DOI:10.13374/j.issn1001-053x.1989.03.019

第11卷第3期 北京科技大学学报 Vol.11 No.3
1989年5月 Journal of University of Science and Technology Beijing May 1989

爆炸烧结中金属粉末颗粒的尺寸效应

杨 让 解子章 陈家昌 王小鹏 邵丙璜
(北京科技大学) (中国科学院力学所)

摘 要：采用环状飞片柱面收缩爆炸方法，研究了FT15高速钢粉末在冲击波作用下，因粉末粒度的差异而引起的颗粒效应：在动态冲击载荷的作用下金属细粉比粗粉吸收的能量多，温度高，致使细粉比粗粉表层更易熔化，熔化量也相对增加。同时发现在FT15高速钢混合粉爆炸烧结后粉末中的大颗粒与小颗粒的变形规律不同。

关键词：爆炸烧结，金属粉末，颗粒效应，形变

Particle Size Effect of Metal Powders during Explosive Consolidation

Yang Rang Xie Zizhang Chen Jiachaug Shao Binghuang

ABSTRACT: In this paper, two different sizes of high-speed-steel powders have been mixed and then consolidated dynamically by means of a cylinderical converging explosive method with a ring-shape flyer. It has been found that the behaviors of large powder particles differ from that of small powder particles. After the passage of shock-wave the energy absorption on small powder particles is much greater than that on large powder particles, so that the small power particles may melt prior to large powder particles.

KEY WORDS: explosive consolidation, metal powders, particle-size-effect, deformation

激冷凝固微晶和非晶材料具有一系列优异的性能，但其产品多为粉末或薄带，常常不能满足使用要求。为此，材料科学工作者经过长期的研究发现爆炸烧结技术是使激冷材料成材的有效途径，并给以高度重视。

在爆炸冲击波作用下，金属粉末受到激波绝热压缩作用，颗粒相互撞击和摩擦使颗粒表层沉积大量能量，导致颗粒表层温度急剧升高，可达熔点温度。但是颗粒心部所沉积的能量并不

1988-06-10 收稿

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

多，心部温度变化不大。这样，一方面粉末颗粒通过表面极薄熔化层而结合；另一方面粉末整体平均温度不高，不会导致粉末原有组织的变化，因而可保持激冷材料的优异性能[1-3,8]。

近年来，国外在爆炸烧结领域的研究十分活跃。对粉末在冲击波作用下的致密化规律、粉末的烧结机理及烧结样品的性能有大量的文献报道[4-7]。但对粒度相差较悬殊的金属粉末的爆炸烧结行为尚未见报道。

本文采用两种粒度的粉末混合物，研究冲击波在粉末中的能量沉积特点和爆炸烧结中的颗粒效应。

1 实验方法

采用氮气雾化法制备的FT15高速钢粉末。粉末为球形，含氧量在500ppm以下，其化学成分为1.5wt%C、4.0wt%Cr、5.0wt%V、5.0wt%Co、12.0wt%W，其余为Fe。筛选－360目细粉及－65＋85目粗粉并按一定的比例混合均匀后装入包套封焊。

实验采用柱面收缩爆炸装置（详见文献[7]）。

2 实验结果

在本实验中采用高压、中压和低压3种不同的击波压力进行爆炸烧结。实验结果分述如下。

2.1 低压试样（1号试样）

利用光学显微镜对试样进行组织分析，发现在组织中大的粉末颗粒被小的粉末颗粒包围，大颗粒没有宏观变形仍保持球形，小颗粒有大量形变，见图1。

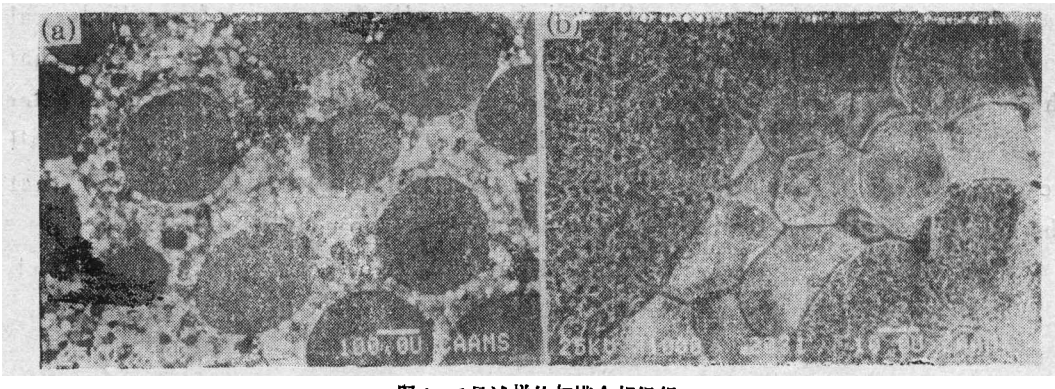

图1 1号试样的扫描金相组织

Fig. 1 SEM Microstructures of No. 1 specimen

图1b为图1a的局部放大照片。从中可以看出小颗粒形变的规律性：在逆冲击波传播方向（图1b中的箭头方向）上的颗粒表面（面方向指外法线方向）变成光滑的凸面；在顺冲击波传播方向上的面形成尖锐的凹面及锐利的尖角。这种变形的方向性将导致烧结的不均匀性。

