

文章编号: 1006-9941(2010)05-0483-04

RDX 晶体颗粒聚集体压缩刚度曲线的振荡分析

李明, 黄明, 徐瑞娟, 康彬, 李洪珍

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为考察晶体颗粒压制过程的振荡现象, 对三类五种 RDX 晶体颗粒进行了压缩刚度试验, 发现压制曲线的振荡特征与单个颗粒凝聚强度有密切关系。定义并测量了破碎阶段的压制曲线振荡幅值, 其中重结晶 RDX 样品的振荡幅值约为 2.4 MPa, 远高于普通 RDX 颗粒的 1.2 MPa, 而高品质 D-RDX 的振荡幅值为 4.4 MPa, 表明 D-RDX 破碎的许用应力最高, 其晶体颗粒凝聚强度得到显著提高。研究表明利用压缩刚度法分析颗粒品质特征还需考虑曲线振荡幅值, 同时也表明高品质的晶体颗粒不易通过压制获得较理想的破碎状态。

关键词: 凝聚态物理; RDX; 压缩刚度; 振荡**中图分类号:** TJ55; O469**文献标识码:** A**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.05.001

1 引言

压缩刚度法是利用晶体颗粒聚集体在准静态压制条件下的力学响应曲线来评价晶体颗粒品质特性(凝聚强度)、进而间接评价晶体颗粒感度特性的一种新试验方法。在作者早先发表的文献^[1-2]中是将压制过程(曲线)的破碎阶段(即粉末压制过程的第二阶段)的割线模量用作度量颗粒凝聚强度的定量指标, 并通过与参考样品(如普通晶体颗粒)进行对比来评价晶体品质以及重结晶工艺。自从作者提出压缩刚度法以来, 通过进一步研究发现, 压缩刚度曲线(压制曲线)的振荡包含着与晶体单个颗粒强度(凝聚强度)密切相关的信息。在颗粒物理与力学研究中, 压制曲线的振荡现象与颗粒聚集体中的所谓“力链”^[3-4]的形成、演化有密切关系, 而所谓“力链”, 则是颗粒聚集体用来传递外界载荷的接触“链条”, 它体现了颗粒聚集体内部应力(接触应力)分布的高度非均质特点。压制过程中, 由于颗粒的破碎和流动, 在微细观尺度上导致“力链”分布不断发生变化, 宏观上则体现为压制曲线的振荡。

压制曲线的振荡特性与颗粒的破碎与流动关系密切, 因此对曲线的振荡分析: 一方面, 可以寻找到与颗

粒凝聚强度密切相关的指标特征, 为颗粒的品质特征评价提供支持; 另一方面, 也为颗粒材料的压制工艺优化提供重要参考。本文对两类 RDX(普通和重结晶)进行压制试验, 分析了破碎阶段的振荡特征并提出了一个定性的物理图像来解释了曲线振荡原因。

2 实验

2.1 材料与实验条件

选取一组 RDX 晶体颗粒进行压缩刚度试验, 这组样品中包含了三类晶体颗粒共计 5 个样品: 第一类是原料粗颗粒样品(命名为 C-RDX), 实验中取一个样品; 第二类是利用原料进行重结晶后获得的不同批次的晶体颗粒, 选取了 3 个样品(即表 1 中的 sample 1, sample 2 和 sample 3), 这类颗粒的内部品质基本一致, 但是粒径稍有差异; 第三类样品是利用重结晶晶体进一步修饰处理获得的高品质晶体颗粒(中物院化工材料研究所将其命名为 D-RDX)。所有样品用量在 2 g 左右, 样品的信息(如编号、质量、平均粒径和初始松装密度)在表 1(表中的 ISM 与 σ_a 将在文章后面予以解释)中列出(需要说明的是, 本文中的 D-RDX 和 C-RDX 的试验数据引自作者发表的论文^[1])。压缩刚度实验的具体细节见文献^[1-2], 实验选取内径为 15 mm 的钢制模具, 采用 $0.05 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的压制速率, 获得了样品的压制曲线, 即压缩应力与压缩率的关系, 如图 1 所示。

收稿日期: 2010-06-03; 修回日期: 2010-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(10832003)

