

TA2/5083 钛铝爆炸焊接数值模拟及实验

吴晓明¹, 史长根¹, 房中行¹, 蔡晨宇², 李文轩¹

(1. 陆军工程大学 野战工程学院, 江苏 南京 210007)

(2. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

摘要: TA2 与 5083 钛铝爆炸焊接界面易生成脆性金属间化合物、氧化物、连续熔化区等缺陷, 焊接窗口狭窄, 最佳焊接参数难以准确获得。本研究重构了动态弯折角 β 和碰撞速度 V_f 的 β - V_f 模型, 使用 SPH-FEM 耦合算法, 运用 Steinberg-Guinan 材料本构模型进行了炸药厚度为 10、15、20 mm, 复板厚度为 1.5 mm 的 TA2/1060/5083 爆炸焊接数值模拟; 并采用数值模拟获得的参数开展了爆炸焊接实验。数值模拟和实验结果高度吻合。研究表明: 药厚 10 mm 时, TA2/1060 和 1060/5083 界面均呈优质平直状结合; 药厚 15 mm 时, 1060/5083 界面呈波状结合。2 种药厚条件下的钛-铝过渡界面均未检测到脆性金属间化合物缺陷。药厚 20 mm 时, 基复板材料发生破坏, 不能实现复合。运用计算优化的参数成功制备了大面积 TA2/1060/5083 复合材料。本研究为理化性能差异较大异种金属爆炸复合提供了一种新的可靠算法。

关键词: 爆炸焊接; SPH-FEM 算法; 数值模拟; Steinberg-Guinan

中图分类号: TG456.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)01-0286-09

作为最优质的工程材料之一, TA2 具有质轻, 比强度高, 耐腐蚀性好, 生物相容性优等特点, 被广泛应用于航空航天, 海洋船舶, 化工, 生物医学等领域。5083 (铝镁合金) 强度较高, 可塑性好, 在低温下仍能保持较好的力学性能, 同样是主要的轻量化结构材料^[1], TA2 和 5083 的爆炸焊接能兼具 2 种材料的优势, 具有极大的研究意义和工程应用价值。然而, 钛铝理化性能差异极大, 钛的熔点高达 1668 °C, 此温度下铝镁合金中镁、锌等合金元素易在碰撞产生的高温下蒸发和烧损, 生成界面缺陷。其次, 钛铝均为具有强烈钝化倾向的金属, 二者极易产生 TiAl₂、TiAl₃、Ti₃Al、TiAl、Ti₂Al₅ 等多种脆性金属间化合物以及 TiO₂、Al₂O₃ 氧化物缺陷^[2-5], 杂质的存在增加了材料发生脆性破坏倾向, 降低了复合材料强度。此外, TA2 和 5083 线膨胀系数和导热能力差异过大, 爆炸焊接产生的严重塑性变形易在结合界面产生大量残余应力, 影响材料使用。另有研究表明, 铝合金的焊接难度随着其硬度提高而提高^[6], 这使得 5083 的爆炸焊接窗口更加狭窄。以上因素导致 TA2 和 5083 的爆炸焊接最佳参数难以准确得到, 本研究使用厚度为 1 mm, 与基板 5083 为同源金属的 1060 作为夹层进行焊接参数优化和设计。

爆炸焊接实验具有危险性、瞬时性等特点, 实验过程中基复板运动姿态, 界面应力应变特征不易观察研究, 数值模拟方法成为解决上述问题的有效手段。现有的数值模拟算法主要分为需要划分网格的拉格朗日 (Lagrange)、欧拉 (Euler)、流固耦合 (ALE) 算法和不需要网格的光滑粒子流体动力学 (SPH) 算法 4 种^[7,8], 其中, 无网格形式的 SPH 算法的近似函数不依赖于网格, 与传统有限差分法和有限元方法相比, 更能准确计算材料的大变形、剥落等行为, 因此更适合于爆炸焊接过程的数值模拟^[9,10]。Tanaka^[11] 最早使用光滑粒子动力学算法对爆炸焊接产生的界面波形进行观察。曾翔宇等^[12] 使用 SPH 算法对 Q235 和 45 钢的界面形貌进行模拟, 提出波的形成需要界面扰动的积累而触发 Bahrani 刻入机理。陈凯等^[13] 利用数值模拟求解确定爆炸焊接过程中界面温度变化率可达每秒亿度的高数量级。现有 SPH 算法研究初步实现了对界面射流、波形形貌的仿真观察, 并能对碰撞过程中的界面温度、压力、变形等实验难以得到的大量数据进行获取和分析, 但还存在数值模拟与实际实验二者直接的对应关系不明确, 数值模拟使用的炸药厚度、基复板规格等爆炸焊接核心静态参数与实验存在较大出入等问题。

SPH 算法存在运算周期长, 计算效率低的问题, 本研究综合 SPH 和 Lagrange 2 种算法优势, 使用 SPH-FEM

收稿日期: 2021-01-19

基金项目: 国家自然科学基金 (51541112)

作者简介: 吴晓明, 男, 1997 年生, 硕士生, 陆军工程大学野战工程学院, 江苏 南京 210007, E-mail: 15605168183@163.com

