

爆炸粉末烧结机理的研究现状及其发展趋势

李晓杰, 王金相, 闫鸿浩

(大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

摘要: 分析了爆炸粉末烧结技术的高温、高压、瞬时作用及其在新材料开发, 特别是在粉末冶金中不可替代的特点和发展前景。从粉末材料状态方程、宏观机理和细观机理出发, 综述了爆炸粉末烧结机理的研究进展。最初作为多孔材料本构模型提出的 p - α 模型经过不断修正已能反映孔隙的完全闭合并计入熔化效应; 在宏观机理的研究上, 除实验外, 数值模拟已被用于分析烧结机理及各种实际因素对烧结质量的影响; 在细观机理上, 综述了对爆炸粉末烧结过程中颗粒间结合机制和沉能方式的由浅入深的认识过程, 简单阐述了各种沉能机制, 分析了以往研究成果的不足, 对其今后的发展方向进行了展望。

关键词: 爆炸烧结; 爆炸压实; 冲击粉末压实; 烧结机理

中图分类号: TF124.1.

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2004)06-0566-05

1 引言

爆炸粉末烧结是利用炸药爆轰产生的能量, 以激波的形式作用于金属或非金属粉末, 在瞬态、高温、高压下发生烧结的 1 种材料加工或合成的新技术, 是爆炸加工领域的第三代研究对象。

作为 1 种高能率加工的新技术, 爆炸粉末烧结具有烧结时间短(一般为几十微秒左右)、作用压力大(可达 0.1 GPa~100 GPa)的特征。与常规烧结方法^[1,2]相比, 有着其独特的优点。(1)具备高压性, 可以烧结出近乎密实的材料。目前有关非晶钴基合金、微晶铝及其合金的烧结密度已超过 99%T.D.; Si_3N_4 陶瓷烧结密度达 95%~97.8%T.D.^[3]; 钨、钛及其合金粉末的烧结密度也高达 95.6%~99.6%T.D.不等^[4]。(2)具备快熔快冷性, 有利于保持粉末的优异特性。由于激波加载的瞬时性, 爆炸烧结时颗粒从常温升至熔点温度所需的时间仅为微秒量级, 这使温升仅限于颗粒表面, 颗粒内部仍保持低温, 形成“烧结”后将对界面起冷却“淬火”作用, 这种机制可以防止常规烧结方法由于长时间的高温造成晶粒粗化而使得亚稳合金的优异特性(如较高的强度、硬度、磁学性能和抗腐蚀性)降低。因此, 爆炸烧结迄今被认为是烧结微晶、非晶材料最有希望的途径之一。(3)可以使 Si_3N_4 , SiC 等非热塑性陶瓷在无需添加烧结助剂的情况下发生烧结。在爆炸烧结的过程中, 冲击波的活化作用使粉体尺寸减小并产生许多晶格缺陷, 晶格畸变能的增加使粉体储存了

额外的能量, 这些能量在烧结的过程中将变为烧结的推动力^[5]。除上述特点外, 与一般爆炸加工技术一样, 爆炸粉末烧结还具备经济、设备简单的特点。正广泛地用于精细陶瓷^[6]、金属间化合物^[7,8]、金属基复合材料^[9]、纳米块体^[8,10]以及微晶、准晶、非晶等亚稳合金^[11]的粉末烧结研究中。

爆炸粉末烧结的研究主要涉及爆炸力学和材料学 2 个方面。目前的研究主要偏重于材料学, 即针对各种新材料进行实验性的研究。有关爆炸烧结机理的研究大部分也是关于粉末中冲击波规律、压力场的实验观测与数值计算, 这方面的研究有利于爆炸烧结装置、动载施加方法的改进, 但不能从根本上解决爆炸烧结的内在机理问题。目前, 关于爆炸烧结的机理, 特别是细观机理的研究尚不够深入。本文从高速冲击动力学的角度出发, 分别从粉末材料的冲击状态方程、宏观机理和细观机理 3 方面对爆炸粉末烧结进行了总结并分析了其中的不足, 对进一步的发展方向进行了展望。

