

# 大块金属玻璃焊接研究进展

王小京 覃作祥

(大连交通大学材料科学与工程学院,大连 116028)

**摘要** 综述了大块金属玻璃焊接领域的最新进展;介绍了成功焊接大块金属玻璃的不同方法,包括爆炸焊、电火花焊、电子束焊、用多层金属片进行焊接等熔化焊,以及固相下的摩擦焊。熔化焊接方法的成功,原因在于大块金属玻璃的玻璃态成型能力和在这些方法中高的线能量;而摩擦焊接的成功,则是由于金属玻璃在过冷液相区的热稳定性以及在该区域的超塑性和粘滞性。

**关键词** 大块金属玻璃 焊接 过冷液相

## Recent Advances in Welding of Bulk Metallic Glass

WANG Xiaojing QIN Zuoxiang

(School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028)

**Abstract** Current progress in the investigation into welding of bulk metallic glass is reviewed. Several methods of welding bulk metallic glasses (such as the liquid phase welding including explosion, sparking welding, electron-beam and using reactive multiplayer foils, and supercooled phase welding using friction welding) are introduced in this paper. Successful welding of the liquid phase methods is due to the high glass-forming ability of the bulk metallic glasses and the high concentration of welding energy in these methods. The supercooled liquid phase welding is successful due to the thermally stable supercooled liquid state of the bulk metallic glasses and the superplasticity and viscous flow of the supercooled liquid.

**Key words** bulk metallic glass, welding, supercooled liquid phase

长期以来困扰金属玻璃发展的主要问题来自3个方面:一是金属玻璃的玻璃形成能力;二是金属玻璃的加工性;三是金属玻璃的焊接性。近年来,出现的一些大块金属玻璃不仅具有宽过冷液相区、大的玻璃形成能力以及高的抗拉强度和优异的耐腐蚀性能,而且在过冷液相区表现出超塑性<sup>[1]</sup>以及优良的加工性能<sup>[2]</sup>。这使前2个问题得到了不同程度的解决。如Inoue等采用吸铸法获得直径为30mm的 $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ 合金金属玻璃棒<sup>[3]</sup>。迄今,已经报道过的具有较大的玻璃形成能力、较宽过冷液相区的合金系有:Al-La基<sup>[4]</sup>、Cu基<sup>[5]</sup>、Ti基<sup>[6]</sup>、Fe基<sup>[7]</sup>等。这些合金系的共同特点是在较低的临界冷却速率即可获得毫米尺寸的玻璃态合金。

对于金属玻璃焊接性研究也取得了一定进展,其焊接方法主要包括:爆炸焊接、脉冲电流焊接、电子束焊接、摩擦焊接等。前3种为熔化焊接,摩擦焊接则被认为是一个固态焊接过程。目前主要焊接的是Zr基和Pd基非晶合金,其焊接情况如表1所示。金属玻璃焊接方面的发展无疑可以拓宽金属玻璃的研究领域和进一步应用。

## 1 焊接方法

### 1.1 爆炸焊接 $Zr_{41}Be_{23}Ti_{14}Cu_{12}Ni_{10}$

爆炸焊是以炸药为能源进行金属间焊接的方法。这种焊接

是利用炸药的能量使被焊金属表面被高速碰撞,在接触面上形成一金属塑性变形层,在短时间内形成冶金结合。其特点是能将任意同种材料,特别是不同种材料迅速并且牢固地焊接起来。在金属玻璃的焊接过程中,焊接射流可有效地清理金属玻璃条带表面的氧化膜,达到良好的焊接结合<sup>[8]</sup>。图1为爆炸焊接简图。Kawamura等<sup>[8]</sup>用爆炸焊接方法将玻璃态金属条带焊接在金属基板上,焊接以后的金属玻璃条带仍保持玻璃态,增强了金属表面硬度和耐磨性,但焊接过程中要注意焊接参数的选取,以控制微裂纹的产生。

