

文章编号:1006-9941(2020)10-0960-09

# TATB 造型粉颗粒单轴压缩力学性能

马寅翔,刘晨,王慧,张才鑫,陈华,张伟斌

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川绵阳621999)

**摘要:** 为掌握三氨基三硝基苯(TATB)造型粉颗粒力学性能,设计了一种适用于X射线微层析成像系统的原位微米力学加载装置,利用X射线微层析成像技术对颗粒细观结构特征进行了无损表征,采用Hertz法向接触模型对单个造型粉颗粒力-位移关系进行了研究,获得了单个TATB造型粉颗粒的杨氏模量、屈服点、接触刚度、破坏荷载等力学参数与颗粒外形、孔隙形态、孔隙分布等结构特征。结果表明,单个TATB造型粉颗粒准静态法向压缩过程表现出弹性变形、弹-塑性变形与破坏崩塌三个阶段,颗粒内部尺寸小且空间结构分散的孔隙在颗粒变形过程中基本不发生变化,颗粒内部尺寸大且平行于加载方向的片状孔隙显著降低颗粒破坏强度,颗粒内部结构的差异对其压缩力学性能影响较大。

**关键词:** 三氨基三硝基苯(TATB);造型粉颗粒;CT原位试验;单轴压缩;力学性能

**中图分类号:** TJ55; TP391; O34

**文献标志码:** A

**DOI:**10.11943/CJEM2019327

## 1 引言

高聚物粘结炸药(polymer bonded explosive, PBX)依据成型工艺可分为压装型、浇注型、热固型等,其中压装型PBX以其优异的性能被广泛应用。TATB造型粉颗粒一般由水悬浮法制备,结构具有多样性且差异明显<sup>[1-3]</sup>,是压装型PBX的颗粒单元,不同的颗粒结构将影响其成型PBX的应力、变形与稳定性,因此有必要深入研究TATB造型粉单颗粒的压缩力学性能,掌握压缩作用下颗粒尺度的结构演变,为揭示TATB基PBX细观结构成因及对宏观力学性能影响提供研究基础。

国内外主要通过单轴压缩加载的方式研究单颗粒的力学性能,使用Hertz法向接触模型拟合实验获取的力-位移曲线,分析颗粒变形及颗粒强度等性能,如Russell等<sup>[4]</sup>从能量角度考虑沸石颗粒准静态压缩变形和断裂的发生,Portnikov等<sup>[5]</sup>通过单轴压缩力-位移曲

线确定不同工业颗粒的屈服点、弹性接触刚度和有效弹性模量,Huang等<sup>[6]</sup>利用统计方法解释玻璃球准静态压缩强度特征。上述研究虽获得颗粒的力学性能,但尚不能解释不同颗粒具有不同力学性能的原因,且研究集中在岩土与粉末技术领域的天然或工业制造的颗粒<sup>[7-11]</sup>。关于炸药造型粉颗粒尤其是TATB造型粉颗粒力学性能的研究鲜有报道。

X射线微层析成像(Micro-Computed Tomography,  $\mu$ CT)技术能以微米级别无损观测实验样品的细观特征,对于研究颗粒内部结构优势明显,已有大量工作使用 $\mu$ CT技术对颗粒物质开展研究,如颗粒形态测量<sup>[12]</sup>、颗粒细观结构演化<sup>[13]</sup>、颗粒变形机理研究<sup>[14]</sup>等,但仅实现了对颗粒外形与内部结构的描述,尚未对加载过程中的颗粒力学性能进行深入研究。

本研究利用 $\mu$ CT技术,设计适用于单个TATB造型粉颗粒的压缩加载装置,原位、无损观测单个TATB造型粉颗粒单轴压缩行为,掌握其应力-位移响应与细观结构演变,获得其压缩力学性能。

## 2 试验与方法

### 2.1 试验样品

TATB造型粉颗粒,呈黄色近球形颗粒,由中国工

收稿日期:2019-11-13;修回日期:2020-02-11

网络出版日期:2020-07-16

基金项目:国家自然科学基金资助(11572294、11702262)

作者简介:马寅翔(1995-),男,硕士研究生,主要从事材料力学性质与CT应用研究。e-mail: mayinxiang17@gscaep.ac.cn

通信联系人:张伟斌(1972-),男,研究员,主要从事先进材料与工程无损评价、凝聚态物理、CT应用技术研究。e-mail: weibinzhang@caep.cn

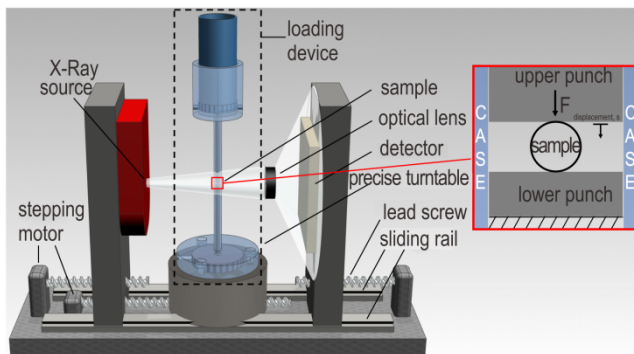
引用本文:马寅翔,刘晨,王慧,等. TATB造型粉颗粒单轴压缩力学性能[J]. 含能材料,2020,28(10):960-968.

MA Yin-xiang, LIU Chen, WANG Hui, et al. Mechanical Property of the Single TATB Granule by Uniaxial Compression[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(10):960-968.

