

爆轰驱动单、双管粉体压实对比

付艳恕, 孙宇新

(南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 由材料可压缩性及爆轰驱动的相关假设, 根据质量、动量守恒导出可压介质运动微分方程, 并将聚心爆轰的平面泰勒波近似与粉体受压状态方程相结合, 得到爆轰产物流场与粉体收缩运动的耦合关系式, 使运动微分方程明确且可解。应用该方程式计算聚心爆轰驱动下多孔铜粉的单、双管压实过程, 所得速度、平均密度时程曲线分别与文献报道的结果吻合良好, 且由于位移时程曲线由速度导出, 有理由认为其是符合物理实际的。通过对比计算结果可知, 双管压实装置中外管具有明显的聚能效应, 在相同装药比下能实现更高压力, 使烧结体具有更高的压实密度; 另外, 实验结果还显示双管结构配合中心杆能有效避免马赫孔及扩大可烧结尺寸, 因而双管烧结设计更优。

关键词: 爆炸压实; 柱面收缩; Runge-Kutta 法; 可压缩粉末

中图分类号: TF124

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2010)02-0357-05

粉末爆炸烧结是一种重要的冶金手段, 由此法制备的钨、铜合金穿甲弹芯相比于其他烧结方法所得性能更优, 然而目前普遍采用的单管装置使烧结体存在着诸多缺陷, 本研究通过理论分析及初步实验对比单、双烧结装置所得烧结体性能, 其结果可指导实验设计及工业应用。爆炸烧结过程中, 爆轰产物驱动可压缩介质的运动是爆炸烧结研究的关键问题之一, M. A. Meyers、D. K. Djiken、K. H. Oh^[1-5]等人主要应用 Mie-Grüneisen 状态方程和 Hugoniot 关系进行压力与比容关系的计算, 以分析压实过程中材料的状态方程; 国内学者孙承纬等^[6]通过求解爆轰波流场分布, 在刚性飞片假设条件下, 推导了球、柱壳运动的近似解; 谭多望等^[7,8]在此基础上, 考虑壳体的变形和塑性效应, 导出了不可压缩金属球、柱壳在聚心爆轰和散心爆轰作用下运动的解析方程式。描述粉末爆炸烧结, 需要将可压缩特性与爆轰驱动流场相结合。本研究根据有限半径聚心爆轰驱动时波后产物流场的平面 Taylor 波近似及壳体受力状态求得运动方程, 发展了聚心爆轰驱动可压缩柱壳运动理论模型, 所得结果与文献进行比较, 最后通过对比说明双管烧结较之于单管的不同。

1 可压缩运动方程的建立

对较高硬度的粉末进行压实, 为了避免马赫孔的出现, 选用低爆速炸药; 而要实现较高的压力, 应采用图 1a 所示的装置^[1]。利用文献[2,3]提出的粉末爆炸压

实模型, 针对图 1a 的装置, 其横截面可简化为如图 1b 所示的情形。为导出薄壳运动方程, 以柱壳对称轴线为 z 轴建立圆柱坐标系 (r, θ, z) , 并作如下基本假设^[7,8]:

(1) 聚心爆轰产物驱动柱壳瞬间进入塑性状态, 具有本构关系:

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = -2K \quad (1)$$

σ_r 、 σ_{θ} 分别为径向和环向应力, K 为材料常数, 其值为单向拉伸时屈服极限的一半; (2) 主要研究粉体宏观半径收缩运动, 忽略应力波在粉体内的传播、反射等过程, 忽略内部粉末颗粒间各种细微变形; (3) 内部材料是连续可压缩介质, 且钢壳较薄, 忽略其强度及内外表面速度差; (4) 爆轰产物是等熵的; (5) 由于对爆轰产物压力的描述具有不可逆性, 假设粉体在接近密实状态附近, 因巨大的摩擦及内压的升高, 颗粒运动速度迅速下降为零, 即忽略宏观上柱壳收缩后具有的小膨胀过程。

