

S&TR

CAEP-Report-
LMS-9003 (1994)

Science and Technology Report

金属粉末冲击压实过程中能量沉积机制

Mechanism of Energy Deposition at the Interface
Powder in Dynamic Consolidation

科技報告



China Academy of Engineering Physics

中国工程物理研究院

中国工程物理研究院科技系列报告

科技系列报告编辑部编辑

强激光与粒子束杂志社出版发行

(成都市 511 信箱 5 分箱, 610003)

中物院曙光印刷厂印刷

☆

开本 787×1092 1/16 · 印张 1/2

1994 年 12 月 第一版 · 1994 年 12 月 第一次印刷

(绵) 新登字 2272 每册定价: 1.50 元



吴强: 1967年1月生于江苏南京, 1988年毕业于西北工业大学宇航工程系。同年考入中国工程物理研究院北京研究生部, 1991年分配至中物院流体物理研究所工作。

Wu Qiang, was born in Nanjing Jan. 1969, graduated from aerospace engineering faculty of Northwest Polytechnic University in 1988, received M.S. degree from Graduate School of China Academy of Engineering Physics in 1991 and works in Institute of Fluid Physics Physics of CAEP.

金属粉末冲击压实过程中能量沉积机制

吴 强 章冠人 高 文

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 成都 523 信箱, 610003)

摘 要 在平衡压力约 15GPa 的粉末压实样品中, 发现了典型的由于绝热压缩而引起的冲击熔化现象。通过微观数值模拟发现这一熔化现象发生在 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ s 的时间范围内, 这与粉末冲击波前沿的上升时间相同, 因而我们认为, 在 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ s 的冲击波前沿上升时间内, 由于“聚心”绝热压缩的影响, 在粉末样品中, 形成了一些高压区域, 使得粉末颗粒在界面上发生冲击熔化而粘结在一起

关键词 冲击压实 能量沉积 绝热压缩

1 引 言

粉末的冲击压实是一项具有广泛应用前景的粉末冶金技术, 其实质是利用冲击波(或爆轰波)对粉末材料进行绝热冲击压缩, 在这一过程中伴随着能量的沉积、粉末材料的熔化和固结。Ahrens 等人^[1]、Gourdin^[2]和 Schwary 等人^[3]证明了粉末颗粒的升温 and 熔化首先发生在颗粒的四周边界上, 而且 Belyakov 等人^[4]指出在一定程度上, 在粉末颗粒界面的某些区域中, 产生了能量的高度集中, 并使颗粒界面局部熔化。在 Belyakov^[5,6]、Raybould^[7]和 Morris^[8]工作的基础上, 1984 年, Gourdin^[9]提出了一个有关粉末冲击压实中能量沉积的统计模型——“能量流”模型。这一模型较为成功地预测了压实样品中熔化的发生以及熔化量的大小, 但遗憾的是这一模型并没有给出能量沉积的具体机制。

Bowden 和 Hanwell^[10]对粉末颗粒的冲击压实研究认为, 在冲击压实过程中, 金刚石是由于石墨晶体界面的滑移而形成的。同时他们认为在陶瓷材料中由于剪切带的形变造成摩擦加热而形成高温。Williamson 和 Berry^[11]在忽略粉末颗粒界面摩擦和绝热剪切的情况下, 对粉末颗粒冲击压实进行了微观模拟, 他们认为在粉末颗粒的高速变形区域, 介质达到了冲击熔化所需的温度, 从而发生熔化。现在一般认为粉末颗粒的升温 and 熔化所需的能量有以下四种来源:

- (a) 粉末颗粒的塑性功转变为热能;
- (b) 粉末颗粒之间的绝热摩擦;
- (c) 粉末颗粒的绝热剪切;
- (d) 粉末颗粒的绝热压缩。

但是其中哪些机制对升温起主要作用, 始终没有一致的看法和定量的说明。

粉末冲击压实所需的平衡压力在几到十几 GPa 的中等压力范围内。由于相应这一压力范围的粉末颗粒的绝热压缩所引起的介质温度上升, 值很小, 因此, 对于绝热压缩的影响在研究中往往不予考虑^[2, 10, 11]。本文的目的便是通过实验和数值模拟对绝热压缩的影响作进一步的探讨。

