复合材料学报 第22卷 第2期 4月 2005年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 22 No. 2 April 2005

文章编号: 1000-3851 (2005) 02-0001-05

爆炸复合 Cu-Al-Ni-Mn-Ti 与 QBe2 合金减振弹性复合板材料

李 周, 徐根应, 汪明朴*, 郭明星
(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 利用 Cu-Al-Ni-Mn-Ti 与 QBe2 合金爆炸复合研制出一种新型的减振弹性复合板材料, 用多功能内耗仪测试了该复合板材料的阻尼性能。结果表明: 其内耗值比 QBe2 增加了近一个数量级, 而且具有明显的振幅效应。复合板材料的电阻率介于 Cu-Al-Ni-Mn-Ti 与 QBe2 合金之间, 复合界面对电阻率的影响较小。爆炸复合的界面多呈波浪型, 在界面附近有融化区, 780 ℃等温处理, 界面随保温时间延长而展宽。

关键词: 复合板材料; 爆炸复合; 内耗
中图分类号: TB 331; TG146 **文献标识码**: A

ELASTICITY-DAMPING COMPOSITE MANUFACTURED USING Cu-Al-Ni-Mn-Ti AND QBe2 ALLOYS BY EXPLOSION CLADDING

LI Zhou, XU Genying, WANG Mingpu*, GUO Mingxing
(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A novel type elasticity-damping composite was manufactured using Cu-Al-Ni-Mn-Ti alloy and QBe2 alloy by explosion cladding. The damping value of the composite is about 10 times higher than that of the QBe2 alloy, and has an obvious amplitude effect. The electrical resistivity of the composite board is lower than that of the QBe2 alloy but higher than that of the Cu-Al-Ni-Mn-Ti SMA. The boundary of the composite board has a little effect on the resistivity of the composite board. The shape of the boundary of the composite by explosion cladding is wave-like. At 780 ℃, the boundary of the composite widens with the prolong of the holding time.

Keywords: composite board; explosion cladding; internal friction

继电器的失效一直是人们研究的热点问题。其主要失效原因可归结为两点: 继电器电触点的烧蚀和继电器的接触抖动。理想的继电器弹簧片材料应具有4个基本特点: 优良的导电能力, 高弹性, 高减振性和良好的耐热能力。目前广泛使用的弹簧片材料, 如铍青铜、黄铜等[1], 虽然具有高弹性和高导电性, 但阻尼性能差, 而阻尼性能好的材料, 如 Mn-Cu[2]、Zn-Al[3,4]、形状记忆合金[5~8]等, 其导电性能和弹性又较差, 无法用作弹簧片材料。而两种性能兼有的多功能材料国内外相关文献均未见报道。本文中报道了利用 Cu-Al-Ni-Mn-Ti 合金与 QBe2 爆炸复合研制出的一种新型的弹性与减振综合性能良好的复合材料。

1 实验过程

实验合金 Cu-12.3Al-2.0Ni-2.0Mn-1.0Ti (质量分数, %) 经中频感应熔炼后铸锭, 850 ℃均匀化 24 h, 铣去表面缺陷, 热轧成 1.5 mm 厚的板材, 780 ℃固溶空冷后, 利用电阻-温度曲线测得记忆合金的相变点为: M_f = 90 ℃, M_s = 150 ℃, A_s = 174 ℃和 A_f = 195 ℃。复合板材采用 QBe2 合金为基板, 记忆合金为覆板, 爆炸焊接而成。其具体结构是两层记忆合金板中间夹持 QBe2 合金, 覆板 (记忆合金) 的尺寸: 250 mm ×200 mm ×1.5 mm, 基板 (QBe2) 尺寸: 300 mm ×250 mm ×3 mm。将爆炸复合的复合板材进行折断实验, 发现无论是否进行热处理, 材料都不会发生分层现象。另外还进行了反复弯曲实验, 复合板材同样没有发生分层现

收稿日期: 2004-03-29; 收修改稿日期: 2004-05-13
基金项目: 国家自然科学基金 (50071069) 资助项目
通讯作者: 汪明朴, 教授, 研究方向: 功能材料 E-mail: wangmp@mail.csu.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