根据图 1 所示模型及以上假设, 对于可压缩介质, 欧拉形式的运动微分方程为:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right) = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} \quad (3)$$

式中: ρ 为粉体密度; v 为粉体质点当前径向运动速度; r 为粉体质点当前径向坐标; σ_r 、 σ_{θ} 为分别为组成粉体的薄壳径向、环向应力。

收稿日期: 2009-03-11

基金项目: “863” 基金(2006AAJ229); 博士点基金(20070288070)资助

作者简介: 付艳恕, 男, 1982 年生, 博士生, 讲师, 南昌大学机电工程学院, 江西 南昌 330031, 电话: 0791-3969623, E-mail: yshfu1982@hotmail.com

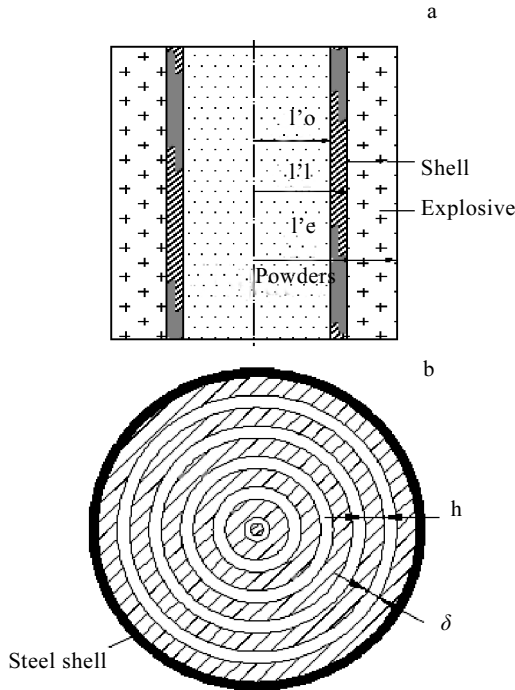


图 1 聚心爆轰驱动装置及其横截面示意图

Fig.1 Convergent detonation(a) and the sketch of cross section(b)

由质量守恒和可压缩条件得关系式:

$$\rho_0 r_0^2 = \rho r^2 \tag{4}$$

式中: $r \in (r_0, r_s)$, $r_s = \sqrt{\rho_0 r_0^2 / \rho_s}$, ρ_s 为理论密度, r_s 为粉体压缩为理论密度时圆柱半径, r_0 为粉体初装半径, ρ_0 为粉体初装密度。

式(4)代入式(2)后可将其简化为:

$$\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} = 0 \tag{5}$$

式(5)对 r 积分得速度分布的通解:

$$v(r, t) = C(t) \cdot r \text{ 或 } C(t) = \frac{v(r, t)}{r} = \frac{\dot{r}}{r} \tag{6}$$

式中: $C(t)$ 是任意的时间函数。

式(6)对时间 t 微分可得:

$$\dot{C}(t) = \frac{\ddot{r}}{r} - \frac{\dot{r}^2}{r^2} \tag{7}$$

将式(4)、(6)、(7)代入式(3)得:

$$\rho_0 r_0^2 \left(\frac{\ddot{r}}{r^2} + \frac{\dot{r}^2}{r^3} \right) = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} \tag{8}$$

2 产物流场与粉体收缩运动的耦合

粉体在爆轰产物聚合驱动下, 柱面器壁将发生快

速收缩, 容器内松散堆积的粉料也因受冲击而快速运动, 导致内部颗粒间发生一系列的挤压、摩擦、熔化、焊接等变形过程, 伴随颗粒间缝隙的填充, 实现最紧密的堆积^[9,10]。因而研究粉体半径的收缩历程, 实际上就是研究爆轰产物流场与粉体收缩运动的耦合。为了建立耦合方程, 应该从柱面器壁所受的内、外压力分析入手。

