

装药方式对铜/钢爆炸焊接界面波的影响及波形成机理

缪广红^{1,2}, 马雷鸣³, 李雪交⁴, 艾九英³, 赵文慧³, 马宏昊⁵, 沈兆武⁵

- (1. 安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001;
2. 安徽理工大学力学与光电物理学院, 安徽 淮南 232001;
3. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001;
4. 安徽理工大学化学工程学院, 安徽 淮南 232001;
5. 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230027)

摘要: 为了改善爆炸焊接质量, 解决高噪低效的问题, 选取 Cu 为复板、Q235 钢为基板, 采用 LS-DYNA 软件和光滑粒子流体动力学方法分别设计了均匀布药和梯形布药方案, 研究了硝酸炸药对爆炸焊接界面波的影响。均匀布药结果显示: 沿着爆轰方向碰撞压力逐渐增大; 炸药量越多, 碰撞压力越大, 界面波波形越大。梯形布药方案中, 通过改变炸药起爆端和末端的高度, 设计了 4 种方案, 结果显示: 梯形布药可以消除爆炸焊接界面波不均匀现象, 使界面波形尺寸基本保持一致, 而且节省了炸药用量; 当起爆端和末端的高度分别为 67.2 mm 和 42.0 mm 时, 波形效果最好。通过研究界面波的形成过程可知, SPH 法模拟的界面波形成过程与复板流侵彻机理的一致性较好, 证明了复板流侵彻机理解释界面波形成过程的有效性。

关键词: 炸药量; 布药方式; 梯形布药; 界面波

中图分类号: O389

文献标识码: A

由于爆炸焊接过程具有瞬时性、复杂性, 人们在通过实验及相关设备来观察、研究爆炸焊接过程时, 效果十分有限。随着计算机技术的发展, 数值模拟技术的突破为爆炸焊接研究提供了帮助。迄今为止, 国内外诸多学者利用数值模拟软件对爆炸焊接过程及参数开展了大量研究, 取得了较理想的研究成果。Nassiri 等^[1] 分别利用光滑粒子流体动力学 (Smoothed particle hydrodynamics, SPH) 法、任意拉格朗日-欧拉 (Arbitrary Lagrange-Euler, ALE) 法模拟了爆炸焊接的高速撞击过程, 并研究了结合界面的剪切应力和速度分布, 结果显示只有 SPH 法再现了碰撞时的射流现象。Abe^[2] 使用二维有限差分法研究了爆炸焊接波的形成机理, 计算结果与模拟结果保持一致。Yuan 等^[3] 采用 SPH 法研究了 6061Al/AZ31B 的爆炸焊接, 模拟得到波形界面和射流现象, 但是并没有详细指出波的形成机理。Tabbataee 等^[4] 使用有限单元法模拟了射流。Mousavi 等^[5-6] 采用欧拉法模拟了射流和类似流体状的波状界面, 并成功预测了波形尺寸和射流速度。王宇新等^[7] 应用无网格物质点法 (Material point method, MPM), 对爆炸荷载作用下基板和复板的动态变形过程进行了三维数值模拟, 并分析了碰撞点压力和速度的变化情况。刘江等^[8] 用 SPH 法进行二维建模, 重现了实验中观察到的射流和界面波现象, 并揭示了碰撞压力、有效塑性应变、温度等参数随时间的变化关系。周春华等^[9-10] 研究了均匀布药下结合界

* 收稿日期: 2019-10-08; 修回日期: 2019-11-11

基金项目: 国家自然科学基金 (11902003, 51874267); 安徽省高校自然科学基金重点项目 (KJ2017A089, KJ2018A0090); 高校优秀青年骨干人才国外访学研修项目 (gxgwfx2019017); 安徽省自然科学基金 (1808085QA06)

作者简介: 缪广红 (1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事含能材料、爆炸复合及爆炸力学相关研究。

E-mail: miaogh@mail.ustc.edu.cn

面波的变化规律后,提出了新的不等药厚布药工艺。

从众多学者的研究成果来看,数值模拟软件能够帮助人们全面、系统地了解爆炸焊接过程,降低实验成本,优化实验参数。在平板爆炸焊接中,通过炸药爆炸产生的爆轰能量推动复板与基板发生斜碰撞,碰撞界面在微秒级的时间内产生数千兆帕高压,发生塑性变形,从而实现基板和复板的固相焊接。由此可以看出,炸药是整个爆炸焊接过程的能量来源,因此对炸药药量和布药方式进行控制具有重要的研究意义。本研究应用 LS-DYNA 软件,采用 SPH 法进行二维建模,研究炸药与爆炸焊接界面波的关系及波的形成机理。

