

钨铜材料和紫铜及铬青铜的热等静压扩散连接

唐安清 吕大铭

(冶金部钢铁研究总院,北京 100081)

摘要 用热等静压工艺实现了含铜 10%~40% 的钨铜材料和紫铜及铬青铜的扩散连接。试样的拉伸强度接近或等于铜端的强度。对结合界面和拉伸断口进行了观察,对铜端的物理、力学性能进行了分析,对与连接质量有关的问题进行了讨论。试验结果表明,铬的存在对扩散连接有利,并改善连接件的综合性能。

主题词 扩散连接 热等静压 钨铜材料

1 前言

钨铜材料是一种两相假合金。它具有出色的抗电弧烧蚀、抗熔焊性能和良好的导电导热性能,被广泛地用作电触头、电火花电极和电阻焊电极。在上述应用中,大多数情况下都需要把钨铜材料和铜(或铜合金)连接起来,制成复合件使用。

常用的连接方法有钎焊、电子束焊、熔铸和摩擦焊等。由于各自的局限性,对于一些形状复杂、面积大、焊缝纵深的结合面,不易得到理想的连接。

热等静压技术已广泛地应用于各种材料之间的扩散连接^[1~3],但目前尚未发现用于钨铜材料和铜的连接的报导。本文探讨了不同成分的钨铜材料和铜及铬青铜之间的直接扩散连接,旨在为大型及特殊复合件的制备提供一种新方法。

2 试验方法

将含铜量分别为 10%、20%、25%、40% 的钨铜材料、T2 紫铜棒、CuCr_{0.7} 青铜棒加工成圆柱体,按图 1 所示方式配对,于真空状态下封装入钢包套中。所有结合面均为精车加

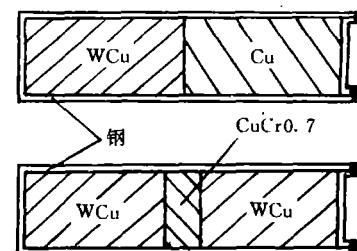


图 1 试样封装示意图

Fig. 1 Schematic drawing of specimen canned for HIP

工新鲜表面。

封装后的试样在热等静压机中进行扩散连接,用作对比试验的纯铜棒和铬青铜棒也于相同条件下进行 HIP 处理。热等静压条件为 1000~1060℃、85~95MPa、保温 2h。对部分经 HIP 处理后的铬青铜试样进行时效处理。

测定各组试样的拉伸强度 σ_b 、硬度 HB 及电导率。

对结合部位和拉伸断口进行显微观察。

3 结果和讨论

3.1 关于连接强度

各组试样的拉伸试验结果如表 1 所示。表中还列出了试样的断裂情况。

表 1 拉伸试验结果

Table 1 Results of tensile test

试 样	σ_b , MPa			试样断裂情况
WCu ₁₀ —Cu	250	230	230	2个试样在铜端断裂
WCu ₂₀ —Cu	195	178	160	0个试样在铜端断裂
WCu ₂₅ —Cu	230	230	215	1个试样在铜端断裂
WCu ₄₀ —Cu	220	180	210	1个试样在铜端断裂
WCu ₄₀ —CuCr _{0.7}	280	275	285	2个试样在铜端断裂
HIPed Cu	230	215	215	
HIPed CuCr _{0.7}	280	275		

注: 用户要求 σ_b 130MPa。

从表 1 可以看出, 所有试样的连接强度均超过了用户要求, σ_b 值多在 180MPa 以上。其中 WCu₁₀—Cu、WCu₂₅—Cu 的连接强度较高且一致性相对较好, 而 WCu₂₀—Cu、WCu₄₀—Cu 的 σ_b 值稍低且有较大的分散性。WCu₄₀—CuCr_{0.7} 的 σ_b 值高达 280MPa, 一致性也非常好, 可见铬的存在对扩散连接有利。

如图 2 所示, 试样在拉伸时出现了两种

断裂形式, 即在结合面断裂(a、b、g)和在铜段上断裂(c、d、e、f)。试样在铜(或铬青铜)段上断裂时, σ_b 值与相同状态的紫铜(或铬青铜)的 σ_b 值一致, 即实际的结合强度高于试样的 σ_b 值; 试样在结合界面断裂时, σ_b 值代表实际的连接强度。从图 2 还可看出, 无论试样从何处断裂, 其铜端均有明显的塑性变形。

