

文章编号: 1001-1455(2009)03-0289-06

冲击载荷下孔隙塌缩过程的数值模拟*

赵 铮¹, 李晓杰², 陶 钢¹

(1. 南京理工大学动力工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 大连理工大学工程力学系工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 爆炸压实过程中多孔体的孔隙闭合程度对压实效果起着决定性作用。利用 LS-DYNA 有限元程序, 对无氧铜中的圆形孔隙塌缩过程进行了数值模拟。根据模拟结果分析得出, 在 6 GPa 的冲击压力下, 孔隙闭合时不同边界区域会发生爆炸焊接和射流侵彻, 这 2 种结合机理可以使材料结合更牢固, 提高材料的致密度和机械强度, 实现高质量的爆炸压实。

关键词: 爆炸力学; 孔隙塌缩; LS-DYNA 有限元程序; 冲击载荷; 爆炸压实

中图分类号: O389 **国标学科代码:** 130·35 **文献标志码:** A

1 引 言

爆炸压实是利用粉末材料制备致密优质块体材料的一种特殊工艺。爆炸压实前需要将粉末预压烧结成多孔体, 爆炸压实过程中多孔体在冲击载荷下发生孔隙塌缩、闭合, 最终形成致密块体。孔隙的闭合程度及闭合数量直接影响着最终压实体的致密度, 因此对爆炸压实过程中的孔隙塌缩问题进行研究有着十分重要的意义。

M. M. Carroll 等^[1]提出了著名的空心 Carroll 模型, 研究了动态载荷下孔隙的弹性、弹塑性、塑性变形过程, 并在一系列后续研究中引入了应变率效应和温度效应, 这一模型后来成为研究孔隙塌缩的基本模型。王金相等^[2]采用一维对称球塌缩模型对爆炸压实中孔隙塌缩的能量沉积机制进行了深入分析。郑坚等^[3]对高应变率下延性多孔介质中孔隙的动态演化进行了深入研究, 提出了一种新的材料延性动态损伤模型, 考虑了率效应、惯性效应、孔洞表面能变化和材料硬化对孔隙塌缩的影响。

随着计算机技术的不断进步, 对冲击载荷下孔隙塌缩过程的数值模拟研究也陆续展开。爆炸压实前要先将粉末烧结成多孔体, 多孔体中孔隙的形状、大小及分布十分复杂, 无法建立反映真实情况的有限元模型, 可以将多孔体简化为密排通孔模型。对孔隙的闭合过程进行数值模拟, 可以先从单个孔隙着手, 建立单通孔模型进行分析。假设通孔直径远小于通孔长度, 则可以采用平面应变二维单孔模型进行分析。国内外多位学者采用平面应变二维单孔模型对孔隙闭合过程中的变形、应力、温度等进行了数值模拟分析。文献[4]利用 DYNA2D 有限元程序对爆炸载荷下铜中单个圆孔的塌缩闭合过程进行了数值模拟, 载荷爆压为 4 GPa, 圆孔直径为 10 mm, 得到的数值模拟结果与实验结果非常吻合。文献[5]利用二维欧拉流体动力学程序(Eulerian hydrocode)对无氧铜中的单个圆孔塌缩过程进行了数值模拟, 对基底底部边界承受的冲击速度分别为 50、200、500 m/s 的情况进行了分析。文献[6]也利用二维欧拉流体动力学程序对无氧铜中的单个圆孔在冲击速度为 500 m/s 的条件下的塌缩过程进行了数值模拟, 对孔隙塌缩过程中的温度分布进行了分析。

上述文献的数值模拟结果虽然给出了孔隙变形程度、应力或温度分布, 但没有对孔隙闭合时孔隙边界的结合机理进行分析, 因此本文中采用 LS-DYNA 有限元程序对孔隙塌缩进行二维数值模拟, 结合爆炸焊接理论对孔隙塌缩过程中孔隙边界的结合机理进行研究。