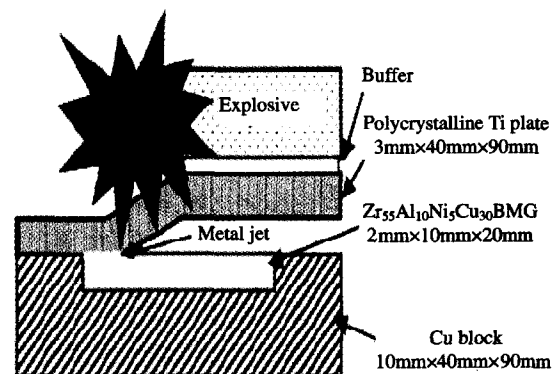


图1 爆炸焊接简图

表 1 BMG(I)和合金II的焊接情况

BMG(I)	焊接方法	合金II	I和II的焊接结果	参考文献	
Zr <sub>41</sub> Ti <sub>14</sub> Cu <sub>12</sub> Ni <sub>10</sub> Be <sub>23</sub>	摩擦焊接	低碳钢	失败	[15]	
		Ti合金(Ti-6Al-4V)	失败	[12,15]	
		Al-7075	失败	[15]	
		Al-5083	成功	[15]	
	电子束焊	金属玻璃	Zr <sub>41</sub> Ti <sub>14</sub> Cu <sub>12</sub> Ni <sub>10</sub> Be <sub>23</sub>	成功	[17,19]
		金属玻璃	Zr <sub>41</sub> Ti <sub>14</sub> Cu <sub>12</sub> Ni <sub>10</sub> Be <sub>23</sub>	成功	[11]
		晶体	纯Zr金属	成功	[12]
			Zr合金(Zircaloy-4)	成功	[15]
			低碳钢	失败	[15]
			Ti合金(Ti-6Al-4V)	失败	[15]
激光焊接	金属玻璃	Zr <sub>41</sub> Ti <sub>14</sub> Cu <sub>12</sub> Ni <sub>10</sub> Be <sub>23</sub>	成功	[8]	
爆炸焊接	金属玻璃	Zr <sub>41</sub> Ti <sub>14</sub> Cu <sub>12</sub> Ni <sub>10</sub> Be <sub>23</sub>	成功	[8]	
多层焊接	金属玻璃	Zr <sub>41</sub> Ti <sub>14</sub> Cu <sub>12</sub> Ni <sub>10</sub> Be <sub>23</sub>	成功	[14]	
Zr <sub>55</sub> Al <sub>10</sub> Ni <sub>5</sub> Cu <sub>30</sub>	电子束焊	金属玻璃	Zr <sub>55</sub> Al <sub>10</sub> Ni <sub>5</sub> Cu <sub>30</sub>	失败	[12]
	爆炸焊接	晶体	Ti合金金属板	成功	[8]
	电流脉冲焊	金属玻璃	Zr <sub>55</sub> Al <sub>10</sub> Ni <sub>5</sub> Cu <sub>30</sub>	成功	[9,10,16]
	摩擦焊接	金属玻璃	Zr <sub>55</sub> Al <sub>10</sub> Ni <sub>5</sub> Cu <sub>30</sub>	成功	[9,10,16]
Pd <sub>40</sub> Ni <sub>40</sub> P <sub>20</sub>	摩擦焊接	金属玻璃	Pd <sub>40</sub> Ni <sub>40</sub> P <sub>20</sub>	成功	[16,22]
	电流脉冲焊	金属玻璃	Pd <sub>40</sub> Ni <sub>40</sub> P <sub>20</sub>	成功	[16]
Pd <sub>40</sub> Cu <sub>30</sub> Ni <sub>10</sub> P <sub>20</sub>	摩擦焊接	金属玻璃	Pd <sub>40</sub> Cu <sub>30</sub> Ni <sub>10</sub> P <sub>20</sub>	成功	[15]

