

爆炸焊接波状界面的形成和发展

曾翔宇¹, 李晓杰^{1,2}, 王小红¹, 闫鸿浩¹, 李科斌¹

(1. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

(2. 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 为了研究在爆炸焊接过程中波状界面的形成机理, 采用对不同强度基板的爆炸焊接实验与光滑粒子流体动力学 (smoothed particle hydrodynamics, SPH) 数值模拟相结合的方式对试样界面形貌及其焊接过程进行了分析。实验发现, 当焊接参数在可焊窗口以内时, 强度较低的材料界面比较容易形成周期性波纹, 而且数值模拟结果显示, 在碰撞点离开后 2 个周期的范围内, 界面粒子仍然具有较高的运动速度并沿界面持续运动形成界面波; 而强度较高且表面光滑的材料则难以形成波状界面。结果表明: 爆炸焊接波状界面的形成需要扰动的积累进而触发 Bahrani 刻入机理, 而当界面缺少扰动时则难以形成波状界面; 在碰撞点离开后的 2 个周期范围内, 波状界面的熔融金属将沿界面持续运动, 最终形成稳定的界面波。

关键词: 爆炸焊接; 成波机理; 界面扰动; 数值模拟

中图分类号: TG456.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)06-1977-07

爆炸焊接作为一种高效的复合材料加工技术, 利用炸药爆轰能量驱动金属板间发生高速碰撞而实现焊接, 由于能实现众多异质金属大面积复合, 故已经被广泛应用于航空工业、核工业及石油化工管道等诸多领域^[1-4]。在其应用于工业生产的 50 多年中, 有数百种不同种类的复合材料通过爆炸焊接技术成功制备^[5]。针对应用中出现问题相关学者做出了大量的研究, 尤其对于爆炸焊接复合材料波状界面的研究至今依然吸引着相关学者极大的关注, 其机理尚有很多值得商榷之处^[6]。

关于爆炸焊接波状界面形成机理的研究, 目前主要集中于“Bahrani 刻入”、“海尔姆霍茨不稳定性”、“涡脱落机理”及“应力波机理”4 种理论。Bahrani^[7]刻入机理是目前认同度较高的理论成果, 这种机理考虑了碰撞点的压力、射流的侵彻及剪切应力的作用, 能形象地解释不对称碰撞时比较常见的涡旋区及周期性波的形成, 而且通过 Li^[8]及 Chen^[9]等人的研究成果也印证了相关结论的正确性。但是 Bahrani 刻入机理假设基板不产生射流, 而实际上射流是基板与飞板共同组成的, 这一点不符合实际情况。除此之外, Cowan^[10]提出了涡脱落机理以及 Holtzman^[11]等人提出了海尔姆霍茨不稳定性原理, 前者认为爆炸焊接中界面的金属流动可以用流体动力学中流体流束在围绕

一个障碍物流动时流束的分离与再汇合来定性地解释, 而后者认为界面的形成是由于射流的扰动导致流体界面失稳造成的。虽然扰动失稳后形成的涡旋界面与爆炸焊接波状界面十分类似, 但是在爆炸焊接过程中并不存在足以产生扰动的障碍物, 而且这 2 种理论都把界面金属假设为流体而忽略了材料强度对界面形貌的影响。然而张^[12]及李^[13,14]的研究结果表明, 材料强度对爆炸焊接界面波的形貌有不可忽视的作用, 所以这 2 种理论仍然有其局限性。

为了研究爆炸焊接波状界面形成和发展的机理, 本工作通过对不同强度基板的爆炸焊接实验与 SPH 数值模拟相结合的方法系统地研究了界面波形成和发展的趋势, 为爆炸焊接波状界面形成机理的研究提供参考。

1 不同强度基板爆炸焊接实验

爆炸焊接实验采用平行焊接法, 如图 1 所示, 其中飞板采用 Q235 冷轧板, 而原始状态及热处理后的 45 钢依次作为实验的基板, 材料成分如表 1 所示, 而材料强度和硬度如表 2 所示。基板与飞板的尺寸分别为 40 mm×15 mm×10 mm 与 40 mm×15 mm×2 mm, 两板之间的间距为 6 mm。炸药采用密度为 0.9 g/cm³ 的 ANFO 炸药, 在厚度为 30 mm 的情况下, 采用压导式

收稿日期: 2019-06-18

基金项目: 国家自然科学基金 (11672067, 11672068)

