

钨粉爆炸烧结对粉末初始参数 依赖关系的研究

王年生

(大连理工大学工程力学所, 大连 116023)

摘要 本文从粉末爆炸烧结的能量沉积概念出发, 提出了粉末爆炸烧结下限概念。讨论了钨粉末的爆炸烧结密度值和硬度分布对粉末初始参数的依赖关系, 给出了实验结果。从理论和实验阐述了粉末初始参数在爆炸烧结实验中的重要作用。

关键词 爆炸烧结 冲击波 装填密度

一、爆炸烧结能量沉积理论分析

粉末爆炸烧结机理早已被人们广泛地研究和讨论。当粉末受冲击波压缩作用, 随着粒子间空隙的闭合, 粉末粒子相互碰撞, 摩擦和挤压变形, 导致各个粒子表面熔化或接近熔化而处于极活泼状态, 从而彼此发生冶金结合。实验和理论研究都证明^[1], 爆炸烧结过程中粉末粒子表面会达到熔化温度, 远远高于粒子内部温度, 这种温差在较长时间内经热传导而消失。

在爆炸烧结过程中, 冲击波对粉末的加载—卸载路径如图1。粉末被冲击加载后内能增加可近似表示为^[2]

$$\Delta E \approx \frac{1}{2} p \left(\frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_s} \right)$$

其中 p 为冲击波压力, ρ_{00} 为粉末初始装填密度, ρ_s 为粉末基体材料密度。

ΔE 以何种方式转化为单个粉末粒子的内能, 是爆炸烧结能量沉积概念的关键。Schwarz^[2]近似取 ΔE 完全沉积于粉末粒子表面的一薄层内, 并使其熔化, 从而计算得烧结过程中粉末的最大熔化量, 并认为可据此预报成功的粉末爆炸烧结。Gourdin^[3]认为冲击波能量在冲击波前沿时间 τ 内以热传导方式自粉末粒子表面传入粉末粒子一个均匀能流 $f \cdot \Delta E / \tau A$, 并取粉末粒子的直径为 $6/\rho_s A$ (等比表面积球直径), (其中 f 为一修正系数, A 为粉末比表面积), 然后按热传导方程式进行数值计算, 求得粉末熔化量。按计算的粉末熔化量结合实验结果可得出取得成功爆炸烧结的条件。

冲击波能量沉积于粉末粒子表面的过程, 并不完全如上两种描述, 而是粉末粒子, 尤其是粉末粒子表面极薄层发生了急剧塑性变形, 塑性功转化为热能, 加上粒子间的摩擦等因素, 从而发生粒子表面熔化和粒子间的冶金结合, 是一个相当复杂的能量转化过程。对于半径为 r_0 的球形粉末粒子来说, 沿半径的内能分布 $e(r)$ 可能如图2所示, 整个粒子内

· 国家自然科学基金资助。

1990年8月20日收到原稿, 11月27日收到修改稿。

能增加为:

$$e_s = \int_0^{r_0} e(r) \cdot 4\pi r^2 \rho_s dr$$

规定 $e_s = (1/4\pi r_0^2) e_s$ 为粒子单位表面积内能增加, 对于所有不同直径的粉末粒子存在一个最大的 e_s , 取其值 e_0 , 且认为每个粒子单位表面积内能增加均达到 e_0 时, 粉末才全部发生烧结, 则粉末实现成功的爆炸烧结的必要条件是

$$\frac{1}{2} p \left(\frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_s} \right) = A \cdot e_0$$

或

$$p = \frac{2e_0 A \rho_s}{(\rho_s / \rho_{00}) - 1}$$

其中 A 为粉末的比表面积。应该指出, 上述 $e(r)$ 是依赖粉末材料热力学性质和粒径的函数, 所以 e_s 也与材料的热力学性质和粒径相关。对具有相同基体材料而粒径分布范围不同的粉末, 其对应的 e_s 也不相同, e_0 当然也不同, 可见 e_0 是决定于材料热力学性质和粉末特性(如粒径)的一个参数, 其大小可通过实验确定。