耦合算法对 TA2/1060/5053 爆炸焊接进行模拟, 仅在结合界面 0.5 mm 厚度范围使用 SPH 算法, 其余部位使用 Lagrange 算法, 在保证计算精度的前提下提高了运算效率。现有的爆炸焊接数值模拟主要使用 J-C 材料本构模型, 然而在应变率为 10^5 s^{-1} 以上的动态力学行为数值计算中, Steinberg-Guinan 本构方程有更高的适应性和准确性^[14], 考虑到爆炸焊接有具备同样数量级的高应变特点, 因此本研究首次使用 Steinberg-Guinan 本构模型对材料爆炸焊接动态力学行为进行描述。进一步基于理论推导, 将数值模拟使用的炸药, 基板, 复板等静态参数与实验直接联系, 设计了一种结合动态弯折角 β 和复板碰撞速度 V_f 的 β - V_f 高速倾斜碰撞模型, 并进行了炸药厚度为 10, 15, 20 mm 的 TA2/1060/5083 爆炸焊接数值模拟和实验, 数值模拟与实验结果吻合程度极高, 由此验证了模型的准确性和实用价值。

1 TA2/1060/5083 爆炸焊接数值模拟

1.1 β - V_f 高速倾斜碰撞模型

爆炸焊接过程可以解释为复板获得炸药的能量, 以速度 V_f 呈动态弯折角 β 撞向基板, 进而实现牢固冶金结合的过程^[15,16], 因此可以使用高速倾斜碰撞模型来进行爆炸焊接过程的仿真计算。作为模型最基本的 2 个参数, 碰撞速度和动态弯折角与炸药、基板、复板这 3 个核心静态参数具有直接联系。在进行爆炸焊接窗口的研究中, 人们提出爆炸比 R 的概念, 将炸药密度和厚度与复板的密度和厚度进行联系, 如式 (1) 所示:

$$R = \frac{\rho_e \delta_e}{\rho_f \delta_f} \quad (1)$$

式中, ρ_e 为炸药密度, δ_e 为炸药厚度, ρ_f 为复板密度, δ_f 为复板厚度。此外, Gurney 提出了一维格尼运动方程, 确定了如式 (2) 所示的爆炸比 R 和复板碰撞速度 V_f 的定量关系:

$$V_f = \left(\frac{6ER}{5+R+4/R} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中, E 为炸药格尼系数, Koch^[17] 通过优化装药结构模型构建了炸药格尼系数的理论公式, 如式 (3) 所示:

$$E = \frac{1}{\gamma^2 - 1} \left(\frac{\gamma}{\gamma + 1} \right)^\gamma V_d^2 \quad (3)$$

式中, γ 为炸药有效多方指数, V_d 为炸药爆速。文献[18]在对 2#岩石粉末状乳化炸药进行非线性数据拟合时确定炸药爆速与装药厚度的倒数近似满足线性关系。本次实验使用含药量为 30% 的粉末状乳化硝铵炸药, 由文献[18]可得炸药爆速 V_d 与厚度 δ_e 的函数关系为:

$$V_d = 3384 \times \left(1 - \frac{5.21}{\delta_e} \right) \quad (4)$$

在平行法爆炸焊接中, 碰撞点移动速度等于爆速 V_d , 根据基板运动姿态的几何关系和力学关系可以推导复板撞向基板的碰撞速度 V_f 和炸药爆速 V_d 之间的函数关系为:

$$V_f = 2V_d \sin(\beta / 2) \quad (5)$$

至此, β - V_f 模型使用的与炸药参数和复板参数之间的函数关系可以全部确定, 联系式(1)~(5)可得动态弯折角 β 和复板碰撞速度 V_f 为:

$$\beta = 2 \arcsin \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\gamma}{\gamma^2 - 1} \right)^{\gamma/2} \cdot \left[\frac{6\rho_e^2 \delta_e^2}{(\gamma^2 - 1)(5\rho_e \delta_e \rho_f \delta_f + \rho_e^2 \delta_e^2 + 4\rho_f^2 \delta_f^2)} \right]^{1/2} \right) \quad (6)$$

$$V_f = \left(\frac{\gamma}{\gamma^2 - 1} \right)^{\gamma/2} \left[3384 \times \left(1 - \frac{5.21}{\delta_e} \right) \cdot \left[\frac{6\rho_e^2 \delta_e^2}{(\gamma^2 - 1)(5\rho_e \delta_e \rho_f \delta_f + \rho_e^2 \delta_e^2 + 4\rho_f^2 \delta_f^2)} \right]^{1/2} \right] \quad (7)$$

实验及模拟使用的粉末乳化炸药密度 ρ_e 为 0.8 g/cm^3 , 有效多方指数 γ 为 1.8, 厚度 δ_e 为 10, 15, 20 mm; 复板 TA2 密度 ρ_f 为 4.5 g/cm^3 , 厚度 δ_f 为 1.5 mm, 代入式 (6) 和式 (7) 中得到 β - V_f 高速倾斜碰撞模型相关参数见表 1。

由于复板 TA2 厚度仅为 1.5 mm, 使得动态弯折角超过了 $5^\circ \sim 25^\circ$ 的最佳范围。确定动态弯折角 β 和复板碰撞速度 V_f 后, 分别构建 1.5 mm 厚的复板 TA2, 1 mm 厚的 1060 夹层和厚度为 8 mm 的 5083 基板, 即完成 β - V_f 高速倾斜碰撞模型的构建 (见图 1)。由于模型设置为轴向对称, 建立的二维平面模型即可实现对三维结构的映射。

1.2 材料 Steinberg-Guinan 本构模型与 Shock 状态方程

爆炸焊接过程中, 基复板以及夹层均会产生剧烈的塑性变形, 变形行为取决于材料的动态力学特征。材料

表 1 β - V_f 高速倾斜碰撞模型相关参数

Table 1 Parameters related to the β - V_f high speed tilt collision model

δ_e/mm	R	$V_d/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_f/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\beta/(\text{°})$
10	1.2	1914	726.5	22.3
15	1.8	2200	781.2	28.2
20	2.4	2502	1273.9	32.6