作者简介: 曾翔宇, 男, 1990 年生, 博士生, 大连理工大学工程力学系, 辽宁 大连 116024, 电话: 0411-84706163, E-mail: XYZeng225@163.com

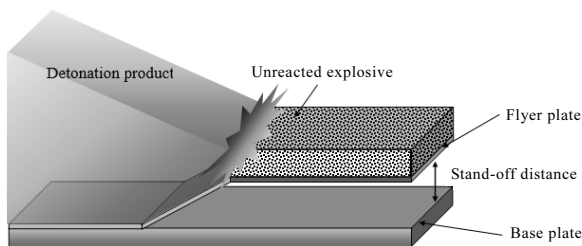


图 1 爆炸焊接实验示意图

Fig.1 Schematic illustration of explosive welding condition

表 1 材料成分

Table 1 Chemical composition of experiment materials (wt%)								
Material	C	Ni	Cr	Mn	P	Si	S	Fe
45	0.5	0.25	0.25	0.6	0.035	0.3	-	Bal.
Q235	0.2	-	-	0.6	0.045	0.3	0.05	Bal.

表 2 材料强度及硬度

Table 2 Tensile strength and hardness of the plates		
Material	Tensile strength/MPa	Hardness, HV/ ×10 MPa
Q235	325	100
45(as-received)	357	105
45(heat treated)	895	268

连续探针^[15]测得其爆速为 2312 m/s。通过 MPM 三维爆炸焊接程序编程^[16]计算可得，在爆速 $V_d=2312$ m/s 以及间距 $H=6$ mm 的情况下其弯折角 $\theta \approx 17^\circ$ ，进而根据式(1)求得其碰撞速度 $V_p=744$ m/s。

$$V_p = 2V_d \sin \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

为确保使用爆炸焊接参数可以将实验材料成功焊接，实验之前应该检验焊接参数是否在可焊窗口以内。其中根据式(2)可得双金属爆炸焊接下限^[17]。

$$V_{pmin}=u_1+u_2 \quad (2)$$

其中：

$$u_1 = \frac{1+4\lambda_1 P_{min}/(\rho_1 C_1^2)-1}{2\lambda_1} \quad (3)$$

$$u_2 = \frac{1+4\lambda_2 P_{min}/(\rho_2 C_2^2)-1}{2\lambda_2} \quad (4)$$

$$P_{min}=\text{Max}(P_{min1}, P_{min2}) \quad (5)$$

式中： λ 为线性系数， C_1 与 C_2 为材料声速， ρ_1 与 ρ_2 为材料密度， P_{min1} 与 P_{min2} 为单金属焊接最低压力，可由式(6)计算得到。

$$P_{min} = \rho D \frac{K\sqrt{H_v/\rho}}{2} \quad (6)$$

式中： D 为材料中的冲击波速度， H_v 为维氏硬度， ρ

为材料密度， K 为经验系数，常取 0.6~1.2。而焊接上限 V_{pmax} 根据式(7)^[18]可得。

$$V_{pmax} = \frac{2}{\pi^{1/4}} \sqrt{(\rho_1 c_{p1} \sqrt{a_1} + \rho_2 c_{p2} \sqrt{a_2}) T_m \sqrt{K}} \frac{\sqrt{t_{min}}}{v_c} \sqrt{\frac{1}{\rho_1 h_1} + \frac{1}{\rho_2 h_2}} \quad (7)$$

式中： c_{p1} 与 c_{p2} 为材料的定压比热， a_1 与 a_2 分别为材料的热扩散率， h_1 与 h_2 分别为基板与飞板的厚度， T_m 为材料熔点， v_c 为爆速， t_{min} 为反射的拉伸波到达界面的最短时间。经检验，焊接参数位于可焊窗口范围以内，可以焊接各组试样。

成功焊接后，在试样中间波状界面稳定区域切取试样，打磨抛光试样，并用 4% 硝酸乙醇进行腐蚀。腐蚀后的试样通过光学金相显微镜对其界面形貌进行观察。

2 数值模拟

SPH 方法适用于模拟高速碰撞下材料的高应变率塑性变形^[19,20]，所以在数值模型的界面区采用 SPH 粒子进行填充。而为了保证计算精度的前提下提高计算效率，在基板除焊接界面 0.5 mm 厚以外的区域使用有限元网格进行替代，其模型如图 2 所示。其中，为了确保界面射流的形成，粒子尺度需要有所控制。对于非对称碰撞而言，其再入射流宽度 m_j 如式(8)所示：

$$m_j = \frac{h_2}{2} (1 - \cos \theta) \quad (8)$$

根据式(8)，射流宽度约为飞板厚度的 2%。为了实现射流的形成，粒子尺度必须小于飞板厚度的 2%。材料的本构方程采用 JC(Johnson-Cook)方程，其参数如表 3 中所示。

