

铝/铝双金属复合材料制备技术研究进展

王旭忠¹, 李晓飞², 王高松¹

(1. 东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 海装沈阳局驻沈阳地区某军事代表室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 文章概述了当前铝/铝双金属复合材料制备的几种不同工艺, 简述了其优缺点, 并分析和展望了铝/铝双金属复合材料在未来的发展趋势。

关键词: 双金属复合材料; 铝合金; 制备工艺

中图分类号: TB331; TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1671-6795(2024)02-0004-06

随着社会不断的发展和进步, 结构件在轻量化的同时对材料综合性能的要求也随之不断提高, 具有轻质、高强、耐蚀和优良成形性能的铝合金材料被广泛应用于各个领域^[1-4]。尽管铝合金已经具有多种优异的性能, 但在某些方面单一的铝合金材料仍然无法满足复杂的应用性能需求。因此, 同时具有多种优良性能的双金属复合材料成为当前材料领域的研究热点之一。

双金属复合材料是利用复合技术在两种性能不同的金属及合金之间实现强冶金结合的一种新型复合材料, 这种复合材料不但能够保持其中单一金属的特性, 还可以在性能上进行“互补”。在面对不同使用需求时, 可以合理设计两种材料的组合方式, 充分发挥两种组元金属各自独特的性能特点, 进而满足更加苛刻的服役环境要求^[5-9]。

目前, 铝/铝双金属复合材料的制备技术已经有了显著进步, 但是从根本上仍为固-固复合法、固-液复合法和液-液复合法三大类, 其热处理工艺也与传统铝合金材料相似, 主要包括固溶处理、时效处理和退火处理等。

1 固-固复合法

固-固复合法首先要将两种金属材料进行预装配组坯, 然后通过冷、热变形加工或特殊的成形方法使

其发生塑性变形^[10], 从而达到机械结合或冶金结合的目的。其基本原理是在高温高压的作用下, 两种组元金属的接触表面通过固态原子之间的相互扩散而结合在一起, 其具有制备工艺简单、生产效率较高和适用范围广泛的优点, 但这种方法也存在一些不足, 比如对组元金属的尺寸和形状精度要求较高, 复合材料界面结合处不够稳定等缺点。

1.1 轧制复合法

轧制复合法利用轧机强大的轧制力使两种固态金属的接触面发生塑性形变, 这也使得两种金属的表层发生破裂, 其表层下新的表面相互接触, 在轧辊强大压力的作用下实现两种金属之间的冶金结合^[11,12], 如图 1 所示。按照轧制温度的不同, 轧制复合法可以分为热轧和冷轧两种复合方法。其中热轧法已经广泛用于复合板材的制备, 其工艺简单, 生产效率高, 制得的复合材料能够实现稳定结合。冷轧法当前多用于多种金属材料的轧制复合, 相比于热轧, 其生产的复合材料性能更加稳定, 但在冷轧过程中基体金属存在变形量较高的问题。

重庆大学胡超^[13]等人通过改变轧制温度和变形量来探究 1060/6061 金属层状复合板材组织和性能的影响, 发现只有在适当的轧制温度和轧制压下量共同作用下才能得到组织、性能和界面结合稳定的层状金属复合板。姜龙^[14]等人发现冷轧和热轧都能得到

收稿日期: 2023-06-26

基金项目: 项目名称 2021GFYD001 (项目编号: N2109006)

作者简介: 王旭忠 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事铝合金复合材料制备工艺研究。

通讯作者: 王高松 (1983-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事铝合金的合金开发、铝合金组织性能控制、铝合金材料制备装备开发。

