

Al/Cu 复合材料制备中理论与工艺研究进展*

李 慧^{1,2,3}, 龙 萍^{1,2,3}, 牛永胜^{2,3}, 黄斐荣^{2,3}, 杨 斌^{1,2,3}

(1 昆明理工大学真空冶金国家工程实验室,昆明 650093;2 昆明理工大学云南省有色金属真空冶金重点实验室,昆明 650093;3 昆明理工大学云南省复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室,昆明 650093)

摘要 Al/Cu 复合材料具有质轻、导电良好和成本低等优点,成为了近年来研究的热点。介绍了 Al/Cu 复合材料的主要界面复合理论,并着重阐述了近年来对主流理论的研究。综述了国内外关于 Al/Cu 复合材料的制备工艺和数值模拟的研究进展,指出了各工艺的优缺点,并对制备工艺的改进方向、未来数值模拟的研究方向进行了展望。

关键词 Al/Cu 复合材料 复合理论 制备方法 数值模拟

中图分类号:TB331 文献标识码:A DOI:10.11896/j.issn.1005-023X.2016.07.026

Fabrication of Al/Cu Composite: Theoretical and Technological Progresses

LI Hui^{1,2,3}, LONG Ping^{1,2,3}, NIU Yongsheng^{2,3}, HUANG Feirong^{2,3}, YANG Bin^{1,2,3}

(1 The National Engineering Laboratory for Vacuum Metallurgy, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 2 Key Laboratory for Nonferrous Vacuum Metallurgy of Yunnan Province, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 3 State Key Laboratory Breeding Base of Complex Nonferrous Metal Resources Clear Utilization in Yunnan Province, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093)

Abstract Al/Cu composites with excellent performances, such as light weight, great electrical conductivity and low price, have been a research hotspot in recent years. Theories on surface composite of Al/Cu composites, and studies of the mainstream theory are introduced. Preparation methods and numerical simulation studies of Al/Cu composite are reviewed, and advantages and disadvantages of each method are also described. Finally, the preparation improvement direction of Al/Cu composites and future research direction of numerical simulation are predicted.

Key words Al/Cu composite, composite theory, preparation method, numerical simulation

0 引言

铜(Cu)及其合金具有良好的导电性和耐腐蚀性,广泛应用于电子、电器、电力与机械等领域^[1,2]。然而,随着铜资源不断被消耗,用铜制备的材料价格昂贵,这对制备廉价的替代材料提出了挑战^[3,4]。Al/Cu 复合材料是公认的铜及其合金材料较理想的替代品,它不仅具有铜强度和电导率高、接触电阻低的特点,而且具有铝密度小、易加工、价格低廉等优点^[5-8],尤其在高频交变电流传输时产生“趋肤效应”^[9,10],表现出与纯铜完全相同的传输性能,有着广阔的应用前景。

本文综述了 Al/Cu 复合材料的复合理论、制备工艺以及数值模拟方法,以期 Al/Cu 复合材料的进一步研究提供参考与借鉴。

1 Al/Cu 界面复合理论

在双金属复合过程中,研究金属原子的运动规律对于揭示金属的结合机理,确定最佳工艺参数,从而提高两金属材料结合品质和复合效率具有重要意义。两金属材料复合

时,外界作用力使金属复合坯发生变形或高温的金属液使芯材表面熔化,促使金属原子在结合界面发生相互的扩散反应生成新的金相组织,实现两金属的牢固结合。根据双金属复合过程中界面是否有液相生成可将 Al/Cu 的复合机理分为固-固相结合和固-液相结合。

1.1 固-固相结合

20 世纪以来,关于 Al/Cu 的固-固复合过程的阐述涌现出了如“再结晶理论”、“金属键理论”、“能量学说”和“扩散理论”等具有代表性的理论^[11]。这些理论从不同的角度解释了 Al/Cu 复合的方式和本质,但总体来说,都不能较完整地阐述该复合机理。

具体而言,再结晶理论根据两种金属结合后晶体结构的变化解释了复合结果,但对结合过程本身以及金属结合的某些现象不能给予合理解释,如对冷压焊接头进行分析,并没有发现再结晶现象;金属键理论从金属原子间的距离是否达到原子量级以及相邻原子以此距离达到平衡时外层自由电子能否构成共用电子对而形成金属键的角度阐述了复合过程,但其未考虑材料性能和材料发生塑性变形时原子的能量

* 国家“973”计划项目(2012CB722803);教育部“创新团队发展计划”(IRT1250)

李慧:男,1988 年生,硕士生,研究方向为层状功能复合材料 E-mail:JamesLee1019@126.com 龙萍:通讯作者,1963 年生,教授级高级工程师,研究方向为冶金、化工分析与研究 E-mail:pkulongping@sohu.com

