DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0107-06

# 合金工具钢的水下爆炸焊接*

孙 伟[1,2],李晓杰[2],闫鸿浩[2]

(1.大连理工大学海洋科学与技术学院,辽宁 盘锦 124000;
2.大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室,辽宁 大连 116024)

**摘要**:针对水下爆炸焊接法对超薄、高硬度脆性材料的独特应用特点,开展合金工具钢与铜箔的焊接复合实验。采用高爆速炸药倾斜装药方式,开展实验研究。利用有限元软件 ANASYS/LS-DYNA 对水下爆炸冲击波驱动飞板的飞行过程进行数值模拟,验证焊接参数合理性。模拟结果显示,飞板与基本碰撞速度沿焊接方向逐渐减小。微观组织观察显示,界面整体表现为爆炸焊接波状形态,呈沿焊接方向逐渐减弱的趋势,与模拟预计结果一致。对焊接实验样品界面处进行显微硬度测试,显示近界面处硬度稍有增加。

**关键词**:爆炸力学;水下爆炸焊接;波状界面;合金工具钢;显微硬度

**中图分类号**:O382.1 **国标学科代码**:1303520 **文献标志码**:A

爆炸焊接是一种以炸药爆炸能量驱动,通过飞板加速碰撞基板,结合而直接焊接两层或多层异种金属的复合技术[1]。这种焊接的强度往往是其他技术所不能达到的,爆炸复合板广泛应用于化工、造船、核工业、航空航天等工业领域。

爆炸焊接的最大优势在于大尺寸、异种金属的焊接复合。由于炸药爆炸产生的瞬时高温高压,对一些厚度很薄的金属箔材(特别是厚度在 1 mm 以下的薄板)和变形性很差的脆性材料、超硬材料,在焊接时通常要进行许多特殊的处理,而且焊接效果不太理想,复合板整体或局部断裂、薄片屈曲、复合率不高等缺点限制了爆炸焊接在此类特殊材料上的应用。近年来,开发了水下爆炸焊接方法,并且成功应用于铝箔(0.1 mm)与 $ZrO_2$ 陶瓷[2]、不锈钢与非晶薄板(38 μm)[3]、铜板与钨箔(0.5 mm)[4]、NiTi 形状记忆合金与铜箔(0.5 mm)[5]等特殊难焊材料的焊接实验。对比水下冲击波和空气冲击波各自的特点,可以发现:(1)水的可压缩性小,消耗本身的变形能少,传压性稳定,水中爆炸所产生的初始冲击波压力比空气中大很多;(2)密度差异会导致惯性大,水下爆轰产物膨胀过程比空气中慢,产生多次膨胀和压缩;(3)水的声速(1 500 m/s)比空气的声速(334 m/s)大,在相同药量和距离下,水下冲击波对目标体作用的时间短、冲量大。这些特点表明,水下冲击波将在一些特殊领域完善对传统空气爆炸加工的应用。水下爆炸焊接的优点,可以概括为:(1)当炸药爆轰波直接作用于待焊板材,很容易导致此类材料的破碎,而水下爆炸焊接法由于以水为传压介质,可以得到均匀的水下冲击波加载压力,且压力在炸药爆轰压力下可调,便于寻找最优焊接参数,实现均匀完整的焊接复合;(2)使用传统爆炸焊接对金属箔材焊接时,往往需要通过添加介质缓冲层、固定或镶嵌金属箔材等特殊处理,来实现复合。在水下爆炸焊接中,由于基、复板上下都有水层保护,能够有效缓冲压力波,防止大变形,保持焊接材料的完整性。