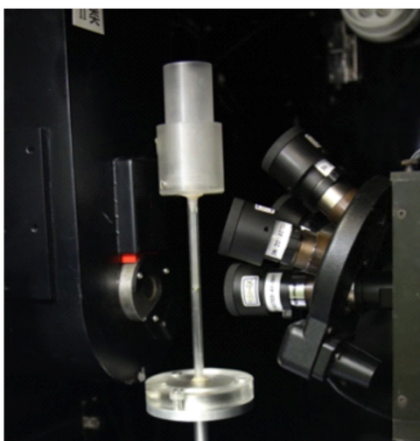
程物理研究院化工材料研究所制备,组成成分有 TATB 粉末晶体(直径小于  $30\ \mu\text{m}$ )、少量黏结剂与添 加剂。随机选取 6 颗表面基本光滑、球形度接近、粒 径大小约  $1000\sim 1200\ \mu\text{m}$  的造型粉颗粒,样品编号记 为 G1、G2、G3、G4、G5、G6。

## 2.2 $\mu\text{CT}$ 系统与力学加载装置

用天津三英精密仪器有限公司的 nanoVoxel-9010 型 X- $\mu\text{CT}$  系统进行 CT 扫描, $\mu\text{CT}$  系统如图 1 所示,主 要由射线源、精密转台与带有放大镜头的探测器构成, 三者的相对位置由丝杆与步进电机控制,以调整成像 放大倍数。精密转台可在水平面内自由旋转、在竖 直方向上升下降,探测器搭配有 4、10、20 倍三种镜头 实现高分辨率成像。探测器接收到来自射线源穿透样 品的射线,完成一次曝光得到的射线投影图像称为数字 射线照相(Digital Radiography, DR)图像,连续拍摄样 品台旋转过程中的多幅 DR 图像并重建被测物三维空 间结构称为计算机断层扫描(Computed Tomogra- phy)成像。 $\mu\text{CT}$  系统最大管电压  $150\ \text{kV}$ ,最大功率  $10\ \text{W}$ ,探测器像素数为  $2048\times 2048$ 。



a. Schematic diagram of  $\mu\text{CT}$  system and loading



b. Photograph of loading device

图 1  $\mu\text{CT}$  系统与原位力学加载装置

Fig.1  $\mu\text{CT}$  scanning system and mechanical loading device

适用于  $\mu\text{CT}$  系统的原位微米力学加载装置如图 1 所示,装置外形呈高脚杯状,使用有机玻璃材料制作。 样品置于上下压头间,下压头支撑样品,上压头及上 部的承载桶自重作为荷载施加于样品,承载桶内根据 实验需要装入不同质量的  $\text{ZrO}_2$  细沙以实现荷载的 精确控制。装置侧面有压头锁定机构,可在加载过程 中随时锁定压头,限制压头位移。

TATB 造型粉颗粒受力示意如图 1a 所示,颗粒受 到的法向荷载  $F, \text{N}$ ,表示为:

$$F = mg \quad (1)$$

式中, $m$ 为上压头及承载桶内  $\text{ZrO}_2$  细沙质量, $g$ ;  $g$ 为 重力加速度,  $9.8\ \text{mN}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

## 2.3 CT 原位力学加载与扫描测量方法

在室温下,将单个 TATB 造型粉颗粒装入加载装 置,未施加荷载时上压头自重作用于造型粉颗粒,在 该状态下采集颗粒的 CT 图像,作为颗粒初始形态基 准。随后分次将  $10\ \text{g}$   $\text{ZrO}_2$  细砂倒入承载桶,并逐 次拍摄 DR 图像,通过对 DR 图像的分析测量,获取 每次加载压头压缩量/颗粒位移量。最后在颗粒发生 显著变形甚至开裂崩塌的临界状态时锁死上压头并 采集 CT 图像。其中,DR 图片的单个像素的尺寸为  $1.494\ \mu\text{m}$ ; CT 扫描像素合并数为 2,CT 图像的体素边 长为  $2.988\ \mu\text{m}$ 。

图 2 为利用 DR 图像使用半峰高法的颗粒高度测 量方法示意。图 2a~图 2d 为颗粒加载过程的 DR 示 例图像。在图 2a 中的 DR 图像最中部垂直方向取一 测量线分析该线上图像灰度值变化如图 2e,根据半 峰高法确定不同荷载下的压头与颗粒接触边界,进 而得到颗粒高度,对每次加载得到的 DR 图像进行 颗粒高度测量,获得加载过程的位移信息。位移测 量最大误差为 1 个像素即  $1.494\ \mu\text{m}$ ,实际测量中定 位半峰高位置所在的像素可根据灰度值-坐标曲线 精确到亚像素级别。

图 3 为将 TATB 造型粉颗粒等效为椭球体的方 法,计算方法如式(2)所示。该方法以颗粒高度与横 截面参数,将造型粉颗粒外形等效为一个具有两根 等长长轴与一根短轴的椭球体。

颗粒与压头的接触半径  $R_c$  可表示为椭球体在 顶点处的曲率半径,  $\mu\text{m}$ ,即

$$R_c = \frac{R_{\text{eq}}^2}{H_{\text{H}}} \quad (2)$$

式中,  $H_{\text{H}}$  为颗粒的半高度,  $\mu\text{m}$ , 定义为颗粒未加 载初始状态高度的一半。  $R_{\text{eq}}$  为横截面等效半径,  $\mu\text{m}$ , 定义为与颗粒半高度位置横截面面积相同的正 圆的半径。