1.2 脉冲电流焊接

Kawamura<sup>[9]</sup>以及Zhou<sup>[10]</sup>等用脉冲电流焊分别对Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub>金属玻璃进行了成功的焊接,所用装置如图2和图3所示。根据Kawamura的实验,成功焊接Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub>的充电电压范围为100~180V,即电压低于100V无法得到健全的焊接接头,而高于200V接头处可以观察到晶化现象;焊接后的抗拉强度为1540MPa,与Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub>原始材料强度一致。而Zhou等<sup>[10]</sup>对Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub>金属玻璃的焊接结果为:XRD图显示接头处依然保持玻璃态组织,而TEM观察发现在接头处有尺寸为20nm左右的纳米晶;母材和接头处的维氏显微硬度分别为510和514;焊后的抗拉强度只有原母材的1/2,即960MPa。分析认为这是由于某些区域的不完整接合造成的。

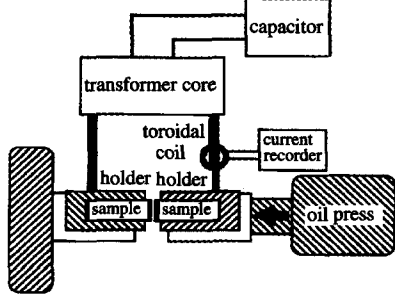


图2 脉冲电流焊接简图(Kawamura所用)

脉冲电流焊接成功的原因是:①焊接过程中金属玻璃的温度最高值约410℃,低于Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub>的玻璃化温度T<sub>g</sub>(420℃)和晶化温度T<sub>x</sub>(500℃),所以母材处仍可保持玻璃态组

织结构;②焊缝区较窄,焊接母材处的温度不高,而且金属玻璃基体的热交换率很高,因此在焊缝处形成了玻璃态和纳米晶的混合组织。

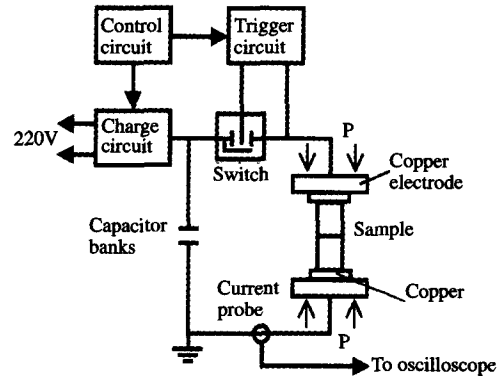


图3 脉冲电流简图(Zhou等用)

1.3 电子束焊接

Kawamura等<sup>[11-13,15]</sup>利用电子束焊接方法成功地对Zr<sub>41</sub>Ti<sub>14</sub>Cu<sub>12</sub>Ni<sub>10</sub>Be<sub>23</sub>自身、Zr<sub>41</sub>Ti<sub>14</sub>Cu<sub>12</sub>Ni<sub>10</sub>Be<sub>23</sub>与纯Zr金属、Zr<sub>41</sub>Ti<sub>14</sub>Cu<sub>12</sub>Ni<sub>10</sub>Be<sub>23</sub>与Zr合金(Zircaloy-4)进行了焊接,但对Zr<sub>41</sub>Ti<sub>14</sub>Cu<sub>12</sub>Ni<sub>10</sub>Be<sub>23</sub>与低碳钢、Zr<sub>41</sub>Ti<sub>14</sub>Cu<sub>12</sub>Ni<sub>10</sub>Be<sub>23</sub>与Ti合金(Ti-6Al-4V)的焊接失败。此外,对Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub>的电子束焊失败,原因在于Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub>的玻璃形成能力比Zr<sub>41</sub>Ti<sub>14</sub>Cu<sub>12</sub>Ni<sub>10</sub>Be<sub>23</sub>的差。

金属玻璃Zr<sub>41</sub>Ti<sub>14</sub>Cu<sub>12</sub>Ni<sub>10</sub>Be<sub>23</sub>与晶态金属Zr、Zr合金的焊接获得了良好的焊接接头。接头处靠近BMG一侧的区域仍保持了玻璃态组织,而靠近Zr金属的区域没有脆性相的形成。对接头作拉伸实验,断裂发生在Zr金属一侧。接头的抗拉强度与原纯Zr金属的同为400MPa。在三点弯曲实验中,弯曲发生在Zr金属一侧,焊接接头表现出一定的抗变形能力。