本文中,利用水下爆炸焊接方法开展合金工具钢与铜箔的焊接复合实验。其中,合金工具钢 JIS SKS3 为高硬度脆性材料,铜箔为薄材。传统爆炸焊接中炸药直接加载飞板,可以利用格尼(Gurney)公式[6]、Aziz 一维飞板驱动公式[7]等估算飞板的加速过程以及基复板的碰撞速度。但是,在水下爆炸焊接中,由于炸药和复板之间水层的存在,爆轰波先在水中传播,形成水下冲击波,然后在水下冲击波的驱动下加速飞板,形成焊接。所以,现有的飞板运动(加速过程、终速大小)计算规律不能直接应用于水下爆炸焊接,需对水下爆炸焊接进行数值模拟。利用数值模拟,可以分析炸药爆轰后冲击波在水下的传播

* **收稿日期**:2014-06-09;**修回日期**:2014-10-10
**基金项目**:中央高校基本科研业务费专项项目(DUT15RC(3)049)
**第一作者**:孙 伟(1986— ),男,博士,dust911@163.com。

过程、飞板的加速过程以及飞板与基板的碰撞变形过程，可以计算基复板的碰撞速度，保证碰撞速度满足爆炸焊接窗口理论。

## 1 实 验

实验材料为日本产 JIS SKS3 合金工具钢，主要成分为 Fe，其他成分含量为：$w$(C)=1.0%，$w$(Si)=0.3%，$w$(Mn)=1.0%，$w$(Cr)=0.8%，$w$(W)=0.8%。工具钢尺寸为 60 mm× 60 mm × 25 mm，作为基板，铜箔尺寸为 60 mm × 60 mm × 0.5 mm，作为飞板。日本产高爆速防水 SEP 炸药成分为 $w$(PETN)=65%、$w$(石蜡)=35%，密度约 1 300 kg/m$^3$、爆速约 7 000 m/s。爆炸焊接的焊接速度小于材料的声速，本实验采用倾斜装药，倾角预设为 20°，整体装置模型如图 1 所示。药厚为 5 mm，铜箔与合金工具钢的间距设为 0.2 mm，用防水胶布密封飞板和基板。实验在水中完成，使用电雷管从左端起爆炸药。

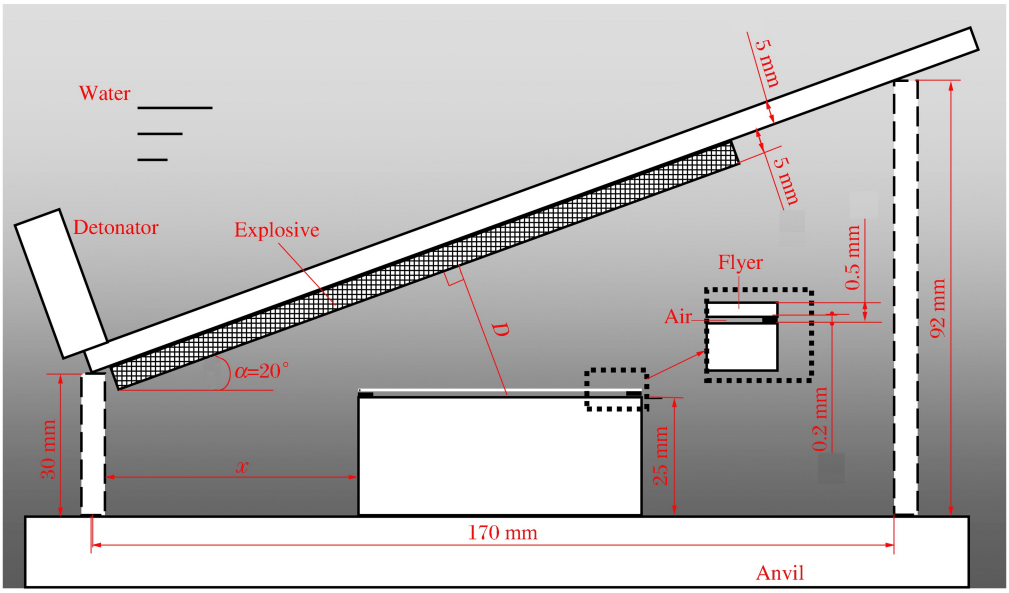



图 1 水下爆炸焊接装置图

Fig. 1 Underwater explosive welding setup

## 2 数值模拟

利用有限元软件 ANASYS/LS-DYNA 对炸药爆轰、水下冲击波传播以及驱动飞板与基板碰撞过程进行模拟，炸药、水、基复板各模型如图 2 所示。炸药尺寸 12 cm×0.5 cm，倾斜角 20°，飞板 6 cm×0.5 cm，基板 6 cm×2.5 cm，飞板与基板间隔 0.02 cm。网格划分为 0.05 cm×0.05 cm。