象。考虑到较长时间的热处理会引起复合界面的宽化，采用淬火与热轧减薄同步进行，即将复合板材在 780 ℃热轧减薄，且一道次压到所需厚度 2.0 mm，并直接淬入水中，热轧后板材各层的厚度比大致为 1 ∶2 ∶1。然后在 350 ℃/45 min + 420 ℃/5 min 条件下进行热处理。在中科院固体物理所的多功能内耗仪上进行内耗测量实验，温度变化范围为：- 75 ℃～250 ℃；金相观察在德国产 Nephot-Ⅱ型卧式金相显微镜下进行。

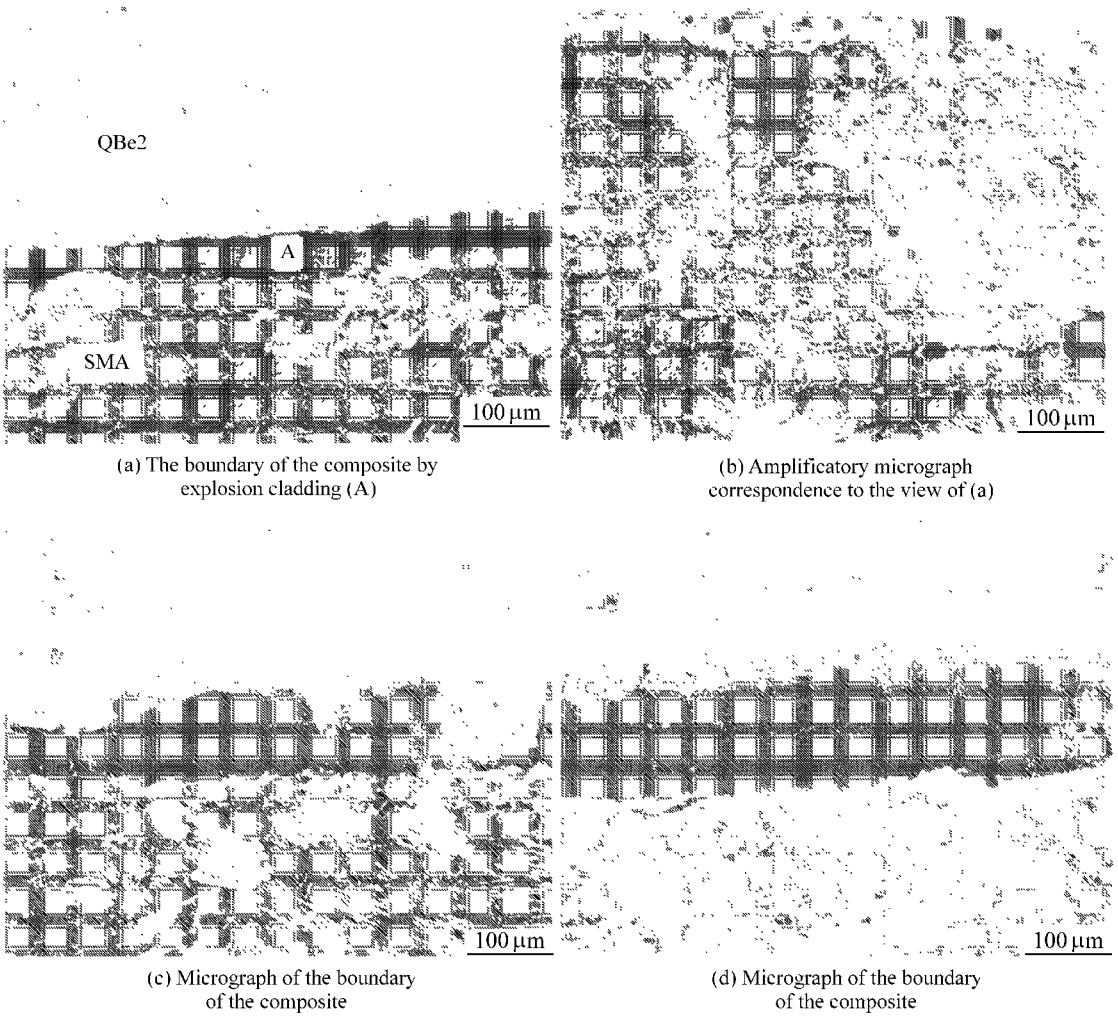
2　实验结果

2.1　爆炸焊复合界面金相观察

图 1 为爆炸焊复合界面的金相显微组织。图 1(a) 为原始爆炸复合界面层的金相组织。从图中可以看到，爆炸复合界面有一定的宽度(图 1(a) 中 A 处)，且凹凸不平，呈现波浪状。图 1(b) 为高倍数下观察到的复合界面的形貌，复合界面处的晶粒为长条形，记忆合金层中白亮、针状的马氏体长入到复合界面层的晶粒中，QBe2 层晶粒也与复合层的晶粒发生相互包缚。复合板材在 780 ℃保温不同时间的金相组织见图 1(c)、图 1(d)。图 1(c) 为 780 ℃保温 5min 的组织形貌，过渡层的宽度较之原始爆炸复合界面展宽 1 倍，保温 10 min 时，过渡层进一步展宽(图 1(d))。

2.2　复合板材的导电性能

表 1 列出了经最终热处理之后的 QBe2、SMA



(a) The boundary of the composite by explosion cladding (A)