状态等对金属界面结合的影响;能量学说阐述了组元金属能否相互结合取决于原子所具有的能量,如果原子不具备结合所需要的最低能量,即使两金属接近到原子量级距离也不能结合,但其并没有指出金属键的结合到底与连接金属的何种物理化学性能有关,也不能解释导致晶格能量增加的冷作硬化反而使结合能力削弱的事实;扩散理论解释了一定扩散机制下两金属通过扩散形成扩散层实现牢固结合,但忽略了接触表面的激活过程,对界面扩散层的形成过程也不能给予合理描述。

相比之下,N. Bay 机理被认为是当前能较全面地反映两金属结合过程及本质的理论,它描述了该复合过程:在一定压力下,两金属表面覆膜破裂以及新鲜金属基材显露,使其活性面在基材覆膜裂缝中汇合并发生扩散反应形成真实的结合^[12-14]。后来的研究进一步完善和补充了该理论,其中最重要的一方面是对扩散反应的发生和扩散层的特征作了一定的描述。Chen 等^[15]指出构成扩散层的新相呈现出明显的层状分布,其组成主要有 Al_2Cu 、 AlCu 、 Al_3Cu_4 和 Al_4Cu_9 等。Gueydan 等^[16]指出扩散层 Al/Cu 界面间的层状物主要是溶质在熔剂中形成过饱和固溶体实现,形成的扩散亚层厚度与退火时间满足抛物线关系。同时, Lee 等^[17]通过计算金属间化合物的活化能预测在界面先生成 AlCu 后生成 AlCu_2 ; Chen 等^[18]通过计算化合物的标准生成自由能和晶格常数,指出物相接 AlCu_2 、 AlCu 和 Al_4Cu_9 的次序生成,并指出了扩散反应生成的 AlCu 最稳定。Hug 等^[19]的研究发现铜、铝金属原子在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 Kirkendall 效应,形成空洞(见图 1)。此外, Vahid^[20]对扩散机制所形成冶金结合的断裂机理进行了研究,为评估复合扩散层的性能提供了依据。

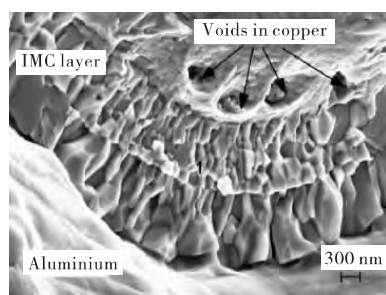


图 1 在 300 °C 下退火 180 min 铜包铝线断裂处脆性中间化合物层高分辨率 SEM 图^[19]

Fig. 1 High-resolution SEM observation of the brittle intermetallic compound layers on fractured copper-clad aluminium thin wires annealed at 300 °C for 180 min^[19]

1.2 固-液相结合

Al/Cu 液-固结合是指金属铝液与固体铜在接触界面处相互作用形成界面过渡层,从而实现冶金结合。当铝液注入铜管时,铜在接触界面上溶解,同时铜和铝原子的互扩散使得在两者接触面上生成了一定厚度的扩散层。随着扩散的进行,在过渡层中铜和铝浓度超过熔剂溶解度极限将导致其晶格发生变化,从而生成金属间化合物。因此, Al/Cu 液-固复合的界面结合机理可以分为两类^[21]: 熔合结合和扩散结

合。

与铜材表面相接触的高温基体金属铝液会产生瞬时凝固而形成凝固层,但凝固层在铝液进一步的作用下再次熔化并与之相混合,同时铜材表层开始熔化与铝液发生共熔,最终在金属液内形成熔合结合。而扩散结合是指基体金属铝液与铜相接触形成凝固层,然后凝固层在铝液的作用下发生部分或全部熔化,促进铜、铝原子的充分扩散,最终凝固形成扩散结合。

复合材料界面结合通常是这两种机理共同作用的结果。一方面,根据金属学的基本原理,铜、铝在非平衡凝固时的最大固溶度较平衡凝固时有显著偏离,因此必然出现共晶组织^[22]。然而,共晶化合物几乎不随复合材料的受力变形而产生滑移或者产生的滑移过程相当短暂,滑移量极小,因此阻碍滑移带晶格产生畸变,易引起晶界脆性和产生晶间裂纹,最终造成脆性破裂。同时,由共晶化合物的生成引起的复合材料体积变化和界面不匹配将导致材料弹性畸变,以及界面结合强度大幅度降低^[23-25]。另一方面,在铜、铝特定的冶金作用下,铝液在铜材表面开始凝固或具有明显凝固倾向时铜、铝发生互扩散,凝固过程中溶质发生再分配,促使铜、铝发生共晶反应形成固溶体^[26]。在晶体结构中金属表面及晶界等处都存在大量的金属学缺陷,晶格畸变明显,使处于这些区域内的原子获得较大能量,其振动频率增大,同时也促进了物质的扩散^[27]。