如图 2 所示, 在爆轰产物压力计算时, 记 c_j 、 p_j 分别为爆轰波阵面的声速和压力, c 、 p 、 k 、 D 分别为产物声速、压力多方指数和炸药爆速:

$$c_j = kD / (k+1) \tag{9}$$

$$p_j = \rho_e D^2 / (k+1) \tag{10}$$

$$p = p_j (c/c_j)^{\frac{2k}{k+1}} \tag{11}$$

有限初始半径聚心爆轰驱动时, 文献[6]近似地认为是平面 Taylor 波, 其黎曼不变量 α 及柱壳外表面处声速 c 为:

$$\alpha = mD/n \tag{12}$$

$$c = \frac{k-1}{2} (\alpha + \dot{r}) \tag{13}$$

式中, $m = h/r_0$ 为炸药装药厚度与柱壳半径比, $n = t/(h/D)$ 。柱壳外表面处径向应力等于爆轰产物作用于柱壳外表面压力, 即:

$$\sigma_{r1} = \frac{\rho_e D^2}{k+1} \left(\frac{k^2-1}{2k} \right)^{\frac{2k}{k-1}} \left(\frac{mD + nr}{nD} \right)^{\frac{2k}{k-1}} \tag{14}$$

内表面径向应力 σ_{r0} 由材料在受冲击压缩时径向应力与比容的本构关系 $\sigma_{r0} = \sigma_{r0}(v)$ 确定, 其方向如图 2 所示。采用文献[2]根据 $p-\alpha$ 模型简化得到的粉末状态方程:

$$\begin{aligned} \sigma_{r0} &= \sigma_y - \frac{10^9}{5N-9.4} \ln \frac{V-V_s}{V_0-V_s} \\ &= \sigma_y - \frac{10^9}{5N-9.4} \ln \frac{r-r_s}{r_0-r_s} \end{aligned} \tag{15}$$

式中 V_0 、 V_s 分别为粉体的初始比容和密实体的比容, V 为被压实过程中的当前比容, N 为 Meyer 硬化指数, σ_y 为粉体简化为薄壳层的屈服强度。

将式(14)、(15)联立代入式(8)中并化简可得:

$$\ddot{r} = -\frac{\dot{r}^2}{r} + \frac{r^2}{\rho_0 r_0^2} \left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2K}{r} \right) \tag{16}$$

其中:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} &= \frac{2k \rho_e D}{k^2-1} \left(\frac{k^2-1}{2k} \right)^{\frac{2k}{k-1}} \cdot \left(\frac{mD + nr}{nD} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{\dot{r}}{r} + \\ &\quad \frac{10^9}{(5N-9.4)(r-r_s)} \end{aligned}$$

式(16)是二阶常微分方程, 将其化为两个一阶微分方

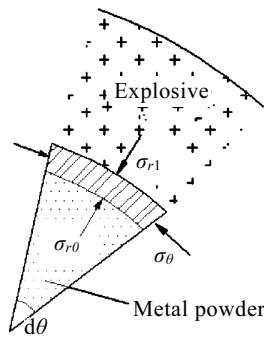


图 2 柱壳受力分析图

Fig.2 Stress acting on tube

程，可用含有两个公式的 4 阶 Runge-Kutta 法求得初值问题的数值解。

令 $v = \frac{dr}{dt}$ ，式(16)可化为两个一阶微分方程：

$$\begin{cases} \frac{dr}{dt} = v \\ \frac{dv}{dt} = f(t, r, v) \end{cases} \quad (17)$$

其中 $f(t, r, v) = -\frac{\dot{r}^2}{r} + \frac{r^2}{\rho_0 r_0^2} \left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2K}{r} \right)$

利用定步长的 4 阶 Runge-Kutta 法解此常微分方程，得到式(17)的递推计算式：

$$\begin{cases} r_{i+1} = r_i + (\Delta t)v_i + \frac{\Delta t}{6}(k_1 + k_2 + k_3) \\ v_{i+1} = v_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \end{cases} \quad (18)$$