3 结果与讨论

3.1 界面形貌及模拟结果

Q235 冷轧板与初态 45 钢爆炸焊接界面形貌及其数值模拟结果如图 3 所示。通过对比数值计算结果与

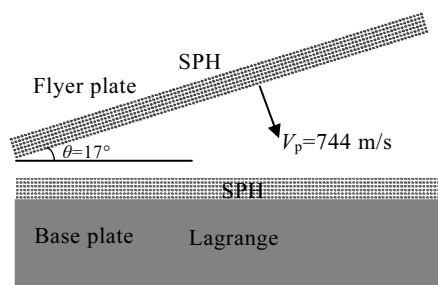


图 2 爆炸焊接数值模拟模型

Fig.2 Model of explosive welding in the simulation

表 3 JC 方程材料参数
Table 3 Material parameters of the Johnson-Cook model

Material	Shear modulus/ GPa	Yield stress/ GPa	Hardening exponent	Strain rate constant	Thermal softening exponent	Melting temp./K	Ref. strain rate/s ⁻¹
Q235	53.5	0.270	0.16	0.015	1.03	1795	1.16
45(as-received)	71.8	0.300	0.36	0.022	1.00	1811	1.00
45(heat treated)	81.8	0.820	0.36	0.022	1.00	1811	1.00

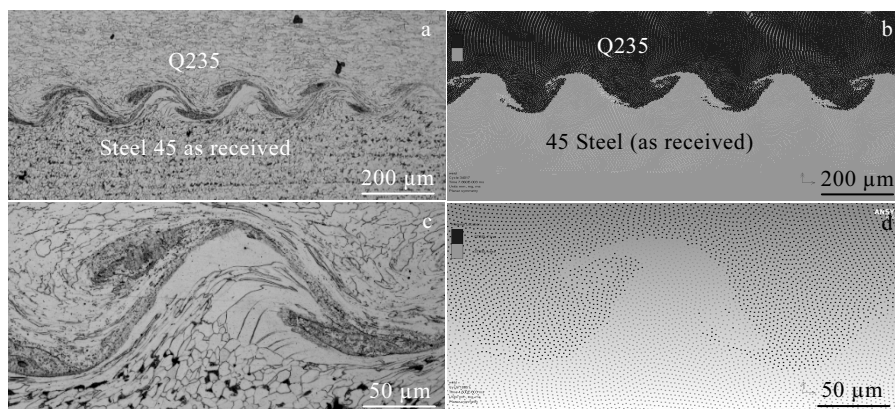


图 3 初态 45 钢焊接的界面形貌及模拟结果

Fig.3 Comparison of interface morphologies (a, b) and simulation results (c, d) of 45 steel (as received)

实验结果可以发现,焊接试样均出现了周期性的波纹,这是典型的爆炸焊接界面特征。爆炸焊接波状界面的形成是由于在飞板高速的撞击下驻点附近形成了高温高压区,温度和压力急剧的上升使得界面金属出现了熔化并形成了金属射流。金属射流不仅对界面具有清洁作用,可以清除金属表面的氧化物及其他杂质,提高焊接界面的质量,并且反复扰动的射流将侵入基板与复板,最终形成波状界面。

数值模拟结果如图 3c, 3d 所示,其中界面参数示于表 4。无论是界面形貌还是波长 λ 与幅值 L 等界面参数都与实验结果十分吻合,这证明了数值模型的合理性以及模拟数据的准确性,为接下来根据模拟结果得到的分析结论奠定了基础。

3.2 界面波形成机理

Bahrani 刻入机理示意图及模拟单个周期界面波的形成过程如图 4 所示。当飞板高速撞击基板时,飞板射流侵入基板并形成了波谷(图 4a)。随着碰撞点的移动,其高压及再入射流的冲刷将使波峰的高度降低

并被拉长形成基板的波峰,如图 4b, 4c。当碰撞点继续前进时,基板的波峰受碰撞点高压出现下坡趋势,形成的再入射流将再次侵入基板形成凹坑。被凹坑分流的射流一部分将进入基板卷曲的空腔中形成涡旋,如图 4e,而另一部分将随碰撞点继续前移形成下一个波峰,如图 4f。