2 爆炸粉末烧结机理的研究现状

2.1 粉末材料的冲击状态方程

在爆炸粉末烧结的研究中, 需要进行大量的温度、压力的计算以及对爆炸烧结的过程进行数值模拟, 这都不可避免地要使用各种粉末材料的冲击状态方程。对于压力高达几十 GPa 的情况, 可认为粉末处于流体状态, 可以采用 Mc Queen^[12]等人建立的多孔材料 p - v 冲击状态方程式。但对于大多数粉末来说, 其爆炸烧

收到初稿日期: 2002-11-08; 收到修改稿日期: 2003-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(10172025, 19972015)和辽宁自然科学基金(2001101075)资助项目

作者简介: 李晓杰, 男, 1963年生, 博士, 教授, 大连理工大学工程力学系, 辽宁 大连 116023, 电话: 0411-4708368

结的压力处于 10 GPa 上下的低压区。一方面由于粉末材料的性质要比均匀连续介质复杂的多; 另一方面, 粉末材料正处于弹塑性模型向流体模型过渡的区域, 因而不能仅用流体模型来描述其运动过程。Herrmann 在 1969 年提出的 $p-\alpha$ 模型^[13]曾一度被用来作为多孔材料的本构模型; 其中 p 为压力; α 为孔隙度, 是在同一压力、内能状态下, 多孔材料与基体材料的比容比, $\alpha > 1$ 。之后 Carrol-Holt 提出的球壳塌缩模型^[14]发展了 Herrmann 的 $p-\alpha$ 模型, 其基本假设是将空穴的闭合理解为不可压缩的弹塑性空心球的收缩。并推导出了当空心球完全进入塑性状态时的 $p-\alpha$ 关系:

$$p = \frac{2}{3} Y \left[\ln \left(\frac{\alpha}{\alpha-1} \right) - \ln \left(\frac{\alpha_0}{\alpha_0-1} \right) \right] \quad (1)$$

文献[3]进一步发展了 $p-\alpha$ 模型与球壳塌缩模型, 建立了 1 个能简便、贴切地反应粉末流体-弹塑性体行为的状态方程。在认为 Mc Queen 的公式仍然可以用的情况下, 将冲击波的波速表示为以下形式:

$$U_s = c_{0p} + \lambda_0 u_p^n \quad (2)$$

其中: u_p 为粉末质点速度; λ_0 , n 为材料常数, 可由粉末材料高压状态下的实验数据来确定; c_{0p} 为粉末材料的扰动波速, 其表达形式为

$$c_{0p} = \alpha_0^2 \sqrt{\left[1 + \frac{3 c_0^2 \alpha}{2 Y v_{s0}} \left(\ln \frac{\alpha}{\alpha-1} + \frac{1}{\alpha-1} \right) \right]^{-1}} \quad (3)$$

其中: c_0 , Y , v_{s0} 分别为相应无孔隙固体材料的声速、静态屈服极限、初始比容。在爆炸烧结实践中, 通常 u_p 小于 1 km/s 且激波压力 p 小于 10 GPa, 这时可进一步使用线性近似, 即

$$u_s = c_{0p} + \lambda_0 u_p \quad (4)$$

粉末材料在冲击绝热压缩下的状态方程可以写成:

$$p = \frac{c_{0p}^2 (1 - v/v_0)}{V_{00} [1 - \lambda (1 - v/v_0)]^2} + \bar{p} \quad (5)$$

其中初始压力为:

$$\bar{p} = \frac{2}{3} Y \left(\frac{1}{\alpha} \ln \frac{\alpha}{\alpha-1} - \frac{1}{\alpha_0} \ln \frac{\alpha_0}{\alpha_0-1} \right) \quad (6)$$

粉末冲击绝热压缩后的等熵卸载方程可遵循孔隙闭合后不再开启的原则按粉末基体材料的卸载曲线来进行, 采用如下形式作为卸载方程:

$$p = A \rho^K - B \quad (7)$$

其中: 系数 A , K , B 可由冲击压缩的初始和最终状态点来确定。此外, 文献[15]将疏松材料微观沉能机制的研究结果应用于状态方程的研究, 采用冲击熔化对