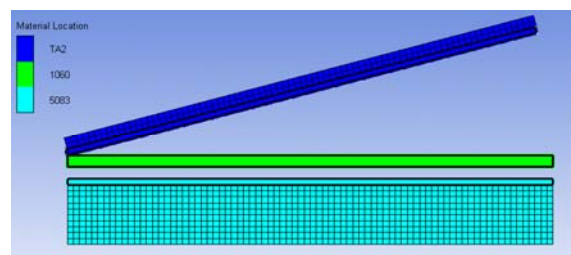


图 1 β - V_f 高速倾斜碰撞模型

Fig.1 β - V_f high speed tilt collision model

的本构模型和状态方程与材料的应力应变、应变率、温度、压力以及变形历史密切相关，是对材料的动力学行为的定量描述。

材料使用的 Steinberg-Guinan 本构模型能准确求解出金属一类的立方晶体结构材料的温度效应和压力效应相关参数^[19]，方程给出了高应变下剪切模量和屈服强度的本构关系：

$$G = G_0[1 + (\frac{G'_p}{G_0})\frac{P}{\eta^{1/3}} + (\frac{G'_T}{G_0})(T - 300)] \quad (8)$$

$$Y = Y_0[1 + (\frac{Y'_p}{Y_0})\frac{P}{\eta^{1/3}} + (\frac{Y'_T}{Y_0})(T - 300)](1 + \beta\varepsilon)^n \quad (9)$$

式中， G 为剪切模量， Y 为屈服应力， ε 为有效塑性应变， β 为硬化常数， n 为硬化指数， T 为温度。 η 为相对体积， Y_0 、 G_0 、 G'_p 、 Y'_p 、 G'_T 和 P 等均为常数。

材料使用 Shock 状态方程定义冲击状态下的材料密度 ρ ，压力 P ，能量 e ，质点速度 U_p 和冲击速度 U 之间的关系：

$$U = C_0 + SU_p \quad (10)$$

$$P = P_H + \Gamma\rho(e - e_H) \quad (11)$$

$$P_H = \frac{P_0 C_0 \mu (1 + \mu)}{[1 - (S - 1)\mu]^2} \quad (12)$$

$$e_H = \frac{P_H}{2P_0} \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right) \quad (13)$$

式中， S 为 Hugoniot 斜率， C_0 为材料中的声速， Γ 是 Gruneisen 参数， $\mu = (\rho/\rho_0)^{-1}$ ， ρ 为材料密度且初始密度为 ρ_0 ， P_0 为初始压力， e_H 、 P_H 为假设 $\Gamma\rho = \Gamma\rho_0$ 时的内能和压力。数值模拟使用的材料参数如表 2 所示。

2 TA2/1060/5083 爆炸焊接实验

2.1 实验材料及方法

为验证数值模拟效果，分别设置与数值模拟一致的 10，15，20 mm 3 种药厚条件。复板、夹层和基板的厚度分别为 1.5，1 和 8 mm，面积为 1000 mm×1000 mm，材料的化学成分如表 3 所示。为方便调整炸药爆速，增加爆炸焊接可控性，实验使用添加 70% 的石英砂和少量木屑的低爆速粉状乳化硝铵炸药。选择松软沙质土地放置基板，在复板与夹层，夹层与基板之间设置 2 mm 厚的折弯铜片控制间隙，3 组实验全部采用中心起爆方式起爆，在电雷管周围覆盖少量纯药进行引爆。

2.2 界面形貌和物相测试

炸药厚度为 10 和 15 mm 的爆炸焊接实验成功获得 2 块复合板，初步观察复合板无明显破坏、裂纹和不结合现象；药厚 20 mm 实验未能实现复合，如图 2 所示，由于炸药厚度过大，基板、夹层和复板都因过于剧烈的塑性变形发生破坏。

将制备的炸药厚度为 10，15 mm 钛-铝复合板沿爆轰方向线切割取样，对 2 块复合板近起爆端和近复合板边缘的 TA2/1060 界面（位置 1、2）和 1060/5083 界面（位置 3、4）进行 SEM 表征，观察其界面微观形貌；仔细打磨复合板 TA2/1060 界面，使结合界面裸露，进行 XRD 分析，确定界面物相组成，检测钛铝元素过渡界面化合物种类。TA2/1060/5083 复合板测试位置见图 3。综合 SEM 和 XRD 对 2 种药厚下的结合质量进行分析，测试项目和试样编号见表 4。

表 2 数值模拟材料参数

Table 2 Material parameters of numerical simulation

Material	Density/ g·cm ⁻³	Γ	C_0 / km·s ⁻¹	S	Specific heat/ J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	β	n	G'_p	G'_T	Y'_p
TA2	4.5	1.23	5.02	1.54	500	210	0.10	0.50	-2.70	0.010
5083	2.8	2.00	5.33	1.34	875	680	0.10	1.80	-1.70	0.019
1060	2.7	1.97	5.38	1.34	884	400	0.27	1.77	-1.67	0.003

表 3 爆炸焊接实验材料化学成分

Table 3 Chemical composition of experimental materials for explosive welding (wt%)

Material	Fe	Ti	Si	Mn	Zn	Mg	Gr	Cu	Al
5083	0.40	0.03	0.40	0.4~1.0	0.25	4.0~4.9	0.05	0.1	Bal.
1060	0.35	0.03	0.25	0.03	0.05	0.03	-	0.05	Bal.

Material	Fe	C	N	O	H	Ti
TA2	≤0.3	≤0.1	≤0.05	≤0.03	≤0.015	Bal.