* 收稿日期: 2008-01-07; 修回日期: 2008-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(10802038); 江苏省博士后科研资助计划基金项目(0802019C)

作者简介: 赵 铮(1979—), 男, 博士, 讲师。

2 建立有限元模型

以无氧铜为研究对象,建立基体中含有单个圆孔的平面应变二维有限元模型,如图 1(a)所示。基体边长为 1 cm,中心圆孔直径为 1 mm。上方施加 4 种冲击载荷,冲击压力分别为 1、2、4、6 GPa,载荷曲线如图 2 所示,模型下方为固定边界。对平面应变模型中心孔隙区的网格进行了适当加密,消除了网格疏密程度对计算结果的影响。将中心孔隙区放大后进行分析,如图 1(b)所示。

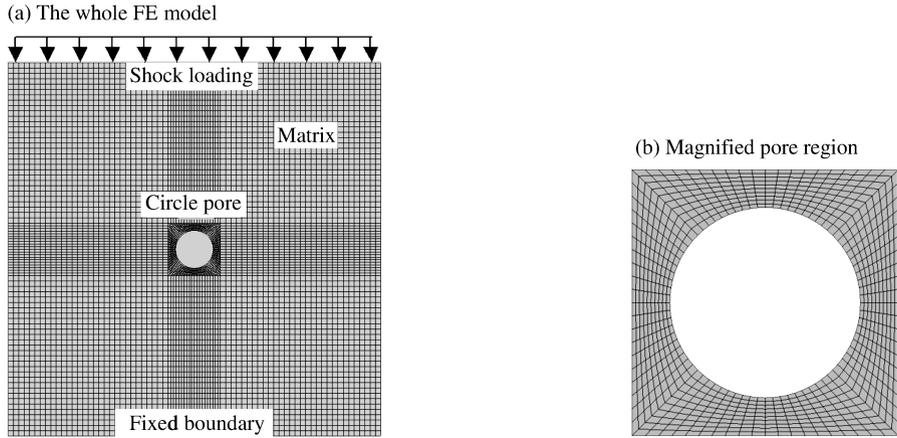


图 1 基体内含 1 个圆孔的有限元模型

Fig. 1 FEM with single circle pore in matrix

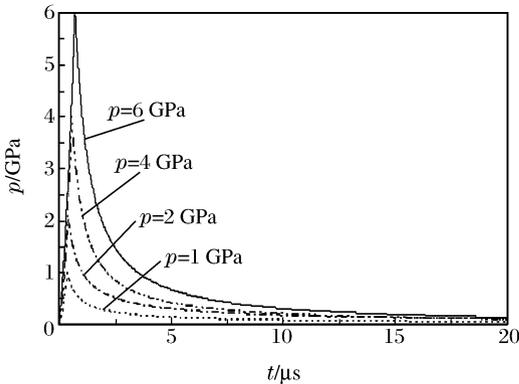


图 2 载荷曲线

Fig. 2 Load curves

对无氧铜,采用能够描述应变率效应和温度效应的 Johnson-Cook 本构模型

$$\sigma_e = (A + B(\epsilon_e^p)^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - (T^*)^m) \quad (1)$$

式中: σ_e 为 von Mises 流动应力; ϵ_e^p 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}_e^p / \dot{\epsilon}_0$, $\dot{\epsilon}_e^p$ 为等效塑性应变率,其中 $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ 为归一化温度, T_m 为材料的熔点, T_r 为室温。

无氧铜的 Johnson-Cook 本构模型参数来自文献[7-8],其中 $A = 90 \text{ MPa}$, $B = 292 \text{ MPa}$, $C = 0.025$, $m = 1.09$, $n = 0.31$ 。

由于材料承受的冲击压力较高,所以需要定义状态方程,本文中采用 Grüneisen 状态方程

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu [1 + (1 - \gamma_0 / 2) \mu - a \mu^2 / 2]}{[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \mu^2 / (\mu + 1) - S_3 \mu^3 / (\mu + 1)^2]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E_v \quad (2)$$

