

文章编号: 1006-9941(2014)03-0376-06

# 流固耦合湍流驱动 TATB 造粒凝结涡旋

张伟斌, 杨雪海, 杨仍才, 戴斌, 肖丽, 杨存丰

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 利用 X 射线微层析成像技术获得了水悬浮法湍流驱动 TATB 造粒结构的全三维信息, 涡旋通过湍流和粘结剂凝结硬化保存下来, 其结构排列及涡旋致密层的三维可视化解决了分析涡旋特征的难题。颗粒内部典型涡旋有单涡旋、双涡旋、多涡旋、涡中涡等, 涡旋形态揭示了湍流发展的模式, 致密层密度则揭示了湍流对 TATB 晶粒的传质作用。X 射线微层析成像提供了无损侵入材料内部的分析方法, 可实现探测很小尺寸范围的凝结涡旋及洞察湍动过程的涡旋凝结。

**关键词:** 流体力学; TATB 造粒; 流固耦合湍流; 颗粒结构; 涡旋; X 射线微层析成像 (X- $\mu$ CT)

**中图分类号:** TJ55; O35

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.019

## 1 引言

涡旋作为湍流运动的一种形态或基本结构已被研究了一百多年<sup>[1-4]</sup>。涡旋的重要物理特征传递物质和动量<sup>[5]</sup>, 在湍流研究中一直非常重要, 目前仍是国内外研究热点和难点<sup>[6-19]</sup>, 研究涡旋的主要方式有理论<sup>[6-7]</sup>、计算模拟<sup>[15-19]</sup>和实验测量。其中, 实验测量湍流涡旋的手段主要有 PIV (Particle image velocimetry) 法、LIF (Laser induced fluorescence) 法等<sup>[8-15]</sup>, 对象适用于液体流体<sup>[8-12, 20-22]</sup>、超流体 (Superfluid)<sup>[16-17]</sup>和气体流体<sup>[19]</sup>等的湍流, 但对固相悬浮液造粒系统湍流以及颗粒内部凝结涡旋的实验测量则存在困难。

炸药颗粒造型通常是压制类高聚物粘结炸药 (Polymer bonded explosive, PBX) 的基本单元, 一般通过水悬浮法湍流驱动造粒并固化成型, 其造粒流体是混合典型的添加剂注射流、循环壁流和叶片剪切流的流固耦合复杂湍流系统。湍流涡旋如能凝结在颗粒内部, 将不仅保存真实复杂湍流的信息, 而且还会包含与炸药晶体微粒子相互作用的多样性信息, 造粒成型的颗粒内部微细结构也将具有多样性, 研究这些有重

要的科学和工程意义。

TATB 是目前安全性能最好的钝感炸药, 以 TATB 为基的 PBX 更是应用很广泛, 但其造粒微细结构还有待深入认识和掌握, 因此工作利用 X 射线微层析成像 (X-ray Micro-tomography, X- $\mu$ CT) 技术非侵入式无损观察 TATB 造粒内部结构, 在先前工作<sup>[23]</sup>基础上深入分析 TATB 造粒微细结构特征与形成原因, 为 PBX 精密物理性能研究提供微细观物理结构基础。

## 2 样品与试验

### 2.1 TATB 造粒

采用水悬浮法对中国工程物理研究院化工材料研究所制备的 TATB 晶体 (TATB crystals) (晶粒尺寸范围为亚微米至十几微米) 进行造粒, 造粒过程既是增加粘结剂的增粘过程, 也是持续搅拌的保持湍流驱动过程, 示意如图 1a, 其湍流流体是混合典型的添加剂注射流、循环壁流和叶片剪切流带动 TATB 晶粒的流固耦合复杂湍流系统。文献表明射流会产生对称双涡旋<sup>[9, 20]</sup>、循环壁流会产生随机分布单涡旋<sup>[3]</sup>、叶片剪切流则易产生较大尺度的单尾涡<sup>[11]</sup>, 但所有的涡发展到后期都会破碎产生大量的耗散涡<sup>[24]</sup>。TATB 晶体经造粒后最终呈颗粒 (TATB granules) 状, 颗粒直径一般为 1~3 mm, 如图 1b 所示。