图 2 厚度 20 mm 炸药爆炸焊接后材料状态

Fig.2 Material state after explosive welding with explosive thickness of 20 mm

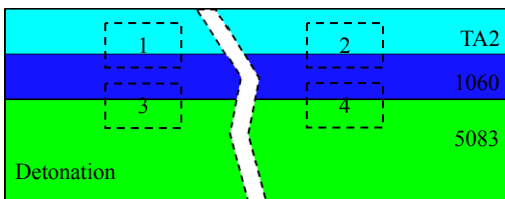


图 3 TA2/1060/5083 复合板测试位置

Fig.3 Test position of TA2/1060/5083 composites

表 4 TA2/1060/5083 复合板测试项目和试样编号

Table 4 Test item and sample number of TA2/1060/5083 composites

δ_0/mm	Item	Location in Fig.3	Number
10	SEM	1, 2, 3, 4	1# ~ 4#
	XRD	1, 2	5#, 6#
15	SEM	1, 2, 3, 4	7#~10#
	XRD	1, 2	11#, 12#

3 结果与分析

3.1 爆炸焊接界面形貌分析

文献[20]在进行爆炸焊接能量流动分析时指出, 夹层在爆炸焊接过程中将炸药能量进行 2 次分配, 2 种界面获得的焊接能量大小与炸药参数、基复板密度和厚度直接相关。3 种炸药厚度下数值模拟结果如图 4 所示。10 mm 炸药厚度下, TA2/1060 界面和 1060/5083 界面均呈平直状形貌结合(图 4a)。由于炸药厚度增加, 爆炸焊接系统获得的总化学能增加, 这使得炸药厚度为 15 mm 时, 虽 TA2/1060 界面仍呈平直状和微波状结合, 但 1060/5083 界面从起爆端到边缘界面却由微波状到小波状变化(图 4b)。当炸药厚度继续增长到 20 mm 时, 复板从炸药处获得的能量过大, 各部分碰撞内力过大, 复板变形超过了材料动态抗弯极限, 因此自上而下生成表面裂纹; 其次, 由于复板、夹层和基板热传导速率差异

过大, 界面冷却速率高达 10^7 s^{-1} 以上, 导致各部分收缩变形相互撕扯, 在界面处生成内部裂纹, 最终发生破坏, 与实验结果(图 2)材料发生破坏表现一致(图 4c)。

进一步将数值模拟结果与实验对比分析, 图 5 是 10 mm 炸药厚度时, 试样 1#~4#界面 SEM 形貌和对应位置仿真计算结果。由于起爆端爆速低于边缘, 试样 2#和 4#界面的波形比试样 1#和 3#更加明显; 此外, 夹层和基板的线膨胀系数高于复板而刚度低于复板, 在受到高温高压作用时, 基板和夹层产生更大的形变。因此 1060/5083 界面(3#、4#)波动大于 TA2/1060 界面(1#、2#)。

图 6 是 15 mm 炸药厚度时, 试样 7#~10#界面 SEM 形貌和对应位置仿真计算结果。TA2/1060 界面由平直状(7#)向微波状(8#)形貌过渡, 1060/5083 界面由微波状(9#)向小波状(10#)形貌过渡。在夹层与基板近边缘一侧界面形成波高 $40 \mu\text{m}$, 波长 $300 \mu\text{m}$ 的稳定波形, 在实验和数值模拟处均观察到爆炸焊接常见的漩涡结构, 试样近边缘处的波形比近起爆端波形更加明显, 夹层-基板界面波形比复板-夹层处波形更加明显。2 种炸药厚度下, 界面均未出现连续不结合区, 裂纹等焊接缺陷。

3.2 界面压力及温度分析

在碰撞产生的温度和压力共同作用下, 金属产生塑性变形、熔化和元素扩散等压力焊、熔化焊和扩散焊常见特征, 局部的高温高压是爆炸焊接的前提条件^[21,22]。但过高的温度和压力会导致界面生成连续的熔化区、孔洞和裂纹等缺陷, 因此对爆炸焊接过程中界面的温度和压力分析是必要的。图 7 是 3 种药厚下 TA2/1060 界面压力计算结果。由于系统总能量和动态弯折角的差异, 20 mm 装药厚度时复板-夹层界面产生了 15 GPa 以上的碰撞高压, 与 10, 15 mm 药厚界面的 3 和 5 GPa 高压产生了明显区别, 这也是实验导致材料破坏的原因。碰撞压力过高导致材料发生明显的屈服和塑性破坏现象, 使得压力瞬间下降, 这与另外 2 种装药厚度下界面压力持续一段时间的高位波动表现也有不同。

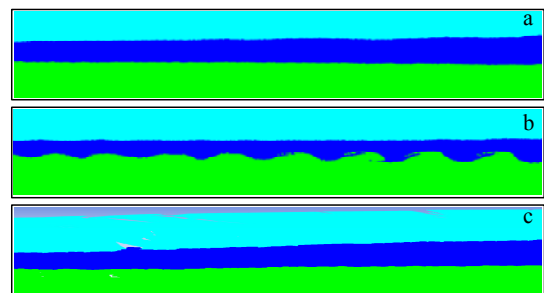


图 4 3 种炸药厚度下数值模拟结果

Fig.4 Numerical simulation results with explosive thickness of 10 mm (a), 15 mm (b) and 20 mm (c)