图2是低压试样的断口照片。由此也可以看出小颗粒严重变形，成为扁平体粘结在大颗粒表面。大颗粒呈球形。从断口特征可以判断该试样没发生烧结。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

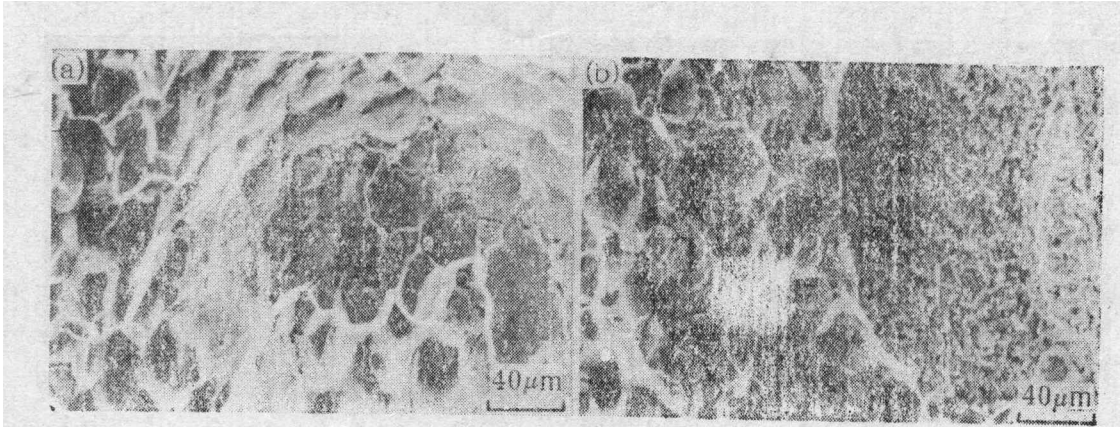

图2　1号试样的断口形貌
Fig. 2　Fractographs of No. 1 specimen

定量金相结果见表1。

2.2　中压试样（2号试样）

图3为中压试样金相组织照片。在中压试样中大颗粒仍为球形，形变量很小；在小颗粒区域内有白亮区。在扫描电镜下观察发现白亮区内的组织呈胞状，见图4。由此可以确定该白亮区是在爆炸烧结过程中的熔化物急冷凝固后形成的，Morris曾报道在爆炸烧结中的熔化与凝固现象，并证实熔化物具有胞状结构。

图5显示了大颗粒周围残留的未熔化的小颗粒。

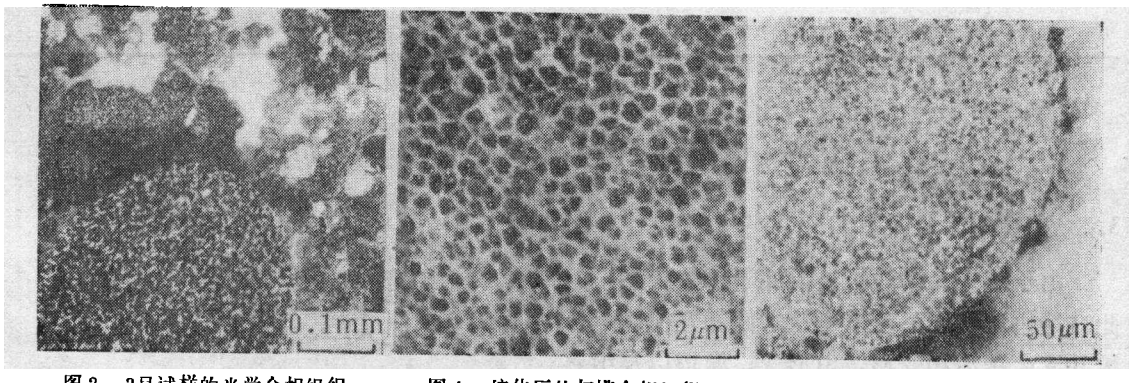

图3　2号试样的光学金相组织，
Fig. 3　Optical microstructure of No. 2 specimen,

图4　熔化区的扫描金相组织
Fig. 4　SEM microstructure of melting-zone,

图5　2号样的光学金相组织
Fig. 5　Optical microstructure of No. 2 specimen

2.3　高压试样（3号试样）

在高压试样内，大颗粒周围的小颗粒已全部熔化，在组织中只有残余的大颗粒和熔化物（见图6）。熔化物为细小的等轴晶（见图8）。大颗粒心部由等轴晶粒组成，(见图7），显然是由于高压试样中大颗粒平均温度高于奥氏体化温度，大颗粒经固态相变破坏了粉末原有的枝晶状组织。