1 计算模型

1.1 爆炸几何模型

SPH 法是一种无网格法,适合处理爆炸、冲击等大变形问题,但是其搜索算法较为耗时,粒子越多,该问题越突出,计算效率越低^[11]。为了提高计算结果的精确性,同时兼顾计算效率,炸药采用粗网格划分,基板和复板采用细网格划分。先采用 LS-DYNA 软件建立二维平面计算模型,再利用 LS-prepost 软件将网格全部生成 SPH 粒子(见图1)。复板和基板材料选取 Cu 和 Q235 钢,爆炸焊接选用硝铵炸药。模型尺寸:复板 150 mm × 4 mm,基板 150 mm × 15 mm,间隙 6 mm,基板和复板网格尺寸为 0.2 mm × 0.2 mm,炸药网格尺寸为 0.4 mm × 0.4 mm。采用 cm-g-μs 单位制。

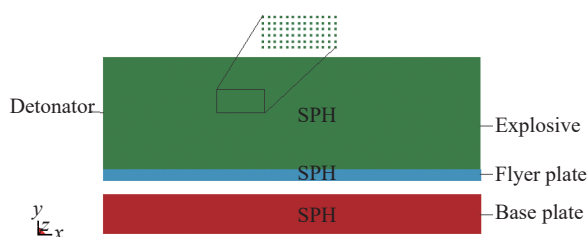


图1 计算模型

Fig. 1 Computational model

1.2 材料模型和状态方程

硝铵炸药选用 Jones-Wilkins-Lee(JWL)^[12] 状态方程(EOS), 计算公式为

$$p = A_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中: A_1 、 B_1 、 R_1 、 R_2 和 ω 为材料系数; p 为爆轰产物压力, GPa; E_0 为初始比内能, $\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-3}$; V 为爆轰气体产物的相对比容。炸药的具体 JWL 状态参数见表1, 其中 ρ 为密度, D 为爆速。

表1 硝铵炸药的 JWL 状态方程参数

Table 1 JWL EOS parameters of ammonium nitrate explosive

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	A_1/GPa	B_1/GPa	R_1	R_2	ω
800	2 800	132.75	0.423	5.3	1.2	0.21

基板、复板均采用 Mie-Grüneisen 状态方程^[13] 和 Johnson-Cook 材料模型^[14]。Grüneisen 状态方程

被广泛应用于解决材料的大变形问题, 它描述了粒子速度 u_p 和冲击速度 D 之间的基本关系, 计算公式如下

$$\rho = \rho_H + \Gamma_\rho (e - e_H) \quad (2)$$

其中

$$\Gamma_\rho = \Gamma_0 \rho_0 = \text{Constant} \quad (3)$$

$$\rho_H = \frac{\rho_0 c_0 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2} \quad (4)$$

$$e_H = \frac{1}{2} \frac{\rho_H}{\rho_0} \frac{\mu}{1 + \mu} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (6)$$

式中: Γ_0 为 Grüneisen 系数, ρ 为当前密度, ρ_0 为初始密度, c_0 为体积声速, s 为压缩比。

Johnson-Cook 材料模型经常用来反映金属的力学行为, 计算公式如下

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*) (1 - T^{*m}) \quad (7)$$

其中无量纲温度 T^* 表示为

$$T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r) \quad (8)$$

式中: ε_p 为有效塑性应变; $\dot{\varepsilon}_p^* = \dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_p^0$ 为有效塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_p^0$ 为参考应变率; A 、 B 、 C 、 m 、 n 是与材料相关的常数; T_r 为室温; T_m 为熔点。Cu 和 Q235 钢的 Johnson-Cook 材料模型参数列于表 2, Grüneisen EOS 参数列于表 3, 其中: c 为声速, km/s; S_1 为拟合系数; a 为 Grüneisen 系数 Γ_0 的一阶体积修正, G 为剪切模量。

表 2 Cu 和 Q235 钢的 Johnson-Cook 模型参数

Table 2 Parameters of Johnson-Cook model of Cu and Q235 steel

Material	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	G/GPa	A/GPa	B/GPa	n	C	m	T_m/K	T_r/K
Cu	8.96	46	0.090	0.292	0.31	0.025	1.09	1 356	294
Q235	7.83	77	0.792	0.510	0.26	0.014	1.03	1 793	294

表 3 Cu 和 Q235 钢的 Grüneisen 方程参数

Table 3 Grüneisen EOS parameters of Cu and Q235 steel

Material	$c/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	S_1	Γ_0	a
Cu	3.940	1.489	2.02	0.47
Q235	4.569	1.490	2.17	0.46

