

文章编号: 1005-0523(2007)04-0117-04

# 点焊电极用铜基复合材料的研究现状

涂芳, 何柏林

(华东交通大学 机电工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 概述了电阻点焊过程中点焊电极的失效原因及铜基复合材料点焊电极的研究进展. 重点介绍了点焊电极用弥散强化铜基复合材料、碳/铜复合材料和钨/铜复合材料的制备工艺和强化原理. 并分析了目前点焊电极用铜基复合材料存在的一些问题.

**关键词:** 点焊; 电极; 铜基复合材料; 碳/铜; 钨/铜

**中图分类号:** TB331

**文献标识码:** A

## 1 引言

在现代航空、汽车和家电制造等行业中, 电阻焊的应用日益扩大, 其中点焊广泛应用于薄板冲焊结构生产, 如汽车车身、飞机机翼、仪表壳体等, 可获得良好的焊接质量<sup>[1]</sup>. 点焊电极是点焊中的易耗零件, 目前最常用的电极材料是有较好的导电导热性能的铜和铜合金, 如铬铜、锆铜、铬锆铜、铍锆铜等. 由于电极的工作条件比较恶劣, 现有的点焊电极一次只能焊 500 点左右. 因此, 频繁的整修和更换电极降低生产效率, 提高了生产成本, 同时也使得焊点质量不一致. 所以迫切需要研究一种性能较好, 寿命较长的新型的点焊电极. 在决定电极寿命的各因素中, 电极材料的性能影响最大. 为了进一步提高生产率, 扩大电阻点焊应用, 国内外在采用多种制备工艺改善电极材料, 以提高点焊电极的寿命方面做出了大量研究.

## 2 电极失效分析

为了研究适合电阻点焊的电极材料, 就必须对点焊电极的作用和热过程进行综合分析. 电极主要功能是传输电流, 加压和散热<sup>[2]</sup>, 而点焊时的焊接电

流常高达数千至数万安, 电极压强可达几百 MPa, 同时, 电极的工作面又直接接触高温焊点的表面 (1 000 K 左右). 由于高温和高压, 电极损坏的主要形式是变形和粘附. 变形是由于电极金属在高温下受到冲击负荷的反复作用, 产生明显的通常称为“蘑菇形”的压溃. 粘附是电极工作面和焊件金属间出现了扩散与合金化. 在点焊铝和铝合金以及镀层钢板时, 电极的粘附现象比变形还严重. 在使用铜钨复合材料电极时, 在电极头部则出现凹蚀或剥落. 随着电极头部变形的加剧, 电极工作面直径不断扩大, 焊接电流密度随之降低, 使熔核焊透率降低、焊接接头强度下降, 最终使电极失效<sup>[3]</sup>. 尤其在点焊镀锌钢板时, 由于低熔点、低硬度、高电导率的镀层金属的存在<sup>[4]</sup>, 接触电阻降低, 且低熔点的锌层融化后填满电极的接触空隙, 使导电面积扩大, 电流密度降低. 因此与低碳钢相比, 焊接电流增加 30%~50%, 电极力增加 10%~30%, 造成电极寿命的急剧下降, 约为一般点焊电极 1/3.

通过对电极磨损分析可知, 失效产生的主要原因是塑性变形、合金化以及再结晶、热疲劳等. 影响电极使用寿命的主要因素有电极材料, 电极头部的形状, 冷却条件和焊接规范等. 其中电极材料的影响最为重要. 因此为提高电极寿命, 研究一种高热硬性、高软化温度、抗高温氧化同时电导率不低于

收稿日期: 2007-05-24

80%IACS 的综合性能较好的电极材料是最有效的途径,对此,几十年来国内外在探索制备高强高导铜电极的各类复合材料方面已作了大量研究,其中材料的复合化一直是研究的热点。

### 3 铜基复合材料点焊电极

由于铜点焊电极要求同时具备高强度和高导电性,而常规的铜合金主要是通过合金化法制备,或固溶强化、细晶强化等手段生产,强度一般低于 550 MPa,电导率一般不超过 80%IACS,难以满足对新型工业材料焊接的要求。随着研究的深入,兼具高熔点与高导电特性的铜基复合材料倍受关注。铜基复合材料是将金属铜与另一种或一种以上异质、异形、异性的材料复合形成的新型材料<sup>[5]</sup>。一般以铜为基体组元,其余为增强体或功能组元,如碳、陶瓷等纤维和晶须等高性能增强体或耐高温的金属、陶瓷和碳(石墨)等。图 1 表示由不同类型增强体强化的铜基复合材料。