其中： $k_1 = \Delta t \cdot f(t_i, r_i, v_i)$ ，

$$k_2 = \Delta t \cdot f\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}, r_i + \frac{\Delta t}{2}(v_i), v_i + \frac{k_1}{2}\right),$$

$$k_3 = \Delta t \cdot f\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}, r_i + \frac{\Delta t}{2}(v_i) + \frac{\Delta t}{4}k_1, v_i + \frac{k_2}{2}\right)$$

$$k_4 = \Delta t \cdot f\left(t_i + \Delta t, r_i + \Delta t(v_i) + \frac{\Delta t}{2}k_2, v_i + k_3\right)$$

求解的初始条件为：

$$r = r_0, \dot{r} = \frac{v_p}{2}, \sigma_{r,0} = 0, \text{当 } t = \frac{h}{D} + t_0 \quad (19)$$

其中 $v_p = \sqrt{2E} \left[\frac{3}{5\eta_1 + 2\eta_1^2\eta_2 + 2/\eta_2} \right]^{1/2}$ ，为外管在间隙中被爆轰产物驱动达到的速度^[1]， $\sqrt{2E}$ 为炸药的格尼能， $\eta = m/m_e$ 为外管与炸药质量之比，令 $r_e = r_0 + d$ ，

$\eta_2 = (r_e + r_0)/r_0$ ，则 $m_e = \rho_e \pi (2r_0 d + d^2) h$ 。单管时 $v_p = 0$ ， ρ_e 为炸药装填密度， h 是外管高度， t_0 是外管在间隙中的飞行时间，单管情形下为 0。

3 计算结果与分析

利用如图 1 所示的实验装置，对初始装填密度为 70.0%T D(T D, theory density)的多孔铜粉末单管、双管压实进行分析。由假设(3)认为在受驱动过程中柱壳内、外表面运动速度相同，而柱壳内表面运动速度即为粉末外径的受驱运动速度。金属铜粉末迈耶硬化指数 $N=245$ ， $\sigma_y=0.2$ GPa，选取 $\sqrt{2E} = 3000$ m/s 及装药密度为 935 kg/m³，多方指数 $k=3$ 的硝铵炸药，装药比(炸药质量与粉末质量之比)0.87，利用式(18)求解方程式(16)，计算粉末初始装填半径为 3.0 cm，对应于密实体半径为 2.51 cm。 t_0 利用 LS-DYNA 进行模拟得约为 0.43 h/D。根据假设(4)，程序设计时只分析粉体半径的收缩，忽略收缩过程中惯性产生的减速及膨胀，所得速度、位移及平均密度时程曲线如图 3 所示。

图 3a 中的速度时程曲线与文献[11]通过数值模拟得到的结果在忽略膨胀阶段后基本吻合，又与文献[7]聚心爆轰驱动刚粘塑性柱壳时内径的速度时程曲线具有相同的运动趋势，在收缩过程中速度具有迅速增加阶段；图 3b 中的位移时程曲线描述的是粉体半径收缩过程，由粉体半径 r 与平均密度 ρ 之间满足关系式 $\rho = \rho_0 r_0^2 / r^2$ 导出；图 3c 所示的平均密度时程曲线与文献[12]给出的粉末受冲击平均密度曲线相近，曲线走向呈下凹($d^2\rho/dt^2 > 0$)形式，与静态压实中的上凸($d^2\rho/dt^2 < 0$)不同，明显反映出冲击动力学的特征。且位移时程曲线是由柱壳运动速度导出，又与平均密度时程曲线具有函数关系，因而由速度、平均密度时程曲线与文献的吻合可知位移时程曲线也符合物理实际。