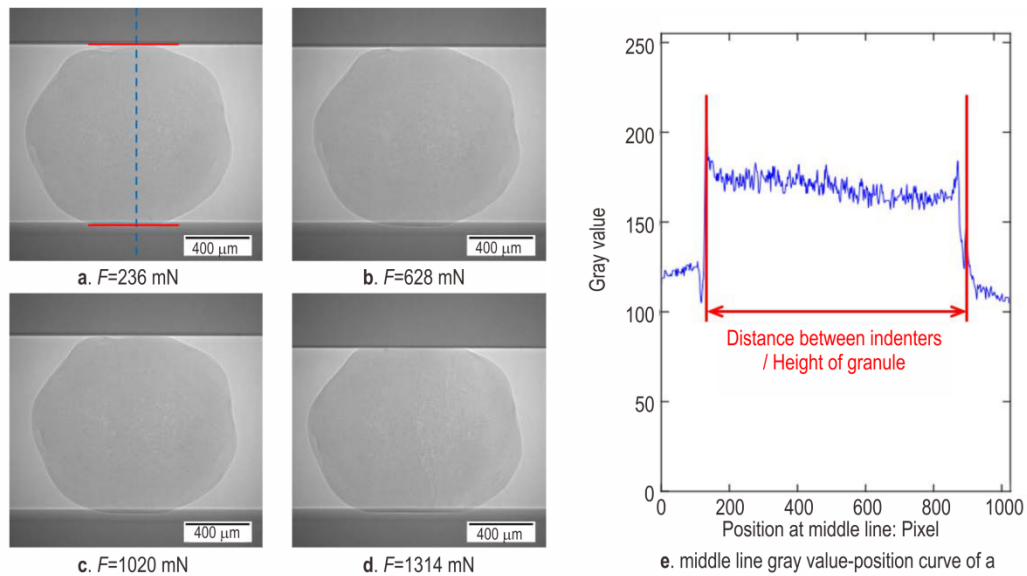


图2 造型粉颗粒加载过程DR图像序列与压头距离测量方法示例

Fig.2 Sequence of DR images of granule under different loading and approach of indenter distance measurement

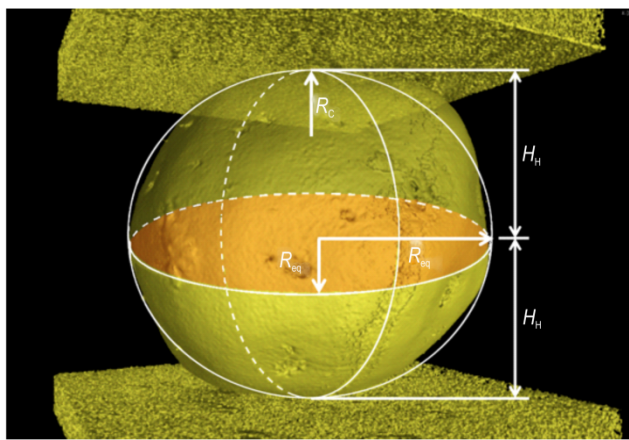


图3 造型粉颗粒等效为椭球体方法

Fig.3 The method of equivalent transformation of granule to ellipsoid

颗粒放置在压头位置的纵横比AR为

$$AR = \frac{H_h}{R_{eq}} \quad (3)$$

### 3 结果与讨论

#### 3.1 颗粒特征CT扫描结果

图4为未加载状态TATB造型粉颗粒CT扫描结果,第一列为颗粒三维重建图,后三列为颗粒中间位置xy、xz与yz截面切片。从图4可以看出:颗粒近似球形,表面存在凹坑凸起等特征,G1与压头的接触面有小的凸起,G6与压头的接触面有较为明显的大凸起,且G1~G6均有高密度致密表层;G5尺寸相对最小,

G6球形度最差;G1内部孔隙少,呈小片状,G2内部孔隙少且分散,G3中心连通的孔隙较大,G4孔隙相对密集,G5有“C字形”片状孔隙,G6有平行于加载方向的片状连通孔隙。颗粒内部结构有明显差异。

表1为结合DR图像与CT切片图像得到TATB造型粉颗粒的横截面等效半径、颗粒半高度、接触面半径、纵横比、接触面形貌、颗粒内部缺陷形貌等特征。结果显示:G1~G5颗粒纵横比小于1,呈扁球状,G6颗粒纵横比大于1,形状较为不规则。

#### 3.2 颗粒压缩力学性能分析

##### 3.2.1 颗粒受力-位移曲线

图5为TATB造型粉颗粒准静态单轴压缩实验的受力-位移曲线。可以看出,最后一次加载产生的位移明显大于之前数次加载的位移。结合DR实验观察,最后加载点造型粉颗粒失去承载能力,发生破坏崩塌,因此本研究认为每条曲线的最后2个数据点分别为破坏点和崩塌点。此外,颗粒力-位移曲线表现出明显的阶段特征,与压头接触的初始阶段,曲线斜率(代表刚度)较大,中间段斜率下降,最后阶段颗粒破坏,曲线斜率接近0。

##### 3.2.2 颗粒压缩变形过程

###### 3.2.2.1 弹性变形阶段

Hertz法向接触模型<sup>[15]</sup>确定了颗粒受法向力准静态压缩变形时的荷载、位移、杨氏模量和泊松比等的关系,模型适用于各向同性弹性固体球间非粘正压小变形弹性接触的情况,在某些微凸颗粒、内部非完全均匀

