

异质材料钎焊中的科学问题、 技术难点与若干工艺方法

王冰¹, 龙伟民^{1*}, 孙华为², 郝庆乐²

1.中机智能装备创新研究院(宁波)有限公司, 浙江 宁波, 315700

2.郑州机械研究所有限公司新型钎焊材料与技术国家重点实验室, 河南 郑州, 450000

摘要: 异质材料钎焊越来越受到关注, 未来应用研究主要集中在表面润湿、界面反应、冶金机理、应力缓解、缺陷产生机理及检测检验等方面。异质结构的应用技术持续开发, 未来技术突破主要集中在高性能钎料研发、复合工艺开发、数控装备研制等方面。在不久的将来, 异种材料钎焊技术在航空航天、海洋装备、汽车制造、生物医学等方面有更广阔的发展与应用空间。

关键词: 异质材料连接; 钎焊工艺; 润湿性

1 引言

目前, 先进制造正向着高精度、高性能、高可靠、低成本、轻量化、结构功能一体化等方向发展[1-4]。在这个过程中, 异质材料的结构层出不穷, 其应用也愈加广泛, 它的重要性日益凸显。但是这类材料结构, 制造却困难重重。例如陶瓷与金属连接, 玻璃与金属连接, 由于两种材料的物性差别非常大, 连接起来非常困难。最初连接异质材料的方法是使用胶接, 但用这种方法接口的连接强度不能满足使用要求, 因此使用焊接方法连接异质材料就越发重要^[5-8]。

20年来梯次接续创新, 前赴后继迭代, 研究热度不减。异质材料连接在接头设计、钎料制造及应用方面引发科学、技术、工程等一系列难题, 凸显重大责任。钎焊技术逐渐成为国际公认的异质材料连接的主流方法, 未来应用研究主要集中在表面润湿、界

面反应、冶金机理、应力调控、缺陷产生机理及检测检验等方面。随着异质结构应用技术的持续开发, 未来异质材料钎焊技术突破主要集中在高性能钎料研发、复合工艺开发、数控装备研制等方面。异种材料钎焊技术^[9,10]在未来航空航天(金属间化合物、陶瓷与复合材料)、海洋装备(钛与铜/钢)、汽车制造(轻质金属与树脂基复合材料)、生物医学(仿生及生体材料)等方面有更广阔的发展与应用空间。

2 异质材料钎焊中的科学问题与技术难点

异质材料的连接或者是钎焊的主要技术难点在于: 一是焊不住; 二是焊不牢。由于两种材料的物性差别非常大, 界面之间的润湿性很差等, 例如金属与陶瓷的连接^[11-13], 它们的熔点差别很大, 热膨胀系数也不相同。因此, 由于一些异质材料的物理、化学、力学性能差异巨大, 导致焊接存在着三

个共性问题。第一, 冶金不相容。异质材料的界面反应非常复杂, 界面间形成的化合物难以预测和调控。第二, 润湿不同步。大部分的异质材料的相容性很差, 导致两种材料难以同时润湿。第三, 应力难协同。两种异质材料的热膨胀系数相差悬殊, 焊接热循环下接头形成应力集中, 应力复杂难以调控, 焊缝处出现强失配、非平衡冶金。因此, 界面润湿机理、界面反应控制、应力调控机理、化合物表征是异质材料钎焊中亟需我们钎焊工艺师解决的科学问题。如图1

3 异质材料钎焊若干关键技术创新

3.1 在线梯度活性钎料

针对石墨与铜物性不互通的鸿沟, 改变以往机械连接的方式, 最初使用真空焊接的方法使石墨与铜连接起来^[14]。而现在使用研发在线梯度活性钎料, 在非真空环境下就能把它们焊



图1 若干科学问题与技术思路

接起来。对石墨一侧焊接的活性钎料是钛，然后在钛的基础上加入氯化钛，提高钎料的活性，对铜一侧焊接使用的是普通钎料。因此，该钎料是一种梯度复合钎料，一边使用氯化钛提高活性，一边不使用钛，在焊接强度高和导电性好的基础上，降低了使用成本，中间又加了一层可伐合金，用于缓冲。针对SiC复合材料/铝物性不互通的差异，发明先导润湿型梯度复合钎料，解决SiC复合材料/铝界面熔渗、熔蚀及脆断等难题，实现珩磨条的高精度低成本焊接，应用于航天器件轻量化和散热器的结构功能一体化。如图2