无氧铜的 Grüneisen 状态方程参数见文献[6,9],其中 $c = 3.94 \text{ km/s}$, $S_1 = 1.489$, $S_2 = 1.75$, $S_3 = 5.64$, $\gamma_0 = 2.02$, $a = 0.47$ 。

3 孔隙闭合过程

图 3 为中心圆孔区(放大图)在 4 种冲击压力下孔隙的最终塌缩程度。 $t = 3.00 \mu\text{s}$ 时冲击波已离开孔隙, $t = 4.00 \mu\text{s}$ 以后孔隙变形量不再增加,因此以 $t = 4.00 \mu\text{s}$ 为截至时间,对之前的孔隙塌缩情况进行观察。可以看出,冲击压力 $p = 1 \text{ GPa}$ 时,孔隙只发生了弹性收缩,没有完全闭合,直径缩小了 0.17 mm。 $p = 2 \text{ GPa}$ 时孔隙虽然发生塑性变形,但仍然没有完全闭合,直径缩小了 0.48 mm。当冲击压力增加到 $p = 4 \text{ GPa}$ 时,孔隙在收缩过程中突然塌缩,最后在 $t = 3.38 \mu\text{s}$ 时完全闭合。 $p = 6 \text{ GPa}$ 时孔隙塌缩更迅速,在 $t = 2.66 \mu\text{s}$ 时就已经完全闭合,而且圆孔上方形成了向下喷射的微小射流。

