文章编号:1000-5773(2008)04-0364-06

多层非晶薄带爆炸焊接实验设计*

付艳恕,孙宇新,王晓萍,张晓立

(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室,江苏南京 210094)

摘要:非晶材料的高强度及其对温度的敏感性,导致爆炸复合制备非晶块体时下限较大而上限较小,使得焊接窗口较窄。通过对非晶薄带涂铜以降低表面硬度,分析表明,其不仅能降低下限,同时使高速撞击产生的热量主要集中在涂层上,减小非晶薄带的受热影响区域。再利用损伤力学的思想,在装置设计时采用增设缺陷的方法,以削弱到达焊接界面的反射拉伸波强度,提高焊接上限。降低的下限和提高的上限能使焊接窗口有效地扩大,从而使爆炸复合制备非晶块体易于实现。

关键词:爆炸复合;非晶薄带;温度场;拉伸波

中图分类号:TG456.6 **文献标识码**:A

1 引 言

非晶态金属合金具有“冻结的液态结构”,是长程原子无序而短程有序的金属合金,不存在影响合金性能的空位、位错、层错、晶界等缺陷[1],具有一系列优异的力学、物理性能,爆炸层合非晶块体材料具有高的防护能力,使其可能成为新一代关键防护材料之一。国内外均开展了非晶合金的爆炸焊接研究,日本的 Y. Kawamura 等[2]人研究过非晶的爆炸焊接,国内大连理工大学李晓杰、张凯等人也开展过非晶薄带爆炸焊接制备三维块体非晶材料。然而由于非晶合金维氏硬度大于晶态合金,以致其爆炸焊接下限相比于晶态结构材料要高,而其爆炸焊接上限又受到冲击状态下晶化温度的制约,相比于晶态材料过熔上限要低,从而导致非晶合金爆炸焊接窗口狭窄,直接施焊对参数的选择及控制要求过高,难于实现[3-4]。

针对爆炸复合非晶块体材料制备所面临的困难,本实验采用对非晶薄带进行涂层,以降低表面硬度从而降低爆炸焊接下限,并改善热影响区域。然而通常涂层与基体的表面附着强度较低,其能抵抗的拉伸波强度较小,导致爆炸焊接上限有所降低。上限、下限同时降低,使爆炸焊接窗口扩大效果不明显甚至更狭小,这是实验设计所不希望出现的。在设计中,结合损伤力学的理论,在实验装置位于薄带下面增设缓冲板,使结构呈缺陷状态以加速拉伸波衰减,实现降低到达焊接界面拉伸波强度的目的,从而克服涂层的附着强度对爆炸焊接上限的影响,使焊接窗口得以扩大。

另外,非晶薄带的成功爆炸复合,可为其它高性能脆性材料爆炸加工操作提供借鉴,例如陶瓷与金属的爆炸复合[5],因而本研究具有指导实验设计及工业生产的实际意义。

2 实验装置

在设计中,爆炸焊接装置如图 1 所示,图示中的“Foils”即为涂铜后的非晶薄带,薄带下面垫有 3 块钢板,其中两块较薄的即为本次实验较之于文献[6]方案所特意增设的缓冲板,厚度为 100 mm,用以加速反射拉伸波的衰减;较厚的为基板,其厚度为 150 mm,组合后具有较大的抗挠刚度,放置于混凝土基

* **收稿日期**:2007-11-09;**修回日期**:2008-02-28

基金项目:国家部委基金(A2620061131)

作者简介:付艳恕(1982—),男,博士研究生,主要从事高能率物理及终点弹道研究. E-mail:yshfu1982@hotmail.com

通讯作者:孙宇新(1970—),男,博士,副教授,主要从事爆炸力学研究. E-mail:yxsun@mail.njust.edu.cn

础上能有效地减小激波过后的弯曲,从而抑制非晶薄带焊接件的变形(由于非晶材料具有易脆特性,剧烈的变形可能导致碎裂),以使焊接件保持完整。

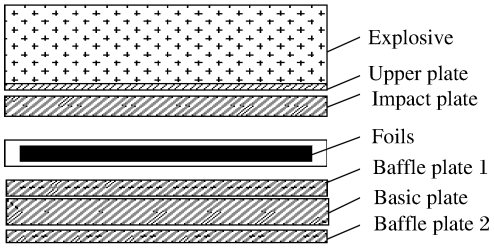


图 1　非晶薄带爆炸焊接装置

Fig. 1　The set-up of explosive welding

3　涂层对爆炸焊接的改善效果

3.1　基本关系式的确定

为了得到冲击波后块体的状态方程,作如下假设[7-8]:

(1) 冲击波后焊接层间没有间隙;

(2) 冲击波后,压力和冲击温升在薄带内部瞬间实现均匀分布;

(3) 材料发生塑性变形但不可压缩,且没有冲击相变。

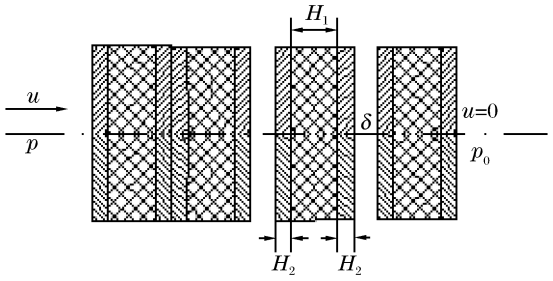


图 2　多层涂层薄带焊接动力学模型

Fig. 2　Dynamic model of explosive welding of plating multi-layer foils

设有一组多层薄带组合,非晶薄带厚为 H_1,正反两面镀层厚均为 H_2,间隙平均处理为 δ,ρ_1、ρ_2 分别为非晶膜的初始密度和镀层金属的密度。如图 2 所示,受到压力 p 的推动,左端已经焊接部分以恒定速度 u 向右运动,每碰上一块箔后,焊好部分的内能变化

$$\Delta E=(H_1\rho_1+2H_2\rho_2)u^2/2 \tag{1}$$

多层箔的爆炸焊接下限可用速度 u 及材料维氏硬度 H_v 表示成如下公式

$$u_{\min}=K\sqrt{H_v/\rho_2} \tag{2}$$

式中 K 为 0.6～1.2 的常数。

由 $\mathrm{d}(\Delta E)/\mathrm{d}u=(H_1\rho_1+2H_2\rho_2)u>0$ 知,涂层后不仅能降低爆炸焊接下限,以接近下限的速度相撞击也能减小碰撞引起的内能变化值,从而使得非晶薄带的受热状况得以改善。

对厚度为 $H_1=30\ \mu\mathrm{m}$、$H_2=10\ \mu\mathrm{m}$ 的 $Fe_{78}B_{13}Si_9$ 非晶涂铜及未涂条件下爆炸焊接温度场分布的系列分析,材料参数如表 1 所示[3,6,9-10],k、ρ、c_p 分别为热传导系数、密度、平均等压比热,下标 1、2 分别对应于非晶基体和涂铜层。$Fe_{78}B_{13}Si_9$ 的相关数据不足,常压熔点以 $Fe_{79}Si_{10}B_{11}$ 的 T_m 代替,k_1 取自铁的相关数据。

表 1　材料参数

Table 1　Parameters of materials

ρ_1 /(kg/m³)	c_{p1} /[J/(kg·K)]	T_{m1} /(K)	H_{v1} /(MPa)	k_1 /[W/(m·K)]	ρ_2 /(kg/m³)	c_{p2} /[J/(kg·K)]	T_{m2} /(K)	H_{v2} /(MPa)	k_2 /[W/(m·K)]
7 180	590	1 419	8 920	73	8 930	383	1 356	833	386

由文献[11]可知熔化层厚度计算式可简化为

$$\frac{L}{2}<\frac{u^2}{4(T_{m2}-T_H)c_{p2}} \tag{3}$$

3.2　数值分析

根据热传导的傅里叶定律及能量守恒建立一维热传导微分方程

$$\frac{\partial T}{\partial t}=a\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\qquad\left(t>0,0\leqslant x\leqslant\frac{H}{2}\right) \tag{4}$$