(b) Amplificatory micrograph correspondence to the view of (a)

(c) Micrograph of the boundary of the composite

(d) Micrograph of the boundary of the composite

(a) 爆炸复合界面层；(b) 对应(a)的放大照片；
(c) 复合界面 780 ℃保温 5 min；(d) 复合界面 780 ℃保温 10 min

图 1　爆炸焊复合界面的金相显微组织

Fig. 1　Optical micrograph of the boundary of composite

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

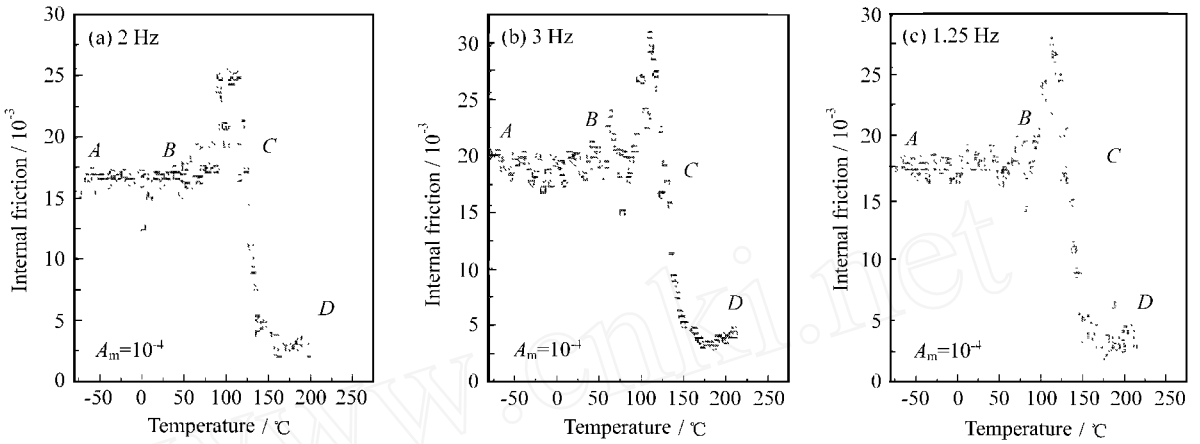


图 2　复合板材在不同频率下内耗随温度的变化

Fig. 2　Internal friction of composite board *vs* temperatures under the different frequencies

及其复合板材的电阻实验值。可见，复合板材的电阻率介于 QBe2 合金与 Cu 记忆合金之间。

表 1　电阻率实验值

Table 1　Measurement of resistivity

Alloys	QBe2	Cu-based SMA	Composite board
Resistivity/ ($\mu\Omega\cdot$cm)	6.58	29.8	10.23