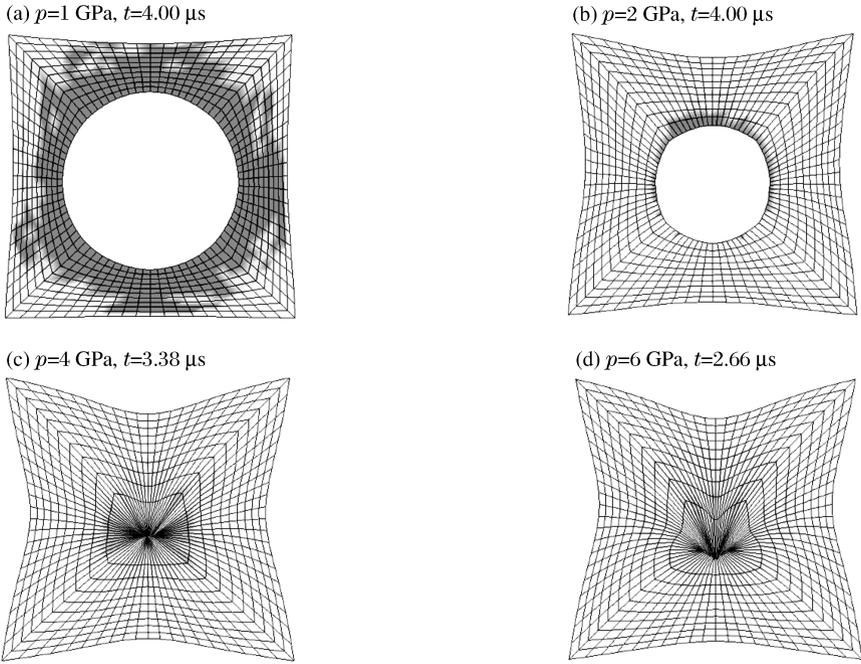


图 3 不同冲击压力下单圆孔塌缩程度

Fig. 3 Single circle pore collapse extents under different shock pressures

图 4 为中心圆孔区(放大图)在 $p=6$ GPa 时孔隙的塌缩过程。孔隙从 $t=1.28 \mu\text{s}$ 时开始收缩,到 $t=2.66 \mu\text{s}$ 时完全闭合,整个过程只用了 $1.38 \mu\text{s}$ 。开始阶段孔隙只发生弹性收缩,孔隙在整个弹性收缩过程中保持为圆形。当 $t=2.44 \mu\text{s}$ 时,孔隙进入塑性变形阶段,孔隙顶部首先开始屈服,顶部垂直向下的变形速度大于两侧的横向速度,孔隙由圆形变为椭圆形。此后顶部变形量继续增加,在 $t=2.64 \mu\text{s}$ 时微射流基本形成,射流长度约 $40 \mu\text{m}$,宽度约 $28 \mu\text{m}$ 。在 $t=2.66 \mu\text{s}$ 时射流在孔隙下方形成侵彻,侵彻深度约 $12 \mu\text{m}$,此时孔隙完全闭合。孔隙的变形过程与文献[4]相符,该实验为双向加载,发生双向变形。与文献[5-6]的数值模拟结果相近,表明本文的数值模拟是比较准确的。

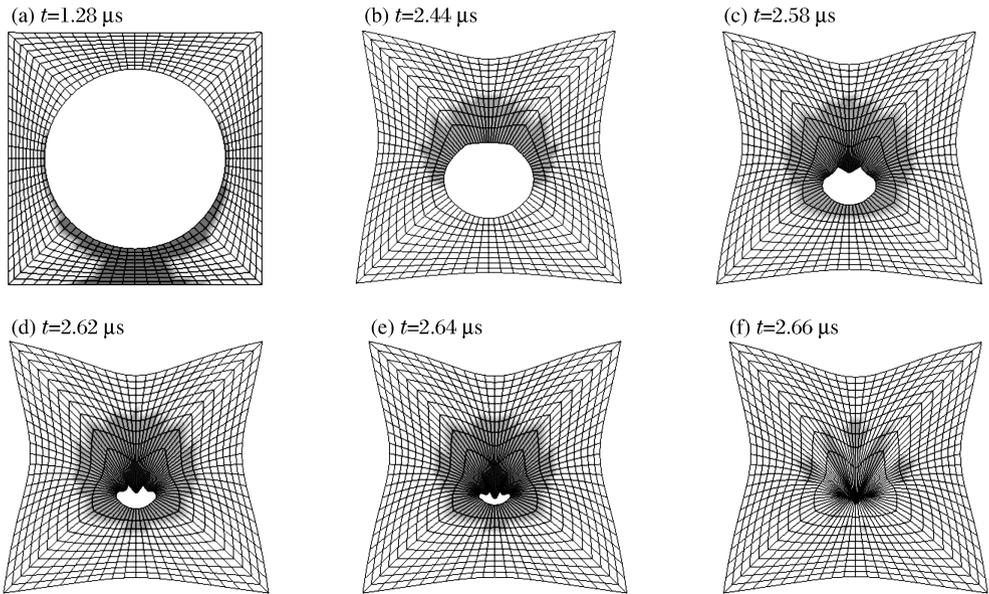


图 4 冲击压力为 6 GPa 时单圆孔塌缩过程

Fig. 4 Single circle pore collapse process under the shock pressure of 6 GPa

4 孔隙边界结合机理

孔隙塌缩过程中,根据边缘变形情况可以大致划分为 3 个变形区:A 区、B 区和 C 区,如图 5(a)所示。A 区为射流侵彻区,B 区、C 区为斜碰撞区,其中 B 区以 y 方向碰撞为主,C 区以 x 方向碰撞为主。在 3 个分区上各选取 2 个节点,编号为 A1、A2、B1、B2、C1、C2(图 5(b)),绘制出节点 A1、A2、B1、B2 的 y 方向速度(见图 6)和节点 C1、C2 的 x 方向速度(见图 7)。节点 A1、A2、B1、B2 的 y 方向最大速度分别为 $-1\,572$ 、 981 、 $-1\,039$ 、 578 m/s,负号表示速度方向向下。在 $t \approx 2.66 \mu\text{s}$ 时节点速度突然减小并迅速衰减到 0,说明此时发生了射流侵彻和斜碰撞。可以得出射流 A 区的相对速度为 $2\,553$ m/s,斜碰撞 B 区的相对速度为 $1\,617$ m/s。节点 C1、C2 的 x 方向速度在 $t \approx 2.66 \mu\text{s}$ 时发生突变,说明此时斜碰撞发生。碰撞前两节点的 x 方向速度分别为 -298 、 -660 m/s,因此斜碰撞 C 区的相对速度为 362 m/s。

