

低成本钛-铜金属复合型材的热挤压成形

倪沛彤，韩明臣，张英明，王成长，潘志强，朱梅生

(西北有色金属研究院，西安 710016)

摘要：采用无压余热挤压法制备钛-铜金属复合型材，对扁形棒进行拉剪强度检测，观察结合层的组织形貌及拉剪断口形貌等。结果表明：利用回收的钛、采用无压余热挤压法可以生产钛-铜金属复合型材，制备的型材性能稳定，生产工艺可行；该方法可以提高生产效率，降低原材料成本。

关键词：回收钛；钛-铜复合型材；热挤压成形

中图分类号：TG 376.2 文献标志码：A

Hot extrusion forming of low-cost Ti-Cu clad rod

NI Pei-tong, HAN Ming-chen, ZHANG Ying-ming, WANG Cheng-zhang, PAN Zhi-qiang, ZHU Mei-sheng

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The Ti-Cu clad rod was prepared by hot extrusion forming. The strain and shearing strength of the flat clad rod was tested in order to check the microstructure of clad section and zone of shearing fracture. The results show that the procedure of manufacturing Ti-Cu clad rod with titanium scrap is feasible. The method can improve product efficiency and decrease cost of raw material.

Key words: titanium scrap; Ti-Cu clad rod; hot extrusion forming

钛-铜金属复合型材是在金属铜棒周围包覆一定厚度金属钛层(一般使用厚度为 1.0~2.5 mm)的复合金属材料，由于其优异的耐蚀性、良好的导电性被广泛应用于电冶金(电解铜、镍、钴、锰等)、制盐和化工等行业^[1~4]，而且其市场需求日趋旺盛。

随着能源、资源的日益紧张，加强资源综合利用、保护环境和建设节约型社会成为新的课题。为了响应这一号召，本文作者采用无压余热挤压法以回收的钛生产出满足使用要求的钛-铜金属复合型材，为钛-铜金属复合型材的工业化生产开辟一条高效率、低成本的重要途径。

1 实验

1.1 坯料

原材料是紫铜棒材，工业纯钛残、废料经洁净处

理、熔炼、热加工、挤压等工艺，制备成的钛管坯；规格分别如下：铜棒，直径为 90~110 mm，长度为 350~450 mm；钛管内径为 90~110 mm，长度为 300~400 mm，壁厚 4~10 mm，其各项性能见表 1。

1.2 组坯

先将钛管内、外壁及铜棒、铜皮表面彻底清洁，然后立即进行钛管和铜棒的装配，即将铜棒完全置于一头部密封的钛管中，再用铜皮给装配好的钛-铜棒包套(铜皮厚度为 2 mm)，组坯成挤压件。

1.3 挤压辅料

采用与挤压件等同直径的挤压垫片，它能代替挤压件产生的压余，并使挤压件直接脱模，一次节约原材料成本 5%~10%，使用这种垫片不仅可以提高生产

通信作者: 倪沛彤; 电话: 029-86230908; E-mail: nipt6655@163.com

表1 钛、铜的室温性能

Table 1 Characteristics of Ti and Cu at room temperature

Material	Density/ (g·cm ⁻³)	Melting point/	$\alpha/$ 10^{-6} K^{-1}	$c/$ (J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	$\lambda/$ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	$\rho/$ ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	$E/$ GPa	$R_m/$ MPa	$A/$ %
Ti	4.5	1 668	8.4	0.50	16.7	55.0	106	510.0	30.0
Cu	8.9	1 083	17	0.38	376.8	1.7	117	258.6	16.5

效率，还能大大提高工模具的使用寿命，达到节能降耗的目的。

1.4 热挤压复合过程

用1 600 t压力机进行热挤压试验，采用电阻炉加热，加热温度为600~850℃，保温时间为0.5~3.0 h，挤压速度为50~150 m/min，压力为400~600 t，总变形量大于70%。

1.5 分析检测

采用OLMPUS PMG光学显微镜观察复合界面的结合形貌，用JSM-6460扫描电镜观察拉伸断口，用Instron1185试验机测试复合层的拉剪性能，用40/MVD机测试复合界面的显微硬度。

