



爆炸焊接动态参数的简易测量系统

杨明¹, 马宏昊^{1,2}, 沈兆武¹, 黄泽春¹, 田启超¹

(1. 中国科学技术大学 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要: 为获得爆炸焊接结合区的动态参数, 使用 PVDF 压电薄膜和等离子探针设计一种简易的测量系统。以 304 不锈钢板和 Q235 钢板分别作为复板和基板进行爆炸焊接试验和动态参数测量试验, 并对动态参数进行理论计算。结果表明, 该测量系统能较为准确地获得炸药爆速、碰撞点移动速度、碰撞速度等动态参数, 炸药爆速和碰撞点移动速度一致性良好。格尼公式所预测的碰撞速度较实验值明显偏大, 而考虑加速历史所获得的碰撞速度与实验碰撞速度吻合良好。此外, 金相分析结果表明焊接界面可实现没有缺陷的高质量波形结合, 体现所选参数的合理性。

关键词: 爆炸焊接; 动态参数; 测量系统; 理论计算

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2018)10-0055-05

A simple measurement system for dynamic parameters of explosive welding

YANG Ming¹, MA Honghao^{1,2}, SHEN Zhaowu¹, HUANG Zechun¹, TIAN Qichao¹

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to obtain the dynamic parameters of explosive welding, a simple measurement system was designed by using PVDF piezoelectric film and plasma probe. Using 304 stainless steel and Q235 steel as flyer plate and base plate respectively, explosive welding and dynamic parameter measurement tests were carried out, and the dynamic parameters were calculated theoretically. The results show that the measurement system can get dynamic parameters such as detonation velocity, collision point velocity, impact velocity, et al. The detonation velocity and collision point velocity were consistent in this tests, and the impact velocity predicted by Gurney formulas was significantly larger than the measured one. However the impact velocity for considering acceleration was in good agree with the experimental results. In addition, metallographic analysis results show that excellent wave bonding interfaces were obtained without any defects, which indicated that the parameters were suitable for explosive welding.

Keywords: explosive welding; dynamic parameter; measurement system; theoretical calculation

收稿日期: 2018-06-17; 收到修改稿日期: 2018-07-22

基金项目: 国家自然科学基金资助(51674229, 51374189); 中国科学技术大学重要方向项目培育基金(WK248000002)

作者简介: 杨明(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事爆炸与冲击, 工程防护等方面研究。

通信作者: 马宏昊(1980-), 男, 副教授, 主要从事爆炸与冲击, 冲击防护等研究。

0 引言

爆炸焊接是利用炸药爆炸产生的强大冲击波,驱动复层金属与基层金属高速斜碰撞,从而使待焊接面产生射流、熔化并达到冶金结合的一种技术^[1]。作为生产金属复合材料的一种特殊工艺,爆炸焊接已实现了300多种金属材料之间的焊接,其产品广泛应用于航空、航天、石油、化工、制盐、制碱、制药、造纸、食品、五金等工业领域^[2-3]。爆炸焊接碰撞过程中动态参数决定了最终的焊接质量,然而由于爆炸的瞬时性和复杂性,通过实验手段获得准确的结合区动态参数具有很大的难度。黄风雷等^[4]利用高速摄影机设计了一套实验装置和闪光灯充电电路,实验测量了滑移爆轰作用下,爆炸焊接复板的运动速度,结果表明该方法有效实用。杨文彬等^[5]利用“电阻丝—探针”法测得了飞板在等速区和准等速区的碰撞角、碰撞速度及滑移爆轰速度,并提出用连续电阻丝测量飞板飞行姿态。Held^[6]利用倾斜电阻丝和爆轰图像仪对爆炸焊接动态参数进行了测量,结果表明该方法具有较高的测量精度。

上述测量手段虽然能较为准确地获得爆炸焊接过程中的动态参数,但操作复杂且精度有限。为此本文利用PVDF压电薄膜和等离子探针设计了一套简易的测量系统。实验测量了SUS304不锈钢板和Q235钢板的爆炸焊接动态参数,并运用格尼公式对实验结果进行了理论分析。

1 实验部分

1.1 实验材料

实验所用炸药为蜂窝铝结构乳化炸药,如图1所示,其中蜂窝铝的铝箔壁厚为60 μm,正六边形胞元的边长为8 mm,高度为10 mm。乳化炸药由15%玻璃微球和85%乳胶基质组成,其中乳胶基质