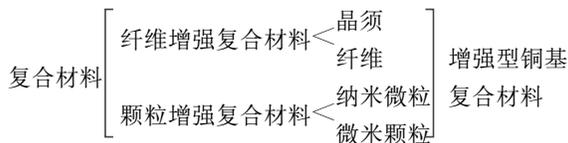


图 1. 增强型复合材料分类

#### 3.1 弥散强化铜基复合材料

研究最早也最成熟的电极材料是弥散强化铜基复合材料(颗粒增强型)。由于点焊电极一直处于高温高压的状态下,铜电极在高温下将发生再结晶、第二相粗化和溶解,因而加工硬化、析出强化等常规方法均难以奏效,固溶强化又会大大降低材料的传导率。为了能在不过多牺牲热导率和电导率的前提下改善铜的力学性能,尤其是改善耐热稳定性,经研究发现采用稳定弥散强化相强化铜基复合材料是解决这一矛盾的较好方法<sup>[6]</sup>。弥散强化铜基复合材料是利用铜与一定比例的具有高熔点、高硬度、具有良好的热稳定性的陶瓷颗粒(如  $Zr_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $TiC$ 、 $WC$  等)混合,通过粉末冶金的方法制成。由于通过第二相质点在铜基体上的弥散分布使其强化,且这些化合物在高温下非常稳定,不易分解,不会与基体发生反应而溶入。因此该类材料在高温下有较强的抗氧化性能,较高的软化温度(1 000 k 以上)。目前,研究的最充分的是氧化铝弥散强化铜电极。软化温度在 1 100 k 以上,焊接镀锌钢板时不易产生粘附现象,使用寿命为铜电极的 4~10 倍。

弥散强化铜基复合材料的硬度和电导率取决于陶瓷颗粒的含量、颗粒度与分布。主要的制备方法包括机械合金化、共沉淀法和内氧化法。目前,内氧化法是用得最多也是较成功的方法,能够精确控制强化相的数量,颗粒分布也比较均匀。但是当增强颗粒非常细小时,使用常规方法(常规粉末冶金法)难以保证增强组分在金属基体内均匀分布和界面结合良好。为此,焊接工作者在改善制备工艺、选择合适的弥散粒子方面,做了大量试验。其中陶瓷增强颗粒  $TiB_2$  具有高熔点、高硬度、热膨胀系数较低和良好的导电导热性<sup>[7]</sup>,强化效果显著,且对金属的电导率热导率影响也较小,成为研究的热点,如董仕节等人用原位法制成  $TiB_2/Cu$  电极材料。此工艺采用机械合金化(MA)和加压烧结相结合的方法<sup>[8]</sup>,原位生成  $TiB_2/Cu$  复合材料。工艺流程如图 2 所示。与  $CuCrZr$  电极相比, $TiB_2$  增强铜基复合材料的硬度提高一倍,电导率稍有下降(30%左右),软化温度提高(1100 k 左右)。试验结果表明含  $TiB_2$  为 1.5 wt% 铜基复合材料制作的点焊电极在焊接镀锌钢板时的寿命是普通  $CuCrZr$  电极的 4~8 倍。

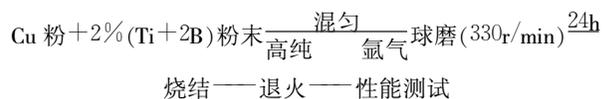


图 2  $TiB_2/Cu$  电极复合材料制备工艺流程

#### 3.2 碳/铜复合材料

碳[碳纤维(CF)、石墨纤维(GF)、石墨(G)]/铜基复合材料统称 C/Cu 复合材料<sup>[9]</sup>,因其具有导电导热性能好,磨损率低等优点,早在三十年代人们就开始深入研究。制备 C/Cu 复合材料的工艺很多,大致可分为两类:固相法和液相法。早期的碳/铜复合材料一般由粉末冶金法制成,将经表面预处理的合金混合、球磨,然后采用冷压烧结或热压扩散烧结制备。近二十年国内外广泛开展了碳增强体的表面涂层研究,同时制备工艺的研究更趋多元化。连续 CF、GF 增强铜基复合材料得到了发展。70 年代末国内有关科研机构和高等院校相继展开了 C/Cu 复合材料的实验研究,主要集中在基体合金化、碳增强体表面处理与界面结构、制备工艺、物理、力学性能等方面。

铜基复合材料的性能主要取决于 1. 铜基体的性能; 2. 增强材料的性能; 3. 基体和增强材料之间的界面性能。金属基复合材料界面是指金属基体与增强体之间因化学成分和物理、化学性质明显不同,构成彼此结合并能起传递载荷作用的微小区域。界