炸药采用高爆燃材料模型和 JWL 状态方程。JWL 方程的形式为：

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\mathrm{e}^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V}$$

式中：$A$、$B$、$R_1$、$R_2$ 和 $\omega$ 为炸药参数，相对体积 $V=v/v_0$，$v$ 为体积，$v_0$ 为初始体积，$E$ 为单位体积内能。

SEP 炸药状态方程参数如下：$\rho$=1.310 g/m$^3$，$D$=6 970 m/s，$A$=365.0 GPa，$B$=2.310 GPa，$R_1$=4.30，$R_2$=1.0，$\omega$=0.280，$p_{\mathrm{CJ}}$=15.9 GPa[8]。

水的密度为 1 g/cm$^3$，采用空材料模型和 Grüneisen 状态方程。材料压缩和膨胀的 Grüneisen 状态方程形式分别为：

$$p_{\mathrm{pre}}=\frac{\rho_0c^2\mu[1+(1-\gamma_0/2)\mu-\alpha\mu^2/2]}{[1-(S_1-1)\mu-S_2\mu^2/(\mu+1)-S_3\mu^3/(\mu+1)^2]^2}+(\gamma_0+\alpha\mu)E$$

$$p_{\exp}=\rho_0 c^2\mu+(\gamma_0+\alpha\mu)E$$

式中：$c$ 为 $v_s$-$v_p$ 曲线的截距，$S_1$、$S_2$、$S_3$ 为 $v_s$-$v_p$ 曲线的斜率参数，$\gamma_0$ 为 Grüneisen 常数，$\alpha$ 为 Grüneisen 常数 $\gamma_0$ 的修正系数，$\mu=\rho/\rho_0-1$，$\rho$ 为密度，$\rho_0$ 为初始密度，$E$ 为单位体积内能。

飞板与基板均选用 Johnson-Cook 材料模型[9]和 Grüneisen 状态方程[10]。Johnson-Cook 材料模型的形式为：

$$\sigma_y=(A+B\bar{\varepsilon}_p^n)(1+C\ln\dot{\varepsilon}^*)(1-T^{*m})$$

式中：$A$、$B$、$C$、$m$ 和 $n$ 为材料常数，$\bar{\varepsilon}_p$ 为等效塑性应变，$\dot{\varepsilon}$ 为等效应变率，$T^*=(T-T_r)/(T_m-T_r)$，$T$ 为温度，$T_r$ 为实验初始温度，$T_m$ 为熔点温度。