1.3 爆炸复合窗口

爆炸焊接质量的好坏极其依赖选取的爆炸焊接参数, 如药量比、间距、碰撞速度、碰撞角等。参考文献 [15] 中的爆炸复合窗口, 选取复板厚度 $\delta_1 = 4 \text{ mm}$ 时药量比(单位面积炸药与复板质量之比 R)分别为 $R_1 = 1.0$ 、 $R_2 = 1.5$ 的两组参数开展研究。经计算得到对应的炸药厚度分别为 44.8 mm 和 67.2 mm。由图 2 可知, R_1 靠近可焊窗口下限, R_2 位于可焊窗口内部, 两组参数均位于爆炸复合窗口内部。

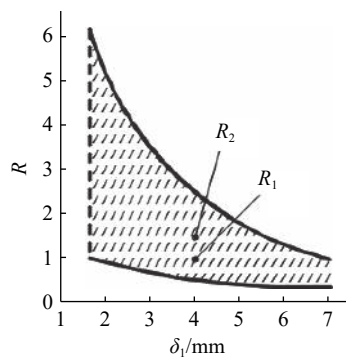


图 2 爆炸焊接窗口

Fig. 2 Explosive welding window

2 模拟结果分析

2.1 均匀布药

为了研究炸药量与焊接界面波形的关系, 首先进行均匀布药模拟。分别建立炸药厚度为 44.8 mm 和 67.2 mm 的计算模型, 输出模拟图像, 如图 3 所示。

为了方便地了解爆炸焊接过程参数的变化规律, 在结合面上等间距区域选取 7 个关键点, 选取位置如图 4 所示。输出关键点的碰撞压力值, 如表 4 所示。硝铵炸药的爆轰压力计算公式为