因此, Al/Cu 的液-固界面结合可归纳为:在高温铝液作用下,铜材表面原子被激活形成激活中心,使新鲜质点间产生金属键,通过熔合和扩散两种结合方式,最终形成具有一定厚度界面层的冶金结合。

2 Al/Cu 复合材料工艺研究

2.1 固-固相复合法

2.1.1 轧制法

轧制法是制备复合板材最常用的方法,根据对轧制坯料是否加热分为热轧复合法和冷轧复合法。轧制法具有成本低、设备简单等优点,但是当压下率较大($>70\%$)时,对轧机性能要求很高。异步轧制法因能在高压下率和大步速比条件下实现材料的牢固复合而应用最为广泛^[28]。轧制法制备的复合材料常出现由加工硬化导致的应力缺陷,因此制得的料坯还需要进行热处理。退火过程可以加速原子重排和减少晶格缺陷,提高材料的加工性能。其中,退火温度显著影响材料的综合性能,退火温度过高或过低都不能获得结合良好的 Al/Cu 复合界面。研究表明^[29],相同保温时间下,当退火温度为 350 °C 时, Al/Cu 复合界面抗拉强度较高,但塑性变形能力不及 400 °C 时的一半;退火温度为 500 °C 时, Al/Cu 复合界面有较好的塑性变形能力,但是抗拉强度不足 400 °C 时的 4/5。

2.1.2 爆炸复合法

爆炸复合可实现 Al/Cu 复合板的瞬间结合。炸药爆炸释放的载荷以波的形式传递,波传递的能量撞击到铜、铝表面使两种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。Behcet^[30]对面积均为 0.04 m² 的铜、铝板进行了爆炸复合研究,指出复合界面的品质与爆速有关。爆速较大时,波的振幅与波长增加,对 Al/Cu 界面的冲击力将增大,导致结合界面发生弯曲,将降低复合界面的品质。此外,研究表明^[31]随着爆速和间距的增大,界面由直线性变为波浪性,且没有显著的元素扩散。爆炸复合法虽然可实现多金属间的窄界面牢固结合,但是还很难突破板面(10 m²)大型化的生产^[32]。

2.1.3 拉拔法

拉拔法能实现复合材料均匀变形和良好界面复合,因而被广泛应用于 Al/Cu 复合线材的制备^[33]。拉拔机制(如拉拔速率、变形量、长度等)是拉拔工艺实现材料良好复合的主要影响因素。Su 等^[34]采用充芯连铸-拉拔工艺制备铜包铝线,发现铜管长度和平均拉伸速度对 Al/Cu 界面有显著影响,其中铜管的长度决定了铝液是否能连续充满,而平均拉伸速度是影响 Al/Cu 液-固界面沿拉伸速度方向位移量大小的关键因素。合适的拉速和较大的变形量可加速金属表面膜的破裂,增大金属键合的新鲜表面,有利于金属键的形成,进而提高结合强度。但拉拔过程是多道次地使 Al/Cu 材料变形的过程,铜、铝塑性变形能力的差异使得复合界面存在残余应力,需经过退火处理使界面形成细晶粒组织的扩散层来改善结合界面的强度。同时,需严格地控制退火条件,研究表明温度过高或保温时间过长都将导致生成脆性金属间化合物进而影响金属的结合强度^[35]。

2.1.4 铸造-挤压复合法

铸造-挤压复合法也是制备 Al/Cu 复合线材的方法^[36]。挤压能明显细化变形区内的铸坯界面及外表面的晶粒,而且有利于铜、铝原子间的扩散渗透。张春祥等^[37]通过铸造-冷挤压复合法制备了铜包铝复合线材。铸造后的复合坯经挤压后,铝晶粒平均直径不到原来的 6%,铜晶粒平均直径为原来的 20%左右,铜、铝晶粒得到完全的细化,尺寸细小均匀,过渡层厚度只有 10~15 μm,界面间生成的脆性化合物数量少,铜、铝两相结合良好。吴云忠等^[38]指出对于洁净的铜、铝表面,结合介质达到接近原子距离的变形程度以及适宜的温度均可提高复合界面复合品质。铸造-挤压复合法操作控制容易,但工艺流程长,界面易氧化,成材率低。