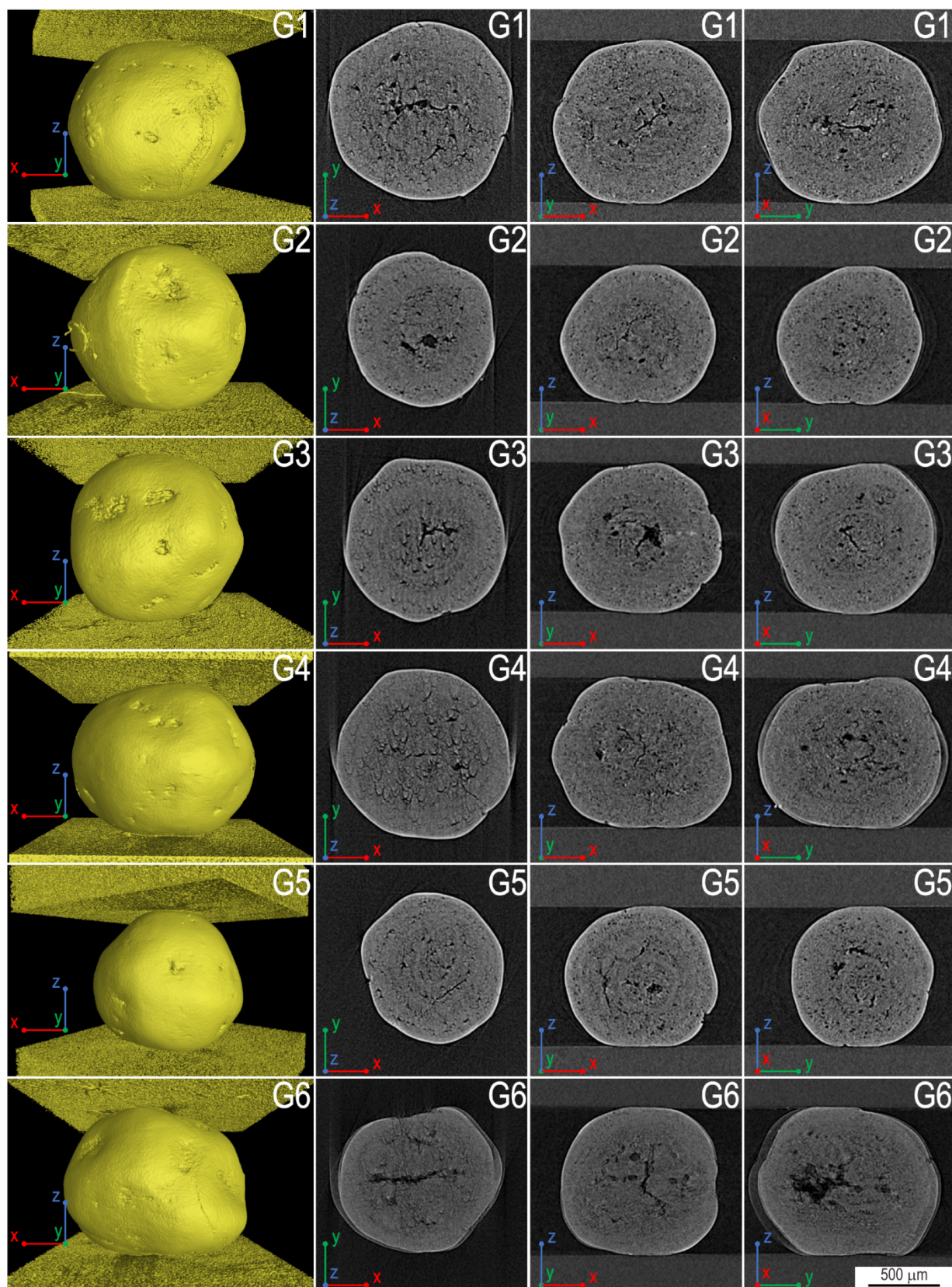


图4 TATB造型粉颗粒未加载状态CT扫描结果

Fig.4 CT scan results of TATB granules before loading

表1 TATB造型粉颗粒结构特征

Table 1 Characteristics of TATB granules

granules	$R_{eq} / \mu\text{m}$	$H_H / \mu\text{m}$	$R_C / \mu\text{m}$	AR	contact surface morphology	defects morphology
G1	627.5	573.5	686.6	0.91	small bump	a few sheet-like pores
G2	544.9	504.0	589.1	0.93	round	a few dispersive pores
G3	586.7	547.5	628.7	0.93	round	one big pore in the center
G4	622.5	551.0	703.3	0.89	round	many dispersive sheet-like pores; big pores
G5	527.0	510.0	544.6	0.97	round	many C-shaped pores
G6	593.0	670.0	524.8	1.13	big bump	sheet-like pores parallel to loading direction; big pores

Note:  $R_{eq}$  is equivalent radius of cross-sectional area;  $H_H$  is half height;  $R_C$  is contact radius; AR is aspect ratio.

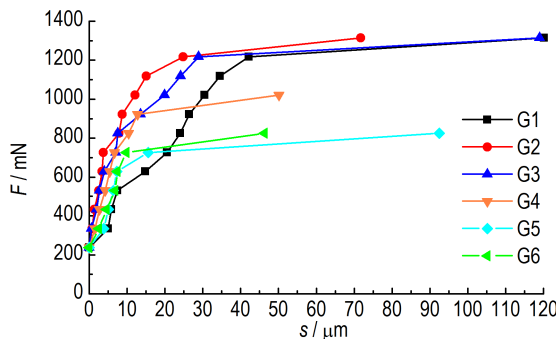


图5 TATB造型粉颗粒加载力-位移曲线

Fig.5 Force-displacement curve of TATB granules

的颗粒也被证明有良好的适用性<sup>[16-19]</sup>, 有效性得到广泛认可<sup>[20]</sup>。Hertz法向接触模型给出了准静态压缩弹性球体的力-位移关系:

$$F = \frac{1}{3} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \sqrt{2R_C s^3} \quad (4)$$

式中,  $F$ 为弹性变形阶段的压缩荷载, mN;  $s$ 为压头位移,  $\mu\text{m}$ ;  $E_1, E_2$ 分别为TATB造型粉颗粒与压头的杨氏模量, GPa;  $\nu_1, \nu_2$ 分别为TATB造型粉颗粒与压头的泊松比;  $R_C$ 为TATB造型粉颗粒与压头接触位置的接触半径。本实验中, 上压头预先加载稳固颗粒, 再开始加载记录数据, 因此初始位移为0, 荷载为上压头自重, 故对Hertz法向接触模型公式(4)作如下修正:

$$F = \frac{1}{3} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \sqrt{2R_C (s + a)^3} \quad (5)$$

