

⑤  
265-271

# 非晶合金条带的爆炸焊接\*

李晓杰 张凯 杨文彬 奚进一 孙明

(大连理工大学工程力学研究所, 大连 116023)

TG139.8

**A 摘要** 报道了利用爆炸焊接技术对铁基、铁镍基非晶合金条带(厚度约25 $\mu$ m)进行单层和多层爆炸焊接的结果。金相分析结果表明,条带间相互结合良好;X光衍射结果说明,焊接后的条带仍保持非晶态,即使采用表面已有部分晶化的条带进行焊接,焊接后仍转化为非晶态。这说明在焊接过程中条带表面已发生熔化,且冷却速度也可达10<sup>6</sup>K/s量级。

**关键词** 非晶合金 爆炸焊接

金属玻璃, 爆炸焊, 焊接, 非晶合金材料

## 1 引言

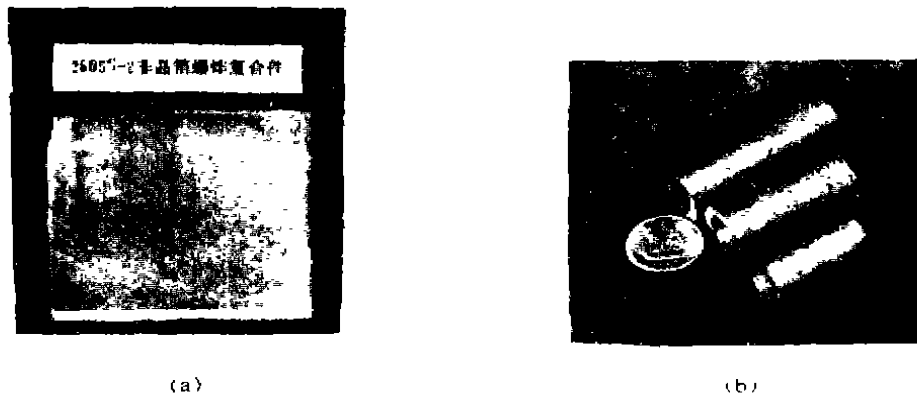
非晶态材料是近二十年来非常活跃的研究领域。从熔体以10<sup>6</sup>~10<sup>9</sup>K/s的降温速率直接快淬出来的合金,有许多独特诱人的性能,如高强度、高硬度、低磁滞损耗和优异的耐腐蚀性能<sup>[1,2]</sup>。但它基本上还处于实验研究阶段,尚没有得到广泛应用,其原因之一就是产品的几何形状受到限制。因为要达到10<sup>6</sup>K/s的淬火速率,就必须使得制备的非晶合金样品至少在一个方向上特别薄,因此大量的非晶合金是以片、箔、条带和粉末状态制备出来的。以铁基非晶合金为例,它具有低矫顽力、高磁导率等优点,电阻率为硅钢的三倍左右,铁损仅为取向硅钢的四分之一,为无取向硅钢的十分之一,是优异的软磁材料。但限制它在电力变压器等电器上应用的主要原因之一,就是带材较薄,使得填充系数仅为75%左右,因此迫切需要制备三维大尺寸的非晶材料。国内外在这方面都进行了大量的研究,包括等离子喷涂、热模压结、冷压结和动态压实<sup>[3]</sup>。这些方法通常均使用粉末或纤维材料,即使制备的非晶合金为带材也须粉碎后使用,因此造成了不必要的浪费。

本文提出用非晶条带直接爆炸复合的方法,生产三维尺寸非晶合金块件,弥补了上述方法的缺点。爆炸焊接与冲击压实方法一样,都是利用高速冲击,使材料的接触表面产生高温、高压,从而促使材料结合,结合后界面的残余热量会迅速传入基体内部,在界面上形成10<sup>5</sup>~10<sup>6</sup>K/s的降温速率,同时整体温升也较低,因此较适于非晶态材料的加工。到目前为止,已有许多利用冲击压实非晶态合金的报道<sup>[3]</sup>,但关于非晶态爆炸复合的报道仍很少见到<sup>[4]</sup>。本文利用爆炸焊接技术,对25 $\mu$ m厚的非晶条带进行了单层、多层爆炸焊接,成功地将20~200层25 $\mu$ m厚的Fe<sub>78</sub>B<sub>13</sub>Si<sub>9</sub>和Fe<sub>40</sub>Ni<sub>40</sub>P<sub>14</sub>B<sub>6</sub>非晶条带焊接成管状件和板状件,图1为这些试件的照片。