1.4 用多层金属薄片进行焊接

多层金属薄片的焊接是利用点火激发后金属薄片的放热反应放出的热量加热金属,在一定压力下达到原子间结合。由于金属薄片反应放出的焊接热量比较小,多用于微电子器件、温度敏感器件以及金属玻璃的连接。Swiston等<sup>[14]</sup>用Ni/Al多层金属薄片实现了Zr<sub>57</sub>Ti<sub>5</sub>Cu<sub>20</sub>Ni<sub>8</sub>Al<sub>10</sub>金属玻璃的焊接。如图4所示,金属玻璃之间的金属片通过点火发生放热反应,反应释放出的能量把金属玻璃软化到黏滞塑性流变区,在压力下软化的金属玻璃流动并结合在一起。与晶体金属不同,金属玻璃黏度不急剧下降,软化后金属玻璃有一定的抵抗切变能力。一般认为,焊接过程中由于压力作用,处于黏滞流变区的金属玻璃在流动的过程中可以把反应过的金属薄片冲出接头。故金属玻璃的黏滞流变性对金属玻璃的焊接质量的影响尤其重要。根据Swiston等的实验可知,接头切变强度为480MPa,并发现切变强度是金属薄片厚度和焊接压力的函数,焊接接头的切变强度随金属薄片的厚度和焊接压力的增加而增加。

1.5 摩擦焊接

摩擦焊是一种焊接金属玻璃较为理想的方法,到目前为止,已成功焊接了Pd<sub>40</sub>Ni<sub>40</sub>P<sub>20</sub>、Pd<sub>40</sub>Cu<sub>30</sub>Ni<sub>10</sub>P<sub>20</sub>、Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub>和

Zr<sub>41</sub>Ti<sub>14</sub>Cu<sub>12</sub>Ni<sub>10</sub>Be<sub>23</sub>等金属玻璃<sup>[15~17,19]</sup>。焊接选用参数一般范围为:主轴转速 1500~6000r/min,摩擦时间 0~0.5s,摩擦压力 50~200MPa,顶锻压力 50~200MPa,顶锻时间也可以为 0~0.5s<sup>[8,15]</sup>。在不同的金属玻璃之间进行焊接时,其玻璃化温度 T<sub>g</sub> 相差低于 50K 的可以成功焊接;而当其玻璃化温度 T<sub>g</sub> 相差大于 50K 时,则由于焊缝两端金属玻璃的变形程度不同导致焊接接头失败<sup>[15]</sup>。另外, Wong 等在对 Zr<sub>41</sub>Ti<sub>14</sub>Cu<sub>12</sub>Ni<sub>10</sub>Be<sub>23</sub> 金属玻璃的摩擦焊接中所用压力为 40MPa,比 Kawamura 等所用压力小很多<sup>[15,17]</sup>。

边可去除接头处表面的氧化物薄膜,从而保证新鲜表面之间的有效结合。同时摩擦焊接中的摩擦时间很短,比大块金属玻璃的固态加热 TTT 曲线的鼻子时间短得多<sup>[18]</sup>。焊接应该被控制在玻璃化转变温度和晶化温度之间,因为温度每上升 15K,黏度就下降 1 个数量级<sup>[18]</sup>。

对于不同种类金属玻璃之间的焊接,其 T<sub>g</sub> 温度相差大于 50℃时,被焊接的异种金属玻璃之间不能同时处于其塑性最大的塑性区域,未能达到两种材质之间原子范围的冶金结合,从而导致了焊接的失败。对于金属玻璃和晶态金属之间的焊接,则着重考虑两种材质之间的形变性能。

### 3 结语

金属玻璃焊接过程中的最大问题是晶化问题,晶化导致金属玻璃性能的下降。到目前为止,焊接大块金属玻璃的方法有两种可行方案:一是在熔化焊接中尽量减小焊接热循环时间;二是把金属玻璃加热到其塑性流变区进行焊接。合金系的玻璃形成能力越高,焊接线能量越集中,塑性变形能力越强,越有利于形成健全的焊缝。