沿轧制方向分布良好的纤维状晶粒,且冷轧复合板的力学性能比热轧复合板的好。相比于其他工艺,轧制复合工艺简单,技术比较成熟,可实现复合板材的

连续生产,但是利用这种方法制得的复合材料综合性能还不够好,复合界面的结合强度仍有待提高,并且无法生产具有特殊形状需求的复合材料。

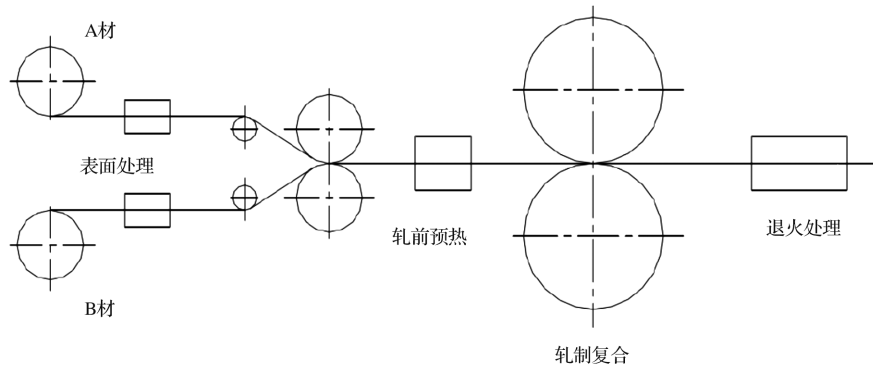


图1 轧制复合示意图^[11,12]

1.2 挤压复合法

挤压复合法是利用挤压筒施加的三向压应力将复合坯料塑性变形,从而使其顺利地通过挤压模孔得到相应形状和尺寸的复合材料^[15]。图2为挤压复合的示意图。在挤压复合之前要将组元金属的表面清洗干净,避免复合界面处出现杂质和开裂的现象,并选择合理的挤压比、挤压速度和温度等参数进行挤压,这样才能制得结合优异的复合材料,利用这种方法生产的复合管材、复合线材和复合棒材已经能够实现良好的冶金结合。

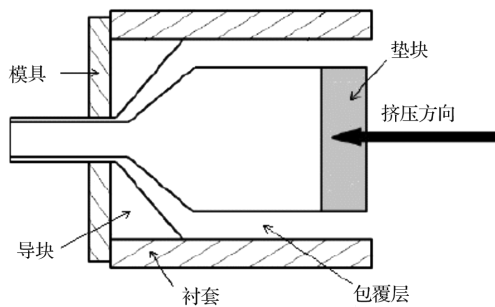


图2 挤压复合示意图^[15]

Fan^[16]等人采用分流模挤压法制备的1060/6063复合材料具有良好的结合界面,且具有较高的抗拉强度和塑性。Chen^[17]等人采用累积挤压结合的方法得到了每层复合界面均结合良好的1060/7050复合材料,并且该材料具有很好的塑形和强度,这是由于采用累积挤压结合的方法能够在挤压过程中得到很大的塑形变形,使合金相能够从7050铝合金中快速析出。挤压复合法的优势在于能够将组元金属的塑形很好的发挥出来,适合进行大批量生产,但其劣势也很明显,制备过程容易被挤压的最大行程所限制,并

且连续操作性较差,能量损耗较高。

1.3 爆炸复合法

爆炸复合法的原理利用铺在复板上的炸药爆炸时产生的巨大能量,在极短时间内将两种金属在高速冲击作用下猛烈撞击在一起并发生塑性变形,致使复板与基板撞击点的周围发生熔化和扩散,从而使两种金属之间发生冶金结合^[18,19],如图3所示。爆炸复合法常用于制备钢/钛复合板,这种工艺虽然工艺简单,灵活度高,但是不易精确控制,技术要求较高。经过不断的研究和改进,人们将爆炸复合法和轧制复合法各自的优点紧密联合起来^[20],这种爆炸-轧制复合法能够避免轧制复合制坯时的困难和麻烦,具有高效率、高成品率、高精度和高质量等优点,相信随着技术的不断完善和发展,在一定条件下这种方法也能够用于铝/铝双金属复合材料的制备与生产。

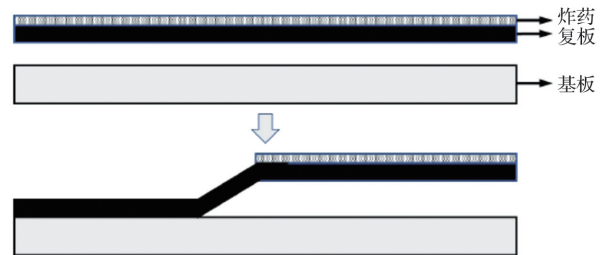


图3 爆炸复合示意图^[18,19]

1.4 旋锻复合法

旋锻复合法是将预制的复合坯料进行轴线上的高速旋转,并同时进行高频次的锻打,使复合坯料发生塑性变形从而实现复合坯料中两金属组元的结合^[21],其工艺示意图如图4所示。这种方法具有生产效率高、自动化效果好和适用范围广等优点,能够实