$$p = \frac{\rho_0 D^2}{1 + \gamma} \quad (9)$$

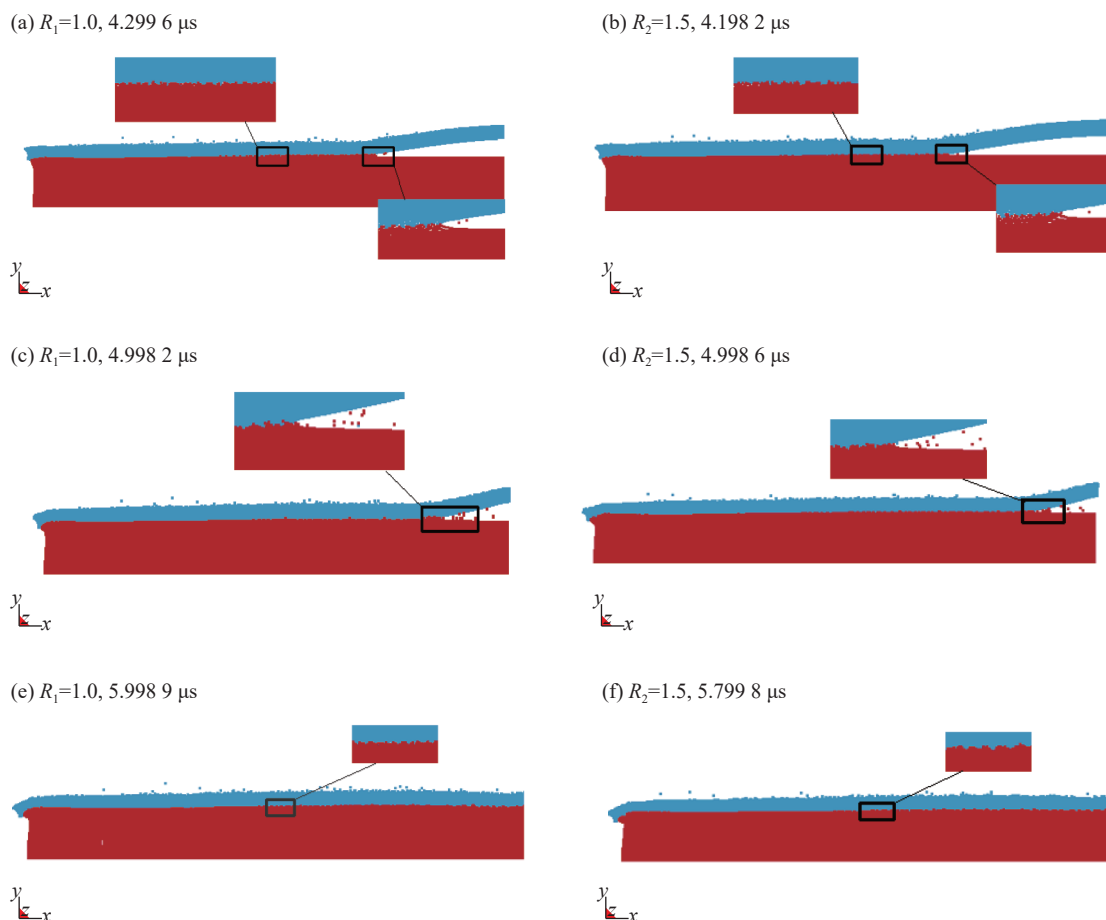


图 3 均匀布药模拟效果图

Fig. 3 Simulation effect diagram of uniform charge

式中: γ 为硝铵炸药的多方指数, ρ_0 为炸药密度, D 为炸药爆速。

由式(9)可以看出, 模拟中使用的硝铵炸药的密度为常数, 所以爆轰压力 p 只与炸药爆速 D 有关。由于炸药的爆速与单位面积的药量成正比^[16], 且 $R_1 < R_2$, 因此 R_2 对应的爆轰压力要高于 R_1 的爆轰压力。炸药的爆轰压力作用于复板, 复板又传递到焊接界面, 最终导致 R_2 对应的基板、复板碰撞压力高于 R_1 。根据图 5 的模拟结果可知, 理论分析结果与模拟结果一致。

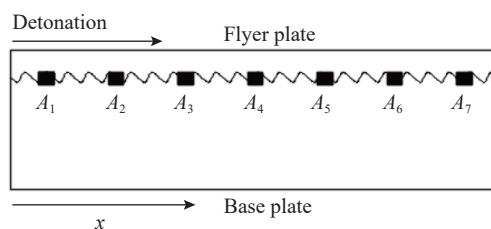


图 4 关键点取样示意图

Fig. 4 Schematic diagram of key point sampling

表 4 均匀布药方案关键点碰撞压力

Table 4 Collision pressure of key points in uniform charge scheme

Key point	Pressure/GPa		Key point	Pressure/GPa	
	$R_1 = 1.0$	$R_2 = 1.5$		$R_1 = 1.0$	$R_2 = 1.5$
A_1	0.581	1.602	A_5	4.999	7.086
A_2	1.672	2.002	A_6	5.754	8.576
A_3	4.507	5.289	A_7	0.526	1.031
A_4	4.654	6.191			

焊接界面波长的计算公式^[17]为

$$\lambda = \frac{\pi v_p d}{2c} \left(\frac{c}{v_c} - 1 \right)^2 \quad (10)$$

式中: v_p 为碰撞速度; d 为复板厚度; c 为材料声速; v_c 为碰撞点移动速度, 等于炸药的爆轰速度。

从式(10)可以看出, 给定金属板材的材料参数后, 复板厚度 d 和材料的声速 c 为常数, 碰撞速度 v_p 和碰撞点移动速度 v_c 为变量, 界面波的波长 λ 与 v_p 成正比, 与 v_c 成反比。

从图 3 可以看出, 复板上部均出现了打伤现象, 这是由于前期炸药和板材划分的网格尺寸不同所致。 R_1 和 R_2 两组模拟均得到了波状焊接界面, 这被认为是焊接良好的标志^[18], 模拟结果与文献 [19] 的金相实验结果吻合较好。从图 3(a) 和图 3(b) 看出, 焊接界面在起爆端区域没有出现波状界面, 随着距起爆端距离的不断增大, 界面先后出现了无波到微波、微波到大波的转变。图 3(a) 中射流现象最先出现在 4.299 6 μs 时刻, 而图 3(b) 中的射流最先出现在 4.198 2 μs , 早于前者, 这是由于药量比越大, 爆轰能量越大, 导致射流出现较早。焊接界面的放大图像显示, 波状界面先于射流出现, 可以认为波的形成不一定需要射流, 印证了 Godunov 提出的应力波机理^[20]。从图 3(c)、图 3(d) 可以清晰地看出, 碰撞点前方在基板和复板碰撞作用下, 板材表面喷射出大量射流, 可以清洗掉金属表面的杂质和氧化层, 提高焊接质量^[21]。喷射出的射流中, 基板的成分明显高于复板, 基板材料是射流成分的主要来源, 这是由于 Cu 的密度高于 Q235 钢, 密度较小的材料更容易产生射流^[22]。图 3(e) 和图 3(f) 为模拟图像, 表明基板与复板已经完全复合。从复合板中央部分的取样结果来看, 图 3(f) 的波状尺寸大于图 3(e), 由于小波增加了焊接面积, 有助于提高焊接质量, 波形越大, 越容易出现裂缝和孔洞等缺陷, 因此可以认为药量比 R_1 优于 R_2 的焊接质量, 药量比尽量取在可焊窗口的下限。

图 5 是均匀布药下各个关键点的碰撞压力折线。考虑到边界效应的影响, 去掉首尾两个关键点后, 折线显示沿着爆轰方向焊接界面的碰撞压力逐渐增大, 由于碰撞压力过大会产生熔化层, 产生的稀疏波可能将已结合的复合板拉开, 降低焊接质量, 因此均匀布药不是最终选择。