2 结果与讨论

2.1 复合界面的组织形貌

取40 mm×10 mm×1.5 mm的扁形钛-铜复合棒试样进行显微组织观察，界面的结合形貌如图1所示。

从图1(a)的形貌可以看出，横向复合界面呈不规则的波形结构特征，扭曲变形较大，说明在复合棒的横向变形量较大，有利于钛-铜的结合。从图1(b)可以看出，纵向界面比较平直，说明在复合棒的纵向变形量较小。从图1中还可以看出，在钛-铜结合面上有一个较宽的过渡层，观察金相组织发现，在复合区界面上，钛晶粒有些变形，横向晶粒发生扭曲变形，纵向晶粒被拉长，而在复合区以外钛晶粒呈等轴状。

2.2 复合棒的拉剪断口

图2所示为钛-铜扁形复合棒拉剪断口的SEM像。从图2(a)可以看出，在断口的钛层上残留有铜金属，并沿受力方向产生剧烈变形，形成金属流，试样从铜侧拉断。从图2(b)和(c)中可以看出，在结合层撕开面的钛侧和铜侧界面上，沿变形方向形成条形突起和深沟，且金属表面产生高低起伏的变形，说明通过

大挤压比加工后，金属变形量大，钛、铜两种金属相

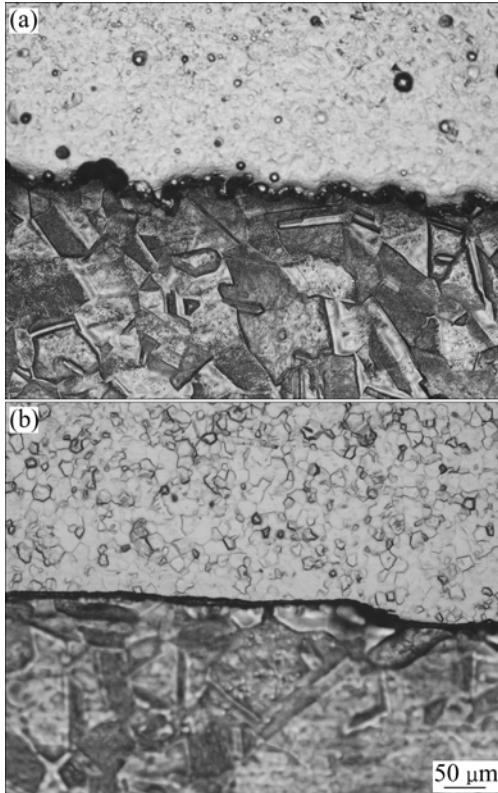


图1 扁形钛-铜复合棒结合界面横断面的显微组织

Fig.1 Microstructures of cross-section of clad interface of flat Ti-Cu clad rod: (a) Cross section; (b) Longitudinal section

互嵌入，增强复合面的结合程度^[5-6]，从而在钛、铜界面形成牢固的冶金结合。

这种结论也可以在拉剪撕开面钛、铜两个侧面微区的EDS分析谱中得到证实(见图3和4)。图3中在钛侧撕开面一微区测得铜含量为31.61%(摩尔分数)；图4中在铜侧撕开面一微区测得钛含量为26.71%(摩尔分数)，说明在结合区，钛和铜元素相互扩散，形成原子结合。