自 1960 年得到第一片 Au<sub>70</sub>Si<sub>30</sub> 玻璃态薄带以来,金属玻璃的尺寸成为困扰金属玻璃发展的问题。从最初的玻璃薄膜、薄带或粉末到现在的厘米级的金属玻璃,尺寸问题始终限制着金属玻璃合金优异性能的发挥和利用。Kawamura 等对金属玻璃焊接性能方面的研究,无疑给金属玻璃在结构件的应用方面提供了可能,标志着金属玻璃材料向实际应用迈进了新的一步。

### 参考文献

- 1 Chu J P, Chiang C L, Nieh T G, et al. Superplasticity in a bulk amorphous Pd-40Ni-20P alloy: a compression study. *Intermetallics*, 2002, 10(11-12):1191
- 2 Kawamura Y, Shibata T, Inoue A, et al. Workability of the supercooled liquid in the Zr<sub>65</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>10</sub>Cu<sub>15</sub> bulk metallic glass. *Acta Mater*, 1998, 46(1):253
- 3 Inoue A, Zhang T. Fabrication of bulk glassy Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub> alloy of 30mm in diameter by a suction casting method. *Mater Trans, JIM*, 1996, 37(2):185
- 4 Inoue A, Zhang T, Masumoto T. Al-La-Ni amorphous alloy with a wide supercooled liquid region. *Mater Trans, JIM*, 1989, 30(12):965
- 5 Inoue A, Zhang W, Zhang T, et al. High-strength Cu-based bulk glassy alloys in Cu-Zr-Ti and Cu-Hf-Ti ternary systems. *Acta Mater*, 2001, 49(14):2645
- 6 Kim Y C, Kim W T, Kim D H. A development of Ti-based bulk metallic glass. *Mater Sci Eng A*, 2004, 375-377:127
- 7 Pang S J, Zhang T, Asami K, et al. Synthesis of Fe-Cr-Mo-C-B-P bulk metallic glasses with high corrosion resistance. *Acta Mater*, 2002, 50(3):489
- 8 Kawamura Y. Liquid phase and supercooled liquid phase welding. *Mater Sci Eng A*, 2004, 375-377:112
- 9 Kawamura Y, et al. Spark welding of Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub> bulk metallic glasses. *Scr Mater*, 2001, 45(2):127
- 10 Zhou Y Z, Zhang Q S, He G H, et al. Connection of bulk amorphous alloy Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub>. *Mater Lett*, 2003, 57(15):2208

(下转第 68 页)

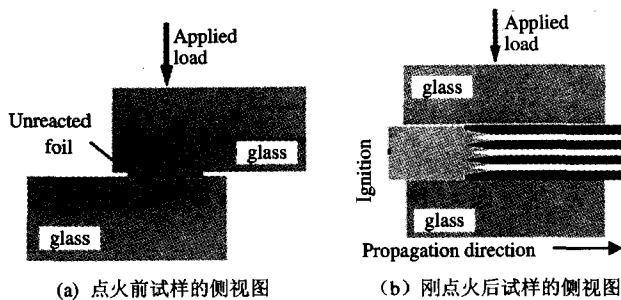


图 4 搭接试样示意图

用摩擦焊接成功地完成了 Zr<sub>41</sub>Ti<sub>14</sub>Cu<sub>12</sub>Ni<sub>10</sub>Be<sub>23</sub> 金属玻璃对 2017 铝合金和 5038 铝合金的焊接<sup>[8,15]</sup>,在这两种情况下,焊缝两端金属都有变形。而在 Zr<sub>41</sub>Ti<sub>14</sub>Cu<sub>12</sub>Ni<sub>10</sub>Be<sub>23</sub> 与低碳钢、Ti 合金、7075 铝合金焊接中,金属玻璃单方面变形,从而导致了焊接的失败。将 Zr<sub>41</sub>Ti<sub>14</sub>Cu<sub>12</sub>Ni<sub>10</sub>Be<sub>23</sub> 与 2017 铝合金的焊接接头做拉伸实验后发现,断裂发生在 2017 铝合金一边,拉伸强度为 400MPa,与 2017 铝合金相同。