## 2 单层非晶条带与低碳钢的爆炸焊接

关于非晶条带爆炸焊接的文献迄今只看到两篇<sup>[4,5]</sup>,均是将条带与普通金属材料焊

\* 本项目由高技术“863”资助。  
1992年6月26日收到原稿,1993年3月9日收到修改稿。



(a) (b)  
 图 1 非晶态合金条带多层爆炸焊接试样  
 Fig. 1 The samples of multilayer amorphous ribbons welded together with explosive

接的。为了检验非晶态箔的爆炸焊接性能,并验证前人的工作,设计了如图 2 的实验,非晶条带为北京钢铁研究院提供的 2605SM(Fe、Si、B、Nb、Mo)合金,宽度 25mm,厚度约 25 $\mu$ m。炸药采用以泰安为主体的泡沫炸药,炸药密度 0.1g/cm<sup>3</sup>,爆速约 1.8km/s;飞板为 0.5mm 纯铝箔,将非晶条带用粘接剂粘在飞板之下(如图 2);基板为普通碳钢;计算得到打击速度  $v_p$  约为 0.45km/s。焊接合金相检查结果与文献[4,5]相同,如图 3 所示,可以看出非晶条带与碳钢间已达到良好的冶金结合,但在条带中出现了大量的裂纹,裂纹大都与焊接界面约成 45°,明显显示为剪切断裂形式。R Prümer<sup>[4]</sup>认为,在低应变率(即低碰撞点速度)下非晶合金的塑性流动与静态拉伸时是一样的,都呈不均匀性,断裂方式以 45°方向形成滑移线,最终断裂,因而要防止在爆炸焊接中非晶条带断裂,则必须提高应变率,使条带达到粘滞流动段。

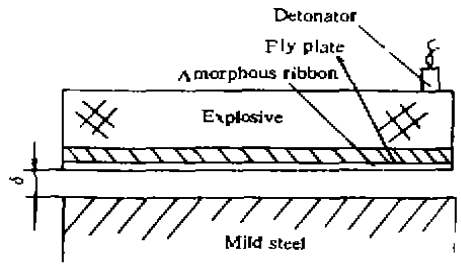


图 2 单层非晶条带焊接装置图  
 Fig. 2 The explosive welding set-up of single amorphous ribbon



图 3 2605SM 与普通钢焊接金相照片( $\times 200$ )  
 Fig. 3 Optical metallographic view of explosively welded sample of 2605SM and mild steel

### 3 多层非晶条带的爆炸焊接

非晶条带的多层焊接无直接的参考资料,只能查到一些普通金属多层焊接的结果,这些焊接所使用的箔材最薄也已达 0.1mm 量级,与非晶条带的厚度相差一个量级。在普通的多层焊接中,板与板之间必须保证一定的间距,以供板加速到焊接速度之用,然而要使 25 $\mu\text{m}$  的非晶条带间,保证准确的间距是极为困难的。另外如前言中所提非晶合金的硬度极高,以  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  (以下称 2605S-2) 和  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$  (以下称 2826) 两种合金为例,其硬度高达  $H_v = 910\text{kg}/\text{mm}^2$  和  $H_v = 640\text{kg}/\text{mm}^2$ , 密度  $\rho$  与铁相当,分别为  $7.18\text{g}/\text{cm}^3$  和  $7.51\text{g}/\text{cm}^3$ , 用爆炸焊接下限公式(其中  $u_p$  代表箔与箔间的碰撞速度)