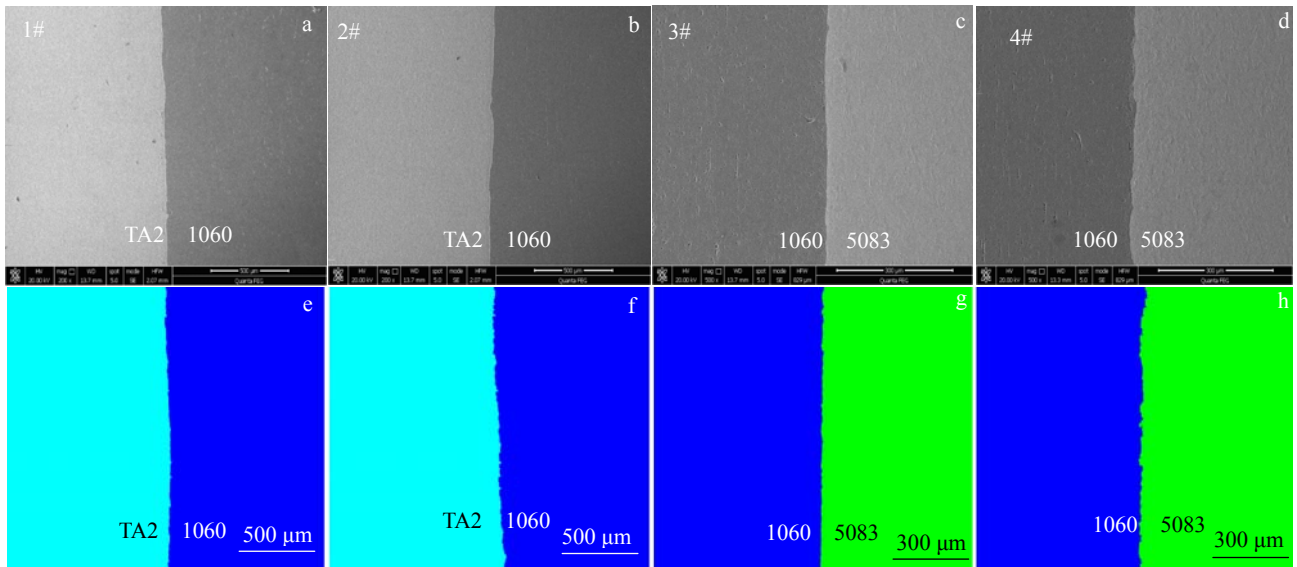


图 5 厚度 10 mm 炸药爆炸焊接后界面的 SEM 形貌及数值模拟结果

Fig.5 SEM morphologies (a~d) and numerical simulation results (e~h) of TA2/1060 (a, b, e, f) and 1060/5083 (c, d, g, h) interfaces of samples 1# (a, e), 2# (b, f), 3# (c, g), and 4# (d, h) after explosive welding with explosive thickness of 10 mm

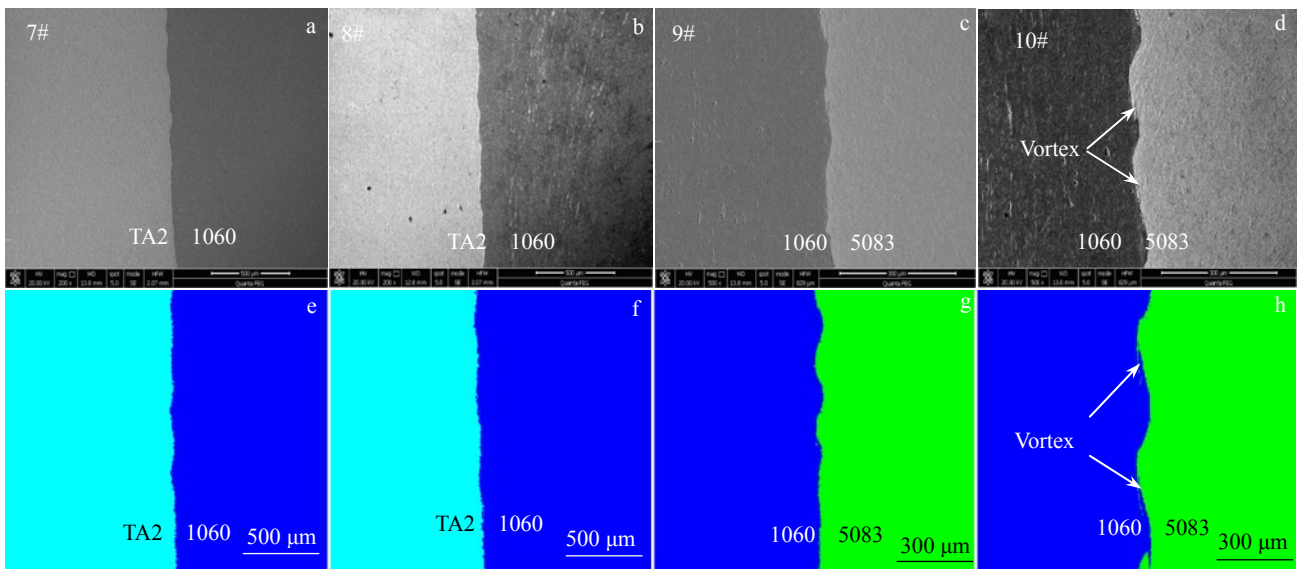


图 6 厚度 15 mm 炸药爆炸焊接后界面的 SEM 形貌及数值模拟结果

Fig.6 SEM morphologies (a~d) and numerical simulation results (e~h) of TA2/1060 (a, b, e, f) and 1060/5083 (c, d, g, h) interfaces of samples 7# (a, e), 8# (b, f), 9# (c, g), and 10# (d, h) after explosive welding with explosive thickness of 15 mm

图 8 是 3 种药厚下 TA2/1060 界面温度计算结果。复板-夹层的界面温度随装药厚度的增加而增加，炸药厚度为 10 mm 时的界面温度为 400 和 550 °C 之间，低于铝的熔点 (660 °C)；炸药厚度为 15 mm 时界面温度在 700 和 950 °C 左右，略高于铝的熔点，材料具备熔化条件。炸药厚度为 20 mm 时的界面温度在 1400 到 1900 °C 之间，远高于铝的熔点，夹层将产生熔化并伴随着剧烈烧