2.3　复合板材的减振性能

图 2 为复合板材在不同频率下内耗随温度的变化情况。从图中可以看出，在不同的频率下，内耗随温度的变化情况基本一致。复合板材的内耗随温度的变化可分成 3 部分：(1) *AB* 段，在这一段中内耗有较高的数值，18 ×10^{-3}左右；(2) *BC* 段，在这一段中，内耗值较 *AB* 段内耗值更高，且先升后降，在 125 ℃附近达到峰值；(3) *CD* 段，这一段中，随着温度的升高，内耗迅速降低到一个很小的数值，为 2.5 ×10^{-3}左右。

图 3 为常温下复合板材、QBe2 的内耗与应变振幅的关系。从图 3(a) 可以看出，复合板材的内耗随振幅的升高而呈增大的趋势，即有较明显的振幅效应。而 QBe2 的内耗值基本没有变化，即无明显振幅效应(见图 3(b))。

对 QBe2 合金在不同频率下内耗值随温度的变化情况也进行了测量。QBe2 合金的内耗对温度和频率的变化均不敏感，常温下内耗平均值较小，为 2 ×10^{-3}左右。图 4 示出了该合金在频率为 2 Hz 时的内耗值随温度的变化。

2.4　复合板材的力学性能

表 2 示出了 QBe2、记忆合金与复合板材不同热处理状态下的力学性能。淬火态下，复合板材的 σ_b 大于 QBe2 与 Cu 基记忆合金的 σ_b。铍青铜在经过时效强化处理后 σ_b 有较大的增大，复合板材的 σ_b 增大也较明显，而 Cu 基 SMA 的 σ_b 增大较小。但经过 420 ℃保温 5 min 后，QBe2 与复合板材的 σ_b 都有较小的回落，而 Cu 基 SMA 的 σ_b 仍在增大。另外，从表 2 中可以发现，复合板材的延伸率在时效强化后有明显的下降。

3　讨　论

Cu 基形状记忆合金在马氏体状态及相变区有较大的内耗值，母相状态下其内耗值较小，相变过程中的内耗值大于合金在马氏体状态下的内耗值，同时该内耗值具有明显的振幅效应[8]。对于本实验选用的 Cu 基记忆合金，马氏体是以层错为亚结构特征的 M18R 马氏体[10]。马氏体状态下的内耗是一种 M/M 界面以及层错亚结构运动的内耗，有较高的数值。在 *AB* 段，实验选用的记忆合金处于单一的马氏体状态，所以内耗值基本保持不变。*BC* 段，选用的记忆合金处于相变区，对应的是相变区内耗值的变化情况，其内耗值高于单纯的马氏体态，它由 M/M 界面内耗及相变内耗(相变内耗由加热时马氏体逆转变所产生的内耗及应力诱发马氏体所产生的内耗组成)两部分共同组成[11]。由于相变的发生，随温度的变化马氏体在不停地转变为母相，M/M 界面内耗及相变内耗都在变化，在 125 ℃附近两者之和达到了峰值，随后随温度升高而降低。当温度超过 150 ℃以后(*CD* 段)，此时复合材料中记忆合金组元完全处于母相状态，所以呈

