

B104-B108

# Cu-Al 爆炸焊结合层的透射电镜研究

周邦新 蒋有荣

(中国核动力研究设计院)

TG456.6

A

**摘要** 用透射电镜(TEM)研究了 Cu-Al 爆炸焊的结合层,爆炸焊连接是由熔化和扩散共同作用的结果。在熔区内存在非晶态与晶态,晶态主要由  $\text{CuAl}_2$ 、 $\text{Cu}_3\text{Al}_2$  和  $\text{Cu}_4\text{Al}$  组成。与熔区相邻的 Al 侧发生了再结晶, Cu 向 Al 中的扩散距离  $< 100 \text{ nm}$ , 析出针状的  $\text{CuAl}_2$  相;与熔区相邻的 Cu 侧只发生了回复, Al 向 Cu 中的扩散距离  $< 100 \text{ nm}$ , 形成了新相层,可能是  $\text{Cu}_3\text{Al}_2$  和  $\text{Cu}_4\text{Al}$ 。在非熔化区存在 Cu 和 Al 的互扩散,形成新相层的厚度  $< 100 \text{ nm}$ 。

**关键词** 爆炸焊, 结合层, Cu, Al

铜, 铝

爆炸焊连接是否可靠,与选择焊接参数有关,实质上是与结合面的组织及其特性有关。爆炸焊形成的结合区很窄,用光学显微镜观察很难分辨,如用透射电镜(TEM)观察,则制样比较困难,无论用电解抛光、化学抛光还是离子溅射减薄技术,都很难对结合面两侧的不同金属获得相同的减薄效果,这可能是用 TEM 研究不同金属爆炸结合层的报道很少的原因。作者克服了制样的困难,用 TEM 研究了 Cu-Al 间的爆炸焊结合层,得到了一些有意义的结果。

## 1 实验方法

Cu-Al 的管材经搭接爆炸焊后,在垂直于管材轴向的焊接部位截取约 0.4 mm 的薄片,仔细研磨以避免样品变形,直至约 0.05 mm 后再用离子溅射减薄制成试样。由于 Cu 的溅射减薄速度比 Al 快,所以要遮挡 Cu,减少受 Ar 离子轰击的时间。所用电镜是 JEM-200CX。

## 2 实验结果及讨论

图 1 为结合区的金相组织,结合面上有明显的熔化区,熔区的硬度  $\text{HV} = 540$ ,而两侧 Cu 和 Al 的硬度 HV 分别为 260 和 54。熔区硬度高说明形成了 Cu-Al 的金属间化合物,用 25% 硝酸水溶液可浸蚀熔区,呈现深浅不同的色彩,说明其中 Cu 和 Al 的分布不均匀。

图 2 是熔区较窄处的结合区形貌,Al 侧已发生了再结晶,但 Cu 侧只发生了回复,Cu 中有极细小(约 3 nm)弥散的  $\text{Cu}_2\text{O}$  相(图 3a),位相关系为  $(100)_{\text{Cu}} \parallel (100)_{\text{Cu}_2\text{O}}$ ,  $[001]_{\text{Cu}} \parallel [001]_{\text{Cu}_2\text{O}}$ 。

1993年7月19日收到

本文通讯联系人:周邦新,研究员,成都(610005)中国核动力研究设计院

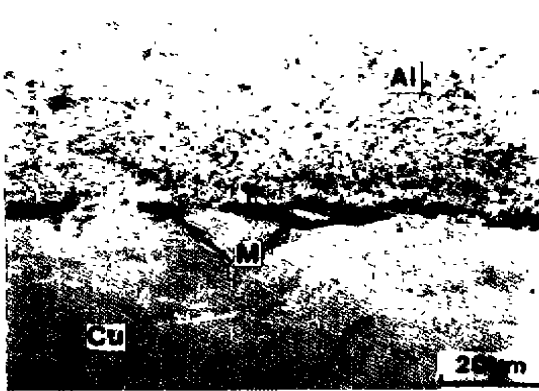


图 1 结合层的金相组织

Fig.1 Microstructure of bonding layer, M—molten region (etched with 25% HNO<sub>3</sub> solution)

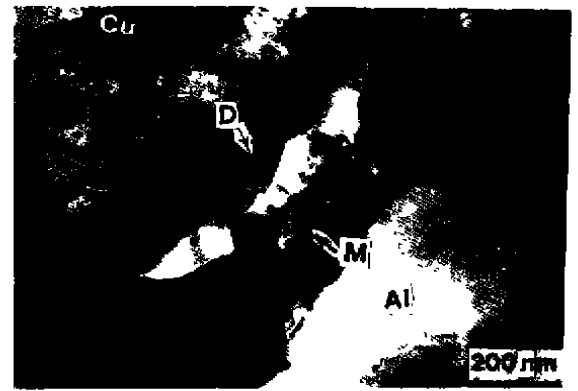


图 2 熔区处结合层的形貌

Fig.2 Morphology of bonding layer at molten region, D—diffusion layer, M—molten region