2.2 液-固相复合法

液-固相复合法是将金属铝液浇注到已预制好的铜基体表面或将已表面处理好的金属铜基体浸没于熔融的铝液中,固体铜与液体铝两相发生热交换,同时铝液凝结在铜材表面获得复合坯;或将纯铜、铝在两熔化设备中加热到所需温度,并控制拉坯速度和结晶器温度,在连铸管状铸型内下拉外层金属铜液,使其在铸型内凝固形成铸管,并通过牵引机构连续引出,同时芯部金属铝液随之充入铸管中与外层金属形成复合坯,再通过拉拔、轧制等工序获得不同规格的线状或带状复合材料的工艺方法。

以固-液结合方式制备的 Al/Cu 复合材料的导电性能和力学性能均接近纯铜,明显优于纯铝,而其价格又显著低于纯铜,表现出作为铜替代品的优越性^[39]。张红安^[40]采用液-

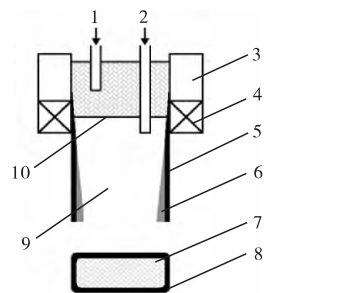
固铸造法制备了 Al/Cu 复合材料,并根据不同因素对 Al/Cu 复合界面的影响优化了工艺参数。吴永忠等^[43]采用水平连铸轧制法制备了矩形断面铜包铝导电扁排,并指出轧制温度、轧制次数和压下量是获得外形尺寸精确、表面质量良好的 Al/Cu 复合材料的关键因素。

2.3 液-液复合法

液-液复合工艺因具有工艺流程短、产品质量好和节约能源等优点在复合板材生产领域得到了较广泛的应用,通常有双结晶器连铸法、双流浇注复合法、电磁连铸法和离心浇注法等。

双结晶器连铸法和双流浇注复合法均采用内、外两个熔解设备分别熔解芯材金属铝和包覆层金属铜,铝液先在结晶器内形成具有一定厚度的坯材,然后通过控制铜金属液的温度和浇注速度等工艺参数使铜金属液均匀包覆于芯材铝表面,形成铜包铝复合坯。但是,这两种方法容易造成芯材表面的氧化和夹杂污染。而且,铜金属液温度难以控制会导致芯材铝大面积熔解进而使界面结合强度降低。

电磁连铸法可以避免双金属铸造过程中结合界面的夹渣等污染,已被广泛应用到双金属的层状复合^[41-43]。与双流浇注复合法相比,该法主要是在结晶器宽度方向的下半部分引入了水平磁场^[44](Level magnetic field, LMF)(见图 2)。在磁场的作用下,分别由短型和长型浸入式浇道进入结晶器的铜金属液与铝金属液在结晶器内形成以 LMF 为界的上、下层两个区域,有效抑制上层铜液与下层铝液混合。然后,控制磁场强度、拉坯速度以及两种金属液浇注速度和凝固时间差等参数,使铜金属液均匀包覆于下层区域中的铝液凝固形成的芯材周围,制备出铜包铝复合坯。该方法可实现包覆层金属铜的反向凝固成型,铝、铜结合界面间的扩散、熔接以及形成具有冶金学结合界面的高品质双金属复合材料^[45]。但是,该工艺对设备制造、工艺水平、操作技能及自动化控制的要求均比较苛刻,特别是浇注速度的控制成为铜、铝界面结合是否良好和稳定的关键因素。



1-外层金属液; 2-内层金属液; 3-结晶器;
4-水平电磁场; 5-外层凝固壳; 6-内层凝固壳;
7-内层金属; 8-外层金属; 9-液穴; 10-上/下界面

图 2 电磁控制双金属连铸工艺原理图^[44]

Fig. 2 Schematic diagram showing the process of electromagnetically controlled continuous casting for bimetallic composites^[44]

离心浇注法适合制备层状复合材料。铜金属液注入高速旋转的铸型内,在离心力作用下先凝固形成坯壳,然后注

入芯材铝金属液,使其在包覆层金属表面凝固,形成铜包铝复合管坯,再将管坯通过挤压、轧制制备成铜包铝复合扁排,或将复合管坯纵向剖开制成板坯,再轧制成板材。该方法很好地解决了复合界面的冶金熔合问题,结合强度高,其优点是不用防氧化,铸坯质密,但是两种金属离心复合难以形成连续、长尺寸的复合材料。

3 Al/Cu 复合材料的数值模拟

数值模拟与实验相结合的研究方法往往更能达到科学研究的目的。通过数值模拟可方便地了解铜、铝结合过程,优化复合工艺参数,并能减少试验次数,降低试验成本。主要的模拟方法为有限元模拟法,所用到的软件有 DEFORM 和 ANSYS。