其中,  $a$ 为常数, 物理意义为预加载的上压头重量作用在颗粒上使颗粒产生变形的位移大小, 由对力-位移曲线的Hertz法向接触模型拟合结果确定。所用TATB材料泊松比约为0.3<sup>[21]</sup>, 经测定, 所用压头材料泊松比 $\nu_1$ 约为0.35, 压头杨氏模量 $E_2$ 为3.73 GPa。

使用Hertz法向接触模型对G2~G6颗粒力-位移曲线拟合如图6。

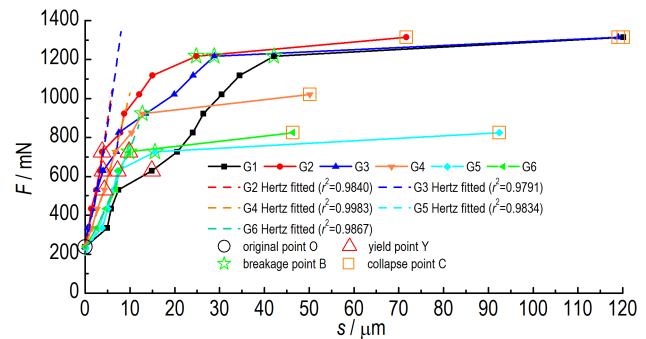


图6 TATB造型粉颗粒加载力-位移曲线的弹性阶段Hertz拟合

Fig.6 Elastic Hertz fitted of force-displacement curve for TATB granules

在Y点之后拟合的Hertz法向接触模型曲线与实验数据发生偏离, 偏离的位置Y点为屈服点, 即OY段对应弹性变形阶段, Y点之后颗粒开始发生塑性变形, 刚度变低。屈服点Y处Hertz拟合曲线的斜率即屈服点处的接触刚度 $k_Y$ ,  $\text{mN} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ :

$$k_Y = \left. \frac{dF}{ds} \right|_{s=s_Y} \quad (6)$$

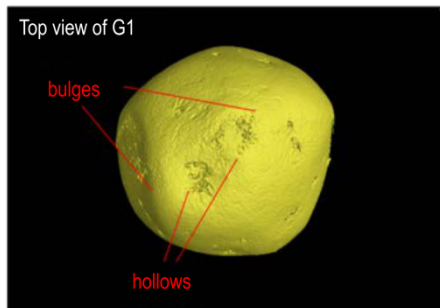
式中,  $s_Y$ 为屈服点处颗粒变形量。屈服点处的变形率 $\psi_Y$ 表示为压头位移与造型粉颗粒竖直高度的比值:

$$\psi_Y = \frac{s_Y}{h} \quad (7)$$

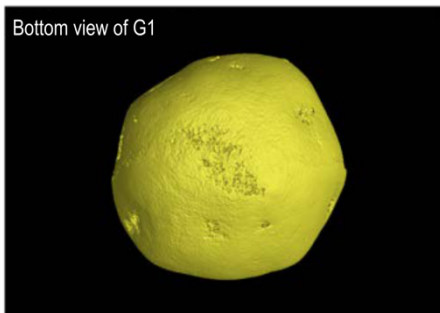
图6可以看出, G2~G6颗粒拟合系数 $r^2$ 大于0.9791, 弹性变形变形率约为5.7‰。

弹性变形阶段变形主要由压头与颗粒接触的颗粒最顶端凸起位置承担, 随着荷载的增大, 颗粒与压头接触面积逐渐增大, 刚度也逐渐增大。颗粒与压头接触的表面形貌在一定程度上影响弹性变形阶段的力-位移关系。图7展示了G1颗粒与压头接触的上下表面CT三维重建图, 发现接触面较不平整, 尤其是与上压头接触的上顶面存在凹坑与凸起, 光滑度与圆度差, 当荷载逐渐增大时, 接触面上的凸起部分先后发生弹性

变形至塑性屈服,凸起位置局部符合 Hertz 法向接触模型,但多个凸起变形过程叠加后,力-位移关系曲线整体表现无规律,因此 G1 颗粒的力位移关系不符合 Hertz 法向接触模型,该颗粒“弹性”段结束(即弹-塑性阶段开始)的位置的变形率达到 13%,远高于 G2~G6 颗粒的 3.6‰~7.1‰,说明该颗粒在初始变形阶段由于接触位置的凸起部分先后的局部弹性或塑性变形产生的位移发生累积。



a. upper contact surface with visible bulges and hollows



b. lower contact surface

图7 G1 颗粒 CT 三维重建图

Fig.7 Three-dimensional CT reconstruction of G1 granule

### 3.2.2.2 弹-塑性变形阶段

颗粒所受荷载大于屈服点 Y 的屈服荷载之后,颗粒内部应力超过其弹性极限,发生塑性变形。这一阶段颗粒内部同时发生各占一定比例的弹性与塑性变形,称这一阶段为 TATB 颗粒的弹-塑性变形阶段。该段力-位移曲线较前段斜率明显下降。

经实验发现,虽然造型粉颗粒内部结构各不相同,但在弹-塑性阶段力-位移曲线总体表现线性。对 G1~G4 颗粒弹-塑性变形阶段 YB 曲线的线性拟合(拟合系数  $r^2 > 0.8747$ )如图 8 所示。虽然造型粉颗粒内部结构各不相同,但从图 8 线性拟合结果及文献[5,7-9,11]等中可发现弹-塑性阶段力-位移曲线总体表现线性。拟合的直线斜率代表弹-塑性阶段有效接触刚度