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

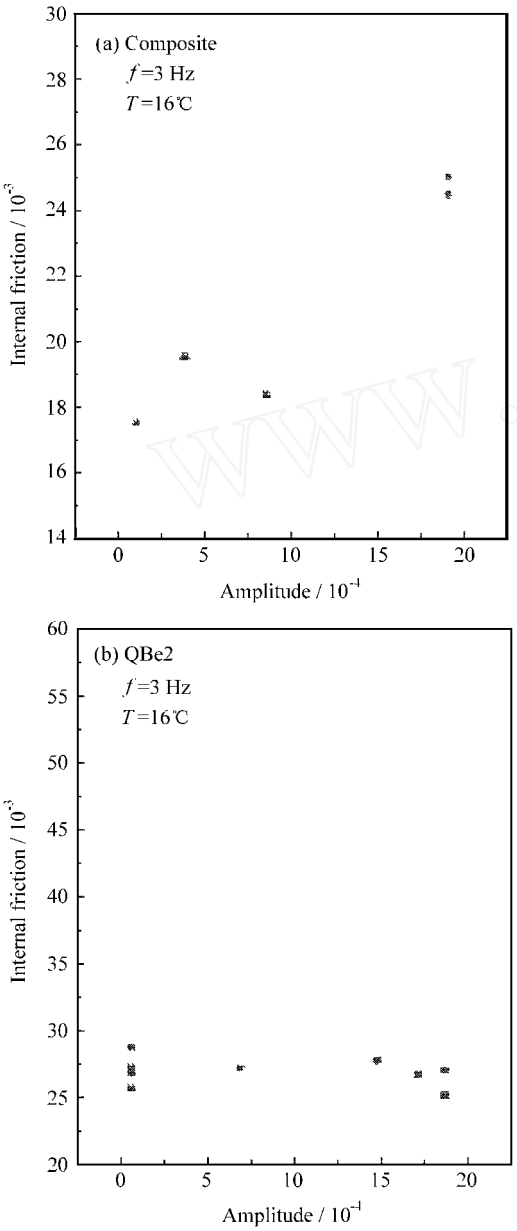


图 3　复合板、QBe2 合金内耗与应变振幅的关系

Fig. 3　Internal friction of the composite board and QBe2 alloy *vs* amplitude at room temperature

现出如图 2 所示的较小的内耗值。

对复合板材内耗的变化情况进行分析还发现，

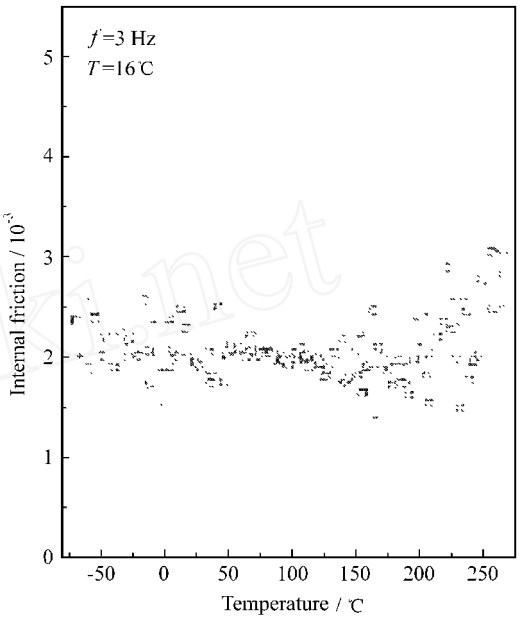


图 4　不同频率下 QBe2 合金的内耗与温度的关系

Fig. 4　Internal friction of QBe2 alloy *vs* temperatures under the different frequencies

复合基材中记忆合金减振组元的相变点有所降低(内耗值的变化显示相变点的变化)，这可能是由于界面两边的元素间相互扩散(铍能使相变点大幅降低[12])及 QBe2 层与记忆合金层层间的牵制共同作用，从而使减振组元记忆合金的相变点降低。

如果我们忽略三层复合板材的两个复合界面对导电性能的影响，可以将三层复合板简化成一个并联电路模型。

根据并联定律：$\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}=\frac{1}{R}$　(1)

将 $R=\rho\frac{1}{s}$ 代入(1)式，则(1)式变为

$$\rho=\frac{2\rho_1\rho_2 s}{2s_1\rho_2+s_2\rho_1} \quad (2)$$

其中：ρ_1 为 Cu 基记忆合金的电阻率；ρ_2 为 QBe2 的电阻率；s_1 为记忆合金层厚度；s_2 为 QBe2 层厚度，$s_2\approx 2s_1$。

表 2　不同合金不同热处理态拉伸实验数据

Table 2　Mechanical properties of the three alloys under different heat treatments