## 2 焊接机理

在前 4 种熔化焊接过程中,成功焊接的关键是避免晶化相的析出。加热形成塑性过程的 TTT 曲线与熔化冷却过程的 TTT 曲线是不同的<sup>[8]</sup>。固态加热 Zr<sub>41</sub>Ti<sub>14</sub>Cu<sub>12</sub>Ni<sub>10</sub>Be<sub>23</sub> 的 TTT 曲线鼻子时间是 5s,远小于熔化金属冷却时的鼻子时间 70s<sup>[18]</sup>;而 Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub> 的熔化冷却 TTT 曲线的鼻子时间为 2s,固态加热 TTT 曲线最短鼻子时间则为 0.14s<sup>[20]</sup>。为了避免析出晶体,通过集中的高线能量来减少熔化区和热影响区的宽度,从而减少熔化焊接中的温度循环时间是很重要的。爆炸焊、电子束焊、脉冲电流焊的温度循环时间分别为 20~50μs、70~100ms、0.2~0.5s<sup>[18,20,21]</sup>,因此爆炸焊和脉冲电流焊接 Zr<sub>55</sub>-Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub>、Zr<sub>41</sub>Ti<sub>14</sub>Cu<sub>12</sub>Ni<sub>10</sub>Be<sub>23</sub> 保持了无组织状态。所以焊接方法和金属玻璃的玻璃态形成能力都应纳入考虑范围,以保证良好的焊接接头。

在摩擦焊接过程中两个接头处的相对运动产生摩擦热,使金属玻璃处于超塑性粘质流变区,从而通过超塑性变形形成焊接接头<sup>[22]</sup>。这是一个过冷液态过程,是不扩散的。焊接界面通过摩擦达到玻璃化温度以上。金属玻璃在接头处呈过冷液态状态,在摩擦过程中会在接头处形成一圈金属飞边。这是处于超塑性状态的接头金属玻璃在摩擦压力下被挤出界面而形成的,即接头处的金属玻璃原子塑性流变的结果。形成的焊接摩擦飞