2 实验结果与讨论

实验中采用球形粉末样品(如图 1 所示)其颗粒度为 $-160+200$ 目, 即粉末颗粒的平均直径在 $76 \sim 98 \mu\text{m}$ 的范围内, 样品初始装填密度为 $4.8\text{g}/\text{cm}^3$ 。采用大约 $2000\text{m}/\text{s}$ 的铝飞片冲击粉末样品, 平衡时样品中的压力大致为 15GPa 。将压实样品的切片经抛光和腐蚀处理后进行显微观察, 结果如图 2 ~ 4 所示。



图 1 实验所用粉末



图 2 摩擦加热熔化



图 3 冲击熔化(绝热压缩)

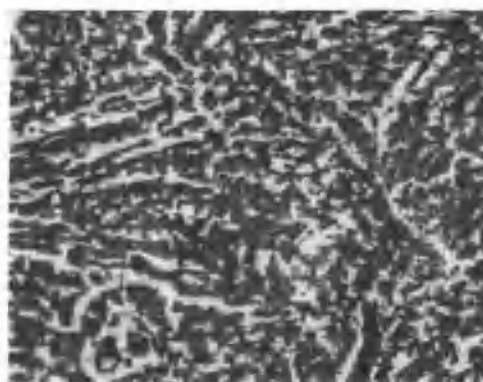


图 4 爆炸(碰撞)焊接

图 2 表示在空穴塌陷过程中, 颗粒表面以 2 倍的粒子速度向空穴中飞散, 同时在运动过程中与另一颗粒表面产生激烈的摩擦, 从而在界面附近形成一个局部加热区, 使得颗粒界面发生局部熔化而粘结在一起。图 3 显示典型的冲击熔化结构, 从图中可以看出在空穴的塌陷过程中, 由于“聚心”绝热压缩的影响, 使得

粉末颗粒在界面附近产生局部熔化而粘结。由于在实验条件下,平衡压力大约 15GPa,不足以引进介质铁的冲击熔化。Brown 和 McQueen 的工作^[12]表明,在大约 253GPa 的压力下,铁介质才会开始熔化。那么出现图 3 这种结构,唯一的解释便是当冲击波传入粉末样品后,在其中达到力学平衡前,由于“聚心”绝热压缩的影响,存在着某些局部高压区,在这些区域中发生了介质的冲击熔化。当样品介质达到力学平衡后,这些区域的高压便不复存在。这一假定,在现阶段很难用实验加以验证。我们拟从理论上作初步的探讨。图 4 为典型的碰撞焊接结构,由于在碰撞点附近存在着一个很大的剪切应变率,在界面附近形成一条绝热剪切带,而使其中的介质温度上升,直到熔化,并形成一股射流。此外,射流与另一颗粒作用,产生了类似图 3 的冲击熔化结构。