空心球壳塌缩模型进行了修正, 提出了记入熔化效应的可使孔隙完全闭合的 $p-\alpha$ 关系式:

$$p = 2/3 \times Y \ln [0.363 4 \alpha / (\alpha - 1 + \eta)] \quad \text{或} \quad \alpha = (1 - \eta) [1 - 0.363 4 \exp(-3p/2Y)]^{-1} \quad (8)$$

其中 α 满足关系式: $1.570 845 \geq \alpha \geq 1$ 。该关系对爆炸粉末烧结有一定的理论指导意义。文献[15]同时推导出了从密实体等压推广的疏松材料状态方程式如下:

$$V_p = V_s + p \left(V_{00} - V_0 + \frac{\alpha-1}{\alpha} V_s \right) \sqrt{\left[p \frac{1-\alpha}{\alpha} - \left(\frac{dp}{dV} \right)_H \cdot \left(\frac{2V_s}{\gamma} - V_0 + V_s \right) \right]} \quad (9)$$

其中: V_0 为密实体初始比容; V_{00} 为多孔体初始比容; 下标 s , p 分别代表密实体和多孔体在高压下的相应参数。与等容、等内能推广对比, 计算表明等压推广有较好的精度。

2.2 爆炸粉末烧结的宏观机理研究现状

爆炸粉末烧结的宏观机理在于冲击波在多孔介质中的传播过程。关于宏观机理的研究, 文献[16]指出, 对于轴对称爆炸压实的情况, 冲击波在向试件中心传播的过程中可能出现 3 种情况: 压力向中心降低、压力在界面上不变、压力向中心增加, 与之相对应圆柱体试样的界面将出现 3 种情况: 压制不完全、压制正确与压制过度。前者和后者的出现将严重影响烧结体的质量。文献[17]总结了前人的实验研究结果认为为了获得最佳压制, 应以 E/M 值为主要参数, 其中 E 为炸药质量, M 为待压粉末质量。另外, 压实的最大密度在很大程度上取决于所用炸药的爆轰速度, 爆轰速度越高 (压力越高) 则爆炸压制所需的 E/M 值越小, 而最大的压制密度需要正确的压制爆速, 如图 1 所示。图中最重要的特点是包含当爆炸速度 (压力) 为某值时粉末可压制到最大密度值。进而揭示了压制过度的原因也就是马赫孔的成因: 激波收缩到轴线附近时

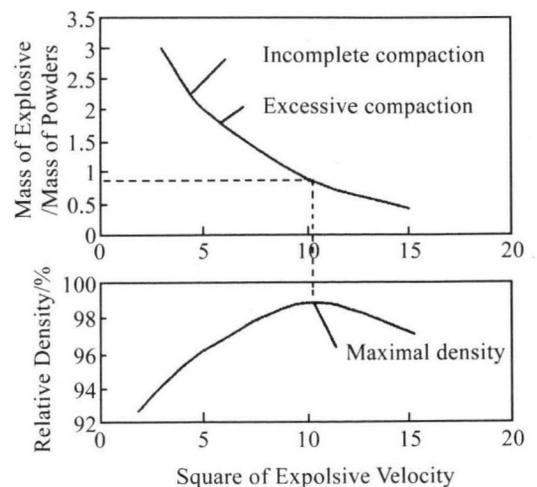


图 1 爆炸烧结参数的选取

Fig.1 Choose of parameters in explosive consolidation

产生强烈的释放波，以致由压缩波形成的颗粒间的结合受到破坏，因此，一般来说不宜采用高爆速炸药。由于爆炸粉末烧结物理过程比较复杂，仅用实验方法无法完成对这些现象的出现作深入理解和全面分析，因此研究人员将注意力转向了数值模拟。