作者简介: 李明(1971-), 博士, 副研究员, 从事固体力学研究。

e-mail: li_ming@caep.ac.cn

表 1 样品信息

Table 1 Information of the samples

RDX particles	sample 1	sample 2	sample 3	D-RDX ^[1]	C-RDX ^[1]
mass /g	2.000	2.000	2.001	2.003	2.001
mean size / μm	315.4	360.1	332.2	276.4	536.6
tap density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.125	1.124	1.126	1.126	0.931
ISM /MPa	82.5	82.0	85.1	82.3	34.6
σ_a /MPa	2.4	2.5	2.3	4.4	1.2

3 结果与讨论

3.1 压制曲线

与作者早期发表的工作一致,图 1 所示的压制曲线清晰地区分了 5 种 RDX 晶体颗粒聚集体的凝聚强度和品质差异,其中重结晶样品 1,2,3 和 D-RDX 样品均表现出相对较高的压缩刚度特征,压制曲线在中间阶段均表现出强烈的破碎振荡特征。根据作者定义的初始割线模量 (ISM-initial scant modulus) 的计算方法^[2]计算了这 5 种样品的 ISM 值,分别列入表 1。样品 1,2,3 和 D-RDX 的性质基本接近,其 ISM 数值基本接近,均远高于普通颗粒 (C-RDX) 的 34.6 MPa,其中样品 3 还略高于 D-RDX,这似乎给出一种印象,即样品 3 的凝聚强度高于 D-RDX,品质似乎更好。但是,如果观察曲线的振荡幅值,D-RDX 则表现出独特的性质,即具有最高的曲线振荡幅值。

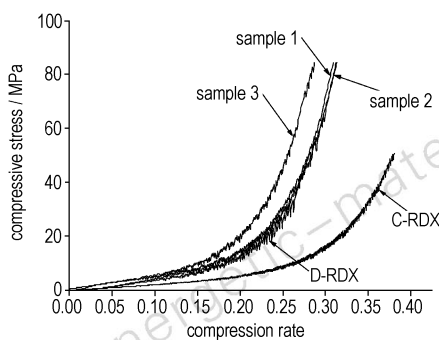


图 1 颗粒压制曲线

Fig. 1 Compression curves for 5 samples

3.2 振荡曲线分析

由于几类重结晶样品压制曲线比较接近,不便于观察和区分,我们将上述样品的压制曲线分别进行绘制,且只挑选颗粒破碎阶段的振荡曲线,即将压缩率在

0.1 到 0.25 间(这一选择也是依据曲线整体的振荡差异,在初期重排阶段几乎没有振荡,这个阶段约在压缩率为 0.1 时结束,而当压缩率超过 0.25 之后,振荡减小直至趋于平缓)的曲线抽取出来单独绘制(对于普通样品 C-RDX,由于破碎阶段后移,则截取的是压缩率在 0.2 到 0.35 的区间)。这个压缩率区间的振荡曲线涵盖了整个压制阶段的最大振荡幅值,反映了颗粒间相互作用导致的破碎特征。振荡曲线如图 2 所示。通过曲线搜索,将震荡过程中发生的最大幅值(这里用 σ_a 表示,即某一特定压缩率的领域附近对应的最大与最小应力的差值的平均值)在振荡曲线中用上下相对的箭头所示,数值列入表 1 的最后一行,并绘制出样品最大振荡幅值与颗粒平均直径的关系图,如图 3 所示。图 3 显示,尽管 D-RDX 的粒径远小于 C-RDX,其振荡幅值却远高于后者。一般认为,较小粒径的颗粒材料其松装密度相对较高(这从表 1 的数据可以看出),留给颗粒破碎的空间较小,因此,在假定颗粒强度相同的前提下,较小颗粒发生振荡的幅值相对较小^[3,5],而具有较小粒径的 D-RDX 其振荡幅值最大,表明其凝聚强度相对较高。