蚀等不良现象。文献[23]指出，由于爆炸焊接的时间极短，除界面薄层以外的位置温升不会过于明显。数值模拟能捕获到实验难以测量的界面温度和压力数据，为实验提供预测和分析的理论基础。

3.3 界面典型特征生长机理分析

复合板在 TA2/1060 界面发生了由 Ti 到 Al 的元素突变，在界面原子扩散过程中极易产生脆性金属间化合物，

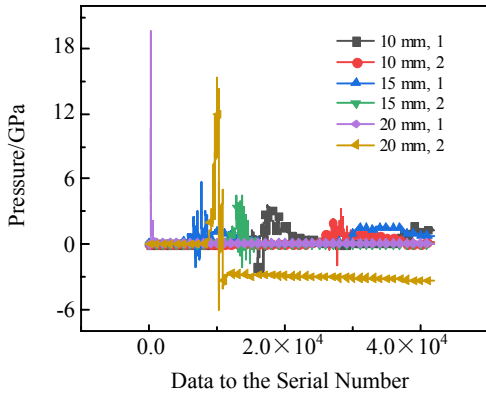


图 7 TA2/1060 界面压力数值模拟结果

Fig.7 Numerical simulation results of TA2/1060 interface pressure

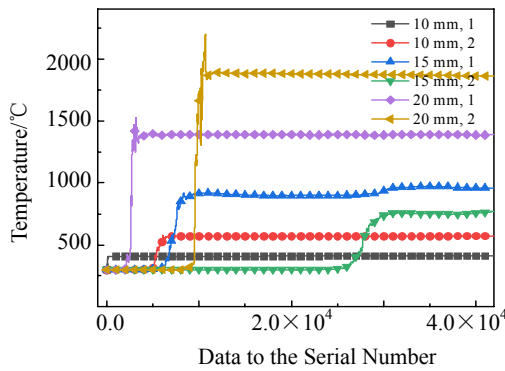


图 8 TA2/1060 界面温度数值模拟结果

Fig.8 Numerical simulation results of TA2/1060 interface temperature

因此，除了对界面微观形貌进行分析外，钛铝过渡界面是否生成脆性金属间化合物同样是检验界面结合质量的关键。10 和 15 mm 炸药厚度时 TA2/1060 界面 XRD 图谱分别如图 9 和图 10 所示。2 种药厚的 XRD 图谱中均未发现金属间化合物的生成，元素以钛-铝固溶体的形式存在。钛-铝固溶体也是钛-铝爆炸焊接界面产物形式之一，可能是热扩散系数更大的 1060 层发生了非平衡凝固，使得钛元素未能有效扩散到铝层。此外，图谱中还显示界面处 TiO₂ 的存在，由于钛的强钝化性能，可能是制样过程中材料发生了氧化。

爆炸复合界面形貌是材料结合质量的直接决定因素。本研究在进行 15 mm 炸药厚度的 TA2/1060/5083 爆炸复合数值模拟时，在 1060/5083 界面生成图 11 所示的与实验一致的理想波形、界面漩涡和少量飞溅熔化块等爆炸复合界面典型特征，此数值模拟结果可作为研究波形生长机理的理想依据。图 12 为整个界面波形生长过程的 16 个片段，图 13 是单个波形生长的过程。如图 12

和图 13 所示，基复板首先发生剧烈碰撞生成金属射流，在整个周期内射流呈正弦波形在基复板间往复运动。高速射流侵彻基板高温低硬度低刚度表面，射流和复板流在惯性力和基板流阻力作用下大部分呈逆时针运动堆积，初步形成波形界面；在此基础上，少量射流在侵彻基板时射流方向与水平放置的基板正方向夹角接近直角，在基板表面阻力的反作用下顺时针运动，形成漩涡形貌，漩涡形貌的生成是一种典型的物理过程。界面波形并非一次定型，已初步形成波形形貌的材料在碰撞点经过后继续逆时针卷动，裹挟少量基板材料向后卷动形成少量飞溅熔化块形貌。界面波形在温度降低至一定数值时，最终定型，不再生长。整个波形生长的过程可以总结为“主逆次顺”过程，即大量射流及复板流在复合时呈逆时针运动，形成波形和少量飞溅熔化块形貌，少量射流及复板流呈顺时针运动生成漩涡结构，界面射流和基复板流的“主逆次顺”运动，形成了界面周期性波形形貌和其他典型特征。数值模拟对界面典型特征的完整再现效果使得现阶段爆炸复合波形的成因有了更准确的理论答案。