### 2.2 X- $\mu$ CT 扫描试验

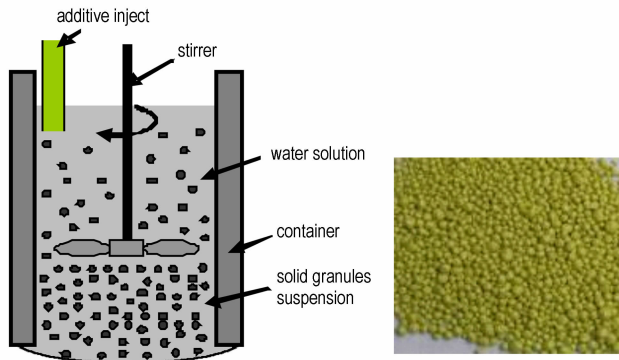
随机抽取颗粒进行 X- $\mu$ CT 无损观察。1~5 颗粒是一批造粒形成, 尺寸为 2.4~2.7 mm; 6~14 颗粒是另一批造粒形成, 尺寸为 1.6~2.1 mm。颗粒置于样品

收稿日期: 2013-08-12; 修回日期: 2013-10-14

基金项目: 中国国防科技预研项目 (426020502, 426020603); 中国工程物理研究院“双百”人才基金 (ZX03015); 中国工程物理研究院科学发展基金 (2013B0203024); 国家自然科学基金-NSAF 重点基金 (U1330202)

作者简介: 张伟斌 (1972-), 男, 研究员, 主要从事先进 CT 应用技术研究。e-mail: weibinzhang1@163.com

架,样品架固定在 CT 旋转与平移平台上处于平板探测器与 X 射线管之间,CT 扫描时 X 射线管发射出一锥束 X 射线,TATB 造型颗粒在旋转平台上每转一微小角度就得到一幅基于 X 射线吸收的射线图像(图 2),最后 TATB 造型颗粒的三维结构图像就由这几百直至几千幅的射线图像重建得到。试验条件为管电压 100 kV,管电流 120  $\mu$ A,分辨体元为 12  $\mu$ m。



a. process of TATB granulating b. TATB granules

图 1 TATB 造粒示意

Fig. 1 Schematic diagram of TATB granulating

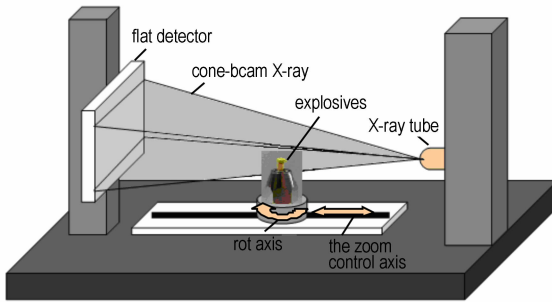


图 2 X- $\mu$ CT 试验示意

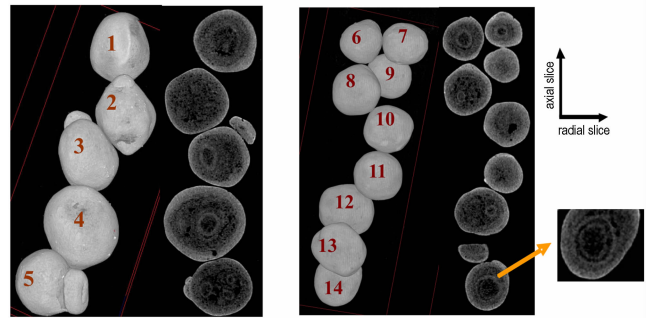
Fig. 2 Schematic diagram of X- $\mu$ CT scanning

### 3 结果与分析

#### 3.1 凝结涡旋

##### 3.1.1 涡旋与颗粒结构

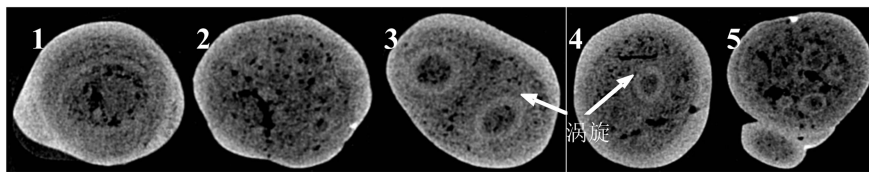
图 3、图 4 给出了随机抽样的 14 个 TATB 造型颗粒的三维 CT 重建图及轴向与径向的一个典型 CT 切片图,从轴向与径向 CT 切片结果可明显看出: ①颗粒内部有明显封闭特征的椭圆形致密层,椭圆尺寸有大有小;个数有一个、两个或多个;形态有规则的、扭曲(颗粒 6)的和在大椭圆中套有小的双椭圆且相互交连(颗粒 14)。②靠近颗粒表面有一致密近表层,颗粒表面有一相对更高密度的薄层。致密近表层厚度有差异,有单椭圆及双椭圆的致密近表层厚度较厚,有多椭圆的致密近表层厚度则较薄;③颗粒内部除椭圆致密层和致密近表层之外的区域相对松散且有孔隙,均匀性较差。