由上式可见, 粉末达到爆炸烧结所需压力与粉末的初始装填密度和比表面积有着十分明确的关系, 粉末的装填密度越高, 比表面积越大, 则达到烧结所需压力越高。对于一批粉末, 比表面积一定, 则所需冲击波压力直接决定于装填密度。以上给出必要条件实际上给出了粉末爆炸烧结所要求的最低冲击波压力, 即压力下限, 其正确性在平面和轴对称爆炸烧结实验中都得到证实^[4,5]。

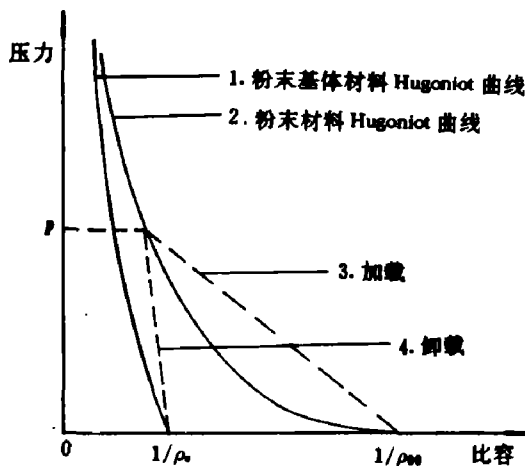


图 1 粉末冲击加载-卸载路径

Fig. 1 Pressure-volume path followed during the shock compaction of a powder

- 1. Hugoniot of powder matrix material,
- 2. Hugoniot of powder material
- 3. Loading, 4. Unloading.

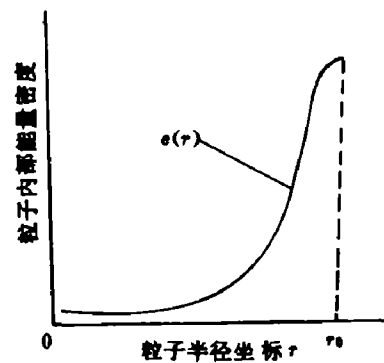


图 2 粒子内部能量密度曲线

Fig. 2 Energy density curve $e(r)$

二、钨粉轴对称爆炸烧结实验与讨论

图 3 为轴对称爆炸烧结示意图。烧结件为圆柱体。图 4 给出烧结件密度与粉末装填密度关系实验数据, 图中曲线有递增趋势。

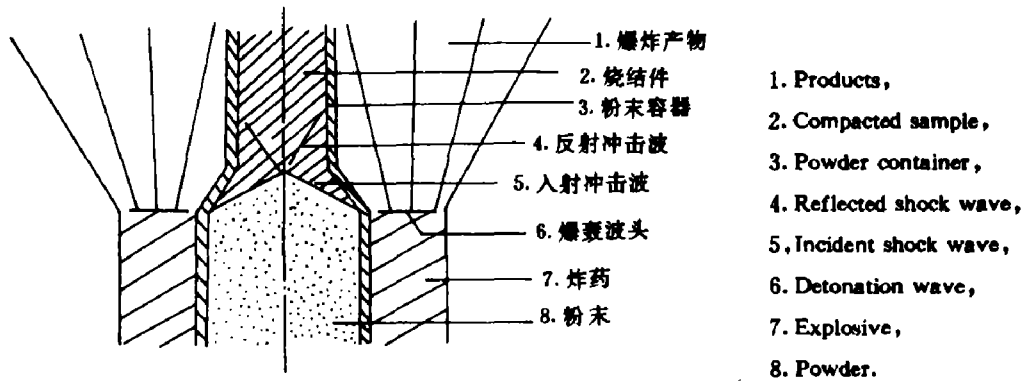


图 3 轴对称爆炸烧结示意图

Fig. 3 Arrangement for axial symmetrical explosive compaction

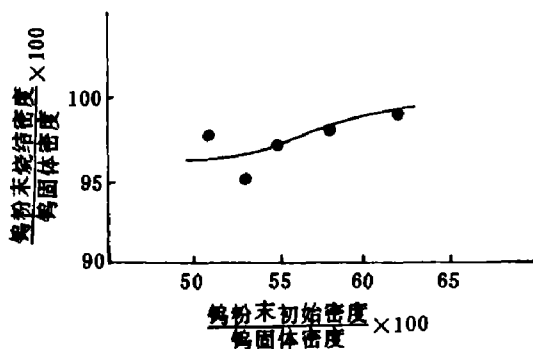


图 4 钨粉装填密度与烧结件密度关系实验曲线

Fig. 4 Resulted relation of the density of compact versus packing density of the powder