表1为定量金相结果。比较低压试样与中压试样内的大颗粒平均粒度可知二者相差不大，说明中压试样中虽然小颗粒已经开始熔化，但是大颗粒并没熔化。而在高压试样中大颗粒的平均粒度为180μm，比低压试样减小42μm，熔化物相对含量为55%，这就证实在高压试样中大颗粒表层有一定深度的熔化，其熔化量为15%。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

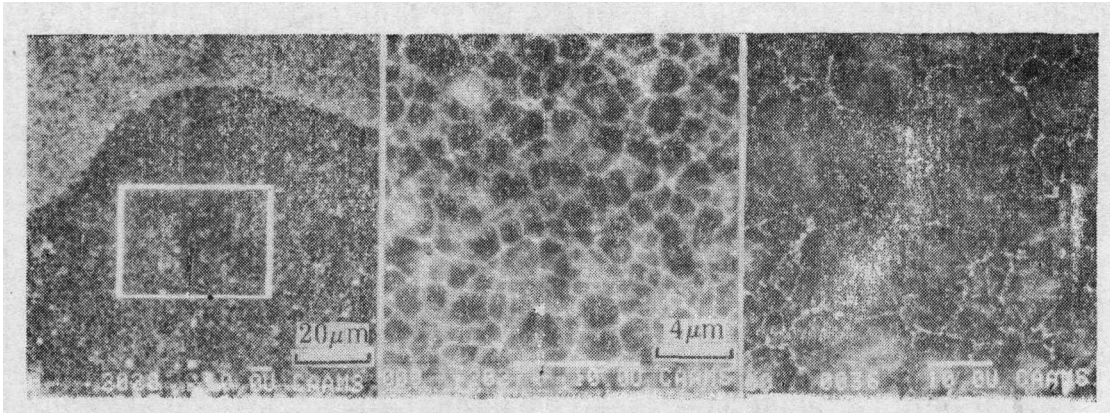

图6　3号样的扫描金相组织

Fig. 6　SEM microstructure of No. 3 specimen

图7　图6的局部放大

Fig. 7　Partial magnifiction of Fig. 6

图8　3号样中熔化区组织

Fig. 8　SEM microstucrure of melting-zone in No. 3 specimen

表 1　大颗粒的平均粒度与含量

Table 1　Average size and content of large particles

试样号	平均粒度，μm	含量，%
1	222	60
2	218	60
3	180	45

3 讨　论

3.1　小颗粒的变形方式

由于粉末在爆炸烧结前处于松装状态，因此在冲击波作用下粉末颗粒之间相互撞击、摩擦并发生转动和变形。由形变、摩擦以及绝热

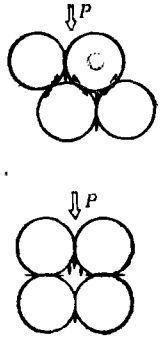

图9　接触点移动方向示意图

Fig. 9　Schematic of the movement direction of contact point

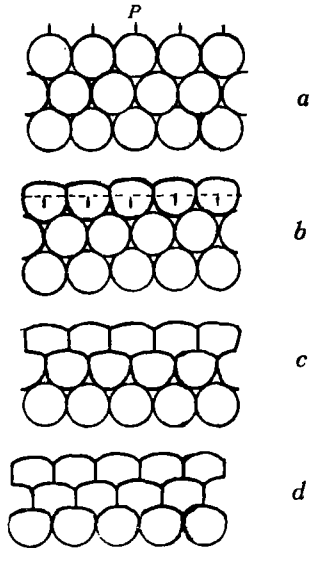

图10　爆炸烧结中颗粒的形变示意图

Fig. 10　Schematic of particle deformation during explosive consolidation

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

压缩提供的热量软化了金属表面，使粉末颗粒不断向孔隙处变形流动。使初始的点接触变为面接触，直到完成致密化和烧结过程。图9表明了冲击波传播方向与物质塑性流动即接触点移动方向（箭头所示）的关系。图10是粉末中小颗粒变形过程。在冲击波传播过程中颗粒逐层致密化。图10d所示的变形特征与本实验结果是一致的，也与W H Gourdin 报道的铜粉的变形特征一致[4]。