式中:T 为温度,t 为时间,$a=k/c_p\rho$。

初值条件根据冲击温升分析及熔化层厚度确定,具有如下关系式

$$T(x,0)=T_{\mathrm{m}} \qquad x\in[0,L/2] \tag{5}$$

$$T(x,0)=T_0 \qquad x\in[L/2,H/2] \tag{6}$$

边值条件根据温度场的对称性确定,其关系式满足

$$\partial T/\partial x=0 \qquad x=0 \tag{7}$$

$$\partial T/\partial x=0 \qquad x=H/2 \tag{8}$$

采用二层显示差分格式对热传导方程(4)进行离散,写成便于计算的形式

$$T_j^{n+1}=T_j^n+f(T_{j+1}^n-2T_j^n+T_{j-1}^n) \tag{9}$$

式中:$f=a\tau/h^2$,为了保证差分方程的收敛及稳定,要求 $f\leqslant 1/2$。初值条件的离散

$$T_j^0=T_{\mathrm{m}} \qquad j=1,2,\cdots,i \tag{10}$$

$$T_j^0=T_0 \qquad j=i,i+1,i+2,\cdots,P \tag{11}$$

式中:$i=L/2h$,$P=H/2h$。

边值条件离散采用虚设节点方法[10],左边界条件(7)式可用中心差商近似

$$(T_2^n-T_{-1}^n)/2h=0 \tag{12}$$

同时,虚设了 $j=-1$ 节点后,原 $j=1$ 的节点变成了内节点,利用(9)式得

$$T_1^{n+1}=T_1^n+f(T_2^n-2T_1^n+T_{-1}^n) \tag{13}$$

将(12)式代入(13)式即可得

$$T_1^{n+1}=(1-2f)T_1^n+2fT_2^n \tag{14}$$

同样处理方法可得右边界条件的离散方程式

$$T_P^{n+1}=(1-2f)T_P^n+2fT_{P-1}^n \tag{15}$$

利用所得差分方程计算铁基非晶涂铜复合与直接复合温度场分布曲线。取 $T_0=298$ K,$a=1.72\times10^{-5}$ m^2/s;时间、空间步长分别为 $\tau=1.0$ ns、$h=0.25$ μm;层间最小碰撞速度由(2)式计算得到 $u_1=670$ m/s,$u_2=250$ m/s。$Fe_{78}B_{13}Si_9$ 非晶涂铜及未涂铜的爆炸焊接,在经过简化后,其差别仅在于前者的 $H_2=0$ μm、$u=u_1$、$T_{\mathrm{m}}=T_{\mathrm{m1}}$,而后者的 $H_2=10$ μm、$u=u_2$、$T_{\mathrm{m}}=T_{\mathrm{m2}}$。计算的两种爆炸焊接情况的温度分布曲线如图 3 所示(图 3(a)、图 3(b)两图中网格尺寸相同,只是图 3(b)中涂铜后其单层厚度增加导致网格数增加)。

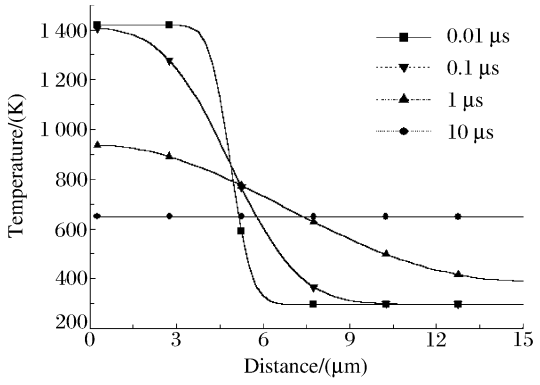


图 3(a) 铁基非晶爆炸焊接温度分布曲线

Fig. 3(a) The curve of temperature distribution of uncoated foil

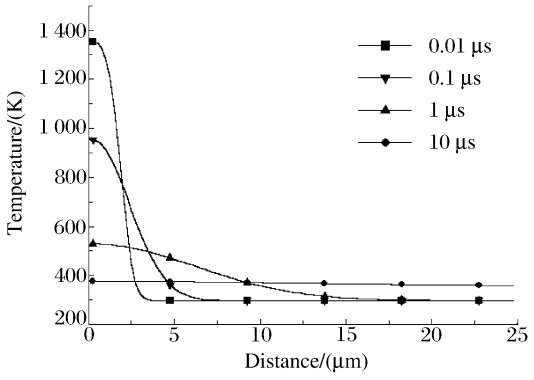


图 3(b) 涂铜铁基非晶爆炸焊接温度分布

Fig. 3(b) The curve of temperature distribution of Cu-coated foil

图 3(a)为非晶薄带爆炸焊接温度场分布,图 3(b)是非晶薄带涂铜爆炸焊接温度场分布。通过对比可发现,由于涂铜层的硬度低于非晶薄带,从而降低了爆炸焊接下限,减小了碰撞内能变化,因界面撞击能引起的热影响区域减小(图 3(a)中近 20 个网格区域温度高于 800 K,热影响率达 1/3;而图 3(b)中近 10 个网格区域温度高于 800 K,热影响率约 1/10);10 μs 后二者温度皆基本均匀,冷却速率均高达 10^7 K/s,但图 3(b)中平均温度(368 K)比图 3(a)中平均温度(649 K)低 281 K;另外,图 3(b)中撞击发生在涂层界面,且瞬时高温熔化及撞击能主要集中在涂层(厚达 40 个网格)上,减弱了温度对非晶的直