State	QBe2				Cu-based SMA				Composite			
	Stress/ MPa			Strain	Stress/ MPa			Strain	Stress/ MPa			Strain
	$\sigma_{0.01}$	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ %	$\sigma_{0.01}$	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ %	$\sigma_{0.01}$	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ %
A	547	595	660	9.1	140	185	545	5.4	365	545	885	4.4
B	/	1150	1250	2.5[9]	125	185	615	6.6	395	920	1075	1.02
C	/	1154	1200	6.0	140	260	785	3.9	450	855	995	1.14

其中：A：780 ℃固溶 5 min，淬火；B：A + 350 ℃/45 min；C：B + 420 ℃/5 min

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

将 ρ_1、ρ_2 的实测值：ρ_1 = 29.8 μΩ·cm、ρ_2 = 6.58 μΩ·cm 代入(2)式，得

复合板材的理论电阻率 ρ = 10.77 μΩ·cm。

比较复合板材的实测电阻率 ρ = 10.23 μΩ·cm，发现两者相差较小。这一现象说明复合界面对导电性能有影响，但影响幅度不大，复合后导电性能基本符合并联定律。

复合板材的强度是由组元强度与界面强度共同决定的。在淬火态时，因为界面强度的作用，复合板材的强度高于组元的强度。在经过强化热处理后，组元的强度，特别是 QBe2 合金的强度有较大的提高，而界面强度的变化不大，同时记忆合金层强度较低。三者综合，出现了如表 2 所示的复合板材强度稍低于 QBe2 合金的现象。

4　结　论

(1) Cu-Al-Ni-Mn-Ti 与 QBe2 合金爆炸复合研制出了一种新型的减振弹性复合板材料，其内耗值比 QBe2 合金提高了近 10 倍，并且具有明显的振幅效应。

(2) 复合板材料的电阻率介于 Cu-Al-Ni-Mn-Ti 与 QBe2 合金之间，复合界面对电阻率的影响较小。

(3) Cu 基合金与 QBe2 的爆炸结合界面为有一定宽度的过渡层，780 ℃等温处理，随保温时间延长而展宽。

(4) 淬火态复合板材的强度高于各组元的强度；经时效处理后，其强度稍低于 QBe2 合金强度。

参考文献：

[1] 李国俊. 仪器仪表用有色合金的现状与展望 [J]. 材料导报，1991，5(9)：21 - 29.

[2] 王丽萍，郭二军，姚秀荣，等. Mn-Cu 阻尼合金时效过程中晶体结构的变化 [J]. 中国有色金属学报，2003，13(1)：46 - 50.

[3] 高光慧，顾　敏. 减振合金种类、特性极其应用 [J]. 国外金属材料，1989，10(1)：12 - 18.

[4] Torisaka Y, Kojima S. Superplasticity and internal friction of a superplastic Zn-22 %Al eutectoid alloy [J]. *Acta Metal Mater*, 1991, 39(5): 947 - 954.

[5] 梁清香，任勇生. 形状记忆合金纤维混杂单层的阻尼预测 [J]. 复合材料学报，2002，19(2)：85 - 88.

[6] Lin H C, Wu S K, Chang Y C. Damping characteristics of TiNi-based shape memory alloys [J]. *Proc Int Symp Shape Mem Mater*, 1994, 205.

[7] Chou T S, Lin H C, Wu S K. Characterization of internal friction of Fe-30Mn-6Si-5Cr [J]. *Scr Mater*, 2000, 42(5): 445 - 450.

[8] Ritchie I G, Pan Z L. High-damping metals and alloys [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1991, 22A: 607 - 616.

[9] 曾正明编. 实用工程材料技术手册 [M]. 北京：机械工业出版社，2000. 589.

[10] Wang M P, Yang J, Li Z. Crystalline structure and morphology of X-phase in Cu-Al-Ni-Mn-Ti alloy [J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2000, 10(6): 749 - 752.

[11] Lin H C, Wu S K, Yeh M T. Damping characteristics of Ti-Ni shape memory alloys [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1993, 24A: 2189 - 2194.

[12] Castro M L, Romero R. Transformations during continuous cooling of a β Cu-22.72Al-3.55Be (atom friction, %) alloy [J]. *Scripta Materialia*, 1999, 42(2): 157 - 161.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net