通过对比数值计算的结果可以发现,其波状界面的形成过程完全吻合,所以 Bahrani 刻入机理对波状界面形成的描述是可靠的。但是,通过观察模拟结果可以发现,在图 4g~4l 中组成金属射流的粒子不仅仅全部出自飞板,而是由基板与飞板的粒子共同组成的,这一点与 Bahrani 刻入机理的描述有所区别。但是这点区别并不影响 Bahrani 刻入机理整体的准确性。

3.3 界面波的发展过程

尽管 Bahrani 刻入机理可以合理地解释界面波形成的原因,但是对于碰撞点离开后界面波的发展情况并没有阐述。首先通过图 5a 可以发现,当碰撞点离开后虽然材料的速度和温度迅速降低,但是界面波仍然有一个继续生长的过程,新形成的波纹涡旋区与远离碰撞点的区域相比并没有完全形成,如图 5b 所示。此外,根据 Bahrani 刻入机理显示,焊接界面应该附着一层熔化的金属射流,从图 5b 的界面温度场也可以发现红色的熔化粒子附着于整个焊接界面,但是在图 6

表 4 波状界面参数

Table 4 Parameters of wave interface

Parameter	Specimen	Simulation result
$\lambda/\mu\text{m}$	220	226
$L/\mu\text{m}$	88	91

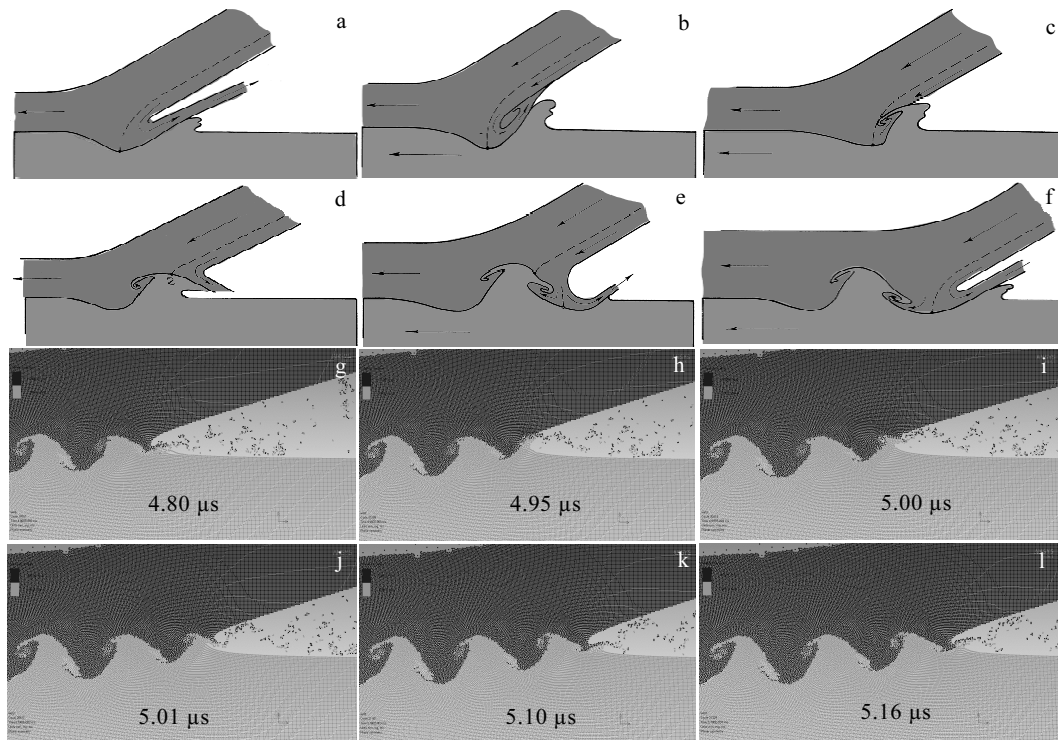


图 4 Bahrani 刻入机理及对应的模拟结果

Fig.4 Comparison of the Bahrani wave formation model (a~f) and the results of SPH simulation (g~l)