2.3 复合棒的结合性能

试验测得钛-铜扁形复合棒的拉剪强度为163~174 MPa，接近T2铜棒的拉伸强度(国际规定T2铜棒的拉伸强度为186 MPa)，拉剪强度一般远远低于拉伸

强度^[2]); 说明挤压复合的钛-铜扁形棒性能良好, 符

Fig.3 EDS spectrum of titanium side on strain-shearing interface

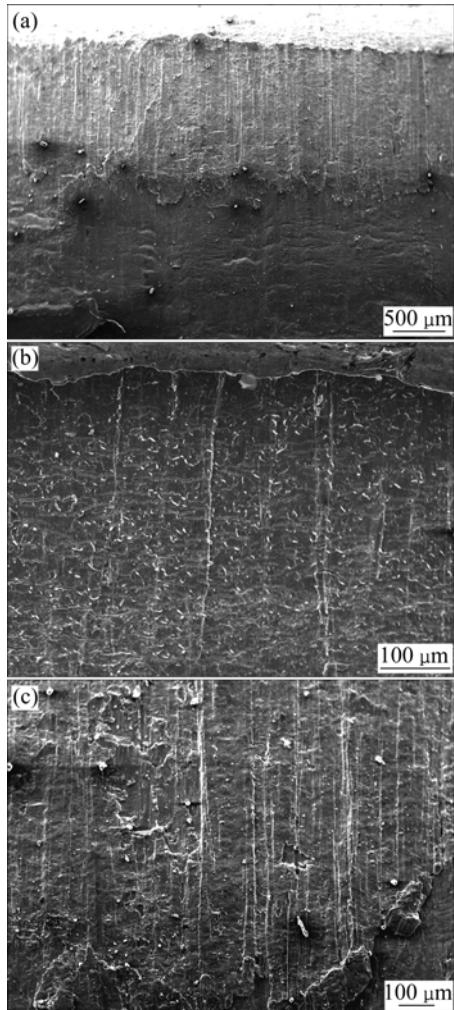


图2 钛-铜扁形复合棒拉剪断口的SEM像

Fig.2 SEM images of strain-shearing fracture of Ti-Cu clad rod: (a) Whole morphology of tensile and shear fracture surface; (b) Ti side interface of tearing surface; (c) Cu side interface of tearing surface

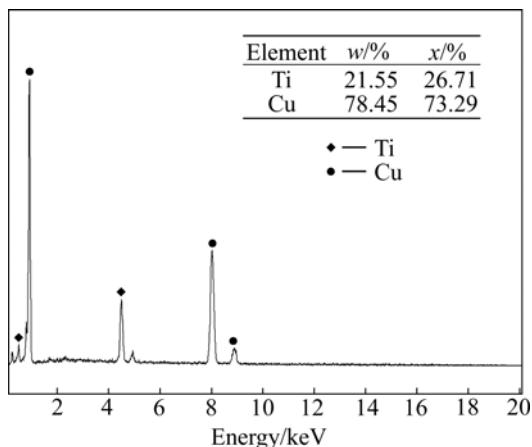


图4 拉剪撕开面铜侧微区的EDS谱

Fig.4 EDS spectrum of copper side on strain-shearing interface

合 GB/T12769—2003 标准, 满足使用要求。

2.4 复合棒横断面的显微硬度

图 5 所示为扁形钛-铜复合棒结合界面的显微硬度。由图 5 可见, 复合界面上的硬度分布在 130 ~ 160 之间, 高于铜的而低于钛的。说明钛、铜两种金属经热挤压后, 在界面上形成一个牢固的结合层。

2.5 钛-铜金属热挤压复合型材的结合机理

大量研究资料表明, 双金属挤压复合的结合机理基本上遵从 Bay 机理^[7]和热作用机制^[8]。Bay 机理即在一定压力下, 覆膜破裂, 表面扩散导致纯净基材显露, 法向压力将基材挤压入覆膜裂缝中, 两种金属的活性面在间隙中汇合并形成真实结合。由此可知, 在挤压过程中, 钛-铜这两种金属结合表面的硬化膜首先破裂, 使得纯净的金属显露, 在挤压机强大的三向压应