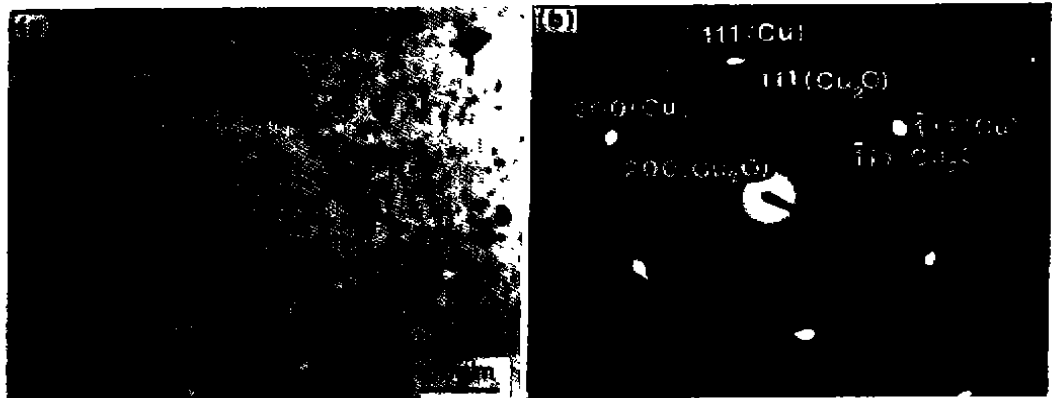


图 3 Cu 中 Cu<sub>2</sub>O 相(a)及其电子衍射图(b)

Fig.3 (a) Cu<sub>2</sub>O phase in Cu, (b) electron diffraction pattern

(图 3b). 这种弥散分布的第二相使 Cu 的再结晶温度升高. 因而在 Cu 侧没有发生再结晶. 由 Cu-Al 相图可知, Cu 与熔区接触处的温度不会低于 1000℃, 约接近 Cu 的熔点(1083℃), Al 与熔区接触处的温度不会低于 550℃, 大约接近 Al 的熔点(660℃). 虽然爆炸焊时熔化和凝固都发生在瞬间, 但由于温度不同, Cu 在 Al 中或 Al 在 Cu 中的扩散也不同. 在 Cu 侧观察到固相扩散后形成的新相层(图 2 中箭头所指处), 可能是 Cu<sub>3</sub>Al 和 Cu<sub>5</sub>Al<sub>2</sub> 富 Cu 相, 而在 Al 侧, 只有在高倍下观察到针状的 CuAl<sub>2</sub> 析出(图 4). 在非熔化区有 Cu-Al 的互扩散, 形成了新相层(图 5)其厚度不超过 100 nm.

在熔区内的组织比较复杂, 有晶态与非晶态两类. 非晶区在氩离子轰击下容易减薄, 很容易辨认(图 6a), 当非晶区较大时, 可由电子衍射鉴别(图 6b). 电子衍射(图 6c 及表 1)确定晶态

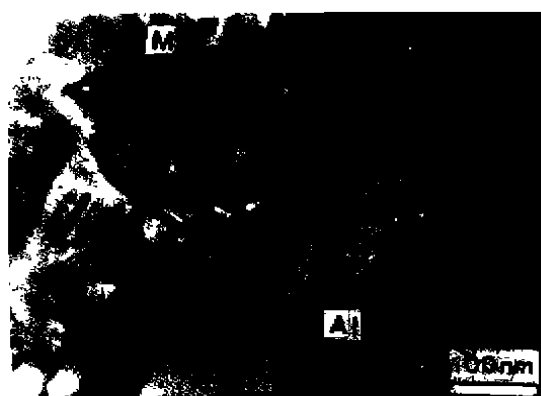


图 4 与熔区接触处 Al 侧中的 CuAl<sub>2</sub> 相

Fig.4 CuAl<sub>2</sub> phase precipitated in Al adjacent to molten region. M—molten region



图 5 非熔化区处 Cu-Al 间的扩散层

Fig.5 Diffusion layer between Cu-Al at non-molten region. D—diffusion layer



图 6 熔区的组织(a, b)及电子衍射图(c)

Fig.6 Microstructure in molten region (a, b) and electron diffraction pattern (c). A—amorphous phase, M—molten region

是由 CuAl<sub>2</sub>、Cu<sub>3</sub>Al<sub>2</sub> 和 Cu<sub>4</sub>Al 组成, 以 CuAl<sub>2</sub> 为主. CuAl<sub>2</sub> 相的晶粒细小, 可形成衍射环. 由此可知, 在图 6a 中针状组织区是 CuAl<sub>2</sub> 相, 而块状组织区是 Cu<sub>3</sub>Al<sub>2</sub> 和 Cu<sub>4</sub>Al 相. 三种相同时存在说明熔区中的成分极不均匀. 电子衍射的计算结果列于表 1 中.