$k_{el-pl}, mN \cdot \mu m^{-1}$ 。G5 颗粒弹塑性段仅有两个数据点,未做拟合,G6 颗粒力-位移曲线没有表现出明显的弹-塑性段特征。

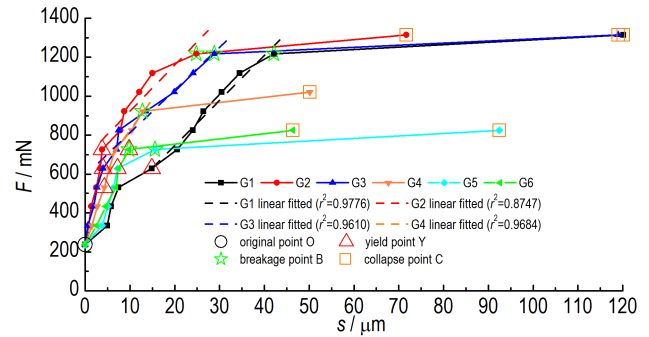


图8 TATB 造型粉颗粒加载力-位移曲线弹-塑性阶段线性拟合  
Fig.8 Elastic-plastic stage linear fitted of force-displacement curve for TATB granules

当颗粒变形达到一定程度时(B点),颗粒发生开裂,失去承载能力。特征破坏强度  $\sigma_B$  可从破坏荷载与垂直于加载方向最大横截面面积的比值确定:

$$\sigma_B = \frac{F_B}{\pi R_{eq}^2} \quad (8)$$

式中,  $F_B$  为破坏点荷载。

破坏点处的变形率  $\psi_B$  表示为:

$$\psi_B = \frac{s_B}{2 H_H} \quad (9)$$

式中,  $s_B$  为破坏点处颗粒变形量,  $\mu m$ 。

G4~G6 颗粒破坏过程发生迅速,未采集到破坏时 CT 图像,G1 颗粒在初始弹性阶段力位移曲线不符合典型的 Hertz 模型规律,这里以 G2、G3 颗粒为例,分析 TATB 造型粉颗粒变形破坏内部结构变化。图 9 为 G2、G3 两颗造型粉颗粒在图 8 破坏点 B 点的 CT 重建图及三正交截面 CT 切片图,相比图 4 中未加载状态,发现 G2、G3 颗粒内部缺陷尺寸小且空间分散或远离颗粒表面,在颗粒受载经历弹性阶段变形、弹-塑性阶段变形直至开裂过程中,内部小缺陷结构对造型粉颗粒整体强度影响不大,内部缺陷仅发生很少扩展,具体体现为垂直于加载方向的横截面 xy 的拉张变形诱发原有缺陷扩展或是连通;平行于加载方向的横截面 yz 与 xz 切片反映出内部初始缺陷直到破坏时都仅发生极小扩展。压头运动产生的颗粒发生明显变形位置主要在颗粒与压头接触的弧面,即颗粒被粘结剂覆盖的高密度致密表层。

图 8 可以看出,G4~G6 颗粒破坏过程发生迅速,

弹塑性段几乎不可见。而且图4的G4、G5与G6颗粒未加载初始状态的CT切片图像观察到,G4~G6颗粒内部缺陷偏大、较多且有长条形平行于加载方向的连通孔隙,推测这些平行于加载方向的大孔隙缺陷在颗粒压缩时膨胀,进而导致颗粒开裂、失去承载能力、破坏并崩塌。由于内部较大缺陷的存在,G4与G5颗粒

的屈服荷载与特征破坏强度明显低于其他颗粒,尤其在颗粒变形进入弹-塑性阶段时,颗粒承载能力显著下降。G6颗粒弹-塑性段几乎不可见,没有明显的屈服点,其内部平行于加载方向的片状孔很快扩展,并导致了G6颗粒在被测样品中具有最小的杨氏模量、刚度、特征破坏强度等性能。

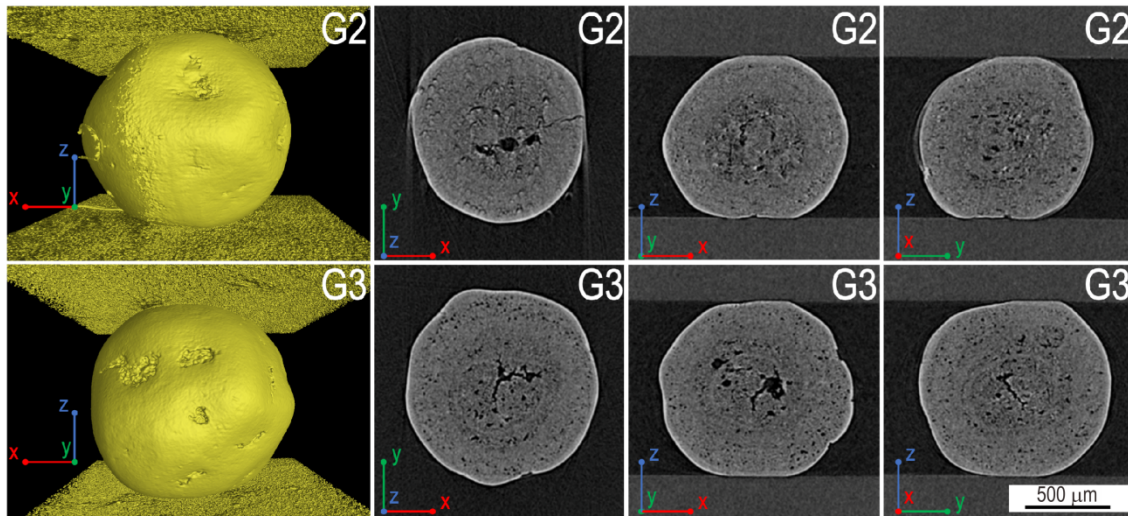


图9 G2与G3颗粒破坏点B点的CT扫描结果

Fig.9 CT scan results of G2 and G3 granules at breakage point B

### 3.2.2.3 破坏崩塌阶段

破坏点B后的加载导致颗粒发生崩塌,图6曲线中BC段发生远大于之前变形的位移,崩塌点C处的变形率记为 $\psi_c$ :