前述烧结理论分析并没有考

虑到烧结件的密度, 只给出了爆炸烧结的压力下限, 但可以推想, 随着粉末装填密度的增加, 烧结所需压力增大。在粉末粒子表层处于流动变形的情况下, 较高的压力必然有助于粒子间更完全和密实的结合, 从而获得具有较高密度的烧结件, 如图 4 所示。在钨粉的轴对称爆炸烧结研究中, Prümer^[8]认为调整炸药质量与粉末质量比 E/M , 存在一个最优爆速, 具有这一爆速的炸药可使钨粉烧结密度达到极限值 $97.4\% \rho_{TD}$ (ρ_{TD} ——钨的结晶密度)。对图 3 所示的轴对称爆炸烧结, 粉末的装填密度决定了烧结所需冲击压力, 也就是决定了所选用的炸药的爆速和爆压, E/M 值只是在适当的爆速下为了达到烧结条件且获得理想的烧结件而必须调整的一个参数。图 4 中的实验结果正是按这种原则得到的, 从图中可见烧结件密度已达到 $99\% \rho_{TD}$ 。

图 4 中的实验结果正是按这种原则得到的, 从图中可见烧结件密度已达到 $99\% \rho_{TD}$ 。

三、爆炸烧结件的性能分析

一般来说爆炸烧结件内各点的性能, 如硬度和金相, 相差很大, 极不均匀, 试件的宏观力学性能也很差。图 5 为装填密度分别为 $62\% \rho_{TD}$ 和 $51\% \rho_{TD}$ 的钨粉爆炸烧结圆柱试件横截面上的显微硬度分布曲线。

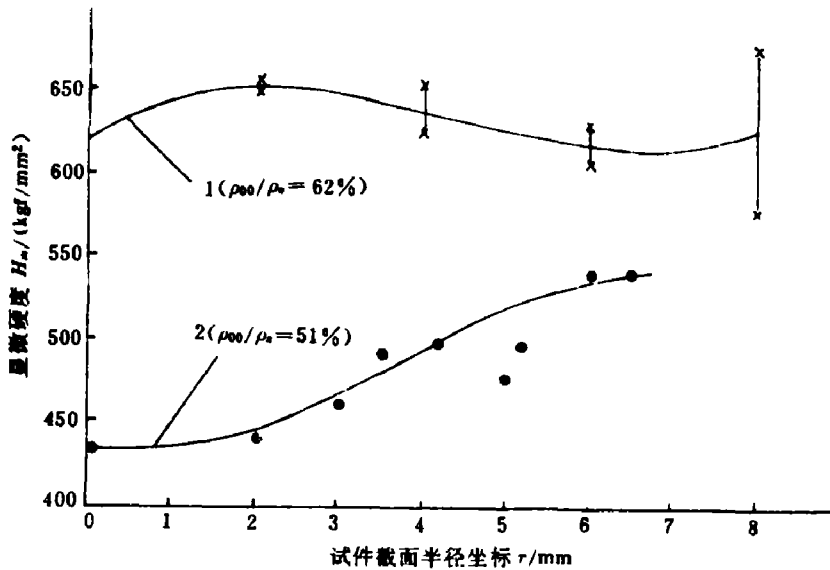


图5 装填密度为62% ρ_{rD} 和51% ρ_{rD} 的钨粉烧结件横截面上的显微硬度分布

Fig. 5 Microhardness distributions of compacts (with packing density 62% ρ_{rD} , 51% ρ_{rD} respectively) on their sections