自 20 世纪 80 年代以来，随着计算机科学和计算方法不断发展，用数值模拟方法开展爆炸烧结的研究逐渐成为 1 个极为重要的手段。粉末材料的爆炸烧结的数值模拟工作是 M. L. Wilkins 开始的^[16]。M. L. Wilkins 采用有限差分法，在兼顾状态方程、屈服强度效应、间隙效应、轴芯效应等的前提下，对不同粉末的爆炸压实过程进行了数值模拟，解决了屈服强度、间隙、药厚等因素对爆炸烧结的过程的影响以及轴芯的存在对于马赫孔的形成的影响，认为采用低阻抗的轴芯可以避免出现马赫孔。而 R. A. Berry 和 R. L. Williamson^[18]则对平面飞板的撞击压实进行了数值模拟，计算出了在各个位置上粉末颗粒的压力历程，可以据此判断粉末在什么条件下已被压实。在此基础上，J. E. Reaugh^[19,20]分实验参数效应和实验装置分析两部分对爆炸粉末压实的机理进行了深入分析。其结果证明了前文提到的 E/M 值、炸药爆速等对爆炸压实的影响以及轴芯的存在对马赫孔的形成的影响，但由于在当时的数值模拟中所用的状态方程未考虑颗粒表面加热、熔化和卸载时的急冷速率，所以计算仅反映了粉末的压实而不能反映烧结。1991 年，A. P. Mann^[21]采用简单的流体模型对爆炸压实进行了数值模拟，在正确反映了压实过程的同时大大减小了计算量。而 A. G. Mamalis^[22]借助于显式有限元方法对爆炸粉末烧结的过程进行了数值模拟，给出了烧结过程中的压力、密度和当量应力分布，然而对烧结过程有重要影响的温度参数的数值计算工作尚有待于解决。

国内对爆炸粉末烧结的数值模拟工作起步较晚。中科院力学所的张德良^[23]采用流体弹塑性模型和 Euler 算法在国内第一次完成了爆炸粉末烧结的数值模拟，在给出了爆炸烧结过程中的密度与压力分布的同时研究了炸药和粉末参数对爆炸烧结质量的影响。其数值模拟结果表明，综合使用间隙、复板和轴芯可得到密实、均匀、无马赫孔的高质量的烧结体。此外，对平面爆炸烧结中常出现的裂纹问题，文献[24]通过对 SiC 粉末的爆炸烧结进行数值模拟后解释了其成因并给出了解决的方法。

对爆炸粉末烧结的宏观机理的研究有利于对加工技术的革新。从上文的分析可以看出，对爆炸粉末烧结的宏观机理的数值模拟工作已取得较大的进展，同时也存在着一些有待解决的问题，除了计算方法有待于改进外，所涉及的最大问题是如何考虑粉末烧结

中的能量沉积过程，也就是细观烧结机理问题。

2.3 爆炸粉末烧结的细观机理研究现状

对爆炸粉末烧结的细观机理的研究有着重要的理论意义和实际意义。它不仅是宏观研究的基础，还可正确解释颗粒间的结合过程，确立粉末颗粒大小、粒度分布、颗粒形状、表面状态、微粒力学性能和热学性能这些对压实、结合影响很大的因素，从而促进爆炸烧结技术向更细微的方向发展，与现代材料学的精细程度相吻合。

最初的研究认为粉末在激波压缩下的升温在粉末颗粒的内部和界面上是均匀一致的。但随着对爆炸烧结的大量研究逐步认识到，粉末颗粒的升温 and 熔化首先发生在颗粒的周界上，热能急剧在颗粒界面积聚，并导致表层的熔融和结合。关于爆炸粉末烧结中的颗粒界面的沉能机制长期以来是个有争议的问题。Linse 认为固结是由于颗粒发生变形、流动填充了空穴和裂缝，从而使颗粒间结合，因而颗粒变形、发热和软化热熔的过程是主要机制^[25]。Wilkins 认为在高压状态下，许多材料均呈现相当高的韧性，从而在动态荷载的高压下发生塑性流动和升温，并使相邻颗粒发生局部焊接^[26]。Morris 在较早时候认为粉末的激波固结过程类似于板-板之间的爆炸结合^[27]。Lotrich 等人还认为空穴或颗粒之间裂缝中的空气绝热压缩是颗粒发生熔化的根源^[28]。Flinn 和 Williamson^[29]等人以 304 不锈钢粉末为研究对象，用二维数值模拟方法对烧结过程中颗粒的塑性流动和空穴的闭合过程进行了数值模拟，给出了空穴闭合过程中，因界面高速斜碰撞所形成的射流的高速侵彻形成的局部高温区。Staudhammer^[30]等人采用模型材料进行了爆后金属学观察与分析。Flinn 的计算结果与丝材的爆炸烧结试验现象吻合良好，是迄今定量描述烧结机制的重要论文。以上机制都是假设粉粒尺寸均匀，可认为比较适合均匀粒子的熔合过程。对非均匀粒子，特别是粒子尺寸相差悬殊的情况，可按文献[31]提出的综合考虑微尺度力学与微尺度传热的“颗粒尺寸效应”机理来解释。