以上观察再次证明爆炸焊连接是由熔化与扩散共同作用的结果<sup>[1]</sup>. 爆炸焊参数的选择原则应是使结合面上只产生不连续的熔化区, 以保证在非熔化区产生原子间的扩散结合.

如爆炸力过大, 得到连续的熔化区, 往往会形成过多的脆性金属间化合物而影响焊接质量。

表 1 熔区中各相晶面间距( $d$ )的实测值和标准值

Table 1 Observed  $d$  values for different phases in molten region and standard  $d$  values

Observed $d$ , nm		Standard phases $d$ values, nm					
in molten region		CuAl <sub>2</sub> (tetragonal)		Cu <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (hexagonal)		Cu <sub>4</sub> Al (cubic)	
$d$	$I^{11}$	$d$	$I/I_0$	$d^{21}$	$I/I_0$	$d^{21}$	$I/I_0$
0.431	m	0.430	100				
0.340	m			0.358	60		
0.305	w	0.304	35				
0.290	m			0.2924	50		
0.273	w					0.2800	12
0.250	w					0.2556	4
0.237	s	0.2374	70				
0.215	m	0.2146	35				
0.212	s	0.2121	90				
0.207	s			0.2068	100	0.2087	100
0.193	s	0.1919	70			0.1980	55
		0.1901	60				
0.184	w					0.1887	20
0.175	w			0.1794	20	0.1801	1
0.170	w			0.1692	20		
0.162	w	0.1611	13			0.1671	4
0.152	w	0.1517	2				
		0.1508	6				
0.145	w			0.1465	70	0.1475	6
0.142	w	0.1408	6				
0.137	w	0.1395	9				
		0.1357	11	0.1358	20	0.1400	5
0.133	w					0.1366	1
0.130	w			0.1311	20	0.1335	1
0.128	w	0.1288	21	0.1266	30		
0.123	w	0.1234	20			0.1278	1
0.122	w	0.1219	8			0.1252	2
0.119	w	0.1190	11	0.1198	80	0.1205	14

- 1) s, m and w represent respectively strong, medium and weak of diffraction intensity ( $I$ )
- 2) Observed  $d$  values which are smaller than standard ones show that the lattice parameter is smaller than that of standard phases

### 3 结 论

用 TEM 研究 Cu-Al 爆炸焊结合层, 表明爆炸焊连接是由熔化和扩散共同作用的结果。熔区内存在非晶态和晶态, 晶态主要由 CuAl<sub>2</sub>, Cu<sub>3</sub>Al<sub>2</sub> 和 Cu<sub>4</sub>Al 组成。与熔区相邻的 Al 侧发生了再结晶, Cu 向 Al 中的扩散距离 < 100 nm, 并在 Al 中析出针状 CuAl<sub>2</sub> 相; 与熔区相邻的

Cu 侧只发生了回复, Al 向 Cu 中扩散距离 < 100 nm, 形成了连续的新相层, 可能是  $\text{Cu}_3\text{Al}_2$  和  $\text{Cu}_4\text{Al}$ . 在非熔化区存在 Cu-Al 互扩散并形成新相层, 其厚度 < 100 nm.

### 参考文献

- 1 周邦新, 盛钟琦, 彭峰. 金属学报, 1989; 25(1): A7

## TEM STUDY OF BONDING LAYER IN Cu-Al EXPLOSIVELY WELDED JOINT

ZHOU Bangxin, JIANG Yourong (Nuclear Power Institute of China, Chengdu)  
(Manuscript received 19 July, 1993)

**ABSTRACT** The amorphous and crystalline phases were observed in molten region of the Cu-Al explosively welded joint. The crystalline phases consist of  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Cu}_3\text{Al}_2$  and  $\text{Cu}_4\text{Al}$ . Recrystallization takes place in Al region adjacent to the molten zone, and the diffusion distance of Cu in Al is less than 100 nm with needle-like  $\text{CuAl}_2$  phase precipitated. Recovery takes place in Cu region adjacent to the molten zone because of the dispersive  $\text{Cu}_2\text{O}$  phase precipitating, and the diffusion distance of Al in Cu is also less than 100 nm with new phase layers which might be  $\text{Cu}_3\text{Al}_2$  and  $\text{Cu}_4\text{Al}$  formed. Interdiffusion between Cu and Al can be observed in non-molten region with diffusion distance less than 100 nm to form new phase layers.

**KEY WORDS** explosive weld, bonding layer, Cu, Al

---

Correspondent: ZHOU Bangxin, professor, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610005