现单道次的大变形量加工,但对温度的控制要求较高。通常将其与拉拔工艺相互配合使用,从而得到复合效果良好的双金属复合管材、线材和棒材。相比于其他复合工艺,旋锻复合法很少用于生产制备铝/铝

双金属复合材料,但是相信随着市场的发展和需要以及技术的不断更新,今后旋锻复合法的应用前景将会更加广泛。

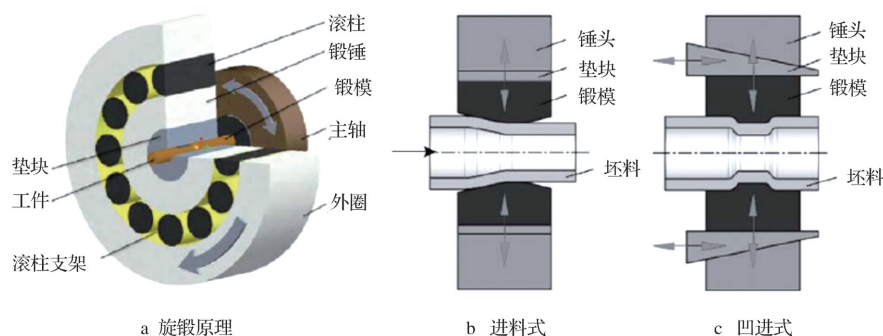


图 4 旋锻复合法示意图^[21]

2 固-液复合法

固-液复合法是将较高温度的液态组元金属浇注到固态组元金属上,或者将处理好表面的固态组元金属浸入到高温的液态组元金属中,利用液态组元金属的高温加热固态组元金属,并在复合界面处发生扩散反应从而进行结合的一种复合材料制备方法^[22]。这种方法制备的复合材料其复合界面更加稳定,并且界面结合优良,是一种简单、实用、有效的复合方法。但是利用这种复合方法制备的复合材料其结合面存在着氧化问题,并且易有氧化皮和杂质的残留,导致复合界面处的结合强度有所下降,造成复合材料在后续使用过程中存在开裂的隐患。

2.1 铸造复合法

铸造复合法是制备复合材料最常用的方法之一,其原理是将液态的高温金属浇注到模具中已经固定好的固态金属上,通过接触面局部的重熔、液相的凝固和元素之间的相互扩散达到界面牢固冶金结合的目的^[23]。铸造复合法的分类有很多,比如离心复合、重力复合和镶铸复合等。

郑小平^[24,25]等人采用挤压铸造复合法制备了包覆型的 7075/6061 复合铸锭,并研究了挤压高度对复合材料组织的影响;结果表明,挤压高度为 250 mm 时其界面处的组织过渡平稳,可以明显看到半固态/枝晶组织,并且铸锭的力学性能良好。李滔^[26]等人利用铸造复合法得到了复合界面牢固结合的 4343/3003/4343 铝合金复合铸锭,这是由于 3003 铝合金表面的 4343 铝合金熔体急速冷却形成了 Al-Si 固溶体,固溶体中的 Si 和 3003 铝合金中的 Mn 发生相互扩散,使

得界面处实现了强力的冶金结合。铸造复合法具有十分广泛的使用范围,可以生产各种形状复杂的产品,并且能够根据大型工件的要求按需制备,也能满足小型零部件的量产,但是其缺点也十分显著,比如在铸造过程中容易产生夹杂、缩松和气孔等一系列铸造缺陷。

2.2 固-液轧制复合法

固-液轧制复合法是一种将轧制工艺和传统铸造工艺相结合的新兴工艺,在轧辊强大压力的作用下,高温的液态组元金属与固态基体金属接触释放出大量的热量,这样就使其快速凝固冷却并发生塑性变形,最终达到两组元金属之间冶金结合的目的,图 5 所示为固-液轧制复合法的示意图^[27]。这种方法具有较高的生产效率,可以将复合材料的生产流程缩短,大大节约了时间成本,并且可以满足大批量生产的需求,生产出来的复合材料界面结合牢固并具有良好的组织和力学性能。