$$u_p = k \sqrt{H_v / \rho} \quad (1)$$

取  $k=0.6$ , 计算所得最小可焊接速度,分别为  $u_p = 669\text{m}/\text{s}$  及  $u_p = 548\text{m}/\text{s}$ 。在这样高的碰撞速度下,多层焊接组合中将沉积大量的热量,达到相当高的平均温升,有可能接近晶化温度  $T_x$ 。从多层焊接模型<sup>[6]</sup>可得多层系统中沉积的热量为每单位质量  $u_p^2/2$ , 因而可用下式计算多层系统的平均温升

$$\Delta T = \frac{u_p^2}{2c_p} \quad (2)$$

对于 2605S-2 合金和 2826 合金,利用理论计算可得热容量分别为  $c_p = 590\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$  和  $c_p = 570\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ , 用式(2)及由式(1)所得到的  $u_p$  速度计算,要达到焊接,以上两种材料的温升应为  $380^\circ\text{C}$  和  $263^\circ\text{C}$ 。如果再加上常温温度  $25^\circ\text{C}$ , 上述两种材料的温度将达到  $405^\circ\text{C}$  和  $288^\circ\text{C}$ , 这与两种材料的晶化温度  $550^\circ\text{C}$  和  $412^\circ\text{C}$ , 仅差约  $100^\circ\text{C}$ , 因而焊接窗口非常小,必须精确的控制焊接参数,才能达到焊接并保持非晶态。从另一个角度看,虽然要精确保持条带间的间距非常困难,但众所周知,即使是抛光表面也会存在微米量级的粗糙度。利用这一点,只要将条带叠放在一起,其间就会形成天然的间距,而这个间距正好是条带厚度量级的,完全可以满足加速的需要。基于这样考虑,我们分别进行了单面多层焊接和对称多层焊接试验。

3.1 单面多层焊接实验

实验采用图 4 装置,由高爆速炸药推动飞板 A 打击支撑板 B,焊接在一起的 A、B 二板再以整体速度  $v_p$  打击非晶条带组。通过调整预支角  $\alpha$  来调节碰撞点移动速度  $v_c$ 。实验采用以 RDX 为主体的塑性炸药,爆速  $6.5\text{km}/\text{s}$ ; 非晶条带采用厚  $25\mu\text{m}$  的 2605S-2

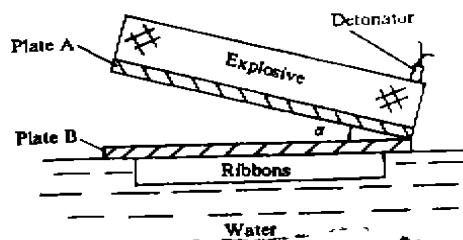


图 4 单面多层爆炸焊接装置

Fig. 4 The set-up of multilayer asymmetrical explosive welding

合金,将 20 层  $100\text{mm} \times 100\text{mm}$  的条带用铝箔制成的小袋包好,压紧排出空气后,密封并放置在 B 板下。整个装置放入水中爆炸,利用水冷却焊接好的非晶试件并吸收剩余动能。实验结果见表 1,其中飞板速度  $v_p$  是板 A、B 焊接后的整体速度,速度计算采用 Aziz 公式,由于无法准确确定非晶条带组的初始密度,表中条带间碰撞速度  $u_p$  是以初装密度为理论

密度的 30% 的计算值, 计算方法见文献[10]。

实验结果表明, 20 层非晶条带成功地焊接在一起, 并保持非晶态。但由于焊接后试件与水 and 地面的强烈冲击, 致使无法回收到完整的试件, 面积 100mm × 100mm 的组合, 常常只能回收到约 10mm × 10mm 的碎片, 最大试件也只有 30mm × 60mm。由于条带间有气泡存在, 试件局部有很小的烧伤和晶化点, 但大部分都保持完好的非晶组织。

表 1 2605S-2 条带单面多层爆炸焊接实验结果

Table 1 The experimental results of asymmetrical explosive welding of multilayer 2605S-2 ribbons