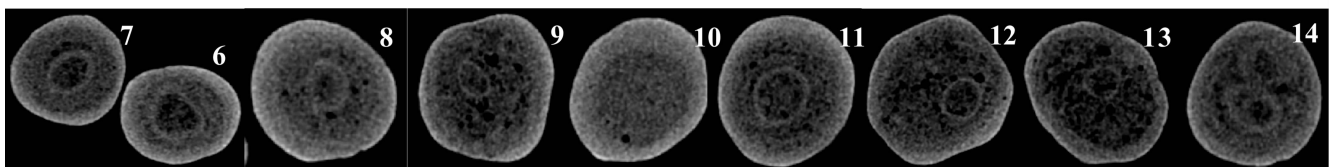
a. sample No. 1 ~ 5 b. axial slice No. 1 ~ 5 c. sample No. 6 ~ 14 d. axial slice No. 6 ~ 14

图 3 TATB 造型颗粒 CT 三维重建图及轴向 CT 切片图

Fig. 3 CT 3D-reconstruction and axial slice of TATB granules



a. sample No. 1-5



b. sample No. 6-14

图 4 TATB 造型颗粒径向 CT 切片

Fig. 4 Radial CT slices of TATB granules

图3和图4的结果表明湍流会带动TATB晶粒与流体发生相互作用决定并影响造粒结构: ①湍流带动TATB晶体微粒通过粘结剂凝结硬化以致密的椭圆形态保存下来, 其中13个颗粒内部发现凝结涡旋, 1个未发现凝结涡旋, 对应的涡旋有单涡旋、双涡旋、多涡旋、涡中涡旋等, 这些涡旋可能与造粒液体湍流及在湍流中位置密切相关, 其具体形态保存了颗粒所处位置的真实复杂湍流信息; ②颗粒都有致密近表层但厚薄不同, 其形成及厚薄可能是凝结过程湍流与颗粒间摩擦共同作用所致, 高密度表层则可能是造型颗粒凝结后的粘结剂直接包覆所致; ③颗粒结构呈现致密“涡旋核-外壳”结构(核-壳结构), 但颗粒内部微细结构具有多样性特征(内部涡旋及颗粒结构特征描述见表1), 不同颗粒微细结构差异明显, 可能是导致其成型PBX的物理性能波动的原因之一。

表1 TATB造型颗粒结构及涡旋特征

Table 1 Structure and characteristic of TATB granules

granules	characteristic of granules	structure of granules
1	single-vortex	single-core & crust
2	multi-vortex	multi-core & crust
3	double-vortex	double-core & crust
4	single-vortex	single-core & crust
5	multi-vortex	multi-core & crust
6	single-vortex	single-core & crust
7	single-vortex	single-core & crust
8	single-vortex	single-core & crust
9	multi-vortex	multi-core & crust
10	non-vortex	non-core & crust
11	single-vortex	single-core & crust
12	multi-vortex	single-core & crust
13	multi-vortex	multi-core & crust
14	vortex-in-vortex	vortex-core & crust

### 3.1.2 涡旋形态与尺度

颗粒凝结的内涡旋形态共同点都是椭圆形, 且单涡旋、双涡旋和多涡旋特征与粘性流体湍流的一些基本特征<sup>[20-22, 24]</sup>(小旋涡、大旋涡、耗散涡以及对称双旋涡等)非常吻合, 其中涡扭曲和涡中涡分裂则与湍流涡发展及其相互之间的影响直接相关, 13个颗粒内凝结涡旋尺度与形态呈现了TATB造粒湍流涡旋的复杂性、多样性、随机性:

(1) 颗粒1单涡旋尺度最大, 涡壁较薄, 致密近表层的局部很厚、外表平滑但不规则, 说明颗粒旋转度大且受外部作用的影响较大, 这与叶片强剪切作用下的大尺度湍流特征相符合, 凝结涡旋可能处在剪切湍流

区并处于发展的前中期;

(2) 颗粒2和颗粒5的多涡旋尺度最小、涡壁厚最薄, 凝结多涡旋可能处在湍流耗散阶段;