组分见表1。将乳化炸药均匀填充到蜂窝铝结构的空腔中即可得到蜂窝铝结构乳化炸药,其密度为0.8 g/cm³。蜂窝铝加入后,乳化炸药高度和蜂窝铝高度保持一致,可以精准地控制装药高度和装药密度的均匀性,从而改善装药质量,提高爆轰稳定性。并且乳化炸药和蜂窝铝胶黏为一个整体,其流动性被蜂窝铝边界所限制,力学性能明显提高。

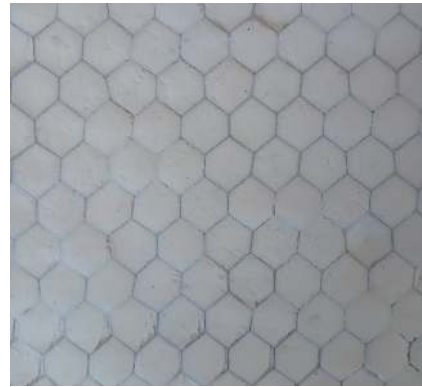


图1 蜂窝铝结构乳化炸药

表1 乳胶基质组分

组分	质量分数	组分	质量分数
NH ₄ NO ₃	75%	C ₁₈ H ₃₈	4%
NaNO ₃	10%	C ₂₄ H ₄₄ O ₆	2%
H ₂ O	8%	C ₁₂ H ₂₆	1%

实验基板为Q235钢,尺寸为20 mm×150 mm×300 mm;复板为304不锈钢,尺寸为2 mm×150 mm×300 mm,其物理和机械性能参数如表2所示。表中 ρ 、HV、 c 、 σ_b 、 T_m 、 K 和 c_p 分别为材料的密度、维氏硬度、体积声速、抗拉强度、熔化温度、导热系数和热容。

表2 基板和复板的材料特性参数

材料	ρ /(kg·m ⁻³)	HV/MPa	c /(m·s ⁻¹)	σ_b /MPa	T_m /°C	K /[erg·(cm ⁻¹ ·°C ⁻¹)]	c_p /[erg·(cm ⁻¹ ·°C ⁻¹)]
Q235	7 850	1 300	6 000	405	1 493	3.8×10 ⁶	5×10 ⁶
SUS304	7 930	1 700	4 500	560	1 454	2.2×10 ⁶	5×10 ⁶

1.2 实验方法

实验共分2组,其中第1组实验在炸药上端设有与复板一致的覆盖板,如图2所示,而第2组采用传统的爆炸焊接装置(见图3)作为对比实验。

动态参数的测量原理如图4所示,其中爆轰速度采用测时法进行测量,共使用4个等离子探针,

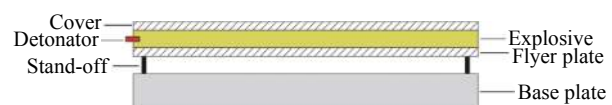


图2 设有覆盖板的爆炸焊接装置示意图

相邻两探针间的距离为40 mm,并通过2BS-110爆速仪记录相邻探针间的时间间隔,实验结果取各段



图 3 传统爆炸焊接装置示意图

平均爆速。结合区动态参数由 3 个相同的 PVDF 压电传感器进行测量, 其相对位置如图 4 所示。炸药引爆后爆轰波快速向前运动, 产生的冲击波和爆轰产物持续推动复板向下运动, 在复板与基板的碰撞过程中传感器 A、B、C 被依次触发, 触发时间由示波器 (Tektronix MDO4104C, 时间分辨率为 1 ns) 记录下来。因此碰撞点移动速度 v_c 可以表达为

$$v_c = \frac{s_1 + s_2}{t_1 + t_2} \quad (1)$$

其中 s_1 是传感器 A 和 B 之间的水平距离, s_2 是传感器 B 和 C 之间的水平距离, t_1 是传感器 A 和 B 之间的触发时间间隔, t_2 是传感器 B 和 C 之间的触发时间间隔。