面微区的厚度可以从一个原子层厚到几个微米。在复合材料制备过程中会发生不同程度的界面反应,形成复杂的界面结构。在制备过程中如何改善金属基体与增强体的浸润性、控制界面反应,形成最佳的界面结构,是金属基复合材料生产应用的关键。解决途径主要有增强体的表面涂层处理、金属基体合金化及制备工艺方法和参数控制。其中最有效的途径就是基体合金化与碳增强体的表面处理。即在铜基体中添加适量的合金元素通过改变基体的化学成分可以降低其表面张力和润湿过程中的界面张力。这些合金化元素多为与碳的亲合力强,易生成碳化物的Cr、Ti、V等元素,是促进Cu基体与碳增强体润湿的有效方法。合金元素添加量的确定及添加工艺的控制是合金化的关键所在。碳增强体的表面处理也是改善润湿性促进界面结合的有效途径,发展了一系列的表面处理工艺。应用较多的主要有化学镀(颗粒和纤维表面)和电镀(CF、GF)。

碳/铜复合材料主要用于要求导电耐磨工作条件,在电极方面的应用方兴未艾,试验较好的是石墨粉末与铜粉制备的电极材料,随着碳纤维增强铜基复合材料研究的深入,碳/铜复合材料在点焊电极方面的应用也将日益扩大。

### 3.3 钨/铜复合材料

我国对钨/铜基复合材料的研究始于上世纪五十年代<sup>[10]</sup>。钨/铜基复合材料是由高熔点、高硬度、抗粘附的钨和高导电、导热率的铜所构成的高性能材料。因其具有良好的抗熔焊性、高强度,同时钨的电导率还高于铁等金属,目前常用作电阻点焊电极。由于钨、铜的熔点相差很大,钨的熔点高于铜的沸点且钨的铜基复合材料含钨量通常在60%(质量比)以上。钨与铜不互溶,一般的熔炼方法难以生产钨/铜复合材料<sup>[11]</sup>,目前只有粉末冶金方法才能使钨铜复合材料制造成为现实。传统的粉末冶金方法,其制备工艺主要分为两大类:熔渗法和直接烧结法。熔渗法首先将钨粉和铜粉按一定的比例配料,然后进行混合(同时加入润滑剂)然后进行成形、烧结。烧结又可分为两类,一种是固相烧结,即在低于铜的熔点下烧结,在烧结过程中没有液相产生;另一种是液相烧结,即烧结温度高于铜的熔点。

由于钨在室温下缺乏塑性,易脆裂,铜钨电极只适合在小电流、低电压下焊接。随着各种新型工业材料如镀锌钢板、铝合金板在汽车、航天制造业中的广泛应用,对铜/钨复合材料电极提出了更高的性能要求,传统的熔渗烧结和简单的液相烧结已难以满足,

所以有必要寻求新的制备工艺以获得均匀的分布组织和期望的焊接特性。近年来,由于纳米技术的飞速发展,直接烧结法获得了很大的发展<sup>[12]</sup>。直接烧结法是将所需成分的钨和铜的混合粉压制成形后直接烧结制得产品。此工艺中较为先进的主要有液相活化烧结法和机械合金化纳米粉法。活化烧结已被证实是有效的方法。以往合金液相烧结过程由于固相钨在液相铜中仅有极小溶解度,再加上钨铜间浸润性差,难以实现致密化。显然,促进的因素就在于改善固态和液态烧结过程。近年来由于制粉方法及粉的预处理方法改进,可得到密度高的烧结产品,同时在钨铜粉末中加入第三种金属元素,可使钨和铜发生烧结作用,研究证明在W-Cu系中,Co、Ni、Fe、Pd具有明显的增强活化烧结作用。机械合金化纳米粉法是通过长时间的高能球磨使金属粉末的特性发生变化,原来不相溶的金属互溶。纳米块体合金的制造研究表明,粉末粒度和均匀性强烈影响烧结特性,若减小粉末粒度,烧结密度和材料性能将大大改善。机械合金化处理得钨铜粉在较低的烧结温度下就出现了固相烧结现象。

最新研究的快速定向凝固技术由于凝固过程快速,过冷度大,使合金的凝固极大地偏离平衡,扩大了合金元素在固相中的溶解度,晶体组织更加细化,显著减少偏析。对于钨铜合金,快速凝固不仅保持很好的导电性能,而且极大地提高了合金的室温和高温强度,改善了合金的耐磨和耐腐蚀性能。常用的快速凝固方法有雾化法,甩带法和雾化沉积法。目前在定向凝固技术中,冷却速率的提高,可以通过提高凝固过程中固液界面的温度梯度和生长速率来实现。具体的方法有深过冷定向凝固,电磁约束成形定向凝固,激光超高温梯度快速定向凝固。当然,要使用具有广阔前景的快速定向凝固技术,还需要解决如何控制热流的方向等技术上的问题。