(3) 颗粒3双涡旋尺度居中、涡壁较厚, 致密近表层一端厚、一端薄, 形态与典型射流产生对称双涡旋且随后放大形成更强涡<sup>[20-21]</sup>极其相符<sup>[9]</sup>; 凝结双涡旋可能处在射流湍流区并处于发展中前期, 但双涡不是严格对称, 可能受叶片剪切流和循环壁流影响;

(4) 颗粒4单涡旋尺度相对颗粒1较小, 但涡壁较厚、致密近表层厚、且外表平滑规则;

(5) 颗粒6、7、8、11的单涡旋形态与颗粒4的单涡旋类似但尺度稍大, 内部微细结构也基本相同, 都是致密近表层较厚、外表平滑规则, 区别在于颗粒6的涡旋发生了扭曲变形, 可能原因是其发展过程中受外界作用因素有关;

(6) 颗粒9、12颗粒13的涡旋结构相同, 都有一个起主导的单涡旋和多个耗散涡构成的多涡旋结构, 主导的单涡旋形态都为椭圆形, 颗粒结构与颗粒2基本相同;

(7) 颗粒10未发现明显的涡旋, 但有较厚的致密近表层, 外表平滑且规则;

(8) 颗粒14的涡旋尺度相对较大但形态颇为特别, 既有涡中涡旋, 又有内层涡旋发生涡分裂且呈现交联特征。

X- $\mu$ CT结果不仅给出了涡旋耗散分裂成更小尺度涡旋的实验证据, 也给出了粘结剂凝固刺激涡旋凝结时的瞬间状态, 而且说明了涡旋不同发展时期的特点和注射流、叶片剪切流和循环壁流所形成的涡旋及其之间的影响。

表2具体给出了14个颗粒内部涡旋的涡壁厚、长短径、相邻涡间距等的CT测量数据。其中除颗粒1外, 2~5颗粒单涡旋与双涡旋的结构尺度约为0.5~0.7 mm, 多涡旋的结构尺度约为0.2~0.5 mm; 6~14颗粒内部涡旋尺度约为0.5~0.9 mm, 涡旋尺度均小于1 mm, 凝结涡旋尺度有毫米但大多为亚毫米。

图5给出了典型的颗粒3、颗粒4、颗粒6和颗粒14的内部涡旋形态CT三维剖析结果, 结果显示内部凝结涡旋是典型的椭球涡旋, 说明X- $\mu$ CT不仅便于分析颗粒内部涡旋形态特征, 而且通过颗粒的所有CT切片可展现涡的三维结构及其与颗粒致密近表层的差异, X- $\mu$ CT非破坏性剖析造型颗粒并解释内部涡旋结构与分布实际上成为可能。

表 2 颗粒涡旋特征参数

Table 2 Characteristic parameters of vortices in TATB granules

granules	parameters of vortex			vortex morphology	dense-layer thickness of granule/mm
	wall thickness of vortex/mm	long/short diameter/mm	distance of between vortices/mm		
1	0.09	1.34/1.06	-	solitary	0.15 ~ 0.50
2	0.05	0.42/0.30;0.32/0.28;0.28/0.22	0.50	dissipative	0.10 ~ 0.17
3	0.13	0.70/0.55;0.67/0.46	1.20	binocular	0.08 ~ 0.23
4	0.15	0.67/0.53	-	solitary	0.25 ~ 0.33
5	0.05	0.53/0.37;0.44/0.32;0.37/0.25	0.74	dissipative	0.12 ~ 0.17
6	0.12	0.61/0.46	-	distorted	0.09 ~ 0.22
7	0.07	0.96/0.65	-	solitary	0.12 ~ 0.27
8	0.11	0.48/0.32	-	solitary	0.07 ~ 0.16
9	0.06	0.48/0.30	0.60	dissipative	0.09 ~ 0.19
10	-	-	-	-	0.09 ~ 0.38
11	0.06	0.72/0.60	-	solitary	0.07 ~ 0.19
12	0.06	0.54/0.43	0.53	dissipative	0.12 ~ 0.19
13	0.04	0.49/0.42	0.46	dissipative	0.11 ~ 0.24
14	0.07	0.78/0.62	0	disrupt	0.09 ~ 0.21