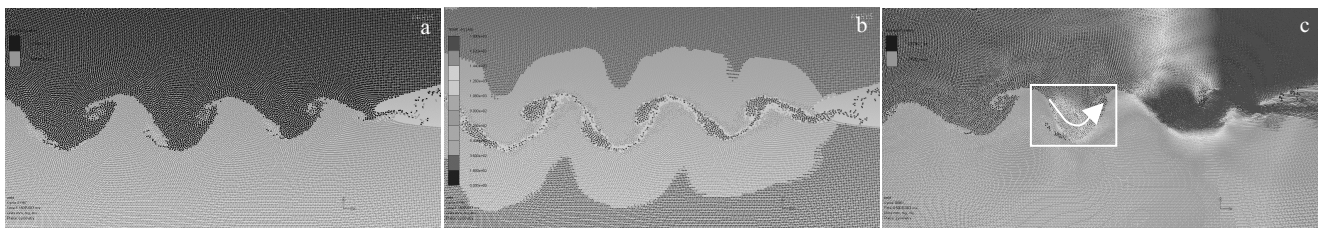


图 5 界面形貌, 界面温度场, 界面粒子速度分布及运动方向的数值模拟结果

Fig.5 Numerical simulation results of interface morphology (a), temperature distribution (b), velocity distribution and direction of interfacial particles (c)

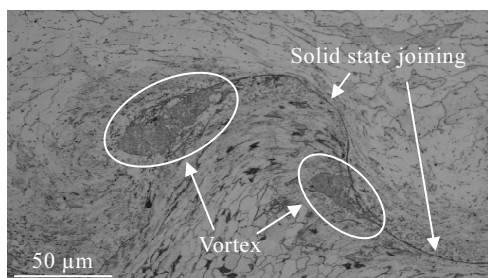


图 6 界面形貌放大图

Fig.6 High magnification image of interface morphology

中可以发现, 熔融物质几乎只存在于涡旋区中, 而其他的界面区域并没有发现任何的熔融物质。这些现象都说明在碰撞点离开后界面波有一个继续生长和运动的过程, 这个运动过程将使熔化物质向涡旋区集中, 而并非是由飞板一次性冲击形成。

为了探究界面波的发展过程, 可以结合图 5c 的粒子速度分布图进行分析。图中白色方框区域的粒子位于碰撞点后约 2 个周期的位置, 但是其残余的运动速度仍然接近 V_p 。而从粒子运动方向上来看, 这些高速粒子运动方向基本是沿波状界面继续运动的。这说明在距离碰撞点后的 2 个周期距离内的飞板射流仍然将

具有较高的速度继续运动,这种运动将使波状界面持续发展形成更深的波谷。此外,这些高速运动的粒子将在界面形成局部的高压区,使得高压区的粒子沿箭头方向向低压区运动进而导致涡旋区的生长。

而通过观察焊接过程的温度场可以发现,在焊接前段形成了平直界面如图 7a, 7b 所示,直至 $2.1 \mu\text{s}$ 时射流角度的偏转出现才开始形成了界面波纹。值得注意的是在数值模拟中,焊接的环境从始至终均为理

想的斜碰撞过程,不存在实验中的爆轰稳定段,所以按照 Bahrani 刻入机理界面波应从焊接前端立即形成。而造成数值模拟与理论不同的原因是在实际实验中前端缺少扰动造成的。由于缺少对射流的扰动导致射流全部从两板之间射出,而并未刻入任何一侧,因此界面间的扰动应该是形成 Bahrani 刻入及波状界面的必要条件。