文献[32]对当时国内外的细观机理的研究进行了总结，采用粉末颗粒堆积模型提出了金属粉末的微爆炸焊与微摩擦焊机制（如图 2 所示），并经过计算得出摩擦生热比绝热剪切生热更为重要。此外，它还通过热内能观点将细观的烧结机制和宏观的多孔隙材料的激波压缩理论相结合，给出了界面熔化区大小的简化判据，与有关实测进行了比较，取得了较一致的结果。最近，希腊学者 Mamalis 又对多年来关于爆炸烧结的细观机理的研究进行了总结^[33]，指出：冲击波通过疏松介质时基本的烧结机理主要与以下 2 个因素有关：

① 颗粒的塑性变形以及颗粒间的相互碰撞、孔隙塌

缩、颗粒表层的破坏导致颗粒表面的沉热和熔化并发生焊接。② 颗粒的破碎、孔隙的填充、颗粒表面由于热量的沉积而发生部分熔焊或固态扩散结合。需要说明的是上述第一种机理主要是针对金属一类塑性材料来说的, 而第二种机理主要适用于陶瓷等脆性材料。

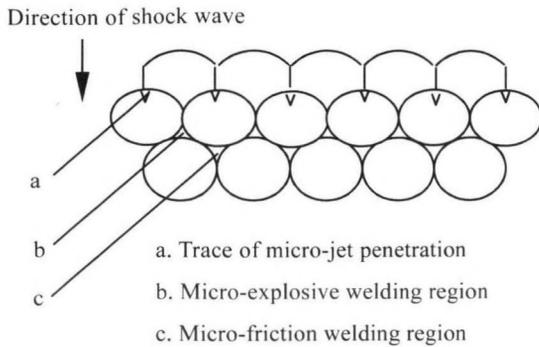


图 2 绝热摩擦和微爆炸焊接示意图

Fig.2 Schematic diagram of micro-explosive and adiabatic friction welding

此外, Mamalis 还对很多学者为描述和解释粉末的烧结过程而建立的分析模型进行了总结, 并提出了以下几种最常用的分析模型: 由 Mamalis^[34,35]提出的粉末变形机理、由 Schwarz^[36]提出的颗粒间熔化机理、由 Carroll 和 Holt^[37,38]提出的孔隙塌缩机理、由 Dijken 和 DeHosson^[39]提出的微动力学机理模型、针对脆性材料的颗粒破碎机理^[40]和有限元方法为基础的数值计算模型^[41]。

3 结束语

自爆炸粉末烧结技术产生以来, 关于其机理的研究取得了巨大的进展。但是, 也不难发现对其机理的研究仍不完善。尤其是在微观机理的研究中, 由于在目前的数值模拟方法中, 网格不能划分太细, 从而抹掉了射流形成时在碰撞点附近所形成的高应变率剪切层所产生的高温层。在 Flinn 等人的计算中还忽略了在激波高压下粉粒挤入空隙时界面之间的绝热摩擦的升温机制。此外, 还未能引入微传热等机制, 尚无法全面的反映爆炸烧结的真实微观过程, 而现有的微摩擦焊与微爆炸焊理论模型, 基本上是在绝热假设的基础上的, 对爆炸烧结的热、力耦合过程也不能给出很好的解释。