图 3 所示的 3 条曲线，由于爆轰驱动的高加载速率特征，相比于准静态或低加载速率情形而言，均表现出明显的延迟性。这是由于冲击载荷作用下，粉体的惯性及状态方程中反映的应变率效应、粘性等影响因素的作用十分明显甚至占主导。另外，通过图中数据对比可知，双管压实历时较单管情形要短，同一时刻双管情形的管径收缩速度及粉体平均密度也较高，这明显体现了双管装置中外管(图 1)的聚能效果。在间隙中飞行时，外管聚合了爆轰产物的能量，使得在碰撞初期就实现较高速度，整个过程中较之于单管而言也具有更高的驱动压力，因而可以利用爆速较低的炸药对高硬度的粉末进行烧结。

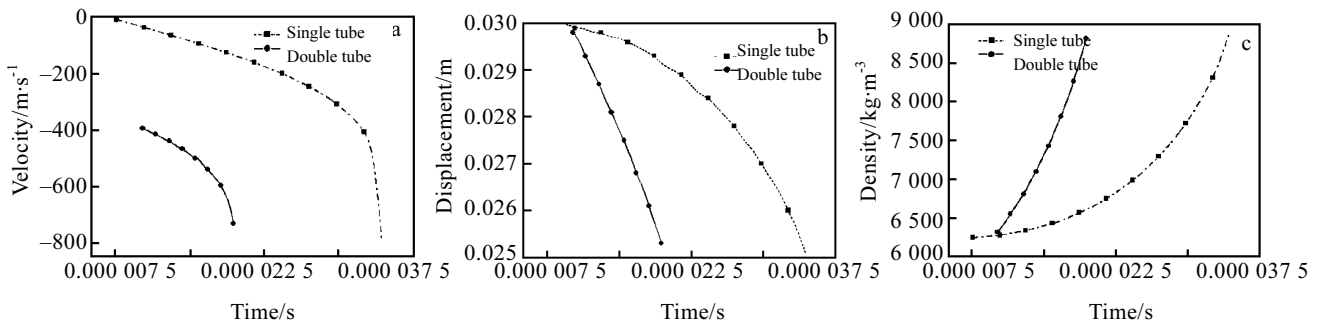


图 3 时程曲线

Fig.3 History curve: (a)velocity history curve, (b) displacement history curve, and (c) average density history curve

4 单、双管实验结果对比

对钨、铜合金粉末进行双管、单管爆炸烧结，针对双管、单管不同特征，尺寸设计时双管方案内管管径大于单管。由于两方案待压实粉末质量不同，为了具有可比性，使装药量与合金粉末质量比相同。所得爆炸烧结试件分别如图4、图5所示，通过切割取下1/4获得便于分析的小块体。

对试件进行压实密度分析及宏观硬度测试，结果表明，由于双管装置中外管的聚能效果而实现的较高压力，使烧结所得试件压实密度和宏观硬度均高于单管装置情形，与文献[13]所得结论相一致，合理的设计方案使得烧结件压实密度、宏观硬度与爆轰驱动产生的冲击压力成正相关。另外，图5中单管烧结件在中心出现了因马赫孔而导致的疏松现象，相比之下，双管方案的可烧结尺寸也得以扩大。