表1 各类复合材料点焊电极的性能

名称	电阻率( $10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}$ )	硬度(HB)	强度(MPa)
碳/铜	2.0—4.0	180—250	450—650
钨/铜	3.5—5.2	160—220	590—690
TiB <sub>2</sub> /铜	81—88AICS	154—161HV	402—429
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /铜	44—52(MS/m)	78—86(HRB)	510—600

## 4 存在的问题

目前国内外对铜基复合材料点焊电极强化机制和延长电极寿命方面了解仍十分有限,难以大幅度

的提高电极寿命. 上述新技术虽为提高材料的性能和开发新型合金提供了新途径, 但普遍研究不够深入, 再者它们所需设备都很昂贵, 工艺也较复杂, 难于适应工业化生产的条件. 此外, 复合材料的基础理论问题最突出的是界面问题和可靠性问题. 复合材料性能受界面结构的影响极大, 复合材料的可靠性与结构设计、加工工艺和环境等密切相关, 同时也需要进一步完善评价、监测和监控的方法. 由于计算和信息技术的高度发展, 给复合材料新的设计方法提供了优越的条件, 从而引出了虚拟设计等新思路. 复合材料的新的制备技术, 如含增强体的反应注射成型以及电子束固化, 自蔓延合成法制备 TiC/Cu 复合材料<sup>[13]</sup>, 气相沉积法等都需寻求更适宜于电极材料的制造工艺, 以提高工艺效率, 改善制品的质量. 同时, 采用各项新技术新工艺对电极表面进行强化处理也是一种很有发展前景改善焊接性能的方法. 材料的复合化是电极材料发展的必然趋势之一, 因此, 研究性能优良综合效益高的新型铜基复合材料就成为必然<sup>[14]</sup>. 如纤维替代粒子增强法, 即用具有一定方向性的纤维替代难熔金属粉末颗粒(如钨粉)所制作的复合材料不仅导电、导热性能高, 且能控制难熔金属在高温下的氧化飞溅, 具有较高的耐蚀性. 另一方面, 建立多元少量的合金化铜基复合材料体系也日益迫切, 不同元素的加入, 对复合材料的导电、导热特性的影响, 尚需进一步研究和实验分析, 逐步建立铜基复合材料的成形机理, 以指导新技术的探索.

参考文献:

- [1] Ferrasse S, Verrier P, Meesemaeker F. Resistance spot weldability of high strength steels for use in car industry[J]. *Welding in the world*, 1998, 41 (3): 177—195.
- [2] 中国机械工程学会焊接学会电阻焊专业委员会编著: 电阻焊理论与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [3] K. S. Yeung, P. H. Thornton. Transient Thermal Analysis of Spot Welding Electrodes [J]. *Welding journal*, Vol 78, No 1, 1999: 75—81.
- [4] Dupuy T. The degradation of electrodes by spot welding zinc coated steels[J]. *Welding in the world*, 1999, 42(6): 58—68.
- [5] 吴人浩. 复合材料[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002. 12.
- [6] 武建军, 等. 弥散强化铜基复合材料的制备工艺[J]. 粉末冶金技术, 1999, (3): 195—200.
- [7] Biselli C, Morris D G, Randall N. Mechanical alloying of high strength copper alloys containing TiB<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dispersoid particles[J]. *Scripta metallurgical material*, 1994, 30(10): 13—27.
- [8] 董仕节. 点焊电极用 TiB<sub>2</sub> 增强铜基复合材料的研究[D]. 西安交通大学, 1999.
- [9] 韩绍昌, 等. 碳/铜复合材料研究进展[J]. 机械工程材料, 1999, (6): 7—8.
- [10] 陈文革, 等. 钨铜基复合材料的研究及进展[J]. 粉末冶金工业, 2001, (3): 46—49.
- [11] 陶应启, 等. 钨铜复合材料的制造工艺[J]. 粉末冶金技术, 2002, (1): 49—51.
- [12] 张玉龙. 先进复合材料制造技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003. 6.
- [13] 宋云芳, 等. 反应球磨制备 TiC/Cu 复合材料[J]. 热加工工艺, 2003(4): 35—37.
- [14] B. Irving. Extending Resistance Welding Electrode Life [J]. *Welding journal*, Vol 80, No 11, 2001: 106—112.

## The Present Research of the Copper Matrix Composites for Spot Welding Electrodes

TU Fang, HE Bo-lin

(School of Mechanical and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** The reasons for failure of electrodes during spot welding and the latest research on copper matrix composites for electrodes are summarized in the paper. The processes and theories of fabrication of dispersed strengthened copper matrix composites and C/Cu composites and W/Cu composites for spot welding electrodes are introduced in detail. Furthermore, the present problems in copper matrix composites for spot welding electrodes are analyzed.

**Key words:** spot welding; electrodes; copper matrix composites; C/Cu; W/Cu