3.2 无时滞高活性钎料

一般情况下，活性的产生经常需要较长时间，有的甚至需要几十分钟。为了缩短活性产生时间，就提出了无时滞的概念，没有时间滞后直接就能完成。提出原位合成技术，发明TiH₂粉与CuAgSnTi粉原位反应技术，自生高活性高强度钎料，并原位连接，实现金刚石工具锋利度、耐用度、可靠度的

协同提升，主要应用于高端金刚石工具中。

针对预合金粗粉活性低、细粉活性难保持的国际难题，发明硼化物覆膜包衣技术，在粉末的表面涂上一层膜，这层膜是膨化物，在常温下它能保护钎料不被氧化，焊接过程中，这个表面的膨化物先熔化，熔化也起到先导润湿的作用，这种润湿能很好的把粉末表面的氧化物给还原掉，同时能降低整个钎缝中间的表面张力，这样可以起到去膜、保护、降张力的效果，实现一类粉末可高效提升多种工具性能。让需要在真空环境下才能完成的焊接，在大气中就能完成。这种技术和钎料主要应用于锯、切、钻、磨、珩、抛等多种金刚石工具。如图3

3.3 表面造型与钎缝构形技术

针对异质材料连接润湿不同步引发焊缝缺陷的行业难题，发明可改变表面微观结构和焊缝间隙形态技术，提升极异材料焊接接头可靠度。例如金属与陶瓷之间的焊接非常困难，一

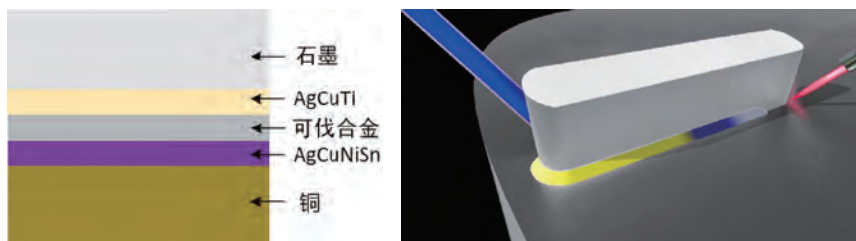


图2 在线梯度活性钎料与诱导润湿增韧抗裂

般会在真空下进行焊接。若要在非真空下焊接就必须考虑到气和渣的影响，而由于金属与陶瓷的润湿不同步，金属润湿较快，陶瓷润湿较慢，导致气和渣卷入到润湿界面内部，降低界面结合强度。因此，需要金属与陶瓷同步润湿，把气和渣同时推出去，才能使焊缝的强度最好。另一个更大的难点是从热力学数学公式推导我们发现，如果钎缝间隙是平行的、是无序的，它中间会产生很多缺陷。为了减少甚至消除这些缺陷，把钎缝间隙做成有一定曲率的曲面间隙，随着时间的延长，渣和屑会向更大的地方有序运动，这样降低焊缝的缺陷，使焊缝更加致密。这是我们的工艺师做的事情，仅仅改变了一下钎缝间隙的相对位置，就得到更完美的钎缝。如图4

3.4 热力耦合与应力缓释技术

针对异质构件在服役时高温-深冷骤变引发的热应力失衡问题，创新超声耦合调控织构技术，实现界面强化与应力缓冲，支撑ITER、载人航天重大工程。这是一项多项技术耦合在一起的技术，通过对这项技术的开发，并凭借这一技术和法国达成国际合作项目，并且把相关的工作全交给了中国，虽然该技术的应用一年不到一百万，但还是凭借该技术获得了中国专利一等奖。此外还针对大尺度异质构件长寿命服役应力集中隐患问题，发明驻波驱动赋能，调控焊缝结构技术，实现应力随动缓释。利用这一技术实现了硬质合金和钢的焊接，焊长度达到1.08米。这种方法很好的解决了硬质合金和钢有序的碰撞，实现了硬质合金和钢的顺序连接。如图5