Sample number	$v_c / (\text{km/s})$	$v_p / (\text{km/s})$	$u_p / (\text{km/s})$
05261	4.308	0.790	0.726
11011	4.520	0.790	0.726
11100	4.000	0.790	0.726
05262	4.376	0.750	0.692

3.2 对称多层爆炸焊接实验

上述实验虽然很不成功, 但至少说明非晶条带间是能产生焊接的, 而且在焊接试件中很少发现剪切带。这说明上述实验的焊接参数是合适的, 只不过回收方式有问题, 致使焊接后的试件还具有很高的飞行速度, 以致于最后与地面碰撞使非晶试件碎裂, 为解决这个问题最简单实用的方法就是采用对称焊接。同时为解决上述实验中气泡存留的问题, 就必须进行抽真空处理。但是采用对称装置也存在着很大的问题, 如图 5 当条带焊接完毕时, 就会与芯片发生高速碰撞, 碰撞的动能将转化为热能并传给芯片和非晶试件。如前所述焊后的非晶试样与其晶化温度只相差 100℃, 如果在叠加上这部分热能, 必将导致试件发生晶化。因而必须设计一种能吸收这部分能量的芯片才能解决这个问题。为验证对称装置的可行性, 我们首先进行了轴对

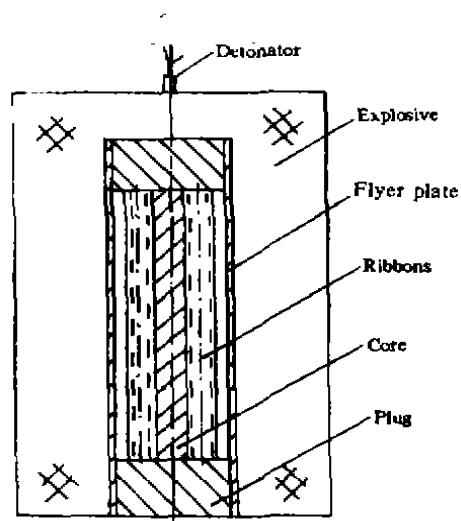


图 5 对称多层爆炸焊接装置

Fig. 5 The set-up of multilayer symmetrical explosive welding

称爆炸焊接实验, 将宽 100mm 的 2605S-2 条带直接卷在所设计的吸能芯棒上, 测得卷紧后的非晶条带初始密度约为理论密度的 60%, 然后装入飞管打击装置中经抽真空后进行爆炸焊接, 焊接后取下外径  $\phi 20\text{mm}$ , 内径  $\phi 10\text{mm}$ , 长度为 100~80mm 的管状件, 经磨削和

切割加工成如图1的试件。经金相和X光衍射检查证实焊接良好,并保持非晶态。依照轴对称的实验结果,重新设计了平面对称焊接装置(如图5)。实验采用2605S-2和2826两种非晶条带,带宽均为100mm,带厚约25 $\mu$ m。将条带直接卷于60mm宽的吸能芯片上,卷紧后的密度约为理论密度的60%。然后放入已制好的方盒中焊接密封,并抽出盒内的空气,即可进行爆炸焊接。炸药使用硝铵与黑索金的混合物,经调整到一定比例,使爆速稳定在4.600~4.800km/s之间。实验结果见表2,金相照片和X光衍射结果见图6至图9,它

表2 对称多层爆炸焊接结果

Table 2 The experimental results of multilayer symmetrical explosive welding of amorphous ribbons

No.	Ribbon	$v_c$ /(km/s)	$v_p$ /(km/s)	$w_p$ /(km/s)	Experimental result
04140	2605S-2	4.484	0.577	0.490	unwelding
10170	2605S-2	4.800 ~4.600	0.898	0.720	welding, amorphous
10241	2605S-2	4.800 ~4.600	0.898	0.720	welding, amorphous
11052	2605S-2	4.800 ~4.600	0.892	0.720	welding, amorphous
11100	2826	4830	0.780	0.630	welding, amorphous