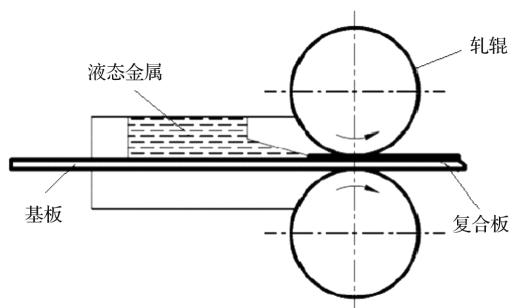


图 5 固-液轧制示意图^[27]

董澎源^[28]研究发现,在固-液轧制过程中,轧出厚度的大小会显著影响 A356/6082 铝合金层状复合板的力学性能,并且保持一定的热处理温度时复合界

面两侧组元合金中的 Si 元素发生明显扩散。陈天赐^[29]等人发现在固-液轧制时升高浇注温度可以使 A356/2024 铝合金复合板材的复合界面处缺陷逐渐消失,且界面处的元素均匀的向两侧扩散,得到结合牢固的复合界面。目前,固-液轧制复合工艺在制备铝/铝双金属复合材料的领域里还没有得到广泛使用,实现柔性包覆复合材料和连续成形仍是需要解决的问题,相信随着技术不断成熟,这些难题会慢慢得到解决。

2.3 热浸镀复合法

热浸镀复合法首先要将固态的组元金属打磨清洁,目的是为了将金属表面的氧化层除去,然后将清洁好的固态组元金属浸入到高温熔融状态下的液态组元金属中,待到一定时间之后,将固态金属从熔融的液态金属中抽提出来,这样冷却之后就得到了双金属复合材料^[30]。这种工艺的生产成本和能耗都比较低,并且能够做到连续化的自动生产,多用于生产覆层较薄的复合薄板带材或者直径较小的复合线材。目前这种工艺被广泛应用于生产异种金属镀层产品,如铜包钢、铝包铁和无氧铜杆等,由于不同铝合金的熔点相差不大,固态铝合金组元在高温熔融的液态铝合金金属液中可能发生部分熔化或变形。因此这种方法不适合用于铝/铝双金属复合材料的制备,未来随着热浸镀技术的不断改进和完善,相信这种复合方法会制备出组织性能良好的覆层铝合金复合材料。

3 液-液复合法

液-液复合法要先将两种组元金属熔化为液态,通过控制两种组元金属的凝固顺序来实现两高温液态组元金属之间的对流和界面扩散,使两组元金属之间的结合变得更加牢固^[31]。液-液复合法制备的复合材料其界面稳定,结合强度好,并且没有夹杂和氧化皮等缺陷,但也有不足之处,如易发生混熔和界面结合宽度不好控制等。目前液-液复合法中半连续铸造复合法和连续铸造复合法是应用较多的复合方法。

3.1 半连续铸造复合法

半连续铸造复合法首先要将一组元金属先浇注到模具中并控制温度让其凝固,然后再向已经凝固的固态金属上浇入另一组元金属液,在金属液高温的作用下结合界面发生元素扩散和局部熔合,从而得到良好冶金结合的复合材料^[32]。半连续铸造复合法能够在保证较低能耗的前提下实现更短的加工流程,大大节约了制造成本,但由于该工艺最先凝固的组元金属未浇注成形,因此在金属的芯部区域容易出现铸造

缺陷。

张卫文^[33]等人研究发现,熔体的浇注温度、节流片的孔径大小和内导管插入结晶器的深度等因素共同影响着半连续铸造得到的 7075/6009 铝合金复合材料中过渡复合层的宽度。蒋会学^[34]等人发现加入冷却板能够使复合界面附近形成一定厚度的半固态层,这样就使得利用直接水冷半连续铸造法制备的 4045/3004/4045 复合材料界面结合效果良好,其界面拉伸强度和剪切强度达到了 105 MPa 和 88 MPa,进一步说明复合界面处为冶金结合。目前半连续铸造复合法仍然存在一些常见的铸造缺陷,因此需要后续对其进行相应的热处理工艺来消除缺陷对复合材料组织性能带来的影响,降低复合材料在后续加工和使用中的安全风险。