4 异质材料钎焊实践

金属与金属的连接，首先介绍铜

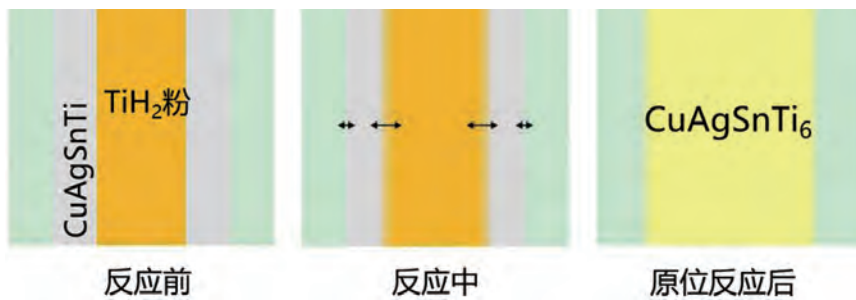


图3 无时滞高活性钎料

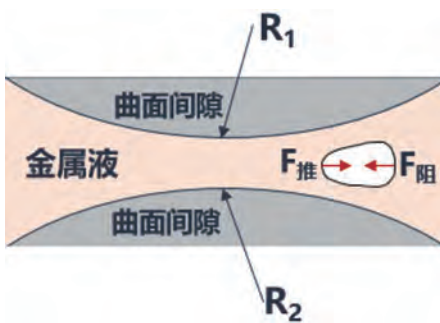


图4 曲面间隙

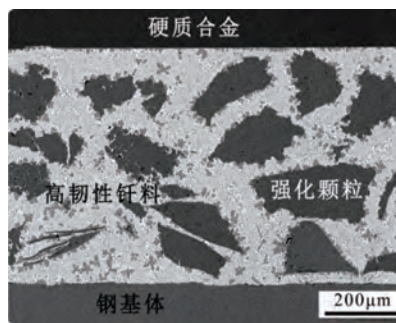


图5 应力缓释

铝^[15]的连接，在变压器和输电线里面会大量用到铜铝的连接，传统的连接是用机械连接等多种方式，它的柔性和灵活性均较差，使用钎焊方法连接的铜铝结构件，柔性和灵活性基本不受限制，随时随地都可以使用。我们发明的Zn-5Al钎料钎焊的Cu/Al接头界面组织均匀，能够有效提高Cu/Al焊接接头的强度。

在铝和钢^[16]方面，使用Zn-15Al钎料钎焊6016铝合金/GXES低碳钢，其接头中的脆性化合物含量降低，很好的解决了铝合金和钢的连接。

对于铜和钢的连接，在航天中的应用比较多。火箭的推力发动机有四根大的尾喷管和很多小的尾喷管，每根大尾喷管上面有几百米的焊口，铜和钢中间有很多两毫米到三毫米宽的缝隙，使用传统的异质材料连接方法连接铜和钢比较困难，而综合使用以上所述的技术，能够比较完美地解决焊接方面的问题。

金属与非金属，传统连接金刚石和金属^[17]的方法，都是在真空环境下焊接起来的。现在可以在非真空下，把金刚石很好的跟金属焊接起来，降低金刚石和金属的焊接成本。开发的

绳锯一般是10到12毫米，最细的有8毫米，这种绳锯可以做几十公里长，可以大幅度提高资源的利用率。随着技术的不断进步与发展，绳锯的价格从最开始是一百多元每米，后来是几十元每米，现在发展到了每米不到十块钱的价格，而且性能比原来更好。

陶瓷分很多种类，其中氧化物陶瓷相对来说用的比较多，氧化物陶瓷和金属的钎焊^[18,19]有很多种类，例如Al₂O₃陶瓷/不锈钢、Al₂O₃陶瓷/铜、TZM合金/Al₂O₃陶瓷/不锈钢等等。相对于氧化物陶瓷，氮化物陶瓷的性能更好，但是它跟钢的差异更大，焊接难度更大。因此，我们研究了TiAl/AgCuTiC/Si₃N₄钎焊接头形成机制，开发专用活性钎料，提高接头可靠性。

5 工艺师的思考

异质材料连接的理论基础研究将重点探究深层次物质与能量交互规律，微区能量与物质的微尺度传输，界面微结构形态的精准计量、检测检验与表征。而在异质材料焊接的应用基础研究将重点研究材料间冶金相容性、润湿同步性、应力协同性以及焊接接头构形原则，焊接过程固液本构关系、界面调控原则。异质材料钎焊的工程技术研究将重点研发零件间结构匹配性、接头呈现性、应力消减性以及钎料成分确定方法、钎焊工艺热温作用过程、设备实现方法。

异质连接要打破物质、信息的约束，通过钎焊互联，使不同材质共同作用、互补承载、传递物质能量信息。工艺研发打破的是设计和制造的局限，通过人机互通、使不同工序共济对象、互补加工、交互达成设计信息。异质钎焊最大限度的发挥材料呈现的性能，减少材料用量，便捷完成设计要