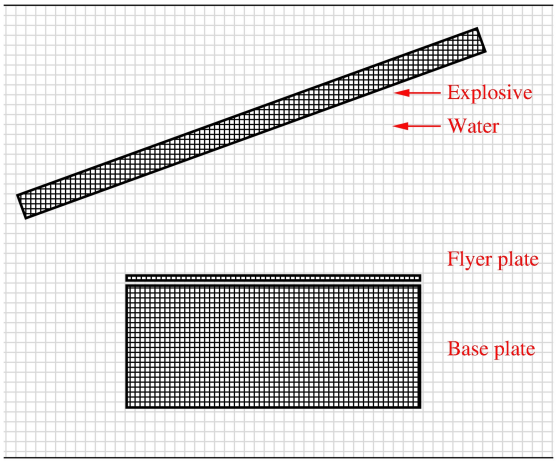



图 2　水下爆炸焊接的数值模型

Fig. 2　Numerical model of underwater explosive welding

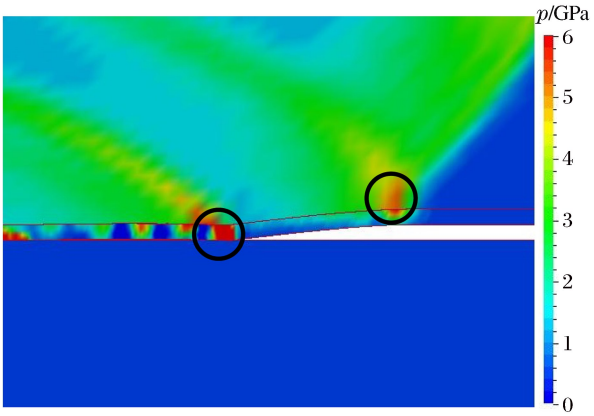



图 3　14 μs 时基复板压力分布

Fig. 3　Pressure distribution of flyer and base plate at 14 μs

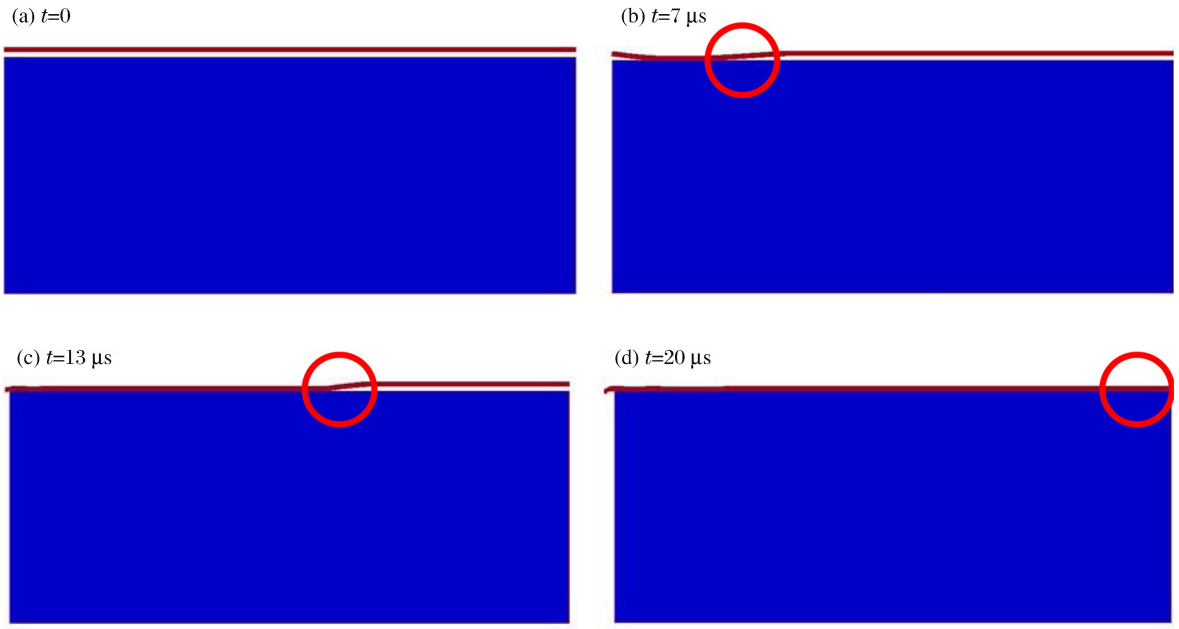



图 4　水下爆炸焊接过程

Fig. 4　Process of underwater explosive welding

图 3 为水下爆炸焊接过程中飞板与基板在水下冲击波作用下的变形过程以及压力分布情况。炸药爆轰后，冲击波传入水中，形成水下冲击波，飞板在水下冲击波作用下向下加速与基板碰撞，碰撞点附近压力剧增，同时向水中形成反射波。因此，在飞板与基板的焊接过程中，可以观察到反射波和碰撞点压力分布显现出两个峰值。图 4 为水下爆炸焊接过程中复板随时间的变形过程。可以看到，复板从左端开始向基板碰撞，直到复板与基板完成焊接，大约需要 20 μs。