2.2 梯形布药

根据均匀布药方式下界面波的分布特点, 起爆端区域的结合呈平直界面, 这是由于炸药起爆时能量不稳定^[23], 碰撞压力小。在爆炸焊接中, 碰撞压力过小会导致界面未复合^[16], 即起爆端附近极易出现未复合现象, 降低金属板材的利用率, 这种现象被称为边界效应, 在实验和工程实践中应尽量避免。碰撞压力要超过某个临界值, 复合板才能获得良好的焊接质量, 这也证明了爆炸焊接是一种压力焊^[24]。沿着爆轰方向, 结合界面逐渐由无波发展成微波、大波界面, 这是爆炸产物的堆集以及基板和复板碰撞引起的振动能在待复合区叠加并共同作用的结果^[25-26]。结合式(9)、式(10)可知, 波状界面的尺寸与碰撞点的移动速度有关, 碰撞压力与炸药爆速成正比, 在平行法爆炸焊接装置中爆速等于碰撞点的移动速度^[27], 由此得出, 炸药的爆轰能量赋予了复板巨大的压力, 碰撞压力决定界面波形。因此可以通过调整炸药厚度来控制爆轰能量, 使界面波形维持在微波状, 进而提高复合板的焊接质量。

设计如图 6 所示的呈梯形装药结构, 通过调整炸药起爆端和末端厚度 a 、 b 的值, 来确定一个合适的倾斜装药角度, 沿着爆轰方向控制碰撞点的压力基本保持不变, 避免因大波状界面而产生涡旋和裂缝, 提高复合板的结合强度, 使整个焊接界面都保持在微波状结合状态。布药方案见表 5。

由于网格划分较大, 导致波形尺寸不易测量。当网格划分较小时, 可以较清晰地观察界面的形貌特征。由前述分析得知, 碰撞压力决定界面波形, 因此将界面上的碰撞压力作为研究对象, 使界面上各点处碰撞压力基本保持一致。

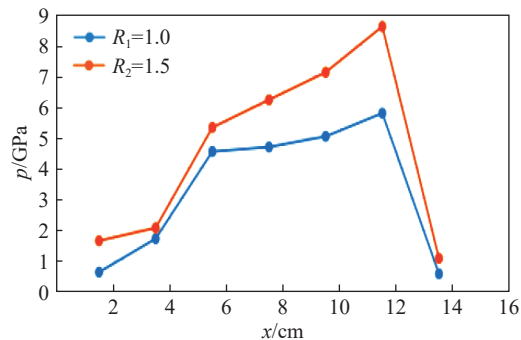


图 5 关键点碰撞压力值折线

Fig. 5 Line diagram of collision pressure of key points

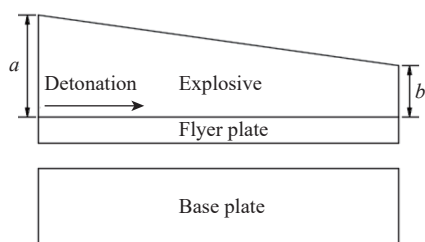


图 6 梯形装药结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of ladder charge structure

不同梯形布药方案下界面关键点的碰撞压力如图 7 所示, 具体压力值列于表 6。由图 7 中折线的波动情况可知, 当采用梯形布药方式后, 基板、复板之间的碰撞压力不再呈均匀布药下逐渐增长的趋势, 而是呈较小幅度的上下波动, 因此梯形布药方式可以消除不利因素, 使焊接界面的碰撞压力基本保持不变, 以获得波长较小、波幅较小的微波界面。观察图 7 发现, 起爆端和末端的碰撞压力最小, 这是由稀疏波引发的边界效应所致。在不考虑首尾两端的压力时, 方案 III 的碰撞压力波动最小, 因此最终焊接界面的波形状态好于其他方案。而方案 II 中界面上的碰撞压力起伏最大, 最终可能导致基板与复板未复合。因此确定合适的首尾装药高度是梯形布药方案的关键。

综上所述, 采用梯形布药方式可以消除焊接界面波形不均匀现象, 而且减少了炸药用量, 同时也可以减小爆炸焊接实验现场引发的噪声。通过分析各个关键点的碰撞压力可知, 方案 III 的复合效果最好, 即炸药起爆端和末端的厚度分别为 67.2 mm 和 42.0 mm 时装药倾斜角度最佳。在实际的工程实践中, 梯形布药方式的应用并不广泛, 原因是其影响因素较多, 参数确定比较复杂。尽管减小炸药厚度会使碰撞压力减小, 但碰撞压力的变化与炸药厚度并非成严格的正比关系, 所以才会得到图 7 的模拟结果。如何优化梯形布药参数使界面波波形基本保持不变, 还需要大量深入的研究。