接作用,从而实现更好地保持材料的非晶态结构。

4　缓冲板的添加

爆炸复合中板间发生碰撞时,将分别向飞板和基板中传入压力脉冲波。上、下两行脉冲波到达自由界面时,将分别反射一簇中心卸载波。两簇卸载波的相互作用使得样品在一定区域中形成拉伸区,当拉伸应力幅值足够高时,能将焊接界面撕裂[12]。

在本设计中,结合损伤力学的理论,在薄带下面特设了两块缓冲板。在实验中最下面 3 块板材之间没有预留间隙,因而撞击后不会发生焊接。按损伤力学[13]中定义的连续度 ψ

$$\psi=\widetilde{A}/A \tag{16}$$

式中:A 为无损状态时的横截面面积,损伤后的有效承载面积减小为 $\widetilde{A}$。连续度的物理意义为有效承载面积与无损状态的横截面面积之比。连续度是一个无量纲标量场变量,$\psi=1$ 对应于完全没有缺陷的理想状态,$\psi=0$ 对应于完全破坏的没有任何承载能力的状态。未发生焊接的界面认为是完全不连续的,对应于连续度为零的状态。当其承受加载波时认为没有损伤发展,承受卸载波时由于没有承载能力而被撕开,出现新的自由面,使卸载波强度呈现出较大幅值的衰减,将出现如图 4 所示的应力剖面状态。此即有意将装置设计为缺陷状态,以削弱到达焊接界面的反射拉伸波强度。

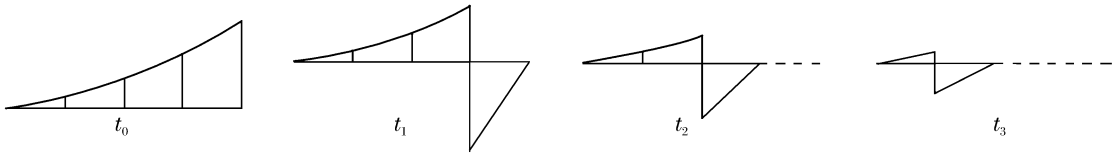


图 4　不同时刻焊接体中应力剖面图

Fig. 4　The interior stress during welding buck at different times

5　反射拉伸波削弱实例

通常金属爆炸焊接上限是根据“过熔”理论进行估算,受反射拉伸波强度限制,认为当反射拉伸波到达焊接界面时,为了确保界面不被拉开,其即时温度值应低于熔点。在本实验设计中,引入温升热软化模型以对焊接界面强度的估算更明确。即假定材料的屈服应力随温升的变化满足如下的热软化方程[8]

$$Y=Y_{s1}[1-(T-T_0)/(T_m-T_0)] \tag{17}$$

式中:Y_{s1} 表示常温 T_0 条件下的焊接界面的屈服强度,Y 表示温升为 T 时界面屈服强度的表观量,T_m 是材料的熔化温度。

另外,假设反射拉伸波强度为 σ,如果界面屈服强度 $Y\geqslant\sigma$,则认为焊接界面能保持完好,设计合理。为了获得添加缓冲板使装置呈现为缺陷状态后对拉伸波衰减的影响,本研究利用复合函数高阶导数的级数展开法[14]及冲击波在钢中传播应力峰值的衰减规律[15],对图 1 所示装置进行应力流分析,得出随应力波传播过程中装置构件中的应力衰减状况,从而分析得到反射拉伸波到达焊接体时的强度受结构缺陷的影响曲线,如图 5 所示。

设材料具有如下形式的递增应力应变关系[16]

$$p=\begin{cases}E\varepsilon & \varepsilon\leqslant\varepsilon_y\\ p_y+a(\varepsilon-\varepsilon_y)/[b-(\varepsilon-\varepsilon_y)] & \varepsilon\geqslant\varepsilon_y\end{cases} \tag{18}$$

式中:$E=1.257\times10^2$ GPa,$a=-1.279$ GPa,$b=-0.8886$,$\rho=7.8\times10^3$ kg/m^3,$p=1.76$ GPa。