在炸药稳定爆轰后，分别选取飞板各段节点进行分析，绘制速度时程曲线如图 5。在飞板前段，速度大约为 400 m/s。沿着爆轰方向，速度逐渐减小，在后端速度大约为 300 m/s。对照文献[11]的双金属爆炸焊接下限条件，可以看出，300～400 m/s 可以满足大多数金属材料的飞板速度下限要求。

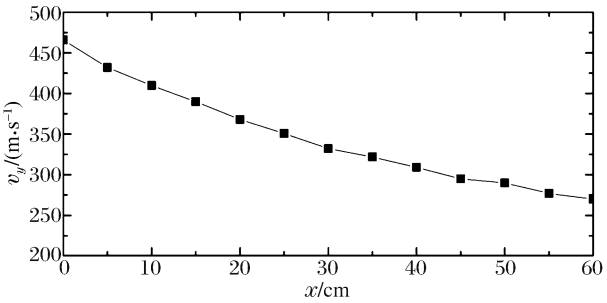



图 5 飞板垂直方向的速度

Fig. 5 Vertical velocity distribution of the flyer plate along the welding direction

## 3 实验结果分析

### 3.1 界面形貌观察

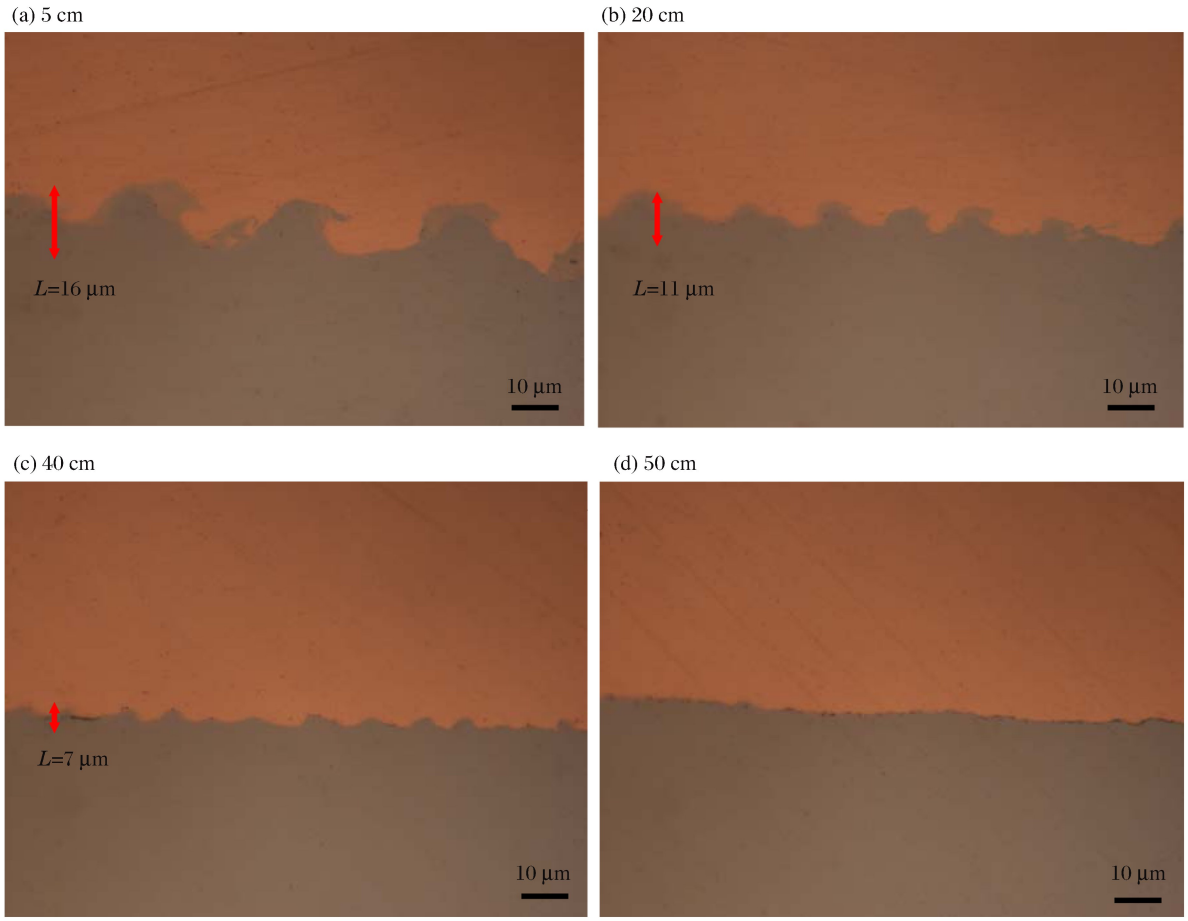



图 6 初始态工具钢与铜箔的界面形态

Fig. 6 Interface of tool steel and copper foil

工具合金钢 SKS 3 与铜箔界面形貌如图 6。从图 6 可以看出，焊接区域结合紧密，呈现规律和连续的正弦波状结合形态，没有产生明显孔洞和脆性金属间化合物，获得优良的结合强度。典型的波状界面表明，焊接参数的正确性和焊接强度的可靠性。沿着爆轰方向，焊接界面在开始阶段 5 cm 处，波纹振幅大约为 16 μm，然后逐渐减小，在后端表现为平直界面。由于采用了倾斜安置法进行水下爆炸焊接，飞板从前端到后端与炸药的距离逐渐增大，导致爆轰能量随着焊接方向逐渐减小。在爆炸焊接中，随着爆炸能量的增大，焊接板材受影响的深度增加，而射流层的厚度增厚，爆炸焊接界面会由平直界面逐渐转变为波状界面[12-17]。反之，用倾斜安置法进行爆炸焊接实验时，各个位置的能量不同，导致界面形态的变化。一组实验可以得到不同的实验结果，这有益于爆炸焊接的研究。