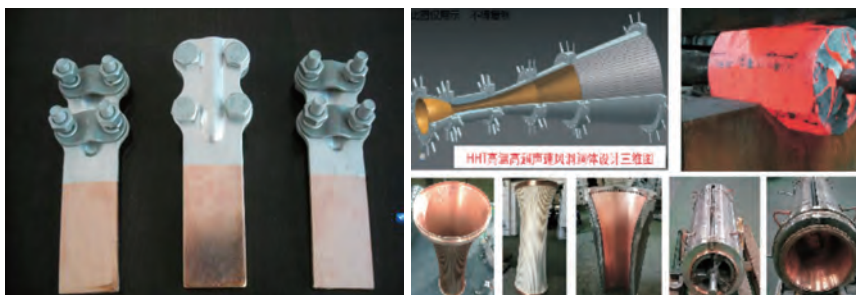


图6 变电站过渡线夹和火箭发动机尾喷管



图7 绳锯和高压线路绝缘子

求,降低系统、部件的重量。工艺设计最大限度地优化新品制造的路径,降低生产难度,快速相应设计目标,趋尽设计、制造的协同。

在物质科学的深度挖掘中,我们探求焊接新方法、发明新原理。在能量转化的高度变换中,寻求焊接新效应、发现新规律。在信息交互的广度孪生中,渴求焊接新知识、发掘新技术。将历史创造的知识精华融入物质流、能量流和信息流,梯次接续集成到焊接系统,连接新时代的物质文明和信息革命。

6 结束语

工艺技术是产品研制过程中利用各种特殊工具对原材料或半成品进行加工或处理,最后使之成为合格产品的一种技术手段。工艺是制造之源,是制造之需,是制造之要。制造的源泉是工艺,如果没有工艺,很难谈制造,材料是基础,工艺是关键。

工艺是保证产品质量的重要手段之一,合理的工艺能够在保证产品质量的前提下大幅度提高生产效率。工艺过程是机械制造业的基础工作,高的工艺技术水平可以提高产品质量、缩短生产周期并增加产量。工艺创新可以提升原有技术的效能,在机械制造业发展过程中不可或缺的重要源泉。工艺承载着产品的价值和生命,工

艺师传承着企业的灵魂和命脉。

工艺是工程技术,工艺是技术科学,工艺是艺术再现,是创作、是科学、是艺术。工艺让您魂牵梦绕,我们让工艺师的明天更美好! **7**

参考文献

- [1] 宋天虎. 开创我国焊接行业的新局面[J]. 电焊机, 2020, 50(09): 1-10.
- [2] 张忠. 焊接技术在轨道交通车体中的应用及其发展方向探讨[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(14): 72-73.
- [3] 王评. 现代焊接技术的发展现状及前景[J]. 内燃机与配件, 2020(18): 183-184.
- [4] 孔令翔. 发达国家与发展中国家去工业化的比较研究[D]. 江西财经大学, 2020.
- [5] 钟素娟, 张丽霞, 龙伟民等. 异质材料连接研究进展[J]. 电焊机, 2020, 50(09): 118-133.
- [6] 龙伟民, 张青科, 朱坤, 等. 绿色钎焊材料及无害化钎焊技术的发展[J]. 焊接, 2014(1): 3-7.
- [7] 罗兵兵. 汽车铝/钢异质材料机器人激光焊接工艺研究[D]. 南昌大学, 2019.
- [8] 侯林涛, 陈文革, 刘盈斌等. 铜钢异质复合材料连接特性的分析[J]. 材料研究学报, 2015, 29(09): 693-700.
- [9] 郭夏君. 陶瓷-金属低温超声钎焊方法及其连接机理研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2019.

- [10] 刘欢, 高晓龙, 刘晶等. Ti6Al4V/Cu异种金属激光焊接头组织及性能研究[J]. 焊接, 2019(10): 7-11+65.
- [11] 林凤洁, 代波, 任勇等. Al/Ni含能多层膜在Al₂O₃陶瓷/不锈钢焊接中的应用[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(05): 65-69.
- [12] 司晓庆, 李淳, 仝钧雷等. 纤维增强陶瓷基复合材料与金属钎焊研究进展[J]. 自然杂志, 2020, 42(03): 231-238.
- [13] 郭乐扬. 氮化硅陶瓷的连接工艺以及钎料研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(S2): 198-201+214.
- [14] 朱艳, 王永东, 赵霞. 石墨与铜真空钎焊接头的组织与强度[J]. 焊接学报, 2011, 32(06): 81-84+117.
- [15] 董博文, 董显, 鲍丽等. 铜-铝异种金属钎焊材料的研究现状[J]. 焊接, 2019(05): 7-12+65.
- [16] 吴杰, 薛松柏, 费文潘等. 铝/钢异种材料钎焊研究现状与发展趋势[J]. 材料导报, 2019, 33(21): 3533-3540.
- [17] 朱海旭, 俞伟元. 金刚石钻头硬质合金层和钢钎焊用新型钎焊膏的研制[J]. 热加工工艺, 2018, 47(07): 204-208.
- [18] 李炎, 魏世忠, 王新阳等. 保温时间对钎焊Al₂O₃/碳钢界面结构及结合强度的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(01): 86-92.
- [19] 潘峰. 梯度钎料连接S13N4陶瓷/42CrMo钢的数值模拟和组织性能[D]. 哈尔滨工业大学, 2011.