Hwang 等^[39]借助有限元模拟方法研究了不同厚度 Al/Cu 复合材料的成形性。模拟了常温冷轧制备 Al/Cu 过程的厚度分布,准确预测了深拉伸实验过程中的断裂以及复合材料的变形行为。在模拟结果的指导下,通过优化工艺参数成功制备了 Al_{1.5 mm}/Cu_{1.0 mm} 的复合材料,还确定了其最大拉伸度。张泽伟^[46]利用 DEFORM 软件模拟了铜、铝复合板材的轧制过程,对双金属板在轧制复合前后的厚比变化规律进行了研究。当原始总厚一定时,轧后与轧前的厚比有随压下量增大而增大的趋势,而且在原始厚比较小时,这一趋势更明显,后序的正交实验验证了这一结论的正确性。罗奕兵等^[47]研究了平辊轧制过程中 Al/Cu 复合棒材金属流动速度、应力-应变和摩擦因数对宽展变形的影响。Al/Cu 复合坯料在平辊轧制过程中会发生不同程度的塑性变形和不均匀性流动;轧制后成品横截面上的等效应变场呈“X”状等效应变带,而较大压下率易使摩擦因数增大,对 Al/Cu 复合材料的滑动宽展率产生较大影响,这一结果与实验结论有较好的一致性^[48]。徐岩等^[49]针对冷挤压加工过程,采用 DEFORM 分析软件建立刚塑性有限元模型,研究了界面的结合强度对铜、铝复合材料电导率的影响,实验结果与有限元分析结果吻合度较好,验证了利用低压压铸-冷挤压法制备铜包铝线材的可行性。此外,李廷举^[50]利用 SMIPLE 程序对铸型内电磁控制下的金属液的流动形态进行了模拟,用 ANSYS 软件分析了电磁搅拌对直浇道内流场和温度场的影响。

4 结语

Al/Cu 固-固相结合机理的主流理论是 N. Bay 机理,而 Al/Cu 液-固相结合机理被广泛认为是通过熔合和扩散两种结合方式最终形成具有一定厚度界面层的冶金结合。但是,为合理、详细地描述 Al/Cu 复合过程和为 Al/Cu 复合材料的制备提供较全面的理论依据,相关理论必须根据实际问题导向进行完善和补充。

Al/Cu 复合材料的制备方法表现出了单方面的优缺点,往往不同的方法适合于不同形状材料的制备。具体而言,固-固相复合法工序较多,不能实现连续生产;液-固相复合法操作控制难度大,产品尺寸精度控制要求高,工艺流程长;液-液相复合法工艺流程短、节约能源,是 Al/Cu 复合材料制备较

理想的工艺。但是,通过液-液相复合法制备 Al/Cu 复合材料时,因无法有效地控制 Al/Cu 复合过程的扩散,常面临中间结合层组织复合不好的问题,需要进行工艺改进。同时,需要整合不同工艺的优势,开发工艺特征明显、适应性强、操作方便的复合型工艺,这将是目前 Al/Cu 复合材料制备研究的主要任务。

数值模拟已经成为研究铜、铝复合的一种有效方法,但还不能对元素分布形态及界面形成的渐变过程进行全面、系统的仿真模拟,而这方面的研究需要对复合过程原子运动状态和原子扩散浓度导致新相生成的零界条件作出界定。同时,模拟过程多在理想的条件下或只是针对实际条件下整个工艺的某个部分进行的,并不能较全面地对工艺流程进行仿真模拟,因此今后应考虑数值模拟分析的系统化和实际化。