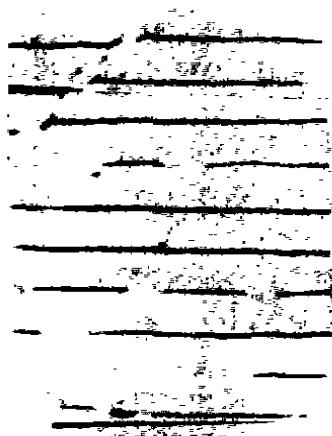
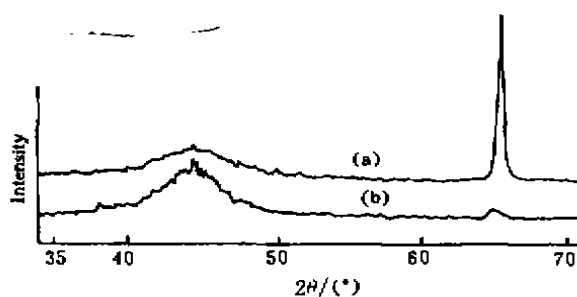
图6 2605S-2 试样金相照片( $\times 400$ )Fig. 6 Optical metallographic view of welded 2605S-2 ribbons ( $\times 400$ )

图7 2605S-2 试样X光衍射结果

(a—原始条带;b—焊后试样)

Fig. 7 X-ray diffraction patterns of 2605S-2 samples (a. Original ribbon; b. Welded sample)

们显示条带焊接良好,并保持非晶态,在金相照片上没有发现剪切断裂,从图7中2605S-2合金的焊接件与原始条带的X光衍射结果可见,原始条带在 $2\theta$ (衍射角 $\theta$ )为 $65.7^\circ$ 的 $\alpha$

铁峰在焊接后的试件上已几乎观察不出来。这说明原始条带的晶化区是在条带表面的,而且在爆炸焊接过程中条带表面已发生熔化,然后热量迅速导入基体内部形成  $10^5 \sim 10^6 \text{K/s}$  的快淬,使之形成新的非晶态。对 11051 号和 10170 号试件用 20% 浓度的硝酸、盐酸混合液经数小时浸泡发现,11051 号试件中条带已发生断裂,约每平方厘米一条裂纹,但裂纹只存在一层条带中,并没有贯通到其他条带层中,10170 号试件的浸蚀结果明显好于前者。对 10170 号和 10241 号试件采用阿基米德原理测定试件密度,分别为理论密度的 97.8% 和 98.3%。

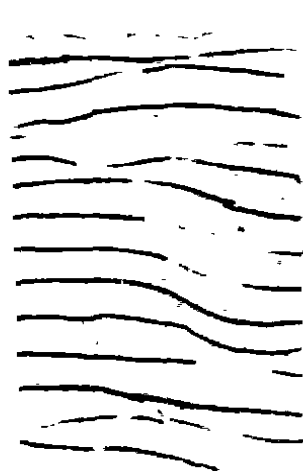


图 8 2826 试样金相照片(100)  
Fig. 8 Optical metallographic view of welded 2826 ribbons ( $\times 400$ )

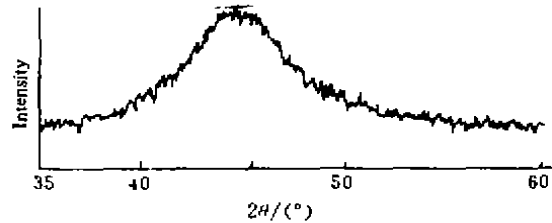


图 9 2826 合金焊接试样 X 光衍射图谱  
Fig. 9 X-ray diffraction pattern of welded 2826 sample

#### 4 结 论

(1) 单层非晶条带焊接说明,在驻点移动速度 ( $v_c \approx 1800 \text{m/s}$ ) 较低时,也即驻点应变率较低时,非晶合金的塑性流动与静态结果一致,呈不均匀性,以形成  $45^\circ$  滑移线,最终发展为剪切断裂。

(2) 由于采用了高碰撞点移动速度 ( $v_c \geq 4000 \text{m/s}$ ),提高了驻点应变率,从大量的多层焊件金相结果来看,试件中的滑移线很少,应变基本呈均匀性,塑性流动已达到玻璃态的粘滞流动段。