作者简介: 王冰 (1991-), 男, 博士后, 主要从事焊接新材料制备与设备研发。电话: 15258253995, Email: wangbing@camsouth.com.cn

通讯作者: 龙伟民 (1966-), 男, 研究员, 主要从事新型钎焊材料及其生产技术、钎焊工艺与设备研发及应用。Email: longweimin@camsouth.com.cn

2020年全国机电企业工艺年会暨第十四届机械工业节能减排工艺技术研讨会在山东潍坊隆重召开

2020年11月26—27日，2020年全国机电企业工艺年会暨第十四届机械工业节能减排工艺技术研讨会在山东潍坊成功举办。此次大会由中国机械制造工艺协会主办，内燃机可靠性国家重点实验室、潍柴动力股份有限公司承办，南京航空航天大学、广西玉柴机器股份有限公司、机械科学研究总院青岛分院有限公司、先进成形技术与装备国家重点实验室等单位协办。

中国机械制造工艺协会理事长、南京航空航天大学校长单忠德院士致开幕词。山东省工信厅副厅长、党组成员孔庆成，山东省潍坊市委常委、副市长刘建国，潍柴动力股份有限公司董事长谭旭光分别致辞。华中科技大学教授李德群院士、海军工程大学教授何琳院士、火箭军装备研究院研究员冯煜芳院士、天津工业大学校长夏长亮院士、中国运载火箭技术研究院研究员朱广生院士等知名专家、学者应邀出席会议，会议吸引了200余位机电行业人员参会，共同围绕“绿色制造与智能制造”交流研讨，研判制造工艺

技术以及机电行业的发展趋势。

单忠德理事长致辞中表示，这次会议是在党中央坚强领导下疫情防控取得巨大成功、经济形势持续向好的形势下召开的。当前在“十四五”规划的大好环境下，制造型企业迎来了做大、做强、做精的宝贵时机，我们要深入学习贯彻落实十九届五中全会精神，大力发展制造业，推动企业更加绿色、高质量、可持续发展，为实现制造强国贡献力量。建议进一步促进产学研深度融合，加强科研协同攻关，提升自主创新能力，营造良好的发展生态。中国机械制造工艺协会作为行业的交流平台，在推动机械工业技术进步方面应持续发挥作用，也希望各企业勇挑重担，共同推动制造业创新发展，绘就美好的明天。

会议邀请了华中科技大学李德群院士、天津工业大学校长夏长亮院士、南京航空航天大学校长单忠德院士分别做了题为《塑料注射成形的智能化研究》《电机系统智能设计与控制技术》《数字化智能化成形制造技术与装备》的特邀报告。

大会邀请中国空间技术研究院原质量总师王至尧研究员、上海交通大学来新民教授、潍柴动力股份有限公司热加工总工艺师刘庆义研究员、中机智能装备创新研究院有限公司总经理龙伟民研究员分别作了题为《关于智能制造与产品系统工程》《薄板微细成形工艺及在燃料电池制造中的应用》《柴油机的绿色制造发展》《异质材料钎焊及工程应用》的大会报告。

为了更好的促进机电行业工艺人员的交流与合作，会议安排了“绿色制造”“智能制造”两个分论坛，来自多家单位的20位优秀代表做了涉及柴油发动机铸造、高速热成形工艺、智能化减材制造、超高速激光熔覆、复合刀具涂层设计等多个领域的技术报告，引起了与会代表的积极响应。

会议期间召开了中国机械制造工艺协会第六届三次会员代表大会暨第六届三次理事会扩大会议、第六届四次常务理事会议，会议均由单忠德理事长主持。会议审议了中国机械制造工艺协会2020年度工作总结，先后表决通过了中国机械制造工艺协会副理事