事实上, 在粉末颗粒的冲击过程中, 随着冲击压力、孔隙度、粉末状态、材料种类的变化, 烧结过程的能量沉积与耗散主要是非等熵压缩、塑性变形、破碎、表面摩擦、传热诸因素相互作用的结果。非等熵压缩涉及到整体的能量沉积, 由整体绝热压缩与颗粒之间的碰撞所产生的微冲击波消耗所组成, 而当材料

明显为脆性时, 破碎过程将代替局域塑性变形, 产生耗散; 以微摩擦为主的沉热将由表面摩擦生热, 发展到局部热软化, 进入高度局域化剪切变形和原子扩散, 形成微摩擦焊接。在合适的条件下粉粒间的碰撞发生微喷射, 也就是微爆炸焊, 以摩擦焊、微爆炸焊及孔隙闭合为主的局部塑性沉能将是烧结的主要作用。但是由于材料的微尺度效应, 传热过程对上述局域化沉能过程的影响是绝对不可忽略的, 并且是相互耦合的。对于金属、陶瓷、纳米粉等不同的材料的爆炸烧结必然会涉及到微尺度下的力学与热学性能问题。研究爆炸烧结粉末颗粒间的冲击运动、传热规律以及由此引发的冶金规律, 也即研究微粒高速碰撞过程引起的微冲击波、微喷射、微粒破碎、微孔隙塌缩、微尺度摩擦与热传导之间的耦合关系是急待解决的问题, 这一问题的解决将有助于正确确立对爆炸烧结影响很大的粉末颗粒大小、粒度分布、颗粒形状、表面状态、微力学性能和热学性能对压实与结合的影响, 从而才可能促进爆炸烧结技术向更细致的材料学领域发展, 同时, 也可促进多孔材料本构关系与状态方程的研究, 为之提供更细致的理论依据。

参考文献 References

- [1] Wang Zhifa(王志法), Jiang Guosheng(姜国胜), Liu Zhengchun(刘正春). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1998, 27(5): 290~293
- [2] Chen Feixiong(陈飞雄), Qiang Jinxi(强劲熙), Jia Zuocheng(贾佐诚). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1998, 27(3): 177~181
- [3] Wang Lili(王礼立), Yu Tongxi(余同希), Li Yongchi(李永池). *Advance of Shock Dynamics*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1992: 323~354
- [4] Laszlo J Kecskes, Ian W Hall. *J Mater Proc Tech*[J], 1999, 94: 247~260
- [5] Xue Honglu(薛鸿陆), Hong Tingji(洪延姬). *Explosion and Shock Wave*[J], 1995, 15(4): 322~328
- [6] Jong-Heon Lee et al. *J Mater Proc Tech*[J], 1999, 85: 79~82
- [7] Ando S et al. *J Mater Proc Tech*[J], 1999, 85: 142~147
- [8] Chen T. *Acta Mater*[J], 1999, 8(47): 2 567~2 579
- [9] Sivakumar K et al. *J Mater Proc Tech*[J], 1998, 73: 268~275
- [10] Tanimoto H et al. *Scripta mater*[J], 2000, 42: 961~966
- [11] Binghuang Shao. *J Mater Proc Tech*[J], 1999, 85: 121~124
- [12] Mc Queen R G, Marsh S P et al. In: Kinslow R ed. *High Velocity Impact Phenomena*[C]. New York: Academic Press, 1970: 297
- [13] Herrmann W. *J Appl Phys*[J], 1969, 40(6): 2 490~2 499
- [14] Carrol M M, Kin K T, Kesteredko V F. *J Appl Phys*[J], 1986,