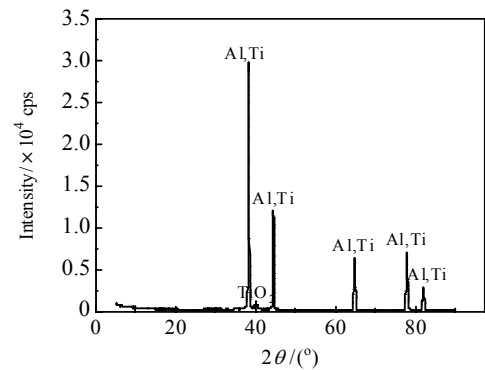


图 9 10 mm 炸药厚度时 TA2/1060 界面的 XRD 图谱

Fig.9 XRD pattern of TA2/1060 interface with explosive thickness of 10 mm

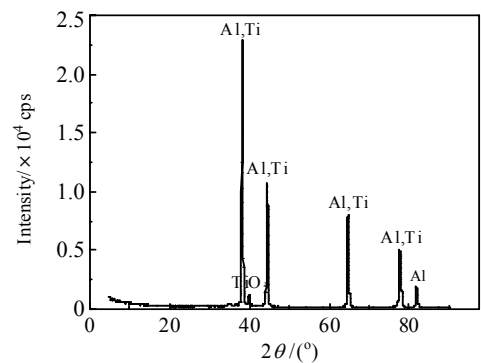


图 10 15 mm 炸药厚度时 TA2/1060 界面的 XRD 图谱

Fig.10 XRD pattern of TA2/1060 interface with explosive thickness of 15 mm

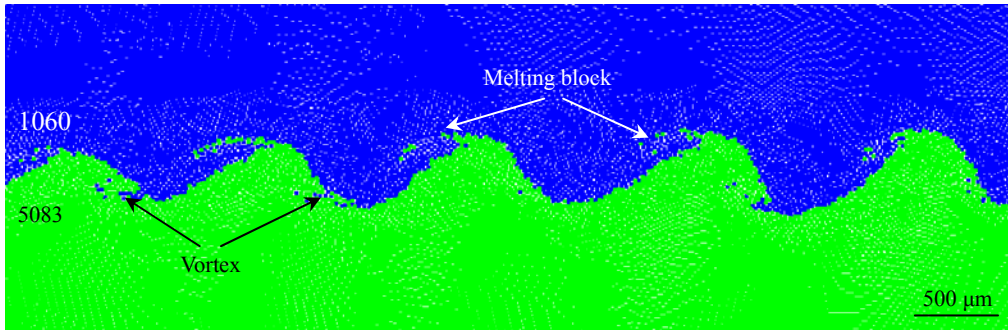


图 11 15 mm 炸药厚度下 1060/5083 界面数值模拟结果

Fig.11 Numerical simulation result of 1060/5083 interface with explosive thickness of 15 mm

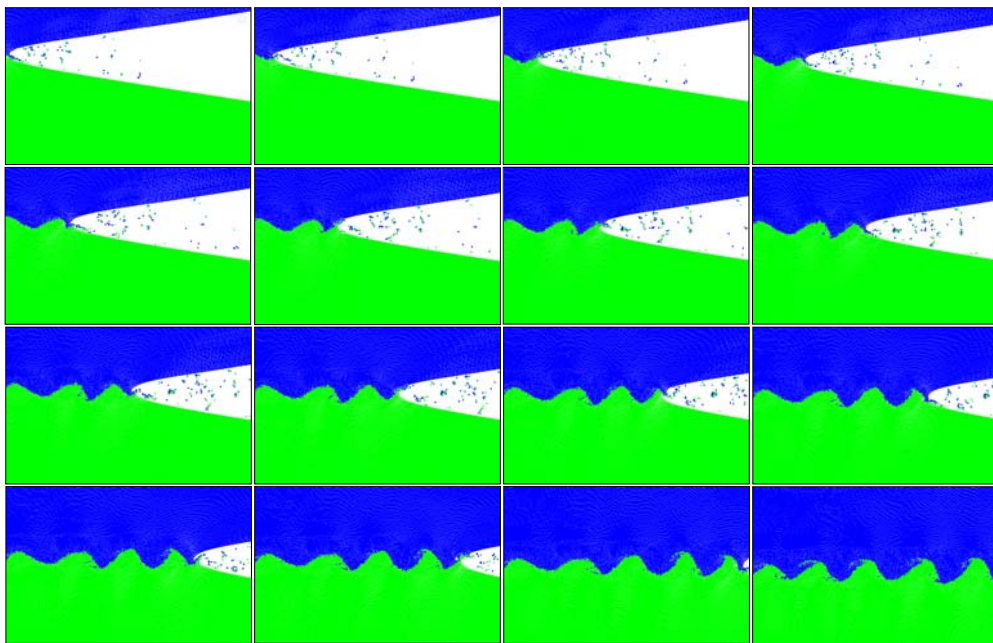


图 12 界面波形生长过程

Fig.12 Growth process of interface waveform

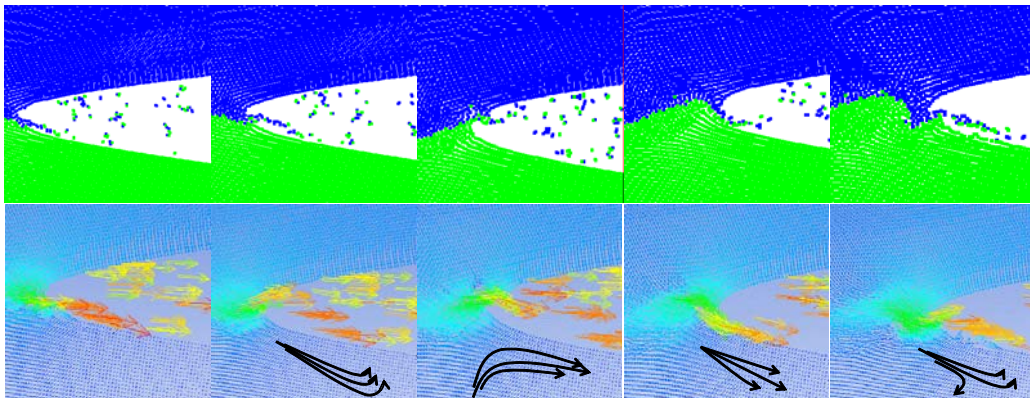


图 13 单个波形生长过程及粒子运动方向

Fig.13 Growth process of single waveform and direction of particle movement

4 结 论

1) 10~15 mm 炸药厚度下能成功实现复板厚度为 1.5 mm 的 TA2/1060/5083 爆炸复合。炸药厚度为 10 mm 时, TA2/1060 界面与 1060/5083 界面均呈平直状结合; 炸药厚度为 15 mm 时, TA2/1060 界面呈平直状及微波状结合, 1060/5083 界面呈小波状结合; 2 种药厚界面均发生非平衡凝固现象, 生成钛-铝固溶体, 未检测到界面金属间化合物生成。