### 3.2　界面显微硬度分析

在载荷 10 g 的 HM-102 上进行显微硬度分析，基覆板显微硬度与界面距离的变化关系曲线如图 7。铜层与合金钢 SKS3 硬度分布变化平稳，靠近界面处硬度稍微增加。爆炸焊接中，由于界面处金属强烈的塑性变形，细晶强化、冷作硬化、位错增加等原因导致硬度在靠近界面处达到峰值，随着远离界面而减小，在基体中达到稳定。在界面上，由于两种金属的混合，硬度值介于两种金属之间。

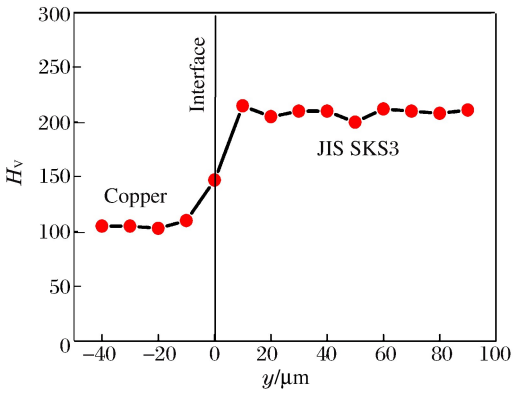



图 7　工具钢与铜箔界面的显微硬度分布

Fig. 7　Micro hardness distribution at the interface of tool steel and copper foil

## 4　结　论

高硬度合金工具钢 JIS SKS3 和铜箔，可通过水下爆炸焊接成功复合。可以看出，水下爆炸焊接高硬度、薄板材料具有很好的焊接效果，这正是传统焊接方法的难点。

(1)利用有限元软件 ANASYS/LS-DYNA 预测水下爆炸焊接过程，得到基覆板的变形和焊接过程中的压力分布以及速度分布，弥补传统经验公式在水下爆炸焊接中的不足。

(2)典型的波状界面表明焊接参数的合理性和焊接强度的可靠性。

(3)倾斜爆炸焊接装置导致的界面形态的变化，与模拟结果预测一致。

(4)显微硬度显示基复板在靠近界面处硬度值达到峰值。

## 参考文献：

[1]　邵丙璜，张凯. 爆炸焊接原理及其工程应用[M]. 大连：大连工学院出版社，1987.