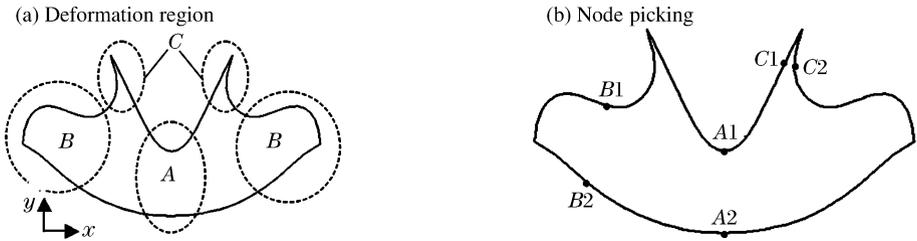


图 5 单个圆孔变形区域划分

Fig. 5 Deformation region division of the single circle pore

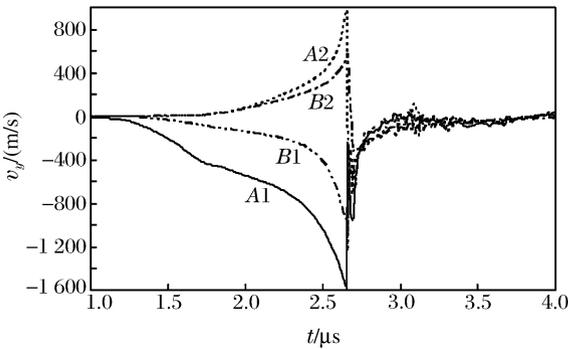


图 6 A、B 区 y 方向速度

Fig. 6 y direction velocities in regions A, B

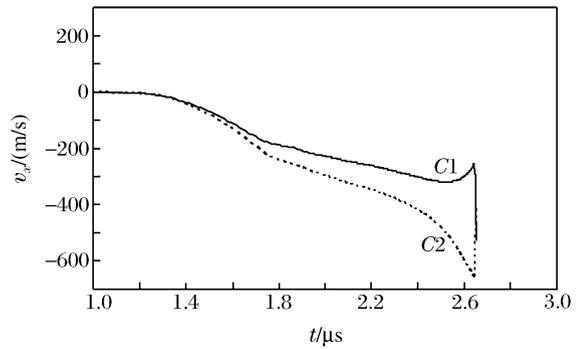


图 7 C 区 x 方向速度

Fig. 7 x direction velocities in region C

孔隙闭合时射流入射速度达到 $2\,553$ m/s,如此高的速度表明 A 区在射流侵彻时一定会发生熔化,孔隙闭合时的熔化可以使材料牢固地结合在一起,对提高压实体的致密度十分有利。孔隙边缘 B 区、C 区的碰撞速度分别达到 $1\,617$ 、 362 m/s,在高速斜碰撞过程中有可能发生爆炸焊接。爆炸焊接是利用炸药爆炸产生的高压驱动金属板高速碰撞形成固态焊接的加工工艺,通过高速碰撞实现,其中有 3 个参数最关键:碰撞速度 v_p 、碰撞角 β 、碰撞点移动速度 v_c ,这 3 个参数满足如下关系

$$v_p = 2v_c \sin(\beta/2) \tag{3}$$

爆炸焊接对以上 3 个参数有着严格的限制,只有当这些参数满足一定条件时才能形成,一般通过碰撞速度 v_p 和碰撞点移动速度 v_c 进行判断。 v_p 和 v_c 的取值范围构成的一个速度区域,称为爆炸焊接窗口。爆炸焊接窗口由流动限、声速限、焊接下限、焊接上限组成(如图 8 所示),只有 v_p 和 v_c 位于爆炸焊接窗口内,才可以形成爆炸焊接。文献[10]给出了无氧铜的爆炸焊接流动限为 $1\,365$ m/s,声速限为 $3\,910$ m/s,焊接下限为 183 m/s,对于微小尺寸的碰撞可以不考虑焊接上限。