前面分析指出,三种重结晶样品 (sample 1、sample 2 和 sample 3) 和 D-RDX 的初始割线模量基本接近,表明其晶体品质比较接近,但是从曲线振荡幅值可以看出,重结晶样品和 D-RDX 晶体颗粒还是有明显区别。样品 1,2 和 3 的振荡幅值分别为 2.4 MPa,2.3 MPa 和 2.5 MPa(基本相同),而 D-RDX 的振荡幅值为 4.4 MPa,几乎为前三种样品的 1.8 倍,上述四种样品的振荡幅值又都远高于原粗颗粒的 1.2 MPa。笔者认为,初始割线模量反映了整体颗粒聚集体的压缩刚度,与颗粒特性密切相关,也与颗粒填充状态相关,而特定位置的振荡则与一个颗粒“薄层”的破碎密切相关,换句话说,后者较之前者更接近于单个颗粒的许用破坏强度 (allowable failure strength)。进一步,作者认为这个颗粒薄层应在压头下方(关于颗粒薄层的破碎理论分析,作者将另著文论述),这里给出定性阐述:由于颗粒聚集体的内摩擦作用(包括颗粒间、颗粒与模套内壁间),在压制过程中,颗粒聚集体内的压缩应力应该是自压头下方开始逐渐递减,即颗粒聚集体的内应力存在沿着高度方向(即压制主应力方向)的应力梯度;随着颗粒流动造成的密实化,颗粒聚集体进入破碎阶段,而压头下方的薄层处于较高的应力(接近外部压制应力),当应力接近颗粒破碎许用应力时,薄层内的颗粒破碎,应力下降,产生应力

跌落和振荡；而后在压头下方形成粒径较小的破碎层，破碎层将继续作为压头压力的传递层，其厚度随着下一个薄层的破碎而增加，直至聚集体所有薄层（实际上是接触且连续的）破碎，则颗粒聚集体进入整体