2) Steinberg-Guinan 材料本构模型能够准确地计算爆炸焊接过程中的材料动态力学行为, 对爆炸焊接应力应变状态实现较高精度的计算。SPH-FEM 耦合算法及构建的 β - V_f 高速倾斜碰撞模型在减少大量计算时间的前提下仍能对爆炸焊接进行精确的计算, 可作为其他异种金属爆炸焊接参数设计的有效算法。

3) 界面波形生长主因是射流及基复板流的“主逆次顺运动”, 大量逆时针运动的射流和复板流生成界面波形和飞溅熔化块形貌, 少量顺时针运动的复板流生成界面漩涡形貌。

参考文献 References

- [1] Bendarma A, Jankowiak T, Rusinek A *et al.* *Materials*[J], 2020, 13(20): 4614
- [2] Kahraman Nizamettin, Gulenc Behcet, Findik Fehim. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2007, 34(8): 1423
- [3] Xu L, Cui Y Y, Hao Y L *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 435-436(4): 638
- [4] Schuster J C, Palm M. *Journal of Phase Equilibria & Diffusion*[J], 2006, 27(3): 255
- [5] Guo Xunzhong, Fan Minyu, Liu Zhongli *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2017, 46(5): 1192
- [6] Saravanan S, Raghukandan K. *Materials and Manufacturing Processes*[J], 2013, 28(5): 589
- [7] Junto N, Yusuke A, Yohei H *et al.* *Journal of Smart Processing*[J], 2015, 4(2): 95
- [8] Nassiri A, Abke T, Daehn G. *Proceedings of Numiform 2019: The 13th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes*[C]. Portsmouth: AIP, 2019
- [9] Libersky L D, Petschek A G, Carney T C *et al.* *Journal of Computational Physics*[J], 1993, 109(1): 67
- [10] Sparks C, Hinrichsen R, Friedmann D. *AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*[C]. Texas: AIAA, 2013
- [11] Tanaka Katsumi. *Materials Science Forum*[J], 2007, 566: 61
- [12] Zeng Xiangyu(曾翔宇), Li Xiaojie(李晓杰), Wang Xiaohong(王小红) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(6): 1977
- [13] Chen Kai(陈凯), Ma Yong(马勇), He Yao(何尧) *et al.* *Journal of Netshape Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2020, 12(2): 67
- [14] Yuan Shua(袁帅), Hu Haibo(胡海波), Zhang Chongyu(张崇玉) *et al.* *Chinese Journal of High Pressure Physics*(高压物理学报)[J], 2016, 30(1): 49
- [15] Borchers C, Lenz M, Deutges M *et al.* *Materials & Design*[J], 2016, 89(8): 369
- [16] Athar M M H, Tolaminejad B. *Materials & Design*[J], 2015, 86: 516
- [17] Koch A, Arnold N, Estermann M. *Propellants Explosives Pyrotechnics*[J], 2002, 27(6): 365
- [18] Lu Ming(陆明), Wang Yaohua(王耀华), Yu Jun(尤峻) *et al.* *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2002(6): 5
- [19] Hu Xiaomian(胡晓棉), Pan Hao(潘昊), Zhu Jianshi(朱建士). *8th National Symposium on Impact Dynamics*(第八届全国冲击动力学学术讨论会会议论文集)[C]. Beijing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2007
- [20] Wu X M, Shi C G, Fang Z H *et al.* *Materials & Design*[J], 2021, 197: 109 279
- [21] Saikov I V, Malakhov A Y, Saikova G R *et al.* *Inorganic Materials Applied Research*[J], 2020, 11(2): 448
- [22] Chen X, Inao D, Tanaka S *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2020, 58: 1318
- [23] Findik F. *Materials & Design*[J], 2011, 32(3): 1081

Numerical Simulation and Experiment of TA2/5083 Ti-Al Explosive Welding

Wu Xiaoming¹, Shi Changgen¹, Fang Zhonghang¹, Cai Chenyu², Li Wenxuan¹

(1. College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

(2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The explosive welding interface between TA2 and 5083 is prone to produce brittle intermetallic compounds, oxides, continuous melting zone and other defects, the welding window is narrow, and the optimal welding parameters are difficult to obtain accurately. In this study, the β - V_f model of dynamic bending angle β and impact velocity V_f was reconstructed. The numerical simulation of TA2/1060/5083 explosive welding with explosive thickness of 10, 15 and 20 mm and flyer plate thickness of 1.5 mm was carried out using the Steinberg-Guinan material constitutive model and SPH and Lagrange coupling algorithm. The parameters obtained from numerical simulation were used to carry out explosive welding experiments. The numerical simulation and experimental results are highly consistent and the research shows that TA2/1060 and 1060/5083 interface have high quality straight bond when the explosive thickness is 10 mm, and 1060/5083 interface has wavy shape bond when the explosive thickness is 15 mm. No brittle intermetallic defect is detected at the Ti-Al transition interface under the two explosive thickness conditions. When the thickness of explosive is 20 mm, the material is damaged and can not be recombined. A large area TA2/1060/5083 composite material has been successfully prepared using the calculated and optimized parameters, and the explosive welding process has been accurately calculated, which provides a reliable algorithm for the explosive composite of the dissimilar metal with great difference in physical and chemical properties.

Key words: explosion welding; SPH-FEM; numerical simulation; Steinberg-Guinan

Corresponding author: Shi Changgen, Ph. D., Professor, College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, P. R. China, E-mail: shichanggen71@sina.com