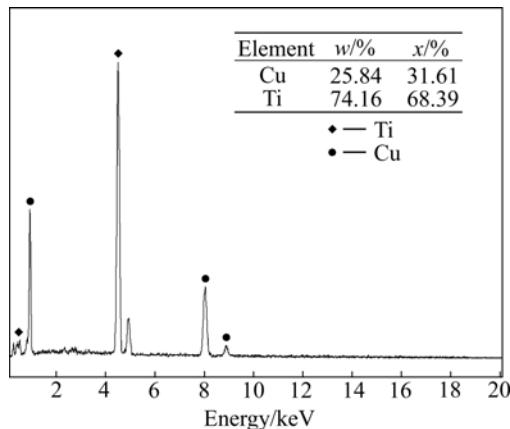


图3 拉剪撕开面钛侧微区 EDS 谱

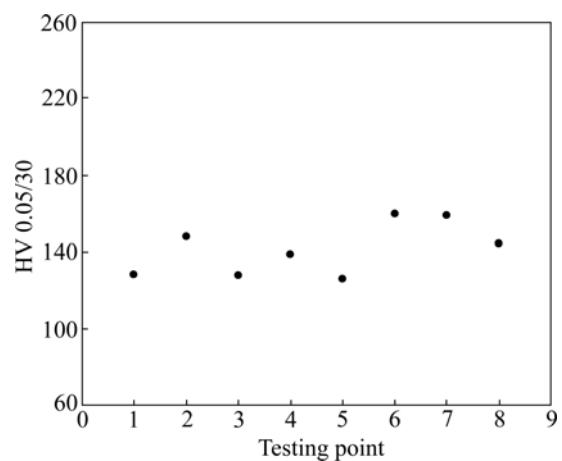


图5 钛-铜扁形复合棒结合界面的显微硬度

Fig 5 Micro-hardness on interface of flat Ti-Cu clad rod

力作用下，两种金属洁净表面压制到接近原子间的距离并形成真实结合。另外，很多学者提到在热加工中还不同程度地存在一种热作用机制，即在双金属的热挤压复合过程中，在加热和变形的共同作用下，复合界面会发生一系列物理、化学变化，主要包括钛、铜在界面发生互扩散，界面局部温度达到共晶温度以上，钛向液相铜的溶解，从而使钛-铜界面产生深度的冶金结合^[9]。但该机理非常复杂，目前还没有给出定量的解释。

3 结论

1) 利用回收的钛，采用无压余热挤压工艺加工的钛-铜金属复合型材，其结合界面形成牢固的冶金结合。

2) 利用回收钛生产的扁形钛-铜复合棒的拉剪强度集中在 170 MPa，接近 T2 铜棒的拉伸强度，结合性能良好。

3) 利用回收钛生产的钛-铜金属复合型材，不仅生产工艺可行，而且可以提高生产效率，大大降低原材料的成本。

REFERENCES

- [1] 郑远谋. 爆炸焊接和金属复合材料及其工程应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2002.
- ZHENG Yuan-mou. Explosive welding and metallic composite and their engineering application [M]. Changsha: Central South University Press, 2002
- [2] 李中, 张建英. 钛-铜复合棒的生产及其应用[J]. 氯碱工业, 1995(9): 33.
- LI Zhong, ZHANG Jian-ying. Production and application of titanium-copper clad rod [J]. Chlor-Alkali Industry, 1995(9): 33.
- [3] 李新中. 钛包铜棒及其在铜电解生产中的应用[J]. 湿法冶金, 2005, 24(4): 32.
- LI Xin-zhong. Titanium clad copper rod and its application in copper electrolysis [J]. Hydrometallurgy of China, 2005, 24(4): 32.
- [4] 李中. 钛-铜复合棒的生主及其应用[J]. 钛工业进展, 1995, 12(6): 34.
- LI Zhong. Production and application of titanium-copper clad rod [J]. Titanium Industry Progress, 1995, 12(6): 34.
- [5] 黄永光, 李宝霞. 钛-铜复合棒复合界面分析[J]. 稀有金属快报, 2005, 24(5): 23.
- HUANG Yong-guang, LI Bao-xia. Analysis of compound interface of titanium clad copper rod [J]. Rare Metals Letters, 2005, 24(5): 23.
- [6] 李德江, 王华昆, 钟毅. 加热温度对型孔轧制法制备钛/铜复合棒结合强度的影响[J]. 金属成形工艺, 2004, 22(1): 46.
- LI De-jiang, WANG Hua-kun, ZHONG Yi. Heating effect on bonding strength of Ti/Cu cladding bar by pass rolling [J]. Metal Forming Technology, 2004, 22(1): 46.
- [7] BAY N. Cold welding 1: Characteristics, bonding mechanisms, bond strength [J]. Metal Construction, 1986(6): 369.
- [8] 颜学柏, 李正华. 加热对钛-铜爆炸复合界面力学性能和显微结构的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 1991, 20(4): 36.
- YAN Xue-bai, LI Zheng-hua. Effect of heating on mechanical properties and microstructure of interface of titanium-steel explosive clad plate [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1991, 20(4): 36.
- [9] 李德江. 钛/铜复合棒轧制复合工艺及界面结合机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2004: 51.
- LI De-jiang. Rolling compounding technics and bonding mechanism of titanium-copper cladding bar [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2004: 51.

(编辑 李艳红)