3 数值模拟

用一维和二维流体力学计算程序对粉末的压实过程进行数值模拟,具体物理模型如图 5 所示

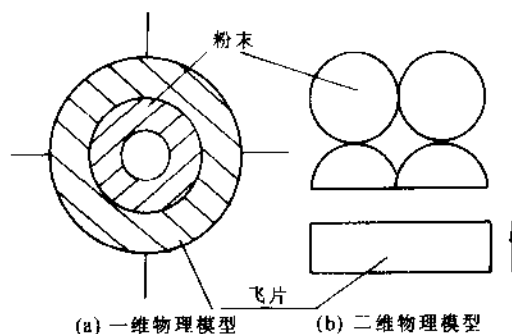


图 5 数值计算的物理模型

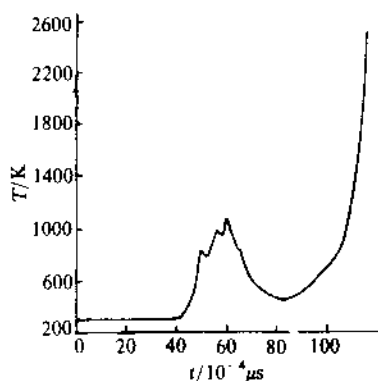


图 6 一维计算中球壳内边界附近的温度变化

可以看出这是在粉末颗粒尺度范围内对粉末的冲击压实过程进行局部的微观数值模拟。由于粉末材料自身所具有的分散性和不均匀性,决定了这种微观数值模拟的必要性。在数值模拟中飞片的速度与实验所用的飞片速度相当,一维物理模型中,恰当地选取了球壳的内外径,使得其空穴直径和整体空隙度与粉末材料中的相同。对于二维数值模拟,我们只是为了同一维的计算作一个定性的比较,因此该物理模型只是采取了一种最为简单的颗粒排列方式,颗粒的直径同真实粉末颗粒的平均直径相等,但对其整体空隙度没有作具体的考虑。

另外,我们数值模拟的目的在于考察绝热压缩对于粉末颗粒升温的影响,因此在计算中我们只考虑了由于基体材料的绝热压缩而引起的温升。

图 6 是一维数值模拟计算中得到的球壳内边界附近的介质在冲击压缩过程中温度随时间的变化曲线。从图 6 可以看出:第一,冲击波在介质中传播时,在冲

击波后介质的温度升高,但所达到的温度都低于铁的冲击熔化温度(约2100K);第二,当冲击波到达内表面时,该自由面以2倍的粒子速度向空穴中飞散,充填空穴,并且由于膨胀而使介质温度下降;第三,当空穴闭合到一定程度时,介质温度迅速回升,并在11.3ns时达到铁的冲击熔化温度。

二维计算得到的粉末样品中温度分布及其变化过程如图7所示。

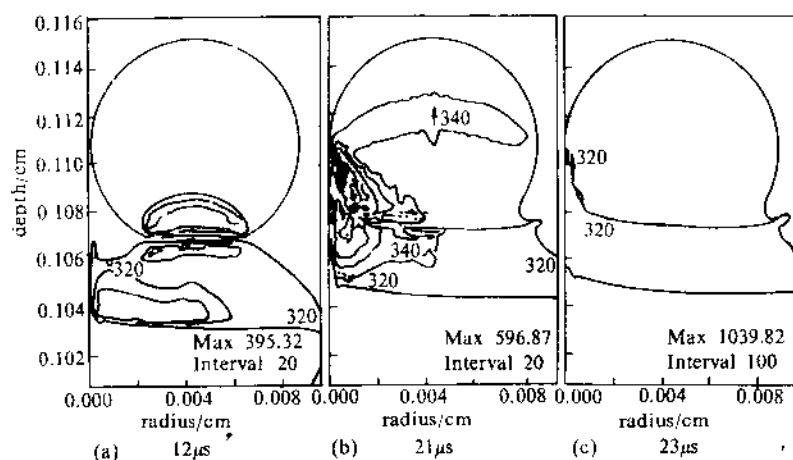


图7 粉末样品中温度的分布及其变化

图7表明,在冲击波作用下,由于两颗粒间的对称碰撞而产生射流(图7a),这股射流在运动过程中与另一颗粒相碰撞,在碰撞界面处形成一个高温高压区域(图7b),并且在21ns以后,该区域的温度开始迅速上升(图7b,图7c)。考虑到二维计算中只是采用了一种最为简单的、理想的粉末颗粒排列方式,使得其空隙度比实际粉末样品中的大,因而空隙闭合的时间要比实际的长,并且相应的温度要低。这样,比较一维和二维数值模拟计算的结果,可以近似地得出,实验条件下,在空隙的闭合过程中,由于“聚心”绝热压缩的影响而在颗粒界面上形成的高温高压区域大约在 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ s内达到介质的冲击熔化温度。

对于冲击波在粉末介质中的上升时间,实验结果和文献[9、13]预估均证实是在 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ s的时间范围内。