(3) 由原始部分晶化的非晶条带焊后结果(图 7)说明:第一,原始条带的晶化部分在条带表面;第二,焊接时条带表面熔化并速冷成非晶,这说明界面冷却速度可达  $10^6 \text{K/s}$  量级。

(4) 爆炸多层非晶箔带的焊接下限与普通金属焊接下限无异,均可用式(1)估算。多层非晶的焊接上限可以简单地认为,爆炸后材料温升必须低于晶化温度,可用式(2)估算。

总之,利用爆炸焊接来制造大尺寸非晶合金板状和管状块件是可行的。目前已制作出  $70 \text{mm} \times 50 \text{mm}$ ,厚度  $0.5 \sim 3 \text{mm}$  的 2605S-2 和 2826 非晶合金板状件及 2605S-2 非晶合金管件(如图 1),但仍然存在相当大的问题。例如,现在虽可制作出无宏观裂纹的非晶试样,但微观裂纹却一直无法消除,因而还有待于进一步研究。

## 参 考 文 献

- 1 王一禾,杨膺善主编.非晶态合金.北京:冶金工业出版社,1989.357
- 2 卢博斯基 F E 主编.非晶态金属合金.柯威等译.北京:冶金工业出版社,1989.1
- 3 卢博斯基 F E 主编.非晶态金属合金.柯威等译.北京:冶金工业出版社,1989.683
- 4 Prümer R. Explosive Welding of Metallic Glasses onto Metal. In: 2nd Meeting on Explosive Working of Materials, USSR, 1981
- 5 Viguera D J, Inal O T, Sgeckel A. Explosive Welding of an Amorphous Ribbon to a Mild Steel Substrate. In: Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena, USA, 1989
- 6 Zhang Kai, Li Xiaojie. Study on the Multilayer Explosive Cladding of Thin Amorphous Foil. In: 3rd International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, France, 1991
- 7 张 凯, 李晓杰. 大连理工大学学报, 1992, (3), 282
- 8 张登霞, 李国豪, 周之洪, 等. 力学学报, 1984, 15(1): 73~80
- 9 邵丙璜, 张 凯著. 爆炸焊接理论及其工业应用. 大连: 大连工学院出版社, 1987. 11
- 10 李晓杰, 等. 多层非晶薄膜爆炸焊接原理. 高压物理学报, 1993, 7(3): 214

## EXPLOSIVE WELDING OF AMORPHOUS ALLOY RIBBONS

Li Xiaojie, Zhang Kai, Yang Wenbin, Xi Jinyi, Sun Ming

(Research Institute of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116023)

**ABSTRACT** Amorphous alloys or metallic glass belongs to a novel class of rapidly solidified alloys, well known for their amorphous structures and excellent properties. Usually, it can only take a very limited number of shapes; thin ribbon, wires or powders. This limitation becomes a major barrier against the spread of the alloys over a wide industrial field. For this reason, a means is necessary to obtain block amorphous alloy. In this paper, the feasibility of bonding amorphous ribbons by explosive means is demonstrated. First, a single ribbon was welded onto a mild steel plate. Second, the cladding of 20-200 layers of  $Fe_{78}B_{13}Si_6$  and  $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$  amorphous ribbons, both of them are 25  $\mu m$  thick and 10cm wide, were made into tube samples and plate samples (Fig. 1). Optical microscope observation and X-ray diffraction analysis were used to check these samples. Results show that the amorphous structure of the alloys still holds after being explosively welded and the welding quality is excellent. Some ribbons initially having crystalline surfaces were also welded, we found that their originally existed  $\alpha$ -Fe peak disappeared after the explosive welding. This reveals that fusion and rapid cooling occurred at the interfaces between the ribbons during the processing. Finally, it suggests that the deformation of amorphous alloy at lower strain rate is similar to that at commonly used strain rate, but at high strain rate the alloy will show a viscous deformation.

**KEY WORDS** amorphous alloy, explosive welding.