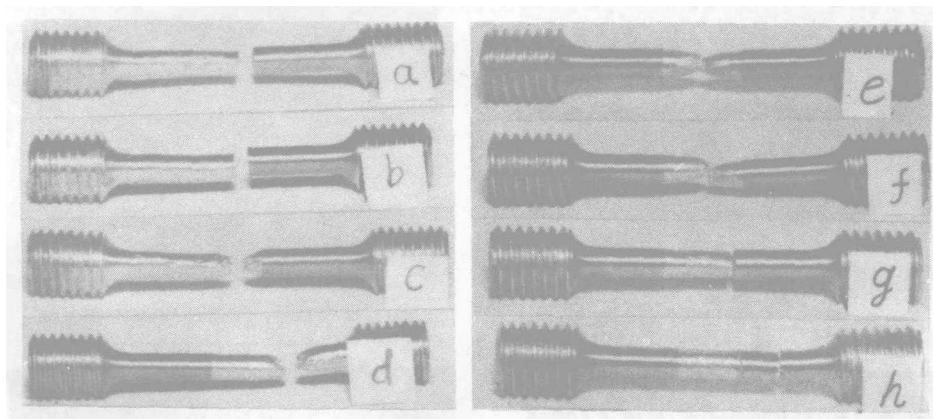


图 2 试样的断裂情况

Fig. 2 Fracture morphology of specimens

所有从结合界面断裂的断口, 其钨铜一侧粘连有薄薄一层铜; 而在其铜侧, 肉眼可见少量钨铜组织。

3.2. 微观分析

由于钨铜材料是由互不相溶的钨颗粒相和铜相组成的两相假合金, 所以钨铜材料和

铜(或铬青铜)的连接是由两种结合偶所构成, 即: 钨颗粒和铜(或铬青铜)结合偶(记作 W—Cu 或 W—CuCr)及钨合金中的铜相和铜端的结合偶(记作 Cu—Cu 或 Cu—CuCr)。由于钨和铜互不固溶, 所以 W—Cu 偶的结合实际上是一个压焊过程——在温度和压力的作

用下,结合界面附近发生充分的塑性变形,破坏了结合面上的氧化膜和吸附层,激活了原子,并使钨颗粒和铜充分接近,达到原子力起作用的距离,从而实现冶金结合,其间并不发生扩散过程。而 Cu—Cu 偶的结合是在压焊的基础上,又通过铜原子的自扩散、再结晶、晶粒长大和二次长大过程,形成一个新的整体。

当用铬青铜与钨铜材料连接时,在 W—CuCr、Cu—CuCr 偶中增加了铬原子的扩散,对扩散连接有利。上述各结合偶的结合质量决定了连接强度的大小。含铜量在 30% 以下的钨铜材料中,由于钨颗粒占有较大的体积比,因此,W—Cu、W—CuCr 偶的结合质量对连接强度的影响更大。

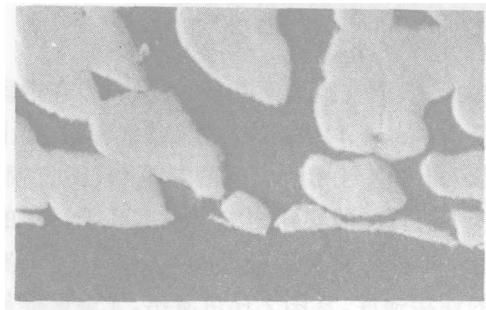
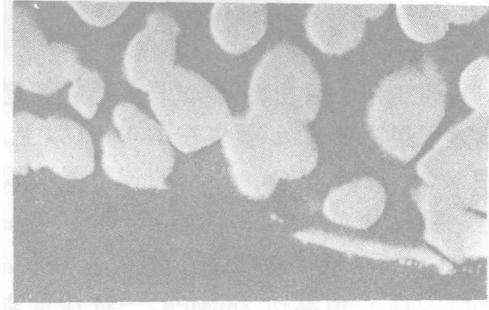
a. WCu₁₀—Cub. WCu₂₀—Cu图 3 扩散连接试样的界面图象 $\times 4000$