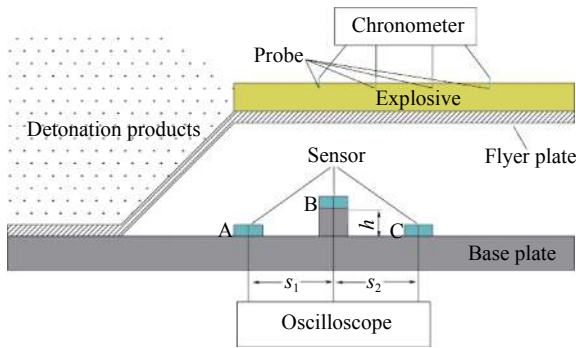


图 4 动态参数测量原理

碰撞角 β 可由下式计算:

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{h}{s_1 - v_c t_1}\right) \quad (2)$$

其中 h 是传感器 B 与 A、C 之间的垂直距离。

在计算得到 v_c 和 β 后, 碰撞速度 v_{pc} 可以表达为

$$v_{pc} = 2v_c \sin(\beta/2) \quad (3)$$

实验所用初始参数列于表 3, 其中 x_0 是炸药厚度, x_1 是炸高。

表 3 实验初始参数

实验组	s_1/mm	s_2/mm	h/mm	x_0/mm	x_1/mm
1	35.7	35.0	1.92	10	8
2	35.6	35.0	1.94	16	8

为观测结合界面的微观形貌, 爆炸完成之后, 在中心位置处切取 30 mm×30 mm 的样品, 平行于

爆轰波传播方向的截面用砂纸打磨到 3000 目, 并用 0.5 μm 金刚石研磨膏进行抛光, 然后用 4 mL 硝酸和 96 mL 无水乙醇组成的腐蚀液进行腐蚀, 最后用金相显微镜 (Leica DM4M) 进行观测。

2 实验结果分析及讨论

2.1 复板碰撞速度

在爆炸焊接中, 炸药上端是否有覆盖板将会显著影响复板的碰撞速度, 根据 Gurney 公式可以得到设有覆盖板情况下复板碰撞速度^[7]的计算公式为

$$v_{pg} = \sqrt{2E} \left[\frac{1+A^3}{3(1+A)} + \frac{N}{C}A^2 + \frac{M}{C} \right]^{-1/2} \quad (4)$$

式中: v_{pg} ——复板的碰撞速度, m/s;

E ——格尼能, J/kg;

N ——覆盖板质量, kg;

C ——炸药质量, kg;

M ——复板质量, kg。

A 由下式确定:

$$A = \frac{1 + 2\frac{M}{C}}{1 + 2\frac{N}{C}} \quad (5)$$

炸药上端覆盖与复板质量相等的覆盖板情况下有 $N=M$, 此时复板的速度可以简化为

$$v_{pg} = \sqrt{2E} \left[\frac{1}{3} + 2\frac{M}{C} \right]^{-1/2} \quad (6)$$

当采用传统爆炸焊接方法时, 炸药上端处于无约束状态即 $N=0$, 此时复板的速度^[7]为

$$v_{pg} = \sqrt{2E} \left[\frac{\left(1 + 2\frac{M}{C}\right)^3 + 1}{6\left(1 + \frac{M}{C}\right)} + \frac{M}{C} \right]^{-1/2} \quad (7)$$

实验所用炸药为乳化炸药, 目前并没有其准确的格尼能参数, 文献[8]基于能量守恒原理给出了格尼能的计算公式为

$$E = \frac{1}{\gamma^2 - 1} \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right)^\gamma v_d^2 \quad (8)$$

其中, γ 为爆炸产物的多方指数, 对于乳化炸药取 2.5, v_d 为炸药爆速。

将式(8)代入式(6)和式(7)可分别计算得到两组实验复板的碰撞速度, 然而 Gurney 公式所预测的碰撞速度是复板的最终运动速度, 基于拉格朗日原理, Flis^[9]给出了滑移爆轰作用下复板的加速历史:

$$v_{pc} = v_{pg} \left[1 - \left(\frac{x_0}{x_0 + (1+A)x_1} \right)^{\gamma-1} \right]^{1/2} \quad (9)$$

实验获得的典型波形(实验组1)如图5所示,图中显示清晰的上升沿,可以准确确定传感器的触发时间间隔 t_1 、 t_2 。测量结果见表4,表中还列出了实验测量的爆速 v_d 、碰撞点移动速度 v_c 、碰撞角 β 、碰撞速度 v_{pc} 以及计算所得的格尼速度 v_{pg} 和碰撞速度 v_{pc} 。