$$\psi_c = \frac{s_c}{2H_H} \quad (10)$$

式中, $s_c$ 为崩塌点颗粒变形量, $\mu\text{m}$ 。

图10展示了G3颗粒在崩塌点C采集的CT重建图像与三正交截面的CT切片图。颗粒崩塌是内部结构的开裂变形,相对崩塌前的状态有明显位移,崩塌过程比破坏过程内部变形程度更大,存在许多贯穿颗粒的裂纹。大规模的破裂增加顶部和底部接触区域的接触面积,减小应力集中,同时颗粒受压沿着竖直方向劈开成多个部分,这几部分碎块围绕中心碎片环绕分布。

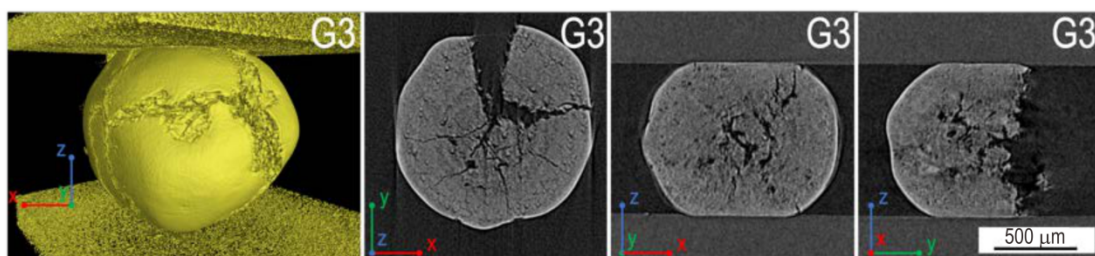


图10 G3颗粒崩塌点C点的CT扫描结果

Fig.10 CT scan results of G3 granule at collapse point C

### 3.2.3 颗粒压缩力学性能

根据式(4),(10)计算得出TATB造型粉颗粒弹性阶段的杨氏模量、屈服点刚度、屈服荷载、屈服点变形率、弹-塑性阶段的刚度、破坏荷载、破坏强度、破坏点

变形率、崩塌阶段的崩塌荷载、崩塌点变形率等,压缩力学性能如表2所示,表2显示出,G1~G6颗粒压缩力学性能有明显差异,主要原因可能由G1~G6内部结构的明显差异所致。

表 2 TATB 造型粉颗粒压缩力学性能

Table 2 Mechanical properties of TATB granules by compression

granules	elastic behavior				elastic-plastic behavior				collapse	
	$E / \text{GPa}$	$k_y / \text{mN} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	$F_y / \text{mN}$	$\psi_y / \%$	$k_{el-pl} / \text{mN} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	$F_B / \text{mN}$	$\sigma_B / \text{MPa}$	$\psi_B / \%$	$F_C / \text{mN}$	$\psi_C / \%$
1	—	—	—	13.0	23.0	1265±49	1.02±0.04	36.8	1314	104.7
2	8.74	140.1	775±49	3.7	23.7	1265±49	1.36±0.05	24.6	1314	71.1
3	3.53	108.5	677±49	3.6	21.9	1265±49	1.17±0.05	26.4	1314	108.7
4	1.61	85.2	775±49	6.7	31.8	972±49	0.80±0.04	11.6	1020	45.5
5	1.20	63.2	677±49	7.1	11.7	775±49	0.89±0.06	15.3	824	90.6
6	0.98	60.3	775±49	7.3	—	775±49	0.73±0.05	7.3	824	34.6

Note:  $E$  is Young's modulus;  $k_y$  is contact stiffness at yield point;  $F_y$  is yield force;  $\psi_y$  is deformation rate at yield point;  $k_{el-pl}$  is effective contact stiffness;  $F_B$  is breakage force;  $\sigma_B$  is characteristic breakage strength;  $\psi_B$  is deformation rate at breakage point;  $F_C$  is collapse force;  $\psi_C$  is deformation rate at collapse point.

## 4 结论

通过设计的适用于单个 TATB 造型粉颗粒的压缩加载装置,利用  $\mu\text{CT}$  技术原位、无损观测单个 TATB 造型粉颗粒单轴压缩行为,得出结论如下:

(1) 测得的颗粒杨氏模量约为 0.98~8.74 GPa,屈服点接触刚度约为 60~140  $\text{mN} \cdot \mu\text{m}^{-1}$  屈服点变形率约为 3.6%~7.1%,弹-塑性段刚度约为 11.7~31.8  $\text{mN} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ,特征破坏强度约为 0.73~1.36 MPa。

(2) 与压头接触的颗粒表面情况对弹性变形阶段影响最大。对于内部缺陷较大较多的颗粒,尤其是平行于加载方向的片状孔隙,缺陷对弹-塑性变形阶段影响较大,缩短了弹-塑性变形阶段过程,显著降低了破坏强度与破坏变形率。对于内部缺陷较少且分散的颗粒,从初始状态至破坏失效过程中,颗粒内部结构及缺陷没有显著变化,小缺陷对颗粒力学性能的影响不明显。