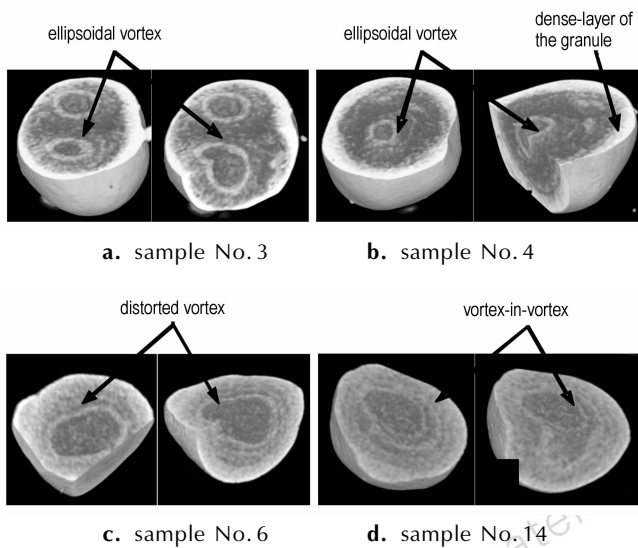


图 5 凝结涡旋形态的 CT 三维剖析结果

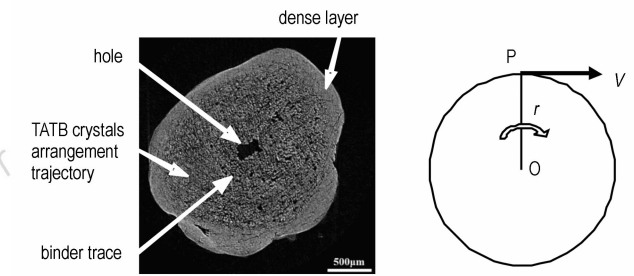
Fig. 5 Morphology of condensed vortices shown in 3D-CT pictures

### 3.2 涡旋对颗粒结构影响

#### 3.2.1 涡旋层与致密层

图 6a 是利用 1 μm 分辨体元对颗粒内部微结构的 X-μCT 切片结果(单涡旋),图像显示出 TATB 晶粒排列随颗粒做整体旋转运动,粘结剂迹线显示区域内单涡旋特征明显,且颗粒致密近表层主要是由更微小的粉末 TATB 晶体组成。根据涡旋运动理论<sup>[24]</sup>,设 TATB 晶体质点 P 以速度 v 半径 r 绕颗粒旋转中心做

圆周运动(如图 6b 所示),则颗粒内部晶粒排列受该局部涡旋向心力决定并影响。涡旋涡动能越大则带动的颗粒旋转度越大,外层更小晶粒越多、越厚。该致密层是构成温压成型 PBX 颗粒间高密度界面层的原因,界面层以前被解释为高密度粘结剂层,现在可清楚地确定它们主要组成为造型颗粒的致密结构层。



a. CT slice of microstructure

b. motion of granule (single-vortex mode)

图 6 颗粒内部微结构与运动示意(单涡旋)

Fig. 6 Microstructure and motion of the granule (single-vortex mode)

表 3 给出了 1 ~ 5 颗粒内涡旋、近表层的致密区与内部较松散区的典型部位 CT 值,分析面积 0.03 mm<sup>2</sup>。从数据结果看,分析区域的致密区 CT 值明显比内部较松散区域的 CT 值大。根据 PBX 材料密度的 CT 值相对比法<sup>[25-26]</sup>,计算得到致密层与内部较松散区的密度比约为 1.2。

表 3 颗粒内部致密区及疏松区 CT 值

Table 3 CT grey of dense area and loosened area in the TATB granules

granules	dense area		loosened area	
	axial	radial	axial	radial
1	17757	17972	16682	16624
2	-	-	16482	16800
3	17602	17875	16440	16644
4	17861	17575	16969	16447
5	-	-	16198	16307
air	12237			

### 3.2.2 孔洞

图 6a 给出了颗粒内部中心孔洞结构。根据涡旋运动理论<sup>[24]</sup>, 涡旋中心应是空的, 尤其是湍动能强的单涡旋, 否则旋转速度无穷大, 因此涡旋带动晶粒做颗粒整体旋转时中心容易产生孔洞结构。

### 3.2.3 更小颗粒聚集

图 7a 是利用 1  $\mu\text{m}$  分辨体元对颗粒内部微结构的 X- $\mu\text{CT}$  切片结果(多涡旋), 图像显示出更小颗粒聚集、颗粒间隙, 且更小颗粒做旋转运动特征明显, 说明区域内颗粒受多涡旋主导作用。由于多涡旋湍动能小、涡旋尺度小、传质作用弱, 在多涡旋之间会形成无旋场(图 7b), 并在粘结剂作用下使多个更小尺度颗粒发生聚集并形成空隙。