参考文献

- Sarsilmaz F. Weldability characteristics of dissimilar Al/Cu friction stir weld joints[J]. Mater Test, 2012, 54(2): 85
- Sahin M, Misirli C. Properties of cold pressure welded aluminum and copper sheets[J]. Adv Mater Res, 2012, 463-464: 244
- Xue P, Xiao B L, Wang D, et al. Achieving high property friction stir welded aluminium/copper lap joint at low heat input[J]. Sci Technol Weld J, 2011, 16(18): 657
- Wu M F, Si N C, Chen J. Contact reactive brazing of Al alloy/Cu/stainless steel joints and dissolution behaviors of interlayer[J]. Trans Nonferrous Met Soc Chin, 2011, 21(5): 1035
- Cheng X L, Gao Y M, Fu H G, et al. Microstructural characterization and properties of Al/Cu/steel diffusion bonded joints[J]. Met Mater Int, 2010, 16(4): 649
- Saeid T, Abdollah Z A, Sazgiri B. Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum copper lap joints made by friction stir welding[J]. J Alloys Compd, 2010, 490(1-2): 652
- Xia C Z, Li Y J, Puchkov U A, et al. Microstructure and phase constitution near the interface of Cu/Al vacuum brazing using Al-Si filler metal[J]. Vacuum, 2008, 82(8): 799
- Xia C Z, Li Y J, Wang J, et al. Microstructure and phase constitution near interface of Cu/Al vacuum brazing[J]. Mater Sci Technol, 2007, 23(7): 815
- Xie Shikun, Chen Jingping, Wan Jianxin, et al. Manufacture process and mechanical performance of CCA bimetal wire[J]. Mater Rev, 2008, 22(5): 83(in Chinese)
- 谢世坤, 陈京平, 万建新, 等. 双金属铜包铝线的制备工艺与力学性能[J]. 材料导报, 2008, 22(5): 83
- Xie Shikun, Yi Rongxi, Xia Xiang. Performance testing and analyzing of CCA multiple metal wire[J]. J Jinggangshan Univ: Nat Sci, 2007, 28(17): 38(in Chinese)
- 谢世坤, 易荣喜, 夏翔. 铜包铝复合金属线材的性能测试与分析[J]. 井冈山学院学报: 自然科学, 2007, 28(17): 38
- Zhang Jianyu, Yao Jinjin, Zeng Xiangyong, et al. Research progress of copper cladding aluminum composites[J]. Chin J Nonferrous Met, 2014, 24(5): 1275(in Chinese)
- 张建宇, 姚金金, 曾祥勇, 等. 铜包铝复合材料研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(5): 1275
- Chen C Y, Huang W S. Effect of annealing on the interfacial struc-