并设爆轰产物作用于焊接件界面的应力时程曲线为

$$q(t)=q_0\,\mathrm{e}^{-t/\tau} \tag{19}$$

式中:$q_0=4$ GPa(涂铜层的最小可焊应力 3.312 GPa[9]),$\tau=600$ μs(t 的单位亦为 μs)。

再有钢介质中冲击波峰值压力随传播距离具有如下的指数衰减特征[15]

$$p(x)=p_{\mathrm{m}}\mathrm{e}^{-\alpha x} \tag{20}$$

式中：p_{m} 为炸药接触爆炸的冲击波峰值压力，衰减系数 $\alpha=1.432$，x 为冲击波传播距离(mm)。

由图 5 中应力流曲线可知，应力波随传播过程中峰值的衰减而衰减，当波峰到达反射界面时，卸载波开始以弹性波波速传入构件内部，由于弹性波波速远高于塑性波波速，在卸载开始后忽略塑性前驱波在传播过程中的衰减。

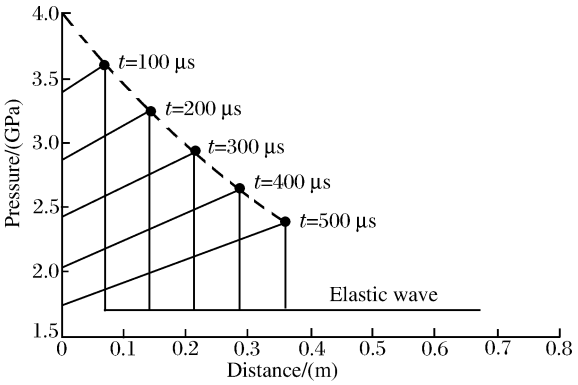


图 5 冲击波随传播距离的衰减曲线

Fig. 5 Shock pressure attenuation with wave propagation

由冲击动力学理论可知，反射拉伸波在冲击波峰值后面时，结构呈拉应力状态，随着传播的进行，由于压应力强度的减弱，使得构件呈现出逐渐增强的拉应力状态。当拉伸波到达缺陷界面时，可视为初始拉伸结束，第二次拉伸波以缺陷界面压应力幅值传入构件内部。由应力流曲线可知，缺陷界面的压应力值小于初始反射开始时的冲击波峰值，因而第二次拉伸波的强度弱于初始拉伸波强度。如果装置中设置多个缺陷界面，则拉伸波会经过多次削弱，从而弱化到达焊接界面的拉伸波强度。以图 5 为例，若在 0.15 m 处设置一个缺陷界面，便能使反射拉伸波强度比未存在缺陷状态时削弱约 0.8 GPa(第 5 个时刻的应力峰值与 0.15 m 处对应的应力值之差)，从而由(17)式可知，允许的界面温度有所提高，也即碰撞上限获得提高。

6 结 论

(1) 由于涂铜层的维氏硬度小于铁基非晶，因此涂铜后的爆炸焊接下限相比铁基非晶的爆炸焊接有较大的下降，从而使得热影响区域减小，平均温度降低 281 K。在同样的晶化温度下，相比于未涂层焊接，减小爆炸焊接下限。

(2) 在设计中利用损伤力学概念对实验装置进行有意的缺陷设置，从而削弱到达焊接界面的反射拉伸波强度，保护结合界面的完好，有利于提高爆炸焊接上限。

(3) 通过对非晶表面涂层可以降低复合下限，而利用损伤力学中缺陷的设置思想可以提高复合上限，本设计将两种方法结合使用从而使爆炸焊接窗口扩大，降低复合难度。

References:

[1] Guo Y C, Wang Z X. Amorphous Physics [M]. Beijing: Science Press, 1984: 280-352. (in Chinese)
郭贻诚，王震西. 非晶态物理学 [M]. 北京：科学出版社，1984：280-352.

[2] Kawamura Y. Liquid Phase and Supercooled Liquid Phase Welding of Bulk Metallic Glasses [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 375-377: 112-119.

[3] Li X J, Zhang K. The Principle of the Explosive Welding for Multilayer Amorphous Foils [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1993, 7(3): 214-219. (in Chinese)
李晓杰，张 凯. 多层非晶薄膜爆炸焊接原理 [J]. 高压物理学报，1993，7(3)：214-219.

[4] Li X J, Zhang K, Yang W B, et al. Explosive Welding of Amorphous Alloy Ribbons [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1993, 7(4): 265-271. (in Chinese)
李晓杰，张 凯，杨文彬，等. 非晶条带的爆炸焊接 [J]. 高压物理学报，1993，7(4)：265-271.