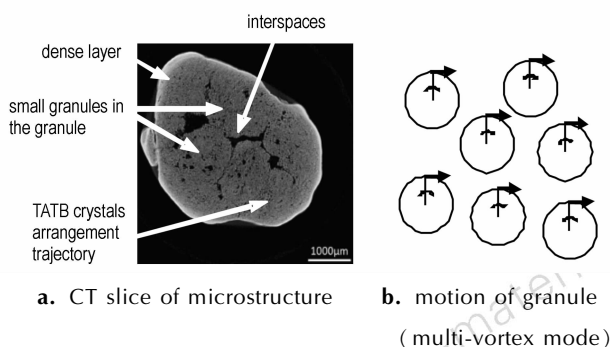


图 7 颗粒内部微结构与运动示意(多涡旋)

Fig.7 Microstructure and motion of the granule(multi-vortex mode)

### 3.2.4 颗粒交联

图 3a 与图 4a 显示发生颗粒交联的内部有双涡旋和多涡旋, 主要原因可能是颗粒旋转度小, 在粘结剂作用下易发生颗粒交连(Cross-link)。其中, 多涡旋一般产生于耗散阶段, 其湍动能小, 带动的颗粒旋转度会小; 双涡旋虽湍动能大, 但其双涡旋特点也会使颗粒旋转度小。

## 4 结论

利用 X- $\mu\text{CT}$  技术无损观察到 TATB 造型颗粒内部存在亚毫米凝结涡旋, 典型的有单涡旋、双涡旋、多涡旋、涡中涡等, 说明涡旋在一定条件下可凝结固化, 这一发现为湍流涡“冻结”可控研究奠定了重要基础。

TATB 造型颗粒呈现“涡旋核-致密外壳”结构(核壳结构), 凝结涡旋的尺度、形态与造粒过程流固耦合的复杂湍流密切相关, 涡旋动力导致 TATB 造型颗粒内部微细结构具有多样性且差异明显, 该差异可能是 PBX 成型性能波动的原因之一。

X- $\mu\text{CT}$  提供了无损侵入 TATB 造型颗粒内部的分析方法, 非破坏性、精密剖析造型颗粒并解释内部涡旋结构与分布实际上成为可能, 且可实现探测很小尺寸范围的凝结涡旋及洞察湍动过程的涡旋凝结, 可为炸药造粒流体的湍流问题研究提供一种新方法或验证技术。

### 参考文献:

- [1] Wood R W. Vortex rings[J]. *Nature*, 1901, 63: 418-420.
- [2] Levengood W. Instability effects in vortex rings produced with liquid[J]. *Nature*, 1958, 181: 1680-1681.
- [3] Hopfinger E J. Vortex solitary waves in a rotating, turbulent flow[J]. *Nature*, 1982, 295: 393-395.
- [4] Hassan Aref, Ireneusz Zawadaki. Links of vortex rings[J]. *Nature*, 1991, 354: 50-53.
- [5] Domon K, Ishihara O, Watanabe S. Mass transport by a vortex ring[J]. *J Phys Soc Jpn*, 2000, 69: 120-123.
- [6] Marusic I, Mathis R, Hutchins N. Predictive model for wall-bounded turbulent flow[J]. *Science*, 2010, 329: 193-196.
- [7] Ronald J. Adrian. Closing in on models of wall turbulence[J]. *Science*, 2010, 329: 155-156.
- [8] Benjamin W Zeff, Daniel D Lanterman, Ryan McAllister, et al. Measuring intense rotation and dissipation in turbulent flows[J]. *Nature*, 2003, 421: 146-149.
- [9] Arakeri J H, Das D, Krothapalli A, et al. Vortex ring formation at the open end of a shock tube: A particle image velocimetry study[J]. *Phys Fluids*, 2004, 16: 1008-1019.
- [10] Jan Visscher and Helge I. Andersson. Particle image velocimetry measurements of massively separated turbulent flows with rotation[J]. *Phys Fluids*, 2011, 23: 075108.
- [11] Chandra Shekhar, Koichi Nishino, Yoshiyuki Yamane, et al. Stereo-PIV measurement of turbulence characteristics in a flow mixer[J]. *J Vis*, 2012, 15: 293-308.
- [12] Fiabane L, Zimmermann R, Volk R, et al. Clustering of finite-size particles in turbulence[J]. *Phys Rev E*, 2012, 86: 035301.
- [13] Friedrich H. Busse. Visualizing the dynamics of the onset of turbulence[J]. *Science*, 2004, 305: 1574-1