### 参考文献:

- [1] Phung K L, Avontuur P, Hounslow M J, et al. A microscopic study of granulation mechanisms and their effect on granule properties[J]. *Powder Technol*, 2011, 206(1): 18-24.
- [2] 张伟斌, 田勇, 戴斌, 等. TATB 造型颗粒微细结构 X 射线亚微米层析成像[J]. 含能材料, 2017, 25(2): 173-176.  
ZHANG Wei-bin, TIAN Yong, DAI Bin, et al. Characterization of TATB molding powder by x-ray sub-micron tomography [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(2): 173-176.
- [3] 张伟斌, 杨雪海, 杨仍才, 等. 流固耦合湍流驱动 TATB 造粒凝结涡旋[J]. 含能材料, 2014, 22(3): 376-381.  
ZHANG Wei-bin, YANG Xue-hai, YANG Ren-cai, et al. Condensed vortexes in TATB granules driven by fluid-solids coupled turbulent flows[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(2): 173-176.
- [4] Russell A, Müller P, Tomas J. Quasi-static diametrical compression of characteristic elastic-plastic granules: Energetic aspects at contact[J]. *Chem Eng Sci*, 2014, 114: 70-84.
- [5] Portnikov D, Kalman H. Determination of elastic properties of particles using single particle compression test [J]. *Powder Technol*, 2014, 268: 244-252.
- [6] HUANG J, XU S, YI H, et al. Size effect on the compression breakage strengths of glass particles [J]. *Powder Technol*, 2014, 268: 86-94
- [7] Müller P, Tomas J. Compression Behavior of Moist Spherical Zeolite 4A Granules [J]. *Chem Eng Technol*, 2017, 35(9): 1677-1684.
- [8] Mader-Arndt K, Aman S, Fuchs R, et al. Contact properties determination of macroscopic fine disperse glass particles via compression tests in normal direction [J]. *Adv Powder Technol*, 2017, 28(1): 101-114.
- [9] Salman, Russell A, Aman S, et al. Breakage probability of granules during repeated loading [J]. *Powder Technol*, 2015, 269: 541-547.
- [10] 王益栋, 徐永福, 奚悦. 岩石单颗粒压缩破碎试验研究[J]. 固体力学学报, 2015, 36: 517-523.  
WANG Yi-dong, XU Yong-fu, XI Yue. Single rock particle crushing in uniaxial compression tests [J]. *Chin J Solid Mech*, 2015, 36: 517-523.
- [11] Müller P, Seeger M, Tomas J. Compression and breakage behavior of  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  granules [J]. *Powder Technol*, 2013, 237: 125-133.
- [12] Druckrey A M, Alshibli K A, Al-Raoush R I. 3D characterization of sand particle-to-particle contact and morphology [J]. *Comput Geotech*, 2016, 74: 26-35.
- [13] Fonseca J, O'Sullivan C, Coop M R, et al. Non-invasive characterization of particle morphology of natural sands [J]. *Soils Found*. 2012, 52: 712-722.
- [14] Zhao B, Wang J, Coop M R, et al. An investigation of single sand particle fracture using X-ray micro-tomography [J]. *Géotechnique*, 2015, 65: 625-641.
- [15] Hertz H R. Ueber die Berührung fester elastischer Körper [J]. *J Reine Angew Math*, 1882, 92: 156-171.
- [16] Liburkin R, Portnikov D, Kalman H. Comparing particle breakage in an uniaxial confined compression test to single particle crush tests—model and experimental results [J]. *Powder Technol*, 2015, 284: 344-354.
- [17] Gilson L, Kozhar S, Antonyuk S, et al. Contact models based on experimental characterization of irregular shaped, micrometer-sized particles [J]. *Granul Matter*, 2014, 16(3): 313-326.



- [18] Kate A, Sarkar A, Shahi N, et al. Cracking force analysis for apricot pit decortication based on mathematical model of Hertz's theory [J]. *Int J Food Prop*, 2015, 18(11): 2528–2538.
- [19] Fonsso J D, Nzié W, Ntamack G E, et al. Hertz theory application in modeling and analysis of mechanical rupture force of Cocoa Pod[J]. *Int J Mech Sci*, 2016, 4(5): 182–188.
- [20] Paul J, Romeis S, Tomas J, et al. A review of models for single particle compression and their application to silica microspheres[J]. *Adv Powder Technol*, 2014, 25(1): 136–153.
- [21] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 61–63.  
DONG Hai-shan, ZHOU Fen-fen. *High-energy explosives and related properties*[M]. Beijing: Science Press, 1989: 61–63.

## Mechanical Property of the Single TATB Granule by Uniaxial Compression

MA Yin-xiang, LIU Chen, WANG Hui, ZHANG Cai-xin, CHEN Hua, ZHANG Wei-bin

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** In order to obtain the mechanical properties of the 1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene(TATB) granules, an in-situ micron-level mechanical loading device suitable for X-ray Micro-Computed Tomography system was designed. By using the X-ray Micro-Computed Tomography technique, the structural characteristics were non-destructively characterized. Hertz contact model was used to study the force-displacement relationship of the individual granule. Mechanical properties of granule such as Young's modulus, yield point, contact stiffness, breakage force, and structural characteristics of granule such as particle shape, pore shape, pore distribution were determined. The results show that the quasi-static normal compression process of a single TATB granule has three stages: elastic deformation, elastic-plastic deformation, and collapse. The pores with small size and dispersed spatial structure in the granule do not change during the particle deformation process, and the large sheet-like pores inside granule paralleled to the loading direction significantly reduce the breakage strength of the particles. The difference in the internal structure of the particles has large influence on their compression mechanical properties significantly.

**Key words:** 1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene (TATB); Single granule; CT in-situ experiment; Uniaxial compression; Mechanical Properties

**CLC number:** TJ55; TP391; O34

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2019327

(责编: 高毅)