- ture of aluminum-copper joints[J]. Mater Trans, 2007, 48(7):1938
- 13 Cheng Xiaole, Gao Yimin, Xing Jandong, et al. Study on the intermetallic compound and its growth of Al/Cu/0Cr18Ni9Ti diffusion bonded joint[J]. Rare Met Mater Eng, 2007, 36(3):627(in Chinese)
成小乐, 高义民, 邢建东, 等. 扩散连接 Al/Cu/0Cr18Ni9Ti 复合材料界面生长机理研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(3):627
 - 14 Hwang C J, Wang C Q, Mayer M, et al. Growth behavior of Cu/Al intermetallic compounds and cracks in copper ball bonds during isothermal aging[J]. Microelectron Reliab, 2008, 48(3):416
 - 15 Chen C Y, Chen H L, Huang W S. Influence of interfacial structure development on the fracture mechanism and bond strength of aluminum/copper bimetal plate[J]. Mater Trans, 2006, 47(4):1232
 - 16 Gueydan A, Domenges B, Dubos P A, et al. Thermokinetic analysis of intermetallic growth in copper clad aluminium wires[J]. Mater Res Innov, 2013, 17(2):124
 - 17 Lee W B, Bang K S, Jung S B. Effects of intermetallic compound on the electrical and mechanical properties of friction welded Cu/Al bimetallic joints during annealing[J]. J Alloys Compd, 2005, 390(1):212
 - 18 Chen J L, Yi S, Wang Y W, et al. Investigation of growth behavior of Al-Cu intermetallic compounds in Cu wire[J]. Bond Microelectron Reliab, 2011, 51(1):125
 - 19 Hug E, Bellido N. Brittleness study of intermetallic (Cu, Al) layers in copper-clad aluminium thin wires[J]. Mater Sci Eng A, 2011, 528(22-23):7103
 - 20 Vahid Y M, Mohammad R T, Ahmad R. The effects of oxide film and annealing treatment on the bond strength of Al-Cu strips in cold roll bonding process[J]. Mater Des, 2014, 53:174
 - 21 Liu Yaohui, Liu Haifeng, Yu Siron. Study on bimetal composite material interface by liquid-solid bonding [J]. Chin J Mech Eng, 2000, 36(7):81(in Chinese)
刘耀辉, 刘海峰, 于思荣. 液固结合双金属复合材料界面研究[J]. 机械工程学报, 2000, 36(7):81
 - 22 Zhang Weiwen, Li Yuanyuan, Long Yan, et al. AlCu/Al gradient material produced by semi-continuous casting[J]. Chin J Nonferrous Met, 2002, 12(1):188(in Chinese)
张卫文, 李元元, 龙雁, 等. 半连续铸造法制备 AlCu/Al 梯度材料[J]. 中国金属有色学报, 2002, 12(1):188
 - 23 Mei Zhi, Gu Mingyuan, Wu Renjie. Characterization of metal matrix composite interface and its advances[J]. Mater Sci Eng, 1996, 14(3):1(in Chinese)
梅志, 顾明元, 吴人洁. 金属基复合材料界面表征及其进展[J]. 材料科学与工程, 1996, 14(3):1
 - 24 Qian Weijiang. The composition and structure of the interfacial compound layer of steel strip of hot dipping Al-2%Si[J]. J Mater Eng, 1994(2):8(in Chinese)
钱卫江. 热浸镀 Al-2%Si 钢带界面化合物的组成和结构[J]. 材料工程, 1994(2):8
 - 25 Metcalfe G. Interfaces in metal matrix[J]. Bondings, 1996, 36(13):28
 - 26 Doug Zhangui, Qian Yiyu, Shi Suqin, et al. Behavior of Al/Cu/Al contact reaction liquid and its brazing[J]. Trans Chin Weld Inst, 2001, 22(6):45(in Chinese)
董占贵, 钱乙余, 石素琴, 等. Al/Cu/Al 接触反应液相行为及其连接[J]. 焊接学报, 2001, 22(6):45
 - 27 Jacobson M H, Umpston G. Diffusion solder—A new low temperature process for joining carat gold jewellery[J]. Solder Surf Mount Technol, 1992, 17(10):27
 - 28 Zu Guoyin, Li Xiaobing, Ding Mingming, et al. Investigating deformation behavior of asymmetrically rolled Cu/Al bimetal clad sheets[J]. J Northeastern Univ: Nat Sci, 2011, 32(5):675(in Chinese)
祖国胤, 李小兵, 丁明明, 等. 异步轧制铜/铝双金属复合板变形行为的研究[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2011, 32(5):675
 - 29 Li Xiaobing, Zu Guoyin, Wang Ping. Effect of annealing temperature on microstructure and mechanical properties of Cu/Al clad sheet fabricated by asymmetrical roll bonding[J]. Chin J Nonferrous Met, 2013, 23(5):1202(in Chinese)
李小兵, 祖国胤, 王平. 退火温度对异步轧制铜/铝复合板界面组织及力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(5):1202
 - 30 Behcet G. Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method[J]. Mater Trans, 2008, 29(1):275
 - 31 Durgutlu A, Gülenç B, Findik F. Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding[J]. Mater Des, 2005, 26(6):497
 - 32 Raghukandan K. Analysis of the explosive cladding of Cu-low carbon steel plates[J]. J Mater Process Technol, 2003, 139(1-3):573
 - 33 Zhang Zhuangzhi, Shen Yu, Kong Xiao, et al. Research on forming performance of copper cladding aluminum through drawing[J]. J Plast Eng, 2013, 20(5):122(in Chinese)
张壮志, 申昱, 孔啸, 等. 铜包铝排拉拔成形性能[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(5):122
 - 34 Su Y J, Liu X H, Wu Y F, et al. Numerical simulation of temperature field in horizontal core-filling continuous casting for copper cladding aluminum rods[J]. Int J Miner Metall Mater, 2013, 20(7):684
 - 35 Wang Qiuna, Liu Xinhua, Liu Xuefeng, et al. Study on annealing process and microstructure and properties of cold-drawing copper cladding aluminum thin wires[J]. J Mater Eng, 2008(7):30(in Chinese)
王秋娜, 刘新华, 刘雪峰, 等. 冷拉拔铜包铝细线的退火工艺与组织性能研究[J]. 材料工程, 2008(7):30
 - 36 Luo J T, Zhao S J, Zhang C X. Microstructure of aluminum/copper clad composite fabricated by casting-cold extrusion forming[J]. J Central South Univ Technol, 2011, 18(4):1013
 - 37 Zhang Chunxiang, Wang Shouyu, Luo Junting. Fabrication technology and microstructure of aluminum/copper clad composites formed by casting-cold extrusion[J]. J Plast Eng, 2010, 17(4):23(in Chinese)
张春祥, 王守玉, 骆俊廷. 铸造-冷挤压成形铜包铝线工艺及微观组织[J]. 塑性工程学报, 2010, 17(4):23
 - 38 Wu Yunzhong, Ma Yongqing, Liu Shiyong, et al. Machining procedure and solid-state bonding mechanism of clad-process welding copper clad aluminum wire[J]. Weld Join, 2006(4):40(in Chinese)
吴云忠, 马永庆, 刘世永, 等. 包复焊接铜包铝线加工工艺与固相结合机理研究[J]. 焊接, 2006(4):40
 - 39 Hwang C T, Ching H H, Chin C H. An analysis of the formability of aluminum/copper clad metals with different thicknesses by the finite element method and experiment[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2010, 49(9-12):1029