压实阶段。必须指出，由于颗粒间隙的存在，实际单个颗粒的许用破坏应力要高于上述振荡幅值，上述振荡幅值是一个定性定义的颗粒薄层的许用破坏应力。

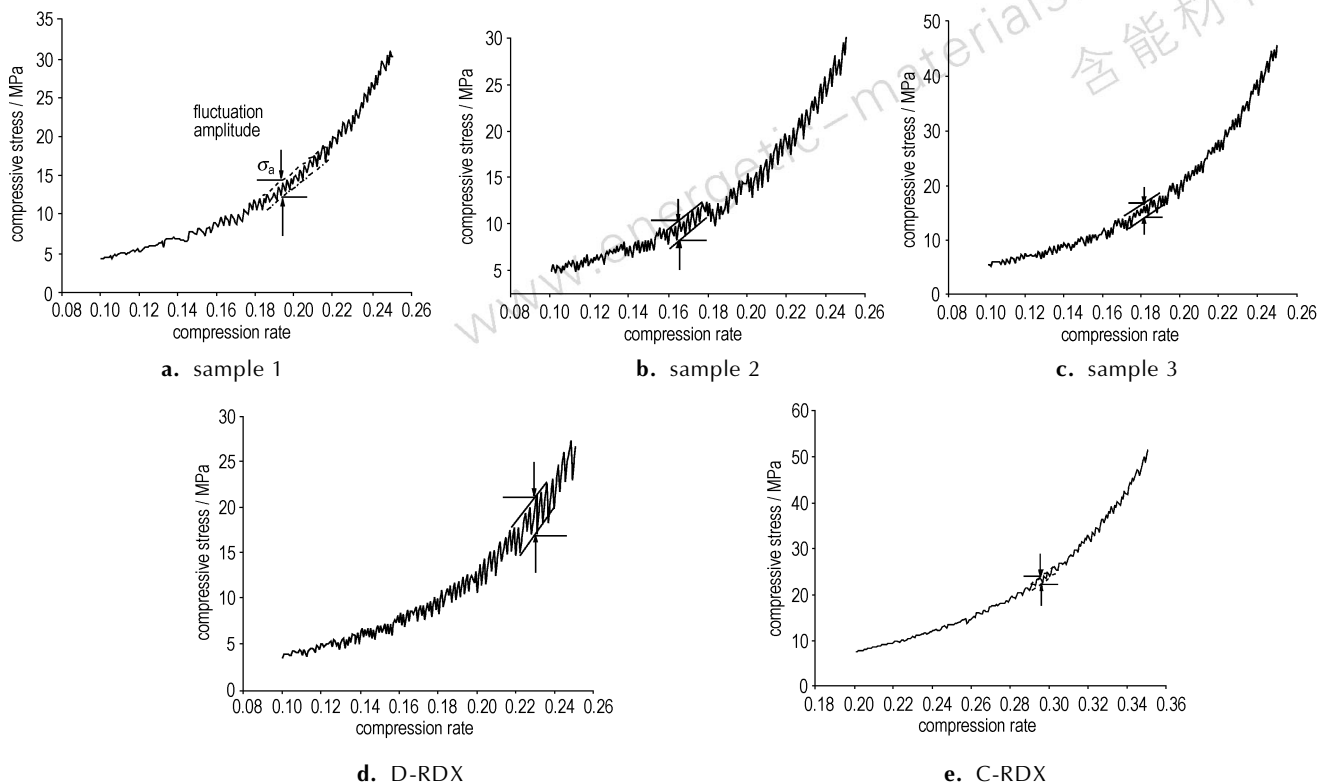


图 2 5 种样品的振荡曲线

Fig. 2 Fluctuation curves of 5 types of crystalline particles

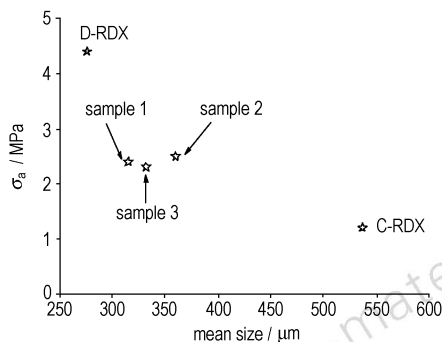


图 3 样品振荡幅值与平均粒径关系

Fig. 3 Fluctuation amplitude of the samples vs the means size

综合上述分析，通过力学特性来判断颗粒品质，既要考虑初始割线模量^[1]，也要兼顾振荡幅值。从本文的数据来看，相对于普通 RDX，重结晶方法可以大幅度提高 RDX 的晶体品质，即凝聚强度，而将重结晶颗粒进行进一步的处理，进一步提高了单个颗粒的凝聚强度，这从压制曲线的振荡幅值可以明显获知。另外需要指出的是，具有较高品质的晶体颗粒可能不适宜

压装，而更适宜于浇注等无需颗粒破碎的工艺过程，因为压装过程需要通过颗粒破碎来获得较高压制密度，而晶体颗粒较高的凝聚强度却不易破碎，增加了压制的工艺难度。

4 结论

重结晶工艺可以大幅度改善晶体品质，表现在晶体颗粒聚集体的压缩刚度大幅度提高。而经过进一步处理获得的 D-RDX，其压制曲线在破碎阶段的振荡幅值最高，表现出单个颗粒的凝聚强度或者品质特性最佳。在利用压缩刚度法评定晶体颗粒品质时，除了考虑压制曲线的初始割线模量外，还应借助曲线的振荡幅值信息进行评价。

参考文献：

- [1] LI Ming, HUANG Ming, KANG Bin, et al. Quality evaluation of RDX crystalline particles by confined quasi-static compressing method[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2007, 32(5): 401-405.

- [2] 李明, 温茂萍, 黄明, 等. 压缩刚度法评价含能晶体颗粒的凝聚强度[J]. 含能材料, 2007, 15(3): 244-247.
LI Ming, WEN Mao-ping, HUANG Ming, et al. Evaluation of coherence strength of energetic crystalline granules by compressive stiffness method[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(3): 244-247.
- [3] Anita Mehta. *Granular Physics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [4] LI Ming, ZHANG J, FANG J, et al. Dynamic analysis of contact forces in impacted disk assemblies by shadow technique of caustics[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Designs*, 2006, 41(8): 609-622.
- [5] Jacco H Snoeijer, Thijs J H Vlugt, Martin van Hecke, et al. Force network ensemble: A new approach to static granular matter[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 92(5): 054302-054305.

Fluctuation Analysis of Compression Curves of RDX Crystalline Ensembles

LI Ming, HUANG Ming, XU Rui-juan, KANG Bin, LI Hong-zhen

(Institute of Chemical Materials, China Academy of Physics Engineering, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to investigate the fluctuation phenomena of RDX crystalline particles subject to pressing, the compression stiffness tests (CST) were conducted for five types RDX crystalline particle ensembles from three sources and it is found that the fluctuation of the compression relates closely to the coherence strength of single particle of RDX. The measured fluctuation amplitudes of recrystallized is about 2.4 MPa, which is much higher than that of commonly used RDX, namely 1.2 MPa, and D-RDX bears the highest fluctuation amplitude of 4.4 MPa, it means that recrystallized RDX (D-RDX) has a maximum allowable failure stress and its quality has been well improved compared to the rest of the samples. This study shows that when using CST to evaluate the quality, the fluctuation should be considered carefully.

Key words: condensed matter physics; RDX; compression stiffness; fluctuation

CLC number: TJ55; O469

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.05.001