孔隙闭合时碰撞点移动速度可以在数值模拟的后处理中,根据孔隙变形过程计算得出。图 9 为单

个圆孔右半部的变形过程示意图,节点 5 为右侧 C 区斜碰撞起始点,记录下不同时刻碰撞点到节点 5 的距离,就可以得出碰撞点移动速度 v_c ,经过计算得出单个圆形孔隙闭合时斜碰撞 C 区的碰撞点移动速度为 1 310 m/s。采用同样方法计算得出斜碰撞 B 区的碰撞点移动速度为 1 830 m/s。由此可以看出斜碰撞 B 区的碰撞速度 v_p 和碰撞点移动速度 v_c 位于铜的爆炸焊接窗口之内,所以可以断定单个圆形孔隙塌缩过程中,孔隙边界的 B 区域会发生爆炸焊接。孔隙闭合时形成焊接可以使材料牢固结合,能够极大地提高压实体的致密度和机械强度。C 区的碰撞点移动速度略小于无氧铜的流动限,落在爆炸焊接窗口以外,因此 C 区不会发生爆炸焊接。适当提高载荷的冲击速度,可以增加 C 区的碰撞点移动速度,将会使 C 区也发生爆炸焊接。

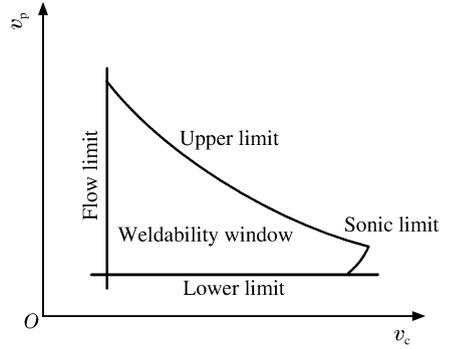


图 8 爆炸焊接窗口

Fig. 8 Explosive welding window

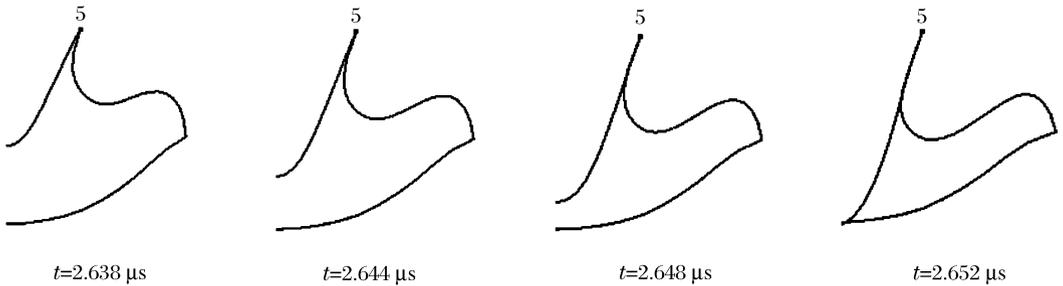


图 9 单个圆形孔隙右侧变形过程

Fig. 9 Deformation process of the single circle pore right side

5 结 论

通过对无氧铜中的圆形孔隙在冲击载荷下的塌缩过程进行数值模拟分析,可以得出如下结论:

- (1) 多孔铜在冲击载荷作用下,孔隙边界闭合时有可能发生爆炸焊接或射流侵彻。这 2 种现象能够使孔隙边界牢固结合,极大地提高大块体材料的致密度和机械强度,使爆炸压实取得更好的效果。
- (2) 在较高的冲击压力下,孔隙闭合过程中经历了弹性收缩、塑性变形和急剧塌缩 3 个阶段。较低的冲击压力不能使孔隙边界牢固结合,甚至孔隙不能完全闭合。

冲击载荷下多孔体孔隙的闭合是个十分复杂的问题。载荷较低时,有可能只形成孔隙闭合而没有使边界产生牢固的结合。载荷较高时,孔隙边界不同区域的结合机理又不相同,可能形成爆炸焊接、摩擦焊接、射流侵彻……。另外冲击载荷也不能无限提高,过高的载荷会使粉末颗粒完全熔化,影响材料的性能。更重要的是反射的拉伸波在熔化区域凝固前到达,会使颗粒间结合区形成断裂,严重降低压实效果。因此,有必要对孔隙塌缩问题进行进一步的研究。

参考文献:

[1] Carroll M M, Holt A C. Suggested modification of the P- α model for porous materials[J]. Journal of Applied Physics, 1972,43(2):759-761.

[2] 王金相,李晓杰,闫浩洪. 爆炸粉末烧结微孔隙塌缩沉能分析[J]. 高压物理学报,2005,19(2):145-150.
WANG Jin-xiang, LI Xiao-jie, YAN Hong-hao. Analysis of energy deposition caused by micro-void collapse in explosive consolidation of powders[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005,19(2):145-150.

- [3] 郑坚,王泽平. 高应变率下延性多孔介质中孔洞的动态演化[J]. 固体力学学报, 1994, 15(3): 189-199.
ZHENG Jian, WANG Ze-ping. Evolution of voids in ductile porous materials at high strain rate[J]. Acta Mechanica Sinica, 1994, 15(3): 189-199.
- [4] Nemat-Nasser S, Okinaka T, Nesterenko V. Experimental observation and computational simulation of dynamic void collapse in single crystal copper[J]. Materials Science and Engineering: A, 1998, 249: 22-29.
- [5] Tran L B, Udaykumar H S. A particle-level set-based sharp interface Cartesian grid method for impact, penetration, and void collapse[J]. Journal of Computational Physics, 2004, 193: 469-510.
- [6] Cooper S R, Benson D J, Nesterenko V F. A numerical exploration of the role of void geometry on void collapse and hot spot formation in ductile materials[J]. International Journal of Plasticity, 2000, 16(5): 525-540.
- [7] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. The Netherlands, 1983: 541-547.
- [8] 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(1): 31-48.
- [9] Nellis W J, Radousky H B, Hamilton D C. Equation-of-state, shock-temperature, and electrical conductivity data of dense fluid nitrogen in the region of the dissociative phase transition[J]. Journal of Chemical Physics, 1991, 94(3): 2244-2257.
- [10] 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 Xiao-jie, YANG Wen-bin, XI Jin-yi, et al. The lower limit of explosive welding parameter window for bimetal [J]. Explosive Materials, 1999, 28(3): 22-26.

Numerical simulation of the process of pore collapse under shock load

ZHAO Zheng^{1*}, LI Xiao-jie², TAO Gang¹

(1. College of Power Engineering, Nanjing University of Science & Technology,
Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology,
The State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,
Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: To explore the compaction mechanism of porous materials under explosive loading, the process of the circular shape pore collapse in oxygen-free copper was numerically simulated by using the LS-DYNA finite element code. Simulated results indicate that explosive welding and jet penetration can appear in the different boundary regions during pore collapse under the shock pressure of 6 GPa. These two bonding modes can improve the bonding compactness of the boundary material and enhance the density and mechanical strength of the block materials obtained by explosive compaction possess.

Key words: mechanics of explosion; pore collapse; numerical simulation; shock load; explosive compaction

* Corresponding author; ZHAO Zheng
Telephone: 86-25-84315491

E-mail address: zhaozheng@china.com.cn