[5] Hokamoto K, Fujita M, Shimokawa H, et al. A New Method for Explosive Welding of Al/ZrO_2 Joint Using Regulated Underwater Shock Wave [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 85: 175-179.

[6] Yan H H. Research of Explosive Welding for Amorphous Alloys Ribbons [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003: 132. (in Chinese)
闫鸿浩. 非晶态合金薄带爆炸焊接研究 [D]. 大连：大连理工大学，2003：132.

[7] Djiken D K,de Hosson J Th M. Thermodynamic Model of the Compaction of Powder Materials by Shock Waves [J]. J Appl Phys,1994,75(1):203-209.
[8] Djiken D K,de Hosson J Th M. Shock Wave Equation of State of Powder Material [J]. J Appl Phys,1994,75(2):809-813.
[9] Li X J,Yang W B,Xi J Y,et al. The Lower Limit of Explosive Welding Parameter Window for Binetal [J]. Explosive Materials,1999,28(3):22-26. (in Chinese)
李晓杰,杨文斌,奚进一,等. 双金属爆炸焊接下限 [J]. 爆破器材,1999,28(3):22-26.
[10] Yu C M. Heat Conduction and Its Numercial Analysis [M]. Beijing:Tsinghua University Press,1982:420-473. (in Chinese)
俞昌铭. 热传导及其数值分析 [M]. 北京:清华大学出版社,1982:420-473.
[11] Sun Y X,Fu Y S,Wang X P. Influence of Coating Materials on Temperature of Amorphous Foils during Explosive Welding [J]. Explosion and Shock Waves,2008,28(4):350-354. (in Chinese)
孙宇新,付艳恕,王晓萍. 表面涂层对非晶薄带爆炸焊接温度影响探讨 [J]. 爆炸与冲击,2008,28(4):350-354.
[12] Yu Y Y,Chen D N,Tan H,et al. Study on Spallation in LY12 AL Caused by Triangular Waves Using Plate-Impact Tests [J]. Acta Mechanica Solida Sinica,2006,27(3):261-267. (in Chinese)
俞宇颖,陈大年,谭　华,等. 三角形波致 LY12 铝层裂的平板冲击实验研究 [J]. 固体力学学报,2006,27(3):261-267.
[13] Yu S W,Feng X Q. Damage Mechanics [M]. Beijing:Tsinghua University Press,1997:10. (in Chinese)
余寿文,冯西桥. 损伤力学 [M]. 北京:清华大学出版社,1997:10.
[14] Li Y C,Wei Y,Ding Q C. A Simple and Convenient Solution for the Attenuation of an Elastic-Plastic Shock Wave [J]. Explosion and Shock Waves,1988,8(3):193. (in Chinese)
李永池,魏　勇,丁启财. 弹塑性激波衰减规律的一种简便解法 [J]. 爆炸与冲击,1988,8(3):193.
[15] Wang H F,Feng S S. An Approximate Theoretical Model for the Attenuation of Shock Pressure in Solid Materials [J]. Acta Armamentar,1996,17(1):79-81. (in Chinese)
王海福,冯顺山. 密实介质中冲击波衰减特性的近似计算 [J]. 兵工学报,1996,17(1):79-81.
[16] Cristescu N. Dynamic Plasticity [M]. Amsterdam:North-Holland Publ Co, 1967.

The Experiment Design for Explosive Welding of Multilayer Amorphous Foils

FU Yan-Shu,SUN Yu-Xin,WANG Xiao-Ping,ZHANG Xiao-Li

(*National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *China*)

Abstract: Because of the high strength and temperature sensitivity of the metal glass, its lower limit is higher and upper limit is lower than that of crystal metal when bulk metal glass was prepared by amorphous foils explosive welding. In this paper, the surface of foils was coated by copper to decrease surface hardness. Results showed that this method can reduce the lower limit, concentrate the energy of plastic collision mainly on coating layer and remarkably minimize foils heat effect zone. Besides, during the experiment designing, ideas of damage mechanics were used to set defects to accelerate the attenuation of tensile waves, so the tensile strength at welding interfaces can be reduced, in combination with the model of thermo-softening at welding interfaces. The upper limit was obviously increased. Both of upper limit and lower limit were improved, and the welding window was effectively expended, so the purpose of preparing bulk metal glass by explosive welding amorphous foils would be easier to implement.

Key words: explosive welding; amorphous foils; temperature field; tensile wave