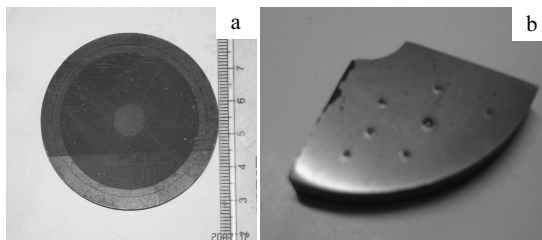


图 4 双管烧结试件

Fig.4 Samples of double tubes

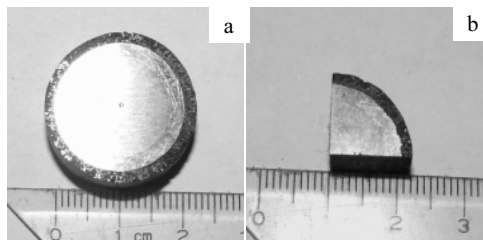


图 5 单管烧结试件

Fig.5 Samples of single tube

5 结 论

1) 柱面收缩速度更快，因而同一时刻对应的柱面位移及粉体平均密度均较大，这是由于双管装置外管的聚能效应，使同样的装药比能实现更高的压力。

2) 外管的聚能效果使双管烧结方案能得到尺寸更大、压实密度更高的烧结体。

3) 可以利用双管烧结方案对高硬度粉末进行作业，利用低爆速炸药获得较高烧结压力，既可避免马赫孔又能得到大尺寸的密实烧结体。

参考文献 References

[1] Meyers M A, Wang S L. *Acta Metal*[J], 1998, 36(4): 925
 [2] Djiken D K, J Th M. *Journal of Applied Physics*[J], 1994, 75(1): 203
 [3] Djiken D K, J Th M. *Journal of Applied Physics*[J], 1994, 75(1): 809
 [4] Oh K H, Persson P A. *Journal of Applied Physics*[J], 1989, 66(10): 4736
 [5] Oh K H, Persson P A. *Journal of Applied Physics*[J], 1989, 66(10): 3852
 [6] Sun Chengwei(孙承纬), Wei Yuzhang(卫玉章), Zhou Zhikui(周之奎). *Applied Detonation Physics*(应用爆轰物理)[M]. Beijing: Defence Industry Press, 2000: 600
 [7] Tan Duowang(谭多望), Sun Chengwei(孙承纬), Wang Yanping(王彦平). *Explosion and Shock Waves*(爆炸与冲击)[J], 2000, 20(4): 348
 [8] Tan Duowang(谭多望), Sun Chengwei(孙承纬). *Chinese Journal of High Pressure Physics*(高压物理学报)[J], 1998, 12(3): 218
 [9] Mamalis A G, Vottea I N, Manolakos D E. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2001, 108: 165
 [10] Li Xiaojie(李晓杰), Wang Jinxiang(王金相), Yan Honghao(闫鸿浩). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料

- 与工程)[J], 2004, 33(6): 565
- [11] Zhao Zheng(赵 铮). *Research on Explosive Compaction and Numerical Simulation of Particle Reinforced Copper Matrix Composites*(颗粒增强铜基复合材料的爆炸压实和数值模拟研究)[D]. Dailan: Dalian University of Technology, 2007
- [12] Tong W, Ravichandran G. *Journal of Applied Physics*[J], 1993, 74(4): 2425
- [13] Zhang Deliang(张德良), Wang Xiaolin(王晓林). *Explosion and Shock Wave*(爆炸与冲击)[J], 1996, 19(2): 105

Comparison of Compressed Powders in Single and Double Tubes Designs Driven by Convergent Detonation

Fu Yanshu, Sun Yuxin

(National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: According to the material compressed conditions and the hypothesis of detonation drive, and based on the conservation of mass and momentum, the motion differential equation of compressible powder was obtained. Combined with the planar Taylor wave and the equation of state of powder, the coupling relationship between the convergent flow filed and the shrinking of powders can be gained, and then the copper powder explosive consolidation was calculated. The results indicate that the velocity and average density history curves agree with the reported reference values. It was convincing that the displacement history curve is satisfied with physical fact because the displacement history curve is derived from the velocity. By comparison, it can be known that in double-tubes, the pressure is higher at the same ratio of explosive mass because the external tube is performed as shape charge, so the density is higher. Besides, the experiment results show that the equipment of double-tubes fits with central pole can avoid the Mach pores and enlarge the size of the sintered body. As a conclusion, the double-tubes design is better.

Key words: explosive consolidation; cylindrical shrinkage; Runge-Kutta method; compressible powders

Corresponding author: Fu Yanshu, Candidate for Ph. D., Lecturer, Nanchang University, Nanchang 330031, P. R. China, Tel: 0086-791-3969623, E-mail: yshfu1982@hotmail.com