3 界面波形成机理

爆炸焊接过程具有瞬时性, 因此很难用实验方法来研究界面波的形成与焊接参数之间的关系。虽然有关界面波形成机理的研究已经进行了数十年, 但迄今为止仍然没有达成一个统一的认识^[28]。期间众多学者提出了一些波形形成机制, 主要有复板流侵入机理^[29]、Helm-holtz 不稳定流机理^[30-31]、涡脱落机理^[32-33]和应力波机理^[34]。随着数值模拟软件的发展, SPH 法能够清晰地模拟出波形成过程, 为解释界面波的形成机理提供了帮助。

图 8 展示了采用 SPH 法得到的爆炸焊接界面波形成过程。基板与复板在 P 点高速碰撞, 此时 P 点可看作低黏塑性流体状态, 巨大的碰撞压力使 P 点产生塑性变形。如图 8(a) 所示, 复板与基板碰撞后

表 5 梯形布药方案

Table 5 Ladder charging scheme

Scheme	a/mm	b/mm
I	67.2	58.8
II	67.2	50.4
III	67.2	42.0
IV	67.2	33.6

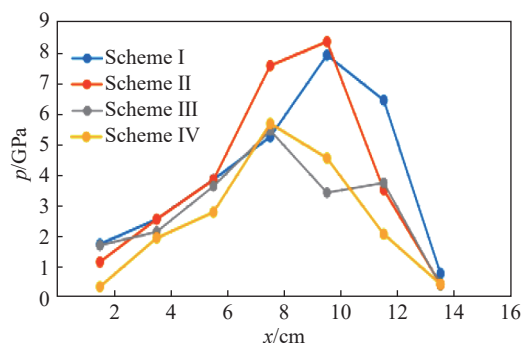


图 7 关键点碰撞压力值折线图

Fig. 7 Line diagram of collision pressure of key points

表 6 梯形布药方案关键点碰撞压力

Table 6 Collision pressure of key points of ladder charge scheme

Key point	Pressure/GPa			
	Scheme I	Scheme II	Scheme III	Scheme IV
A_1	1.738	1.158	1.694	0.351
A_2	2.549	2.548	2.141	1.936
A_3	3.839	3.830	3.621	2.776
A_4	5.230	7.547	5.439	5.665
A_5	7.890	8.330	3.413	4.537
A_6	6.423	3.505	3.731	2.064
A_7	0.780	0.431	0.397	0.435

形成初始射流和再入射流,再入射流在前方复板的阻碍下向斜上方喷出。沿着焊接方向向前发展,碰撞点 P 转移到波峰上,见图 8(b),先前的再入射流被基板捕获,形成在波峰的前后方,此处极易形成漩涡、空洞等缺陷,从而降低复合板的焊接质量。碰撞点 P 转移到波峰上后,再入射流与波峰碰撞,沿斜下方喷出。图 8(c) 中碰撞点 P 越过波峰后形成新的碰撞点,在巨大的爆轰压力下基板再次发生塑性变形,形成新的波形,由此产生周期性的波状界面。由图 8 可见,SPH 法模拟的波形成过程与复板流侵入机理的一致性较好,证明了 SPH 法在解释爆炸焊接界面波形成过程中复板流侵入机理的有效性。

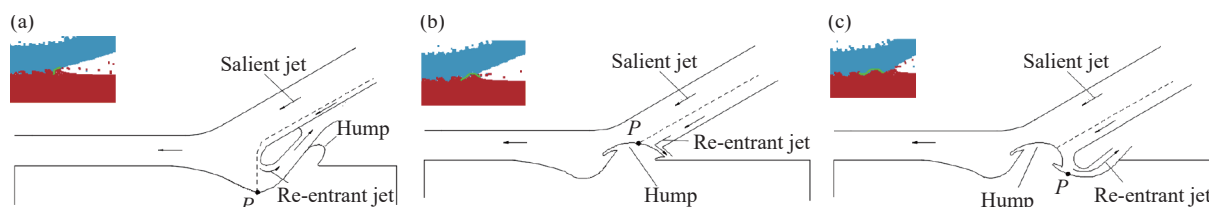


图 8 波形成示意图

Fig. 8 Illustration of wave formation

4 结 论

(1) 采用 LS-DYNA 软件和 SPH 法,模拟了整个爆炸焊接过程,得到典型的波状界面和射流现象,理论分析与模拟结果具有一致性。

(2) 在两种药量比、均匀布药方案中,忽略边界效应后的结果显示,沿着爆轰方向基板与复板之间的碰撞压力均逐渐增大,而且药量比越大,碰撞压力越大,界面波形越大。

(3) 在梯形布药方案中,通过改变炸药起爆端和末端的高度设计了 4 种方案,结果显示梯形布药可以有效消除爆炸焊接界面波的不均匀现象,使界面波形尺寸基本保持一致,而且节省了炸药用量。当起爆端和末端的高度分别为 67.2 mm 和 42.0 mm 时效果最佳。

