechanical properties of selective laser melting Inconel 718[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(4): 1942–1949.
- [50] OLAKANMI E O, COCHRANE R F, DALGARN K W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties[J]. Progress in Materials Science, 2015, 74: 401–477.
- [51] ZHANG J L, SONG B, WEI Q S, et al. A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(2): 270–284.
- [52] MAO Z, ZHANG D, WEI P, et al. Manufacturing feasibility and forming properties of Cu-4Sn in selective laser melting[J]. Materials, 2017, 10(4): E333.
- [53] ZENG C Y, ZHANG B, ETTEFAG A H, et al. Mechanical, thermal, and corrosion properties of Cu-10Sn alloy prepared by laser-powder-bed-fusion additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2020, 35: 101411.
- [54] SHAKERIN S, HADADZADEH A, AMIRKHIZ B S, et al. Additive manufacturing of maraging steel-H13 bimetals using laser powder bed fusion technique[J]. Additive Manufacturing, 2019, 29: 100797.
- [55] WEI C, ZHANG Z Z, CHENG D X, et al. An overview of laser-based multiple metallic material additive manufacturing: From macro-to micro-scales[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2021, 3(1): 012003.
- [56] 王迪, 邓国威, 杨永强, 等. 金属异质材料增材制造研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(1): 186–198.

- WANG Di, DENG Guo-wei, YANG Yong-qiang, et al. Research progress on additive manufacturing of metallic heterogeneous materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(1): 186–198.
- [57] SING S L, LAM L P, ZHANG D Q, et al. Interfacial characterization of SLM parts in multi-material processing: Intermetallic phase formation between $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ and C18400 copper alloy[J]. Materials Characterization, 2015, 107: 220–227.
- [58] GUAN J R, WANG Q P, CHEN C, et al. Forming feasibility and interface microstructure of Al/Cu bimetallic structure fabricated by laser powder bed fusion[J]. Rapid Prototyping Journal, 2021, 27(7): 1337–1345.
- [59] CHEN Y, WANG A Q, XIE J P, et al. Deformation mechanisms in Al/ Al_2Cu /Cu multilayer under compressive loading[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 885: 160921.

Research progress of preparation technique and interface microstructure evolution of Al/Cu composite materials

GUAN Jie-ren, WANG Qiu-ping

(Research Center of Additive Manufacturing, Marine Equipment and Technology Institute,
Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Cu/Al composite structure is typical bimetallic composite material that combine pure Al and pure Cu mechanically or metallurgically by specific method. Due to the characteristics of excellent conductivity, light weight and low price, it has become the focus of extensive research. The physical properties and kinds of intermetallic compounds in Al/Cu composites were introduced, and the effect factors of interface diffusion reaction behavior were illustrated. The preparation, interface microstructure and performances of Al/Cu composite were reviewed. The research direction of composite interface and the improvement direction of Al/Cu composite structure prepared by additive manufacturing were prospected. It provides key theoretical basis and technical support for the preparation of Al/Cu composite structure.

Key words: Al/Cu composite; diffusion; intermetallic compounds; preparation technique; interface; laser additive manufacturing

Foundation item: Project(20KJD430005) supported by the Natural Science Foundation for Colleges and Universities of Jiangsu Province, China; Project(HZ20200006) supported by the Self-cultivation Project of Jiangsu University High-tech Ship Collaborative Innovation Center, China

Received date: 2021-09-01; **Accepted date:** 2021-10-18

Corresponding author: WANG Qiu-ping; Tel: +86-13333856825; E-mail: a21096@163.com

(编辑 李艳红)