纯钨具有单相组织,在烧结过程中 α -钨不存在相变,爆炸烧结后,其硬度主要受如下两种效应的影响。第一种是冲击波使粉末粒子受到压缩,发生剧烈塑性变形,粉末粒子晶粒细化,位错和晶格畸变等缺陷大幅度增加^[6],烧结件出现冲击波硬化效应^[7];另一种效应是冲击波对粉末做功,粉末内能增加导致温度上升,从而促使粒子内部各种缺陷的迁移,提高原子活性,在晶粒内部发生回复,当温升很高时,甚至产生晶粒间的再结晶,最终导致烧结件的软化,降低其硬度值。

轴对称爆炸烧结都存在轴心附近的冲击波正规或非正规反射,以及冲击波向心传播过程中的聚心加强效应,这些因素同时作用则形成更强的冲击波聚心加强效应,前述的硬化效应和软化效应都沿半径向心逐步加强。若粉末的装填密度较高,则声速较高,冲击波向心加强效应就会减弱,沿半径压力分布比较平缓,就有可能克服粉末温升带来的软化作用,而硬化作用占主导地位,获得如曲线1所示的较均匀的硬度分布。若粉末的装填密度较低,则声速也低,冲击波的聚心加强效应也就强烈,邻近轴心区域压力会很高,再加上粉末间隙较大,内能增加量就很大,温升所引起的软化作用占支配地位,出现显微硬度分布曲线沿半径向轴心明显降低,如曲线2所示。

比较图5中两条曲线还可看到,曲线1比2有更高的硬度值。这说明,对于曲线1,沿半径均匀分布的较高的压力与较高的粉末装填密度没有产生过高的粉末内能增加,沉积于粉末的能量引起的软化作用没有达到曲线2对应的水平。联系前节的结果看来,曲线1对应较高的烧结密度,也可能是决定高硬度值的一个因素。

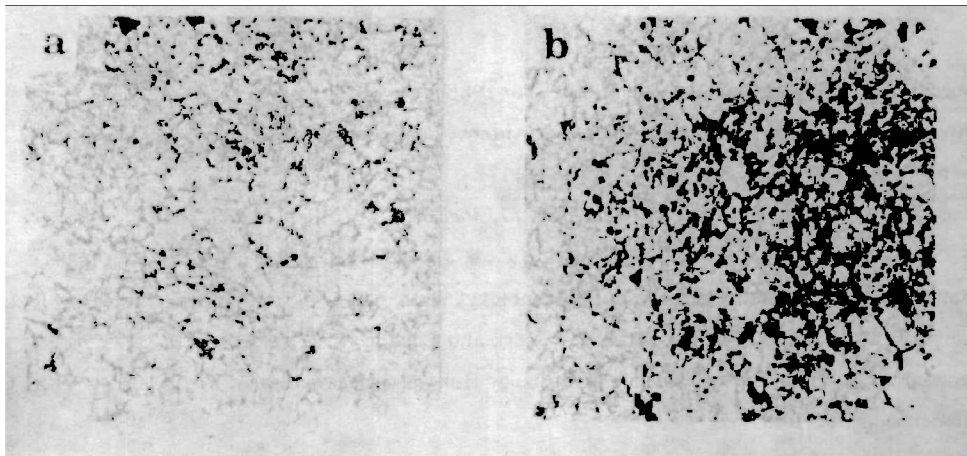


图6 装填密度 $62\% \rho_{T0}$ 的烧结件横截面心部(a)和边缘部分(b)的金相照片

Fig. 6 Micrograph on the section of compact ($62\% \rho_{T0}$ packing density), (a) central part, (b) out part