Fig. 3 Photographs of interface of diffusion-bonded specimens

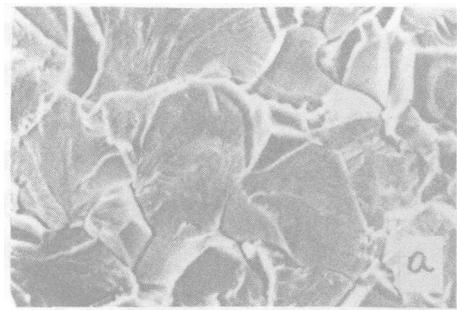
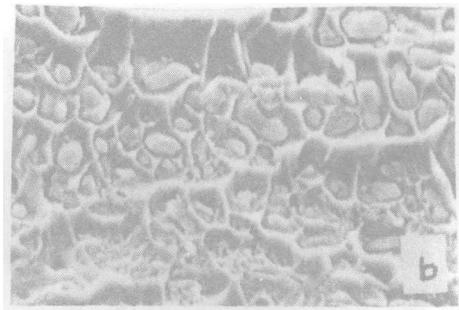
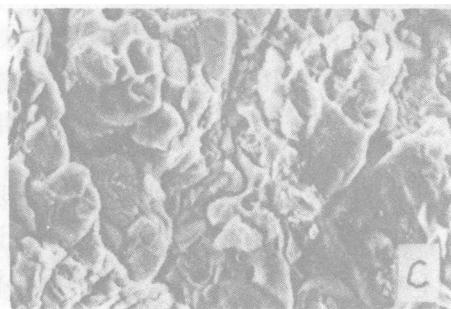
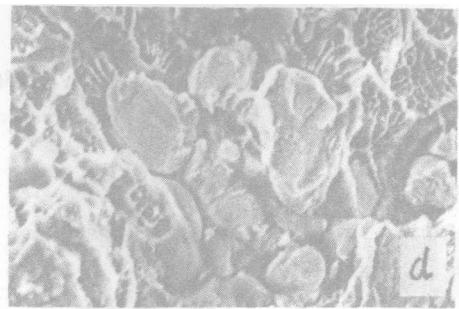
a. WCu₁₀—Cu 断口 WCu₁₀ 侧b. WCu₂₀—Cu 断口 WCu₂₀ 侧c. WCu₄₀—Cu 断口 WCu₄₀ 侧d. WCu₄₀—Cu 断口 Cu 侧

图 4 扩散连接试样拉伸断口的 SEM 图象

Fig. 4 SEM photographs of fracture surface of bonded W—Cu/Cu specimens broken at the interface

图 3 所示为 $WCu_{10}-Cu$ 和 $WCu_{20}-Cu$ 结合界面的背散射电子图象。从图中可以看出, $W-Cu$ 偶和 $Cu-Cu$ 偶的结合质量都非常好。图 4 是从结合界面断裂的拉伸断口的二次电子扫描图象。其中 a、b、c 为 $WCu_{10}-Cu$ 、 $WCu_{25}-Cu$ 、 $WCu_{40}-Cu$ 试样钨铜材料一侧的断口形貌, 从中可以看出铜的韧性撕裂形貌和铜覆盖区。图 4d 是 $WCu_{40}-Cu$ 断口纯铜一侧的形貌, 可以看到被“撕下”的钨颗粒, 还可以看到铜与钨颗粒分离时形成的小韧窝, 这些小韧窝组成了一个个钨颗粒的形状。这足以说明, $W-Cu$ 偶之间可以实现

良好的结合, 而且这种结合具有足够高的结合力。这正是 $WCu_{10}-Cu$ 试样具有很高的连接强度的原因。

3.3 关于铜端的性能

钨铜-铜复合件铜端的强度、硬度和导电率是用户非常关注的。表 2 列出了各种铜的性能和对比值。

从表 2 可以看出, 经 $1000\sim1060^{\circ}C$ 、 $85\sim95MPa$ HIP 扩散连接后, 紫铜的 σ_b 值仍保持在较高的水平, 高于 $600^{\circ}C$ 退火铜和 GB8320 的要求值; 电导度与 GB8320 的要求值相当, 而硬度略低于要求值。

表 2 铜和铬青铜的物理力学性能

Table 2 Some mechanical and physical properties of Cu and $CuCr_{0.7}$

材 料	抗拉强度 σ_b , MPa			硬度 HB	导电度, IACS%
HIPed Cu	230	215	215	530	93.7
600°C 退火 Cu		196		—	—
HIPed $CuCr_{0.7}$	280	275		547 552 532	60.3
HIP+时效 $CuCr_{0.7}$	—			1284 1245 1303	86.2
Cu 要求值*	167			588 765**	≥ 93
$CuCr_{0.7}$ 要求值*	216			686 961**	≥ 82

* GB8320.