3.2 小颗粒优先熔化现象

在一定的冲击波压力作用下，混合粉末中的小颗粒在大颗粒熔化之前优先熔化，是动态载荷作用下特有的现象，可称为爆炸烧结中的颗粒效应。

考虑到界面曲率对物质平衡点的影响，根据热力学原理及克拉珀龙方程推导出大小颗粒的熔点差值ΔT可用下式表示：

$$\Delta T = \sigma \cdot V^{S} \cdot T_{m} / [(1/r - 1/R) \cdot H / 4.19]$$

对本文采用的高速钢材料，表面能σ取2.2J/m，熔点T_m为1 812K，潜化潜热H为272.35J/g，大小颗粒半径r和R分别取100和1 000μm，摩尔体积V^S由密度换算，将上述数值代入公式可求出ΔT为0.7K。可见熔点差值很小，不足以引起小颗粒优先熔化。

根据爆炸力学原理，冲击波对疏松材料做功可用雨贡纽方程表达：

$$\Delta E = (P - P_0)(V_{00} - V_0)$$

ΔE—材料内能增量（主要以热的形式储存）；

P—冲击波压力　　P_0—材料松装状态下的初始压力

V_{00}—材料的初始比容　　V_0—冲击波作用后材料的比容

由雨贡纽方程可知，V_{00}越大即粉末中的孔隙度越高，则内能增量越大。根据爆炸力学计算，对于相对材料在相同击波压力作用下，粉末体的温升要比致密体的温升高出几百乃至上千度。考虑到本实验中混合粉末中的孔隙分布是不均匀的，孔隙主要分布于小颗粒区，因而冲击波能量沉积也集中于小颗粒区。因此高压试样的结果表明小颗粒区沉积的能量高出大颗粒区沉积的能量。

R.B.Schwarz[9]等报道了粉末在冲击波作用下颗粒表层形变层厚度对同一材料是一定的。由于小颗粒比表面积大，沉积的形变功多，也可能使小颗粒优先熔化。

4 结　论

根据上述实验可得如下结论：

(1) 粉末在冲击波作用下，大颗粒没有宏观变形；小颗粒强烈变形，且有方向性。

(2) 小颗粒变形特征为：在逆冲击波传播方向上的颗粒表面呈光滑的凸面；顺冲击波传播方向上的颗粒表面呈凹面并有尖角。

(3) 冲击波在大小颗粒上的能量沉积并不相同，小颗粒吸收更多的冲击波能量。

(4) 在一定的压力下小颗粒优先于大颗粒而熔化，是动态载荷作用下特有的颗粒效应现象。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参 考 文 献

1 Carl F, Cline and Robet W. Hopper. *Scripta Metall*, 1977; (11):1137

2 Morris D G. *Metal Sci.* 1981; 15:116

3 Raybould D. *J. Mater. Sci.* 1981; 16:580

4 Gourdin W H. *Mater. Sci. Eng.*, 1984; 67:170

5 Morris. D G. *Mater. Sci. Eng.*, 1983; 57:187

6 Yang Rang et al. "Consolidation of Rapidly Solidified High-Speed-Steel Powders by the Action of Shock-Wave", International Symposium on Extractive Metallurgy and Materials Science, Changsha, China, Sep. 21-24, 1987

7 杨让等. 北京钢铁学院学报, 1987;9(1):23

8 Meyers M A, Gupta B B, Murr L E. *J. Metals*, 1981; (10):21

9 Schwarz R B, Kasiraj P, Vreeland T. "Temperature Kinetics During Shock-Wave Consolidation of Metallic Powders", International Conference on Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Stain-Rate Phenomena, Porland, Oregon, July 28-August 1, 1985

Y型"七专"电路外壳镀层质量攻关

半导体器件外壳的镀层质量直接影响器件的制造和器件的性能，最终影响整机的可靠性. 为了提高镀层质量，北京科技大学和武汉无线电器材厂合作研究了外壳的镀前处理工艺、中间镀层和终镀层. 把复合镀镍和化学镀镍作为外壳中间镀层在国内尚属首次，并改进了脉冲镀金技术. 经过用户和器件质量监督部门的检测，Y型"七专"电路外壳镀层可达到:

(1) 在420°C，15min高温考核中不变色;

(2) 外引线沾锡面积大于90%;

(3) 经175°C，96h储存后，键合拉力大于6克.

(4) 在48h盐雾试验后，外引线锈蚀率可达5级，加弯曲应力可达3级.

鉴定委员会认为所达到的这些指标在国内处于先进水平.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net