3.2 连续铸造复合法

连续铸造复合法是当前比较新颖的一种复合材料制备方法,如图 6 所示。原理是将两种高温液态的组元金属同时浇注到两个连接的模具中,通过控制温度使两种组元金属先后凝固,待实现牢固冶金结合后通过牵引装置持续的将复合坯料拉出,这样就实现了连续生产^[35]。这种方法根据牵引方向的不同可以分为水平式和垂直式两种,可以实现复合材料批量化、连续化和自动化的生产,在保持较低成本的同时还能带来较高的经济效益。目前这种工艺被广泛应用于复合管材和棒材生产加工,常用的连续铸造复合方法有双结晶器复合铸造法、电磁制动连续铸造复合工艺、充芯连续铸工艺和包覆层连续铸造工艺等。

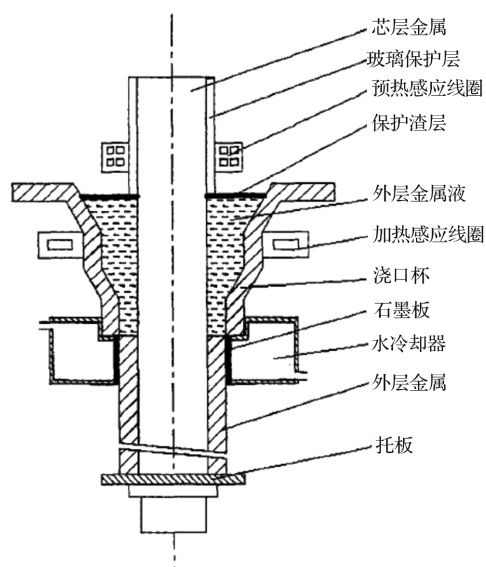


图6 连续铸造复合示意图^[35]

梁春晖^[36]模拟了连续铸造制备 3003/8090 铝合金复合铸坯的过程,其模拟出的最佳参数在实际生产中能够成功制备界面复合良好的复层铸坯。东北大学 EPM 实验室通过多年的不断摸索与试验,已经可以利用这种技术成熟的制备 3xxx 系和 4xxx 系铝合金的复合材料,并且在实际生产应用中取得了不错的成绩。这种方法主要适用于两种熔点相差较大金属之间的复合,无法满足难熔金属的复合需求。此外,如何避免金属液之间发生的混流现象影响复合材料界面的稳定性仍然是这种方法面临的主要问题。

4 总结与展望

(1) 目前,铝/铝双金属复合材料的制备工艺多以轧制复合、铸造复合和挤压复合为主,尽管工艺简单,但缺点也很明显,如制备过程中能耗较高,连续操作性差,并且制得的复合材料存在表面缺陷等。

(2) 近些年来对于复合材料的研究还着重于制备阶段,缺乏相应的理论、技术、人才和设备对其进行深入研究,后续能否实现高水平的连续化批量生产还需要许多学者进行不断的研究和探索。随着技术的不断成熟和科技的不断进步,高效率、低成本、可持续的复合材料生产工艺定会被不断创新和完善,这就为复合材料的广泛使用提供了坚实的基础,相信未来复合材料一定会在材料应用领域大放光彩。