[2]　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(98):175-179.

[3]　Hokamoto K, Nakata K, Mori A, et al. Dissimilar material welding of rapidly solidified foil and stainless steel plate using underwater explosive welding technique[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2009,472(1):507-511.

[4]　Manikandan P, Lee J O, Mizumachi K, et al. Underwater explosive welding of thin tungsten foils and copper[J]. Journal of Nuclear Materials, 2011,418(1):281-285.

[5]　Sun Wei, Li Xiaojie, Yan Honghao, et al. An alternative thin-plate welding technology using underwater shock wave[J]. Journal of Adhesion Science & Technology, 2012,26(10):1733-1743.

[6]　Gurney R W. The initial velocities of fragments from bombs, shells, and grenades[R]. Aberdeen: Ballistic Research Laboratory Report, 1943.

[7]　Aziz A K, Hurwitz H, Sternberg H M. Energy transfer to a rigid piston under detonation loading[J]. Physics of Fluids, 1961,4(3):380-384.

[8]　Lyama H, Kira A, Fujita M, et al. An Investigation on Underwater Explosive Bonding Process[J]. Journal of

Pressure Vessel Technology, 2001,123(4):486-492.

[9] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985,21(85):31-48.

[10] Daniel J S. Equation of state and strength properties of selected materials[M]. Illinois, 1996.

[11] 李晓杰,杨文彬,奚进一,等.双金属爆炸焊接下限[J].爆破器材,1999,28(3):22-26.
Li Xiaojie, Yang Wenbin, Xi Jinyi, et al. The lower limit of explosive welding parameter window for bimetal[J]. Explosive Materals, 1999,28(3):22-26.

[12] Durgutlu A, Gulenc B, Findik F. Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding[J]. Materials & Design, 2005,26(6):497-507.

[13] Kahraman N, Gulenc B, Findik F. Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005,169(2):127-133.

[14] Zareie Rajani H R, Akbari Mousavi S A A. The effect of explosive welding parameters on metallurgical and mechanical interfacial features of Inconel 625/plain carbon steel bimetal plate[J]. Materials Science & Engineering: A, 2012,556(9):454-464.

[15] Grignon F, Benson D, Vecchio K S, et al. Explosive welding of aluminum to aluminum: Analysis, computations and experiments[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004,30(10):1333-1351.

[16] Akbari-Mousavi S A A, Al-Hassani S T S. Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2005,53(11): 2501-2528.

[17] Akbari-Mousavi S A A, Barrett L M, Al-Hassani S T S. Explosive welding of metal plates[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008,202(1):224-239.

## Underwater explosive welding of tool steel

Sun Wei[1,2], Li Xiaojie[2], Yan Honghao[2]

(1. *School of Ocean Science & Technology, Dalian University of Technology, Panjin* 124000, *Liaoning, China*;
2. *State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian* 116024, *Liaoning, China*)

**Abstract**: Tool steel and copper were welded together using underwater explosive welding technique, which is preferably adopted for the welding of super-thin and super-hard brittle materials. In this work we carried out experimental research using inclined welding setup for high velocity explosive. Underwater explosive welding process was numerically simulated using ANSYS/LS-DYNA, the simulated results from which show that the colliding velocity decreases in the welding direction. The micro-characterization indicates that wavy is the dominant interface structure and the wavy structure decreases in the welding direction, according with the simulation. In addition, the micro-hardness test of tool steel welded with copper reveals a slight increase of hardness close to the interface.

**Key words**: mechanics of explosion; underwater explosive welding; wavy interface; tool steel; micro hardness

(责任编辑 丁 峰)