- 40 Zhang Hongan. Study on the preparation and performance of steel/aluminum, copper/aluminum composite[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007(in Chinese)
张红安. 钢/铝、铜/铝复合材料的制备及性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2007
- 41 Nagai J, Suzuki K I, Kojimo S, et al. Steel flow control in a high-speed continuous slab caster using an electromagnetic brake[J]. Iron Steel Engineer, 1984, 61(5): 41
- 42 Ha M Y, Lee H G, Seung H, et al. Numerical simulation of three-dimensional flow, heat transfer, and solidification of steel in continuous casting mold with electromagnetic brake[J]. J Mater Process Technol, 2003, 133(3): 322
- 43 Takeuchi E, Zene M. Novel continuous casting progress for clad steel slabs with level magnetic field[J]. Iron-making Steel-making, 1997, 24(3): 257
- 44 Kouji T, Yoshinori T, Masayuki K. Mathematical model for fluid in a continuous casting mold with electromagnetic brake[C]//The 3rd International Symposium on Electromagnetic processing of Materials. Nagoys, Japan, 2001: 91
- 45 Yamamura H, Toh T, Harada H. Optimum magnetic flux density in quality control of casts with level DC magnetic field in continuous casting mold[J]. ISIJ International, 2001, 41(10): 1229
- 46 Zhang Zewei. Bond rolling principles and heat treatment of Cu/Al clad sheet[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009 (in Chinese)
- 张泽伟. 铜铝轧制复合变形规律及热处理研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009
- 47 Luo Yibing, Liu Xinhua, Xie Jianxin. Lateral spreading deformation behavior in flat rolling of copper cladding aluminum composite rods [J]. Chin J Nonferrous Met, 2009, 19(11): 1176(in Chinese)
罗奕兵, 刘新华, 谢建新. 铜包铝复合棒材平辊轧制宽展变形行为 [J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(11): 1176
- 48 Zhao Na. Numerical simulation on the forming process of Cu/Al composite tube and distribution of current across the section[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2008(in Chinese)
赵娜. 铜铝复合管成形数值模拟及电流通过截面分布规律[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2008
- 49 Xu Yan, Luo Junting, Jia Jianbo. Study on the fabrication of aluminum/copper clad composite by low-pressure compression casting-cold extrusion technology[J]. Chin Mech Eng, 2009, 20(22): 2755 (in Chinese)
徐岩, 骆俊廷, 贾建波. 低压力铸-冷挤压法制备铜包铝线的研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(22): 2755
- 50 Li Tingju, Zhao Yonghui, Wen Bin. Effects of nozzle electromagnetic stirring (N-EMS) on solidification structure of continuously cast billets[J]. J Dalian Univ Technol, 2002, 42(5): 550(in Chinese)
李廷举, 赵勇慧, 温斌. 直浇道电磁搅拌对连铸坯凝固组织影响[J]. 大连理工大学学报, 2002, 42(5): 550

(责任编辑 房 威)

(上接第 147 页)

- 39 Otsubo M. Design concept and optical performance of ultra-light weight carbon/carbon composites mirror for optical-IR astronomy [J]. Proc SPIE, 2004, 5487: 1087
- 40 Li Ruizhen, Hu Qinmei, Li Jin, et al. Properties of C/C camera cylinder composite[J]. Carbon Techn, 2011(2): 19(in Chinese)
李瑞珍, 胡秦妹, 李晋, 等. C/C 镜筒复合材料的性能研究[J]. 炭素技术, 2011(2): 19
- 41 李瑞珍, 孟宇, 李晋, 等. 一种光学望远镜 C/C 复合材料镜筒的制备方法: CN 102173846 A[P]. 2013-06-05
- 42 Zhang Huiru. Carbon/Carbon composites: An overview [J]. Synthetic Fiber, 2011, 40(1): (in Chinese)
张慧茹. 碳/碳复合材料概述[J]. 合成纤维, 2011, 40(1): 1
- 43 Li Wei, Li Hejun, Zhang Shouyang, et al. Effect of high temperature treatment on the microstructure and mechanical properties of binary layer textured 2D C/C composites[J]. New Carbon Mater, 2010, 26(5): 328(in Chinese)
李伟, 李贺军, 张守阳, 等. 石墨化处理对双层热解炭基 2D C/C 复合材料微观结构的影响[J]. 新型炭材料, 2010, 26(5): 328
- 44 Huang Weijiu, Meng Fancheng. Study on the fast preparation of nano-submicro structure SiC-Al₂O₃ composites [J]. J Chongqing Univ Technol: Nat Sci Ed, 2010, 24(10): 28(in Chinese)
黄伟九, 孟范成. 纳米-亚微米结构 SiC-Al₂O₃ 复合陶瓷快速制备 [J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2010, 24(10): 28

(责任编辑 房 威)