** 用途不同对 HB 要求不同, 后者为最高值。

文献[4]介绍了退火温度对铜的力学性能和导电性能的影响, 见图 5。当退火温度高于 $300^{\circ}C$ 时, 铜开始明显再结晶, σ_b 值明显下降。因此, 在 HIP 扩散连接时, 即使选用较低的温度, 也必然超出铜的再结晶温度甚多, 铜

端的硬度值偏低是必然的。这是 HIP 扩散连接的一个缺点。目前国内多用熔铸法实现钨铜和铜的连接, 并用冷变形方法使铜端的强度和硬度提高以达到标准要求。但是对于大尺寸和某些形状的复合件, 则难于对其纯铜部分进行冷变形加工。鉴于这种情况, 本试验中进行了用铬青铜代替纯铜进行扩散连接的探索。

表 1 中, $WCu_{40}-CuCr_{0.7}$ 的 σ_b 值达 $280MPa$, 大大高于 $WCu_{40}-Cu$ 的连接强度。这说明, 在相同的 HIP 条件下, 不但可以实现钨铜材料和铬青铜的直接扩散连接, 而且由于铬的扩散, 使结合强度更高。

铬青铜($CuCr_{0.7}$)经 HIP 处理后, 其 σ_b 值高于纯铜, 也大大高于 GB8320 的要求, 但是 HB 仍仅有 $547MPa$, 导电度仅有 $60.3\%IACS$, 远远低于要求值。这是由于在本试验条件下, 铬较多地固溶在铜中的缘故。对经过

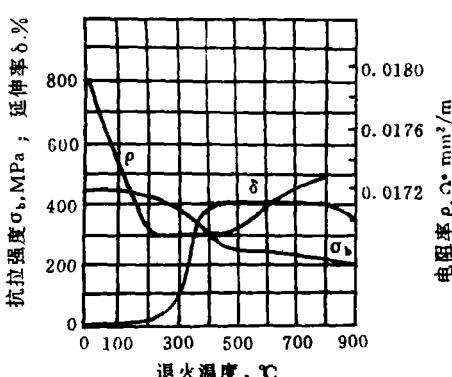


图 5 T2 铜的性能与退火温度(保温 1h)的关系

Fig. 5 Relations between properties of T2-Cu and annealing temperature(holding time: 1h)

热等静压的铬青铜进行时效热处理后,铜中的铬由固溶态转变为弥散析出态,使电导度由60.3%提高到86.2%,HB值由547MPa提高到1280MPa左右,大大高于GB8320的要求。可见,用铬青铜代替紫铜,并在HIP扩散连接以后进行适当的热处理,不仅能得到更高的连接强度,而且能使铜端具有更好的综合性能。

3.4 几个与连接质量有关的问题

适当的温度和足够的压力是扩散连接的必要条件。本试验的温度、压力条件充分,因此仅对以下几个问题进行讨论。

3.4.1 包套的封口质量和真空度

HIP扩散连接一般需要对工件进行包套或其它封焊处理,其目的是防止HIP高压工作介质进入两个待结合表面之间而造成连接失败。因此要保证包封口无砂眼裂纹,而且要在包套的设计上避免封口处在HIP过程中发生太大变形而出现裂纹。

包套内的真空度直接影响待结合面的洁净度,残余气体在受挤压后可能在结合界面积存,也会影响扩散连接的质量。实践证明,几帕的真空度一般能满足要求。

3.4.2 结合面的粗糙度和洁净度

结合面的粗糙度直接影响实际的接触面积。本试验有足够的温度、压力条件,铜又是塑性极好的金属,即使较粗糙的表面,也足以实现完全的接触。如前所述,塑性变形有破坏表面膜的作用,当表面比较粗糙时,表面在达到完全接触以前的塑性变形更大,表面膜破坏后的新鲜表面更多,反而对扩散连接有利。

表面上的氧化膜和吸附层阻碍原子的扩散,或在界面上形成夹杂,是扩散连接之大忌,但又是不可避免的,只能尽量减小其程度和影响。本试验采用精车新鲜表面,基本上能满足要求,连接质量一般是良好的,少数试样的连接强度异常偏低且偏差较大,可能是由于表面氧化程度差异所致。

3.4.3 钨铜材料质量的影响

钨铜材料中可能存在少量气孔或无铜区,这是制造过程中铜的冷凝收缩和渗铜不完全所致。当结合界面附近存在这种缺陷时,会增大钨铜组织被“撕下”一片的可能性,使连接试样的 σ_b 值异常偏低。图4b,c中可见个别疏松区,这是 $WCu_{20}-Cu$ 、 $WCu_{40}-Cu$ 中某些试样 σ_b 值异常偏低的又一个原因。