参考文献

- [1] 杨守杰,戴圣龙. 航空铝合金的发展回顾与展望[J]. 材料导报, 2005,19(2):76-80.
- [2] 黄晓英,刘蒙恩,王怀建. 车用轻质材料铝合金/CFRP 在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2015,36(6):569-572.
- [3] Razzaq A M, Majid D L A A, Ishak M R, et al. Microstructural characterization of fly ash particulate reinforced AA6063 aluminium alloy for aerospace applications [J]. IOP Conference: Series Materials Science and Engineering, 2017,270(1): 012028.
- [4] 李军义,王东新,刘兆刚,等. 铍铝合金的制备工艺与应用进展[J]. 稀有金属, 2017(2):203-210.
- [5] Xu N K, Liang S X, Feng Z H, et al. New series of bulk amorphous/crystal bimetal composites of Vit-elad Ti alloy[J]. Materials Letters, 2018,236(1): 665-668.
- [6] 赵佳蕾,付莹,曹志强,等. 电磁搅拌对复层材料凝固组织的影响[J]. 中国有色金属学报. 2013,23(6): 1598-7604.
- [7] Politis D J, Lin J, Dean J, et al. An investigation into the forging of Bi-metal gears[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2248-2260.
- [8] 吕玉廷,蒋朋,曹佑青,等. 放电等离子烧结制备 YG20C/Cr12MoV 双金属复合材料[J]. 金属热处理, 2013,38(7): 53-56.
- [9] 季策,许石民,黄华贵. 金属包覆材料固-液铸轧复合技术研究进展[J]. 精密成形工程, 2021,13(06):12-22.
- [10] 高海涛, Charlie KONG, 喻海良. 轧制(热轧, 冷轧, 深冷轧制)复合法制备轻质金属层状带材研究进展(英文)[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023,33(02): 337-356.
- [11] 陈林恒,牛刚,武会宾,等. 轧制工艺对 304 不锈钢/Q345 复合板组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(02): 148-153. DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.02.038.
- [12] K. Yuanshen, Anna. Effect of SPD Processing on the Strength and Conductivity of AA6061 Alloy [J]. Advanced Engineering Materials. 2019,21(8): 33-37.
- [13] 胡超. 1060/6061 铝合金层状复合板轧制工艺与组织性能研究[D]. 重庆大学, 2020. DOI:10.27670/d.cnki.gcqdu. 2020.000894.
- [14] 姜龙,郑小平,宋进英,等. 轧制 6061/7075 铝合金复合板的工艺优化[J]. 金属热处理, 2019, 44(02): 96-99. DOI:10.13251/j.issn. 0254-6051. 2019.02.019.
- [15] 郭浩然,郭丽丽,赵颖,等.连续挤压制备铝包镁复合棒材的组织与力学性能[J/OL].材料工程: 1-13[2023-04-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1800.tb.20230417.1804.004.html>.
- [16] Fan X, Chen L, Chen G, et al. Joining of 1060/6063 aluminum alloys based on porthole die extrusion process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 65-72.
- [17] Chen X, Zhang J, Xia D, et al. Microstructure and mechanical properties of 1060/7050 laminated composite produced via cross accumulative extrusion bonding and subsequent aging [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 826.
- [18] Mróz S, Mola R, Szota P, et al. Microstructure and properties of 1050A/AZ31 bimetallic bars produced by explosive cladding and subsequent groove rolling process[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020,20(3).
- [19] 王小苗. TA1/5052 复合板爆炸焊接组织及性能研究[D]. 长安大学, 2021.
- [20] 董运涛,吴江涛,樊科社,等. 爆炸-轧制 TA1/Q345R 复合板的组织与性能[J]. 热加工工艺, 2020, 49(17): 146-149. DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814. 20192820.
- [21] 姜敏轩,刘新华,姜雁斌,等. 铜包铝丝材的旋锻复合-拉拔成形与组织性能[J]. 工程科学学报, 2018, 40(11): 1358-1372. DOI:10.13374/j.issn2095-9389. 2018. 11. 010.
- [22] 李建鹏. 7075/6061 铝合金双金属复合材料的制备及性能研究[D]. 江苏大学, 2022. DOI:10.27170/d.cnki.gjsuu. 2022. 002052.
- [23] 杨吴坤,邱瑾,周宏伟,等. 铝/镁双金属铸造复合材料的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2022,32(06): 1591-1604.
- [24] 郑小平,谢文杰,曹通,等. 挤压复合铸造 7075/6061 双金属铸锭的界面组织与性能[J]. 金属热处理, 2021, 46(06): 186-190. DOI:10.13251/j.issn.0254-6051.2021.06.036.
- [25] 郑小平,谢文杰,曹通,等. 挤压出口高度对 7075/6061 复合铸锭组织与性能的影响[J/OL]. 热加工工艺: 1-4[2023-05-06]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki. 1001-3814. 20202365>.
- [26] 李滔,周海涛,王顺成,等. 液固铸造 4343/3003/4343 铝合金复合锭的界面组织[J]. 材料工程, 2016, 44(01): 19-25.
- [27] 陈天赐. 固液轧制 A356/2024 层状复合材料组织及性能研究[D]. 兰州理工大学, 2018.
- [28] 董澎源. 固-液轧制 A356/6082 层状复合材料界面组织及性能研