(4) 介绍了几种波形成机理,展示并研究了界面波形成过程,模拟的波形成过程与复板流侵入机理的一致性较好,证明了复板流侵入机理解释界面波形成过程的有效性。

参考文献:

- [1] NASSIRI A, KINSEY B. Numerical studies on high-velocity impact welding: smoothed particle hydrodynamics (SPH) and arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, 24: 376–381.
- [2] ABE A. Numerical study of the mechanism of wavy interface generation in explosive welding [J]. *JSME International Journal Series B—Fluids and Thermal Engineering*, 1997, 40: 395–401.
- [3] YUAN X, WANG W, CAO X, et al. Numerical study on the interfacial behavior of Mg/Al plate in explosive/impact welding [J]. *Science & Engineering of Composite Materials*, 2017, 24(6): 833–843.
- [4] TABBATAEE M, MAHMOUDI J. Finite element simulation of explosive welding [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 24(3): 349–359.
- [5] MOUSAVI A A A, BURLEY S J, AL-HASSANI S T S. Simulation of explosive welding using the Williamsburg equation of state to model low detonation velocity explosives [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(6): 719–734.
- [6] MOUSAVI A A A, AL-HASSANI S T S. Simulation of wave and jet formations in explosive/impact welding [C]//ASME 7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. Manchester, England, 2004: 265–274.
- [7] 王宇新, 李晓杰, 孙国, 等. 无网格 MPM 法三维爆炸焊接数值模拟 [J]. *计算力学学报*, 2013, 30(1): 34–38.
WANG Y X, LI X J, SUN G, et al. Three dimensional simulation of the explosive welding by using of the MPM [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2013, 30(1): 34–38.
- [8] 刘江, 郑远远, 沈宗宝, 等. 基于 SPH 方法的爆炸焊接过程模拟 [J]. *焊接技术*, 2013, 42(12): 17–20.
LIU J, ZHENG Y Y, SHEN Z B, et al. Simulation of explosive welding process based on SPH method [J]. *Welding*

- Technology, 2013, 42(12): 17–20.
- [9] 周春华, 史长根, 蔡立艮, 等. 爆炸焊接布药工艺的研究 [J]. [焊接技术](#), 2002, 31(6): 17–18.
ZHOU C H, SHI C G, CAI L G, et al. Research on dynamite-distributing technology of explosive welding [J]. [Welding Technology](#), 2002, 31(6): 17–18.
- [10] 董刚, 周春华, 史长根, 等. 爆炸焊接不等厚度布药工艺 [J]. [焊接](#), 2004(6): 35–38.
DONG G, ZHOU C H, SHI C G, et al. Unequal thickness arranging explosive technology of explosive welding [J]. [Welding](#), 2004(6): 35–38.
- [11] 缪广红, 李亮, 江向阳, 等. 双面爆炸焊接的数值模拟 [J]. [高压物理学报](#), 2018, 32(4): 1–8.
MIAO G H, LI L, JIANG X Y, et al. Numerical simulation of double sided explosive welding [J]. [Chinese Journal of High Pressure Physics](#), 2018, 32(4): 1–8.
- [12] LEE E, FINGER M, COLLINS W. JWL equation of state coefficients for high explosives [R]. Livermore, CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1973.
- [13] LIU G R, LIU M B. 光滑粒子流体动力学——一种无网格粒子法 [M]. 韩旭, 译. 长沙: 湖南大学出版社, 2005.
- [14] 程国强, 李守新. 金属材料在高应变率下的热粘塑性本构模型 [J]. [弹道学报](#), 2004, 11(6): 18–22.
CHENG G Q, LI S X. Thermal viscoplastic constitutive model of metallic materials at high strain rate [J]. [Journal of Ballistics](#), 2004, 11(6): 18–22.
- [15] 张振逵, 吴绍尧. 用半圆柱法测定铜-钢爆炸焊接窗口及合理药量 [J]. [焊接学报](#), 1980(3): 17–30, 67.
ZHANG Z K, WU S Y. Determination of explosive welding window and reasonable charge content of copper-steel by semi-cylindrical method [J]. [Transactions of the China Welding Institution](#), 1980(3): 17–30, 67.
- [16] SUI G F, LI J S, SUN F, et al. 3D finite element simulation of explosive welding of three-layer plates [J]. [Science China-Physics Mechanics & Astronomy](#), 2011, 54(5): 890–896.
- [17] 孙锦山, 朱建士. 理论爆炸物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 356–418.
- [18] MOUSAVI A A A, AL-HASSANI S T S. Finite element simulation of explosively-driven plate impact with application to explosive welding [J]. [Materials & Design](#), 2008, 29(1): 1–19.
- [19] 蔡立艮, 卢红标, 周春华, 等. 爆炸焊接布药工艺与微观结合界面形貌分析 [J]. [爆破](#), 2010, 27(1): 78–81.
CAI L G, LU H B, ZHOU C H, et al. Arranging explosive technology of explosive welding and microanalysis of bonding interfaces [J]. [Blasting](#), 2010, 27(1): 78–81.
- [20] 王克鸿, 张德库, 张文军. 爆炸焊接技术研究进展 [J]. [机械制造与自动化](#), 2011, 40(2): 1–5.
WANG K H, ZHANG D K, ZHANG W J. Research progress of explosive welding technology [J]. [Mechanical Manufacturing and Automation](#), 2011, 40(2): 1–5.
- [21] FINDIK F. Recent developments in explosive welding [J]. [Materials & Design](#), 2011, 32(3): 1081–1082.
- [22] 袁晓丹. 铝-镁合金爆炸焊接层状复合界面形成机制及数值模拟 [D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
YUAN X D. Formation mechanism and numerical simulation of layered composite interface in explosive welding of Al-Mg alloy [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [23] LI Y, WU Z. Microstructural characteristics and mechanical properties of 2205/AZ31B laminates fabricated by explosive welding [J]. [Metals](#), 2017, 7(4): 125.
- [24] 郑远谋. 爆炸焊接和爆炸复合材料 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 13–14.
- [25] 缪广红. 蜂窝结构炸药与双面爆炸复合的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
MIAO G H. Research on honeycomb structure explosives and double sided explosive cladding [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [26] 王耀华. 金属板材爆炸焊接研究与实践 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [27] 缪广红, 马宏昊, 沈兆武, 等. 不锈钢-普碳钢的双面爆炸复合 [J]. [爆炸与冲击](#), 2015, 35(4): 536–540.
MIAO G H, MA H H, SHEN Z W, et al. Double-sided explosive recombination of stainless steel and plain carbon steel [J]. [Explosion and Shock Waves](#), 2015, 35(4): 536–540.
- [28] WANG X, ZHENG Y, LIU H, et al. Numerical study of the mechanism of explosive/impact welding using smoothed particle hydrodynamics method [J]. [Materials & Design](#), 2012, 35: 210–219.
- [29] BAHRANI A S, BLACK T J, CROSSLAND B. The mechanics of wave formation in explosive welding [J]. [Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences](#), 1967, 296(1445): 123–136.