为了进一步探究波状界面形成的原因及确认扰动

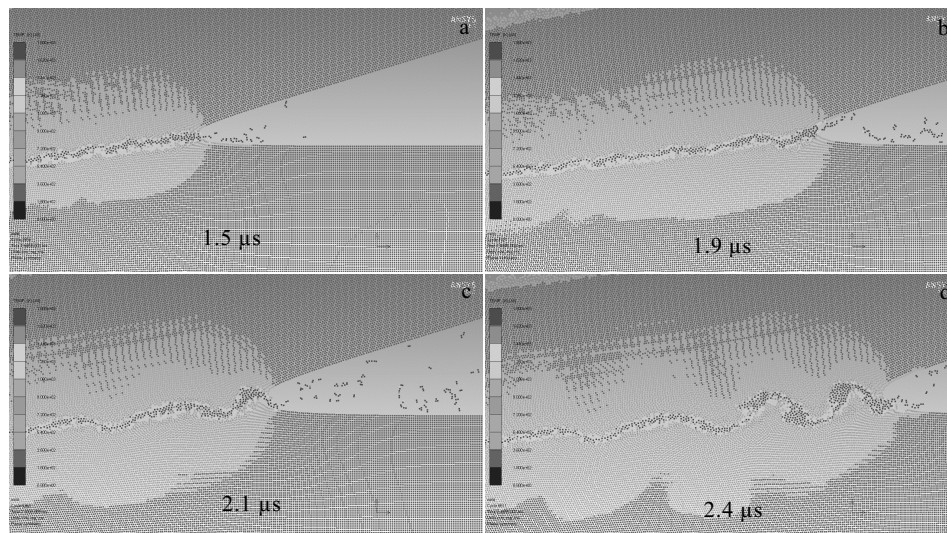


图 7 数值模拟温度分布

Fig.7 Simulation results of temperature distribution on the interface

的存在,对基板材料进行了热处理,将材料的强度提高至 895 MPa,并对一组试样的表面进行了光滑处理,然后在与之前相同的焊接参数下进行了多组爆炸焊接实验,其界面形貌如图 8 所示。表面未打磨的试样界面形貌如图 8a 所示,界面仍然形成了较为规则的界面波,这说明虽然材料强度有所上升,但是焊接参数仍然在可焊窗口范围以内。然而在打磨后试样中,虽然使用了相同的材料和焊接参数,但是波状界面并没有形成,取而代之的是平直界面,如图 8b 所示,这说明界面并未产生过 Bahrani 刻入机理。材料强度的提升以及光滑的表面增加了扰动形成的难度,导致界面并未出现界面波纹,这也印证了之前的结论。

图 9 为热处理后材料的数值模拟结果。为了提高材料表面的光滑程度的效果,将图 9b 中界面粒子加密处理。通过观察界面温度场可以发现,熔化的金属粒子射流都出现在了兩板之间。但是波状界面只在粒子未加密的算例中出现了。而在粒子加密的算例中,所有的射流粒子都从兩板之间的夹角喷射而出,没有

刻入任何一侧。结果表明,材料强度的上升以及光滑的表面增加了扰动产生的难度,而由于没有扰动的

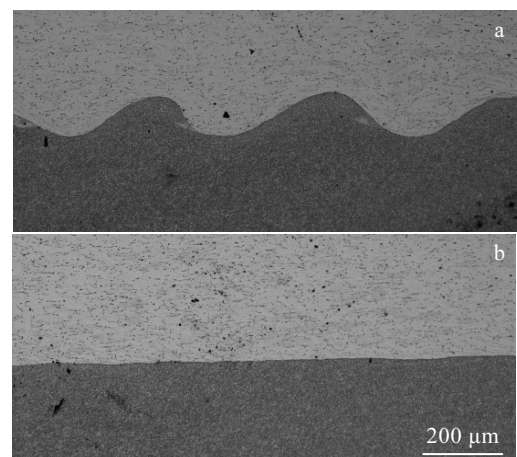


图 8 热处理材料试样界面形貌

Fig.8 Interface morphologies of thermal treated 45 steel: (a) unpolished and (b) polished

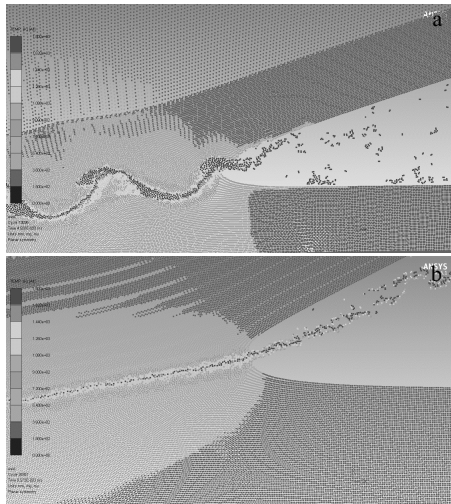


图 9 热处理材料试样界面温度场

Fig.9 Temperature distribution on the interface of thermal treated 45 steel: (a) particles unrefined and (b) particles refinement

积累使得射流无法实现‘刻入’，导致了 Bahrani 刻入无法形成，界面波也无法形成。而波状界面形成的原因应该这是由于界面扰动的持续积累改变了金属射流的喷射方向，导致射流向基板与飞板两侧偏转并侵彻板体，实现了 Bahrani 刻入机理。而在碰撞点离开后的 2 个周期的范围内界面射流仍然具有较高的运动速度并将沿着界面方向持续运动导致涡旋区的形成和生长，最终形成周期性的波状界面。