4. 结 语

在粉末空隙的塌陷过程中,由于“聚心”绝热压缩的影响,在颗粒界面上形成一个高压区域,通过数值模拟计算,估计这一区域达到冲击熔化所需的时间大约为 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ s,这正好与冲击波前沿 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ s的上升时间相同。据此,我们可以这样认为,在冲击压缩过程中,粉末样品内达到平衡的压力为几到十几GPa,在这一压力范围内,由于介质绝热压缩而引起的温升是非常小的,甚至可以忽略不计。但是在冲击波上升的时间范围内,由于空隙的塌陷,产生“聚心”绝热压缩,使得在颗粒界面上形成一个高压区域,并且该区域的温度迅速达到

介质的冲击熔化温度,使粉末颗粒发生局部熔化而粘结在一起。

此外,从实验结果中可以看出,由于在样品中不同区域内的粉末颗粒的排列方式是各不相同的,因而有些区域粉末颗粒发生局部熔化而粘结,而有些区域则没有发生熔化粘结,粉末颗粒间的空隙只是机械闭合,颗粒的原始边界仍清晰可见,并且不同的熔化区域,由于粉末颗粒的排列方式不同,其主要的能量沉积机制也是各不相同的。在冲击波上升时间内,粉末颗粒的绝热压缩是一种重要的能量沉积机制。

参考文献

- 1 Ahrens T J et al. In: Rapid Solidification Processing of Principles and Technologies, Vol. III, ed: R. Mehrabian (National Bureau of Standards) 1983: 672
- 2 Gourdin W H *Materials Science*, 1986, **30**: 39
- 3 Schwarz R B et al. *Acta met.*, 1984, **32**: 1248
- 4 Belyakov G V et al. *Earth Physics*, 1974, **10**: 665
- 5 Belyakov G V *Sov Phys Dokl*, 1975, **19**: 667
- 6 Belyakov G V et al. *Explosion and Shock Waves*, 1977, **13**: 524
- 7 Raybould D. *Intern J Powder Metall & Powder Tech.* 1980, **16**: 9
- 8 Morris D G. *J Mater Sci*, 1982, **16**: 457
- 9 Gourdin W H *J Appl Phys*, 1984, **55**: 172
- 10 Bowden F B and Hanwell A E. *Nature*, 1964, **201**: 1279
- 11 Williamson R E et al. *Shock Waves in Condensed Matter*, ed: Gupta Y M. New York and London: Plenum Press, 1986: 341
- 12 Brown B J M and McQueen R G. *J Geophys Res*, 1986, **91** (B7): 7485
- 13 Krueger Barry R et al. *J Appl Phys*, 1991, **69** (2): 710

MECHANISM OF ENERGY DEPOSITION AT THE INTERFACE OF METALLIC POWDER IN DYNAMIC CONSOLIDATION

Wu Qiang, Zhang Guanren, Gao Wen

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,
P.O. Box 532, Chengdu, Sichuan 610003, China)

ABSTRACT In the dynamic consolidation of powder, high energy deposits at the particle surfaces through various mechanisms. This paper emphatically studied the effect of adiabatic compression on Fe powder consolidation, and considered that adiabatic compression is one of the most important sources of energy deposition.

KEY WORDS Shock consolidation, Energy deposition, Adiabatic compression.

This series of science and technology reports is published by China Academy of Engineering Physics (CAEP) and issued worldwide to expand domestic and international exchanges of science and technology. Permission is granted to quote from the reports for non-profit use. Contributors include those from CAEP and those who do research in CAEP. Reports in this series are divided into 7 catalogues:

MCSF— Mechanics and Condensed State Physics

NPPP— Nuclear Physics and Plasma Physics

EMS— Engineering and Material Science

EPE— Electronics and Photoelectronics

CCE— Chemistry and Chemical Engineering

CCM— Computer and Computational Mathematics

OT— Other.

Available to the public from the High Power Laser and Particle Beams Magazine Corporation, P.O.Box 511-5, Chengdu, China, 610003.