- 究[D]. 兰州理工大学, 2019.
- [29] 陈天赐, 李元东, 李明, 等. 浇注温度对固-液轧制 A356/2024 板材复合界面的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(03): 295-299. DOI:10.15980/j.tzzz. 2018.03.018.
- [30] 毛红奎, 郭冰鑫, 樊宗义, 等. 热浸 Al 对 Al-Si/38CrMo 复合界面固-液成型组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(02): 485-496.
- [31] 李春晓. 7075/6061 双金属复合材料的制备与性能研究[D]. 华北理工大学, 2016.
- [32] 郭睿, 何汉军, 曾大新, 等. 液-液复合制备灰铸铁-球墨铸铁双材料铸件的工艺研究[J]. 铸造, 2017, 66(01): 25-28+32.
- [33] 张卫文, 郑小平, 黄强, 等. 7075/6009 梯度复合铝合金的界面特征[J]. 特种铸造及有色合金, 2008(S1): 344-346.
- [34] 蒋会学, 张海涛, 秦克等. 直接水冷半连续铸造制备 4045/3004/4045 铝合金三层复合锭(英文)[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(08): 1692-1697.
- [35] CHU D, ZHANG J, YAO J, et al. Cu-Al Interfacial Compounds and Formation Mechanism of Copper Cladding Aluminum Composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(11): 2521-2528.
- [36] 梁春晖. 3003/8090 复层材料制备技术与界面表征[D]. 大连理工大学, 2014.

Research Progress in Preparation Technology of Al/Al Bimetallic Composite Materials

Wang Xuzhong¹, Li Xiaofei², Wang Gaosong¹

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Materials Electromagnetic Processes, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. Military Representative Office of Haizhuang Shenyang Bureau in Shenyang Area, Shenyang 110819, China)

Abstract: In this paper, several different processes for the preparation of aluminum/aluminum bimetallic composites are summarized, their advantages and disadvantages are briefly described, and the development trend of aluminum/aluminum bimetallic composites in the future is analyzed and prospected.

Keywords: bimetallic composite material; aluminum alloy; preparation process

(上接第3页)

我国集成电路用金属靶材研究和制造面临着机遇和挑战,在解决金属靶材制备技术上创新不足、专业人才匮乏、上下产业链沟通不及时、靶材产品验证周期长等问题后,继续加大金属溅射靶材基础研究,加强国际合作交流,加强靶材上下游企业的联动,加大科技人才培养,解决关键设备国产化,共同实现我国金属溅射靶材产业的高水平发展,以此推动我国社会经济可持续发展和巩固国家安全战略地位。

参考文献

- [1] 何金江, 吕保国, 贾倩, 等. 集成电路用高纯金属溅射靶材发展研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 79-87.
- [2] 贾国斌, 冯寅楠, 贾英. 磁控溅射用难熔金属靶材制作、应用与发展[J]. 金属功能材料, 2016, 23(6): 48-52.
- [3] 许彦亭, 郭俊梅, 王传军, 等. 贵金属溅射靶材的研究进展[J]. 机械工程材料, 2021, 45(8): 8-14.
- [4] 何金江, 贺昕, 熊晓东, 等. 集成电路用高纯金属材料及高性能溅射靶材制备研究进展[J]. 新材料产业, 2015, 17(9): 47-52.
- [5] 林冰涛, 王娜, 杨明琿, 等. 钼靶材溅射沉积效果差异原因分析[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(3): 127-130.
- [6] 罗俊峰. 稀贵金属在磁记录靶材中的应用[J]. 中国科技信息, 2011(18): 50-50.
- [7] Han, Yasugi-shi G(JP), Murata, et al. Sputtering target, Method of Making same, and High-melting Metal powder Material[P]. EP: 1066899A2, 2001.
- [8] 原范明, 枪田聪明, 松坂律也, 等. 溅射靶材: 1534110A[P]. 2004-10-06.
- [9] 何金红, 贾倩, 等. 一种高纯高致密细晶低氧钨靶材的制备方法: 115740452A[P]. 2023-03-07.
- [10] 姚力军, 潘杰, 等. 一种大尺寸、高致密度钼靶材的制备方法: 115502403A[P]. 2022-12-23.

Brief Introduction on Research Status of Metal Sputtering Targets for Integrated Circuits

Ju Yanpeng, Li Xinran

(Henan Oriental Materials Co., Ltd., Zhengzhou 451100, China)

Abstract: In this paper, the technical requirements and preparation process of metal targets for integrated circuits are introduced, and the development trend of metal sputtering targets is forecasted.

Keywords: integrated circuit; metal sputtering target; grain size; crystal orientation; development trend