- 59(6): 1 962
- [15] Li Xiaojie(李晓杰). *Research on the Mechanism and Experimental Technology of Explosive Synthesis of Superhard Materials*(爆炸复合硬质合金的机械性能研究)[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 1998
- [16] Wilkins M L *et al.* *Computer Simulation of Dynamic Compaction*[M]. Hague: Martinus Nijhoff Press, 1982: 217~230
- [17] Blazynski T Z. *Explosive Welding. Formation and Compaction*[M]. London: Cambridge Press, 1983: 127
- [18] Berry R A, Williamson R L. *Mechanical Engineering*[J], 1987, 52: 167~187
- [19] Reaugh J E. *J Appl Phys*[J], 1987, 61: 962~968
- [20] Reaugh J E. *In Shock Waves in Condensed Mater*[J], 1987: 391~395
- [21] Mann A P. *J Appl Phys*[J], 1991, 70: 3 281~3 290
- [22] Mamalis A G, Vottea I, Manolakos D. *Physica*[J], 2000, 341~348: 2 433~2 434
- [23] Zhang Deliang(张德良), Wang Xiaolin(王晓林). *Explosion and Shock Waves*[J], 1996, 16: 105~110
- [24] Wang Niansheng(王年生), Zhang Kai(张凯), Dong Shouhua(董守华). *Journal of Dalian University of Technology*[J], 1993, 33: 651~654
- [25] Linse V D. *In Metallurgical Applications of Shock-wave and High-strain-rate Phenomena*[M]. New York: Mancel Dekker Inc, 1986: 25~55
- [26] Wilkins M L, Kusubov A S, Cline C F. *Mechanical Engineering*[J], 1986, 52: 57~82
- [27] Morris D G. *Mater Sci Engr*[J], 1983, 57: 198
- [28] Lotrich V F, Akashi T, Sawawoka A. *In Metallurgical Applications of Shock-wave and High-strain-rate Phenomena* [M]. New York: Mancel Dekker Inc, 1986: 277~292
- [29] Flinn J E, Williamson R L. *J Appl Phys*[J], 1988, 64: 1 446~1 456
- [30] Staudhammer K P. *J Mater Sci*[J], 1990, 25: 2 287~2 298
- [31] Dong Ming(董明). *Development and Application of Materials*[J], 1995, 10: 29~33
- [32] Shao Binghuang(邵丙璜), Gao Juxian(高举贤), Li Guohao(李国豪). *Explosion and Shock Waves*[J], 1989, 9: 17~27
- [33] Mamalis A G, Vottea I N, Manolakos D E. *J Mater Pro Tech*[J], 2001, 108: 165~178
- [34] Mamalis A G, Gioftsidis G N, Prohaszka J. *Proc inst Mech Engrs*[J], 1990, 204: 237
- [35] Mamalis A G, Gioftsidis G N. *J Mater Process Technol*[J], 1990, 23: 333
- [36] Schwarz R, Kasirag P, Vreeland T, Ahrens T J. *Acta Metal*[J], 1984, 32: 1 243
- [37] Carrol M M, Holt A C. *J Appl Phys*[J], 1972, 43: 1 626
- [38] Carrol M M, Holt A C. *J Appl Phys*[J], 1972, 43: 759
- [39] Dijken D K *et al.* *J Appl Phys*[J], 1994, 75: 809
- [40] Mamalis A G, Szalay A, Pantelis D, Pantazopoulos G. *J Mater Pros Tech*[J], 1996, 157: 112
- [41] Reaugh J E. *J Appl Phys*[J], 1987, 61: 962

The Survey and Development Trend of the Research for the Mechanism of Explosive Consolidation of Powders

Li Xiaojie, Wang Jinxiang, Yan Honghao
(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Because the technique of explosive consolidation of powders can produce high temperature and high pressure in very short time, it is promising in the exploitation of new materials especially in the consolidation of powders. However, the research of its mechanism is inadequate now. The research of the state equation of powders as well as the macroscopical and microcosmic mechanism of explosive consolidation of powders is discussed in this paper. Finally some suggestions for future development trend are put forward.

Key words: explosive consolidation; explosive compaction; impact compaction of powders; consolidation mechanism

Biography: Li Xiaojie, Ph. D., Professor, Dalian University of Technology, Dalian 116023, P. R. China, Tel: 0086-411-4708368,
E-mail:dalian03@vip.sina.com