4 结论

(1) 在1000~1060℃,85~95MPa条件下,可以实现不同成分钨铜材料和纯铜的直接扩散连接,其连接强度、铜端的强度和导电率均能满足使用要求,而铜端的硬度为HB530,略低于要求值。

(2) 在上述相同的HIP条件下,可以实现钨铜材料和铬青铜的直接扩散连接。铬的存在对扩散连接有利,使连接强度高达280MPa。连接件经时效处理后,铬青铜的综合性能大大高于纯铜,且超过使用的要求值。

(3) 良好的包套质量是HIP扩散连接的必要条件;待结合面上的氧化层和污染物的存在及钨铜材料的内部缺陷会使连接强度降低。表面粗糙度对连接质量影响不大。

5 参考文献

- 1 S J Horrex, G P Yiasemides. Diffusion bonding of uranium to zircaloy by HIP. Proceedings of 3rd Int Conference on Isostatic Pressing. November 11~12, 1986.
- 2 王慧芳,俞淑延.金属材料的热等静压扩散连接.粉末冶金技术,1990,8(1):12~18.
- 3 W Siming, W Shenghong. Diffusion bonding of silicon nitride engineering ceramics to metals using HIP. Hot Isostatic Pressing—Theory and Application, Proceedings of the 3rd Int Conference, June 11, 1991.
- 4 重有色金属材料加工手册.北京:冶金工业出版社,1979. 1~56.

DIFFUSION BONDING OF W—Cu TO Cu AND CuCr_{0.7} BY HIP PROCESSING

Tang Anqing Lu Daming

(Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract Diffusion bonding of W—Cu composites containing 10%—40% (wt)Cu to pure copper or CuCr_{0.7} have been achieved by HIP processing. The tensile strength of specimen are approximate to or equal to that of copper (or CuCr_{0.7}). The bonding interface and fracture surface of tensile specimen have been investigated and some of mechanical and physical properties of Cu (or CuCr_{0.7}) have been analyzed. The problems concerning the quality of bonding have been discussed. The experimental results show that Cr is effective on diffusion and can improve the combined properties of bonded parts.

Key words diffusion bonding HIP W—Cu material

《粉末冶金技术》杂志入选《中国科学技术期刊文摘 数据库(英文版)》(CSTA)首批收录刊源名单

由国家科委牵头组织,中宣部出版局、新闻出版署期刊司、国家教委科技司、中国科学院出版委、中国科协学会部及中国科技信息研究所等近三十个部委信息(情报)机构参建共同开发的《中国科学技术期刊文摘数据库(英文版)》(China Scientific and Technical Periodical Abstracts,简称 CSTA),是我国第一个国家级外向型科技文献数据库。

CSTA 自 1992 年开始筹建并多次在北京召开筹建工作会议。在我国以经济建设为中心和加快改革开放步伐的新形势下,它的建设将有利于我国科技信息资源的开发利用,有利于我国科研学术成果在世界范围内的传播和交流。它将有力地促进我国科技期刊的规范化、标准化和国际化,对我国科技期刊的编辑加工和信息加工走向现代化和一体化也将产生积极的影响。

《粉末冶金技术》杂志经 CSTA 数据库工程建设理事会审查通过,1993 年首批选入《中国科学技术期刊文摘数据库(CSTA)》收录刊源名单。

热忱欢迎广大读者订阅《粉末冶金技术》期刊

《粉末冶金技术》是中国机械工程学会粉末冶金分会、中国金属学会粉末冶金学会和中国有色金属学会粉末冶金及金属陶瓷学术委员会主办的专业技术期刊,1982 年创刊,季刊,80 页。

本刊报导我国粉末冶金科研成果,生产实践经验,材料和制品的应用效益和应用技术,新材料、新工艺和新设备的开发,科技发展动向,学会和行业活动等。报导的材料和制品涉及:机械零件,多孔材料,电工材料和制品,硬质合金,难熔金属,金刚石工具,高温合金,超导材料,精密陶瓷,非晶、微晶粉末及其合金等。

《粉末冶金技术》期刊国内外发行。1994 年已开始征订,国内读者可到当地邮局订阅,本刊邮发代号:36—60。每册订价 4.00 元,全年共 16 元。

海外读者请向中国国际图书贸易总公司订阅(中国北京 399 信箱)。本刊国外订阅代号 Q847。

本刊编辑部地址:北京永定门外宋家庄路 11 号 邮政编码:100078