对于本文所用平行法爆炸焊接,一般认为炸药的爆速与碰撞点移动速度一致^[10-12]。由表4可知试验所测得的碰撞点移动速度与爆速相对误差不超过4%,这验证了实验的可靠性。而两组实验测得的碰撞速度明显小于格尼公式计算的碰撞速度,相对误差高达18%(实验组1),这主要是由于格尼公式所预测的碰撞速度是复板的最终运动速度,在本实验中炸高只有8 mm,不足以将复板速度加速到最大值。因此计算时考虑复板的加速过程是有必要的。而考虑加速历史后两组实验计算的碰撞速度和实验值吻合良好,相对误差不超过8%,实验测得的碰撞速度略低于理论计算值主要是由于在理论计算

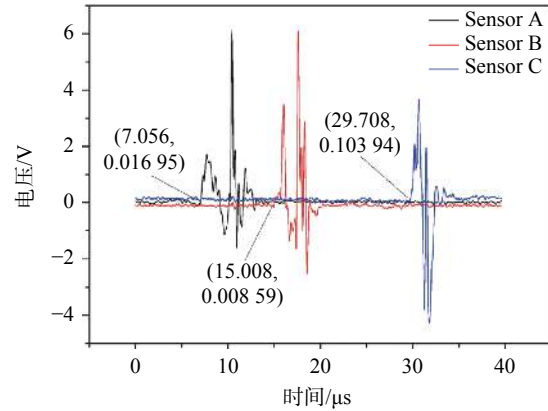


图5 动态参数测量的典型波形。

中忽略了空气阻力以及支持柱的影响。此外,表4还显示了实验组1和实验组2获得相近的爆轰速度(相对误差2%)和复板碰撞速度(相对误差4%),而前者炸药厚度为10 mm并设有覆盖板,后者炸药厚度为16 mm裸露装药,因此该覆盖板的使用可以节约炸药量37.5%。

表4 实验和理论计算结果

实验组	$v_d/(m \cdot s^{-1})$	$t_1/\mu s$	$t_2/\mu s$	$v_c/(m \cdot s^{-1})$	$\beta/(^\circ)$	$v_{pc}/(m \cdot s^{-1})$	$v_{pg}/(m \cdot s^{-1})$	$v_{pc}/(m \cdot s^{-1})$
1	3 219	7.9	14.7	3 110	9.8	534	549	629
2	3 283	7.5	14.2	3 253	9.8	557	597	631

2.2 结合界面微观形貌

图6为实验1和实验2中焊接板的结合界面微观形貌,图中显示两组实验的界面形貌特征基本一致,这是因为其动态参数一致,而结合界面特征由动态参数所决定^[13-14]。由图可知两组实验所得的SUS304/Q235结合界面呈现规则的波形,波长约440 μm ,波高160 μm ,几乎没有连续熔化层、孔洞和裂缝等缺陷的出现。爆炸焊接结合界面通常有

“直线”和“波形”两种结合方式,波形结合方式通常具有更高的结合强度^[15-16],因其结合面积更大,并且随着炸药量的增加,结合界面开始从平直界面转变为波形界面^[17]。但是当炸药载荷过高时,大量的能量在碰撞过程中以热增长的形式释放会导致过熔现象^[18]。轻微过熔现象会使得熔化物在快速冷却过程中形成孔洞、裂纹等缺陷恶化焊接质量;而严重的过熔现象会使得自由面拉伸波到达焊接界面时熔