- [30] COWAN G R, BERGMANN O R, HOLTZMAN A H. Mechanism of bond zone wave formation in explosion-clad metals [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1971, 2(11): 3145–3155.
- [31] COWAN G R, HOLTZMAN A H. Flow configurations in colliding plates: explosive bonding [J]. *Journal of Applied Physics*, 1963, 34(4): 928–939.
- [32] KOWALICK J F, HAY D R. A mechanism of explosive bonding [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1971, 2(7): 1953–1958.
- [33] REID S R, SHERIFF N H S. Prediction of the wave length of interface waves in symmetric explosive welding [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1980, 18(2): 87–94.
- [34] GODUNOV S K, DERIBAS A A, ZABRADINA V. Hydrodynamic effect in colliding solids [J]. *Computational Physics*, 1970, 5: 517–539.

Effect of Charge Mode on Interface Wave of Copper/Steel Explosive Welding and Wave Formation Mechanism

MIAO Guanghong^{1,2}, MA Leiming³, LI Xuejiao⁴, AI Jiuying³,
ZHAO Wenhui³, MA Honghao⁵, SHEN Zhaowu⁵

(1. *State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;*

2. *School of Mechanics and Optoelectronics Physics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;*

3. *School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;*

4. *School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;*

5. *CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)*

Abstract: In order to improve the quality of explosive welding and to solve the problem of high noise and low efficiency, Cu is selected as the flyer plate and Q235 steel is used as the base plate. The LS-DYNA software and the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method are used to design the uniform distribution and the ladder distribution scheme, and the effect of the nitrate explosive on the explosive welding interface wave is studied. The results of the uniform distribution show that the collision pressure gradually increases along the detonation direction; the more amount of explosive, the greater the collision pressure and the higher the interface wave shape. In the ladder distribution scheme, four schemes are designed by changing the height of the initiation and the end of the explosive. The results show that the ladder distribution can eliminate the uneven phenomenon of the interface wave in the explosion welding, and keep the size of interface waveform consistent, and the amount of explosives will be saved. The waveform is best when the height of the initiation and the end of detonation is 67.2 mm and 42.0 mm, respectively. By studying the formation process of interface wave, the SPH results of formation process of interface wave simulated is in good agreement with the jet indentation mechanism, which shows the effectiveness of the jet indentation mechanism to explaining the formation process of interface wave.

Keywords: explosive quantity; charging mode; ladder charge; interface wave