4 结 论

1) 爆炸焊接波状界面形成的起因是由于界面射流受到了扰动。由于扰动的持续累积导致射流的喷射方向发生偏转并侵彻板体，使得 Bahrani 刻入机理得以实现。

2) 界面熔融物质在碰撞点离开后 2 个界面波周期的范围内仍然具有较高的运动速度使得界面波进一步生长。高速运动的熔融物质形成局部高压区，使得熔化物质向两侧运动并形成涡旋区。

3) 较高的材料强度以及光滑的材料表面会提高扰动产生的难度，这将导致即使焊接参数在可焊窗口之内，爆炸焊接的复合材料界面也不会形成周期性的波纹。

参考文献 References

[1] Fu Yanshu(付艳恕), Wang Zhen(王震). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(8): 2458

[2] Wang Y X, Li X J, Wang X H *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2018, 137: 91

[3] Bataev I A, Tanaka S, Zhou Q *et al. Materials & Design*[J], 2018, 169: 1

[4] Zhang T T, Wang W X, Zhang W *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 735: 1759

[5] Luo Ning(罗宁), Shen Tao(申涛), Xiang Junxiang(向俊彦). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(10): 3238

[6] Zhang Z L, Feng D L, Liu M B. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2018, 35: 169

[7] Bahrani A S, Black T J, Crossland B. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [J], 1967, 296: 123

[8] Li Xiaojie, Mo Fei, Wang Xiaohong *et al. Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2012, 17(1): 36

[9] Zhou Qiang, Feng Jianrui, Chen Pengwan. *Materials*[J], 2017, 10(9): 984

[10] Cowan G R, Bergmann O R, Holtzman A H. *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 1971, 2(11): 3145

[11] Cowan G R, Holtzman A H. *Journal of Applied Physics*[J], 1963, 34: 328

[12] Zhang Dengxia(张登霞), Li Guohao(李国豪), Zhou Zhihong(周之洪) *et al. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*(力学学报)[J], 1984, 16(1): 73

[13] Zeng Xiangyu(曾翔宇), Li Xiaojie(李晓杰), Cao Jingxiang(曹景祥) *et al. Explosive and Shock Waves*(爆炸与冲击)[J], 2019, 39(5): 139

[14] Zeng X Y, Li X J, Chen X *et al. Welding in the World*[J], 2019, 63: 967

[15] Li Kebin, Li Xiaojie, Yan Honghao *et al. Journal of Energetic Materials*[J], 2018, 36(4): 377

[16] Wang Yuxin(王宇新), Li Xiaojie(李晓杰), Wang Xiaohong(王小红) *et al. Explosive and Shock Waves*(爆炸与冲击)[J], 2014, 36(6): 716

[17] Li Xiaojie(李晓杰), Yang Wenbin(杨文彬), Xi Jinyi(奚进一) *et al. Explosive Materials*(爆破器材)[J], 1999, 28(3): 22

[18] Li Xiaojie(李晓杰). *Explosive and Shock Waves*(爆炸与冲击)[J], 1991, 11(2): 134

[19] Wang Xiaoxu(王小绪), Wang Jinxiang(王金相), Zhao Zheng(赵峥) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(3): 682

[20] Chu Q, Zhang M, Li J H *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 689: 323

Formation and Development of Explosive Welding Wave Interface

Zeng Xiangyu¹, Li Xiaojie^{1,2}, Wang Xiaohong¹, Yan Honghao¹, Li Kebin¹

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to study the formation mechanism of explosive welding wave interface, the interface morphology and the welding processes were analyzed by explosive welding experiment and numerical simulation. The results show that the plates with lower initial strength are more likely to form periodic wave interface when the welding parameters are within the weldable window, and the molten material within two wavelength after the collision point still has a high velocity and continues the movement along the interface. However, the plates with higher initial strength and smooth surface are difficult to form wave interface. The results indicate that the formation of the wave interface requires the accumulation of disturbance to trigger the Bahrani etching mechanism. In addition, the molten metal within two wavelength after the collision point will continue to move along the interface and eventually form a stable interface wave.

Key words: explosive welding; wave interface formation mechanism; interface disturbance; numerical simulation

Corresponding author: Li Xiaojie, Ph. D., Professor, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, P. R. China, Tel: 008-411-84706163, E-mail: robinli@dlut.edu.cn