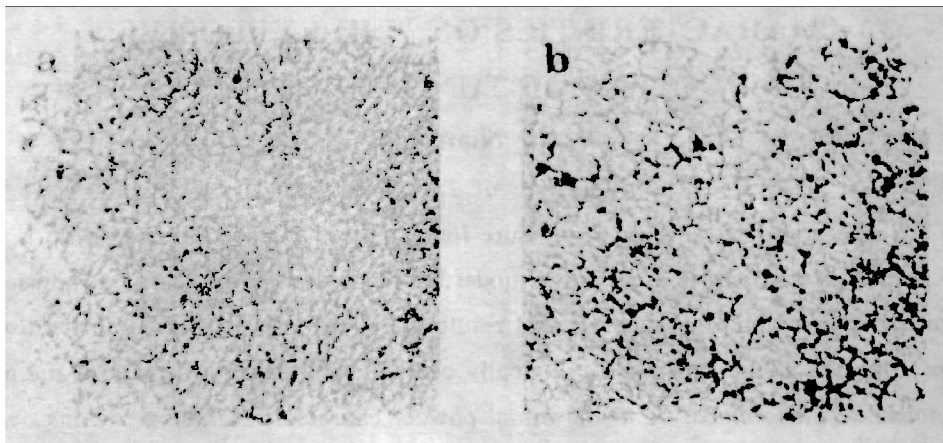


图7 装填密度 $51\% \rho_{T0}$ 的烧结件横截面心部(a)和边缘部分(b)的金相照片

Fig. 7 Micrograph on the section of compact ($51\% \rho_{T0}$ packing density), (a) central part, (b) ort part

图6和图7分别为曲线1和曲线2对应的烧结件的金相照片。从两组照片看出,粉末粒子的表面已被破坏,彼此间发生了冶金结合,可以认为达到了成功的烧结。各试件的边缘部分和中心部分的组织没有很大差异,只是中心部分的粒子破碎程度稍重一点,说明试件轴心附近与边缘部分经历了不同的冲击波压缩过程。

四、结 论

粉末爆炸烧结一直是以其能保持粉末原有特性和能烧结高熔点材料而被广泛重视,粉末爆炸烧结能量沉积概念也被普遍接受。烧结的下限条件对实验极为重要,以接近下限的能量获得的爆炸烧结件可以最大限度地保持粉末原有特性,在轴对称爆炸烧结时有可能获得具有均匀性能的烧结件。

在爆炸烧结实验中,粉末的性能,如装填密度和比表面积,对确定爆炸烧结参数起着决定性作用,对爆炸烧结件的性能也有重要影响。

参 考 文 献

- [1] Gourdin, W. H. , *Progress in Materials Science*, **30**(1986), 39-80.
- [2] Schwarz, R. B. , Kasiraj, P. , Vreeland Jr. T. , Ahrens, T. J. , *Acta Metall.* , **32**(8)(1984), 1243-1252.
- [3] Gourdin, W. H. , *J. Appl. Phys.* , **55**(1)(1984), 172-181.
- [4] Kondo, K. , Soga, S. , Sawaoka, A. , Araki, M. , *J. Mat. Sci.* , **20**(1985), 1033-1048.
- [5] 张 凯, 王年生, 王 雷, 金小石, 钨粉的爆炸压实, 第 4 次全国爆炸加工会议文集, 长沙, (1989).
- [6] Prumer, R. , *High-Pressure Science and Technology*, Sixth AIRAPT Conference , Edited by K. D. Timmerhaus and M. S. Barber , Plenum press, New York and London , (1979) , 814-820.
- [7] Дерibas А. А. , *Физика Упрочнения и Сварки Взрывом*. Издательство, Наука, Сибирское. Отделение, Новосибирск, (1980).

**STUDIES ON THE EFFECTS OF INITIAL POWDER
CHARACTERISTICS ON THE EXPLOSIVE
COMPACTION OF TUNGSTEN POWDER**

Wang Niansheng

(*Dalian University of Technology, Dalian*)

ABSTRACT The prescribed minimum pressure for explosive compaction of powder is presented here in a simple form, which is based on the model for the deposition of energy at powder particle surfaces during compaction. The experimental results show that the densities and the distributions of hardness of compacts are dependent principally on the initial packing density of the powder. It is also demonstrated theoretically that the initial powder characters including packing density and specific surface area play important roles in explosive compaction.

KEY WORDS explosive compaction, shock wave, packing density.