- 1999, A261:292
- 11 张厚安,刘心宇. Al/MoSi<sub>2</sub> 复合材料的低温氧化行为[J]. 矿冶工程,2001,21(4):77
- 12 Toshio Maruyama, Katsuyuki Yanagihara. High temperature oxidation of intermetallic compounds of Mo (Si<sub>1-x</sub>, Al<sub>x</sub>)<sub>2</sub>[J]. Corrosion Sci,1993,35:939
- 13 Maruyama T, Yanagihara K. High temperature oxidation and peeling of Mo(Si,Al)<sub>2</sub>[J]. Mater Sci Eng,1997,A239-240:828
- 14 Mitra R, Rama Rao. Effect of minor alloying with Al on oxidation behaviour of MoSi<sub>2</sub> at 1200°C[J]. Mater Sci Eng, 1999,A260:146
- 15 张厚安,龙春光,刘心宇. WSi<sub>2</sub>/MoSi<sub>2</sub> 复合材料的低温氧化特征[J]. 稀有金属,2002,26(3):202
- 16 Yanagihara K, Maruyama T, Nagata K. High temperature oxidation of Mo-Si-X intermetallics (X=Al, Ta, Zr, and Y) [J]. Intermetallics,1995,(3):243
- 17 张厚安,李颂文,彭成章,等. SiC对MoSi<sub>2</sub>低温氧化行为的影响[J]. 材料导报,1999,13(3):72
- 18 Natesan K, Dedvi S C. Oxidation behavior of molybdenum silicides and their composites[J]. Intermetallics, 2000,8: 1147
- 19 Kowalik R W, Hebsur M G. Cycle oxidation study of Mo-Si<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> based composites[J]. Mater Sci Eng,1999,A261: 300
- 20 Hebsur M G. Development and characterization of SiC(f)/ MoSi<sub>2</sub>- Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (p) hybrid composites [J]. Mater Sci Eng, 1993,A261:24
- 21 Zhu, Shobu K, Zeng Y. Oxidation behavior of hot-pressed MoSi<sub>2</sub>-TiC composite[J]. Mater. Sci Eng, 2001, 36:313
- 22 陈雪梅. MoSi<sub>2</sub> 基复合陶瓷的高温氧化行为[J]. 机械工程材料,1999,23(3):30
- 23 王德志,刘心宇,左铁镛. MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 复合材料的高温氧化行为[J]. 长沙铁道学院学报,2000,18(1):44
- 24 王德志,刘心宇,左铁镛. MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 复合材料的低温氧化研究[J]. 粉末冶金技术,2001,19(4):195
- 25 Jong IK, Lee E, Hecht N L. In suit processing and properties of SiC/MoSi<sub>2</sub> nanocomposites [J]. J Am Ceram Soc, 1998, 81(2):421
- 26 艾云龙,马勤,邓克明,等. ZrO<sub>2</sub>+SiC颗粒强韧化MoSi<sub>2</sub>复合材料的显微组织和性能[J]. 金属热处理学报,2000,21(4):18
- 27 艾云龙,刘长虹,左敦稳,等. ZrO<sub>2</sub>/SiC-WSi<sub>2</sub>/MoSi<sub>2</sub> 纳米复合相陶瓷制备及增韧机制[J]. 材料工程,2004,(1):33
- 28 Yong D X, Cheng L F, Zhang L T. Oxidation behavior and mechanical properties of C/SiC composites with Si-MoSi<sub>2</sub> oxidation properties coating [J]. Mater Sci Eng, 1999,34: 6009
- 29 曾燮榕,郑长卿,等. 碳/碳复合材料 MoSi<sub>2</sub> 涂层的防氧化研究[J]. 复合材料学报,1997,14(3):37
- 30 曾燮榕,杨崢,李贺军,等. 防止C/C复合材料氧化的 Mo-Si<sub>2</sub>/SiC 双相涂层系统的研究[J]. 航空学报,1997,18(4): 427
- 31 Reisel G, Wielage B. High temperature oxidation behavior of HVOF-sprayed unreinforced and reinforced molybdenum disilicide powders[J]. Surf Coat Techn, 2001,147:1
- (责任编辑 张 敏)
- 
- (上接第52页)
- 11 Kawamura Y, Ohno Y. Successful electron-beam welding of bulk metallic glass. Mater Trans, 2001, 42(11):2476
- 12 Kawamura Y, Kagao S, Ohno Y. Electron beam welding of Zr-based bulk metallic glass to crystalline Zr metal. Mater Trans, 2001, 42(12):2649
- 13 Yokoyama Y, Abe N, Fukaura K, et al. Electron beam welding of Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub> bulk glassy alloys. Mater Trans, 2002, 43(10):2509
- 14 Swiston Jr A J, Hufnagel T C, Weilhs T P. Joining bulk metallic glass using reactive multilayer foils. Scr Mater, 2003, 48(12):1575
- 15 Kawamura Y, Shoji T, Ohno Y. Welding technologies of bulk metallic glasses. J Non-Crystalline Solids, 2003,317(1-2):152
- 16 Kawamura Y, Ohno Y. Metallurgical bonding between bulk metallic glasses. Mater Trans, 2001,42(4):717
- 17 Wong C H, Shek C H. Friction welding of Zr<sub>41</sub>Ti<sub>14</sub>Cu<sub>12.5</sub>Ni<sub>10</sub>Be<sub>22.5</sub> bulk metallic glass. Scr Mater,2003,49(5):393
- 18 Johnson W L. Bulk metallic glasses. Mater Res Soc Symp Proc, 1999, 554:311
- 19 Shoji T, Kawamura Y, Ohno Y. J Zr<sub>41</sub>Be<sub>23</sub>Ti<sub>14</sub>Cu<sub>12</sub>Ni<sub>10</sub> bulk metallic glasses by a friction welding method. Mater Trans, 2003, 44(9):1809
- 20 Inoue A. Bulk amorphous alloys preparation and fundamental characteristics, Trans Tech Publications, NH, 1998. 1
- 21 Kawamura Y, Ohno Y, Chiba A. Development of welding technologies in bulk metallic glasses. Mater Sci Forum, 2002, 386-388(3):553
- 22 Kawamura Y, Ohno Y. Superplastic bonding of bulk metallic glasses using friction method. Scr Mater, 2001, 45(3): 279
- (责任编辑 海 鹰)