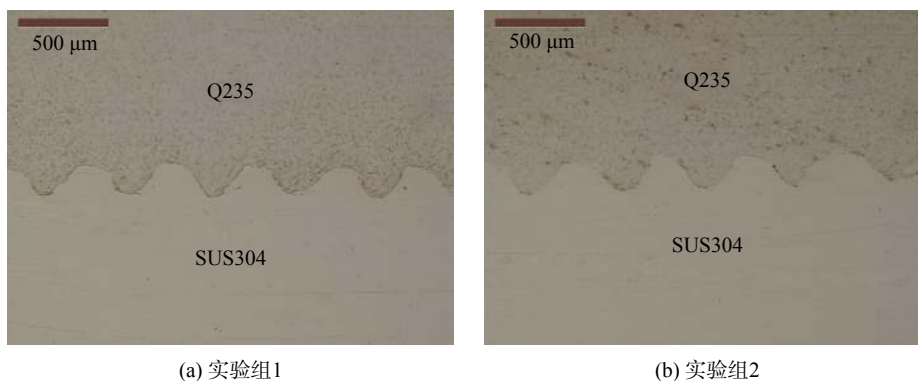


图6 结合界面微观形貌

化物依旧处于熔化状态而使其被拉伸波分开,从而导致焊接失败。本文两组实验均实现了没有缺陷的高质量波形结合,体现了所选参数的合理性。

3 结束语

1)本文使用PVDF压电薄膜和等离子探针设计了一种简易的测量系统,可以较为准确地获得炸药爆速、碰撞点移动速度、碰撞速度等动态参数。

2)实验测得的炸药爆速和碰撞点移动速度一致性良好,格尼公式所预测的碰撞速度较实验值明显偏大,而考虑加速历史所获得的碰撞速度与实验碰撞速度吻合良好。

3)在获得相同爆炸焊接动态参数的条件下,相比于裸露装药,通过在炸药上端设置与复板质量相同的覆盖板可以节约炸药量37.5%。

4)金相分析结果表明两组实验焊接界面形貌特征基本一致,均实现了没有缺陷的高质量波形结合,体现了所选参数的合理性。

参考文献

- [1] BORCHERS C, LENZ M, DEUTGES M, et al. Microstructure and mechanical properties of medium-carbon steel bonded on low-carbon steel by explosive welding[J]. *Materials & Design*, 2016, 89(8): 369-376.
- [2] 郑远谋. 爆炸焊接和爆炸复合材料的原理及应用[M]. 长沙:中南大学出版社, 2007: 165-172.
- [3] FINDIK F. Recent developments in explosive welding[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(3): 1081-1093.
- [4] 黄风雷, 段卫东, 恽寿榕, 等. 爆炸驱动下飞板运动速度的实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22(1): 26-29.
- [5] 杨文彬. 滑移爆轰下飞板飞行速度测量的实验方法[J]. *爆炸与冲击*, 1986(1): 41-49.
- [6] HELD M, 裴大荣. 爆炸焊接的理论及爆炸焊接参数的测量[J]. *稀有金属材料与工程*, 1982(3): 80-88.
- [7] ZUKAS J A, WALTERS W P. Explosive effects and applications[M]. Heidelberg: Springer, 1998: 417-423.
- [8] KOCH A, ARNOLD N, ESTERMANN M. A simple relation between the detonation velocity of an explosive and its gurney energy[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2002, 27(6): 365-368.
- [9] WILLIAM J F. A lagrangian approach to modeling the acceleration of metal by explosives[C]//Southeastern Conference on Theoretical and Applied Mechanics, 1994.
- [10] AKBARIK M S A A, FARHADI S P. Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(3): 459-468.
- [11] HOSEINI-ATHAR M M, TOLAMINEJAD B. Interface morphology and mechanical properties of Al-Cu-Al laminated composites abricated by explosive welding and subsequent rolling process[J]. *Metals & Materials International*, 2016, 22(4): 670-680.
- [12] LI X, MA H, SHEN Z. Research on explosive welding of aluminum alloy to steel with dovetail grooves[J]. *Materials & Design*, 2015, 87: 815-824.
- [13] ATHAR M M H, TOLAMINEJAD B. Weldability window and the effect of interface morphology on the properties of Al/Cu/Al laminated composites fabricated by explosive welding[J]. *Materials & Design*, 2015, 86: 516-525.
- [14] BLAZYNSKI T Z. Explosive Welding, Forming and Compaction[M]. New York: Elsevier, 1983: 225-226.
- [15] XIA H B, WANG S G, BEN H F. Microstructure and mechanical properties of Ti/Al explosive cladding[J]. *Materials & Design*, 2014, 56(4): 1014-1019.
- [16] BINA M H, DEGHANI F, SALIMI M. Effect of heat treatment on bonding interface in explosive welded copper/stainless steel[J]. *Materials & Design*, 2013, 45: 504-509.
- [17] ACCARER M, GÜLENC B, FINDIK F. Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength[J]. *Materials & Design*, 2003, 24(8): 659-664.
- [18] HOKAMOTO K, FUJITA M, IZUMA T. New explosive welding technique to weld aluminum alloy and stainless steel plates using a stainless steel intermediate plate[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 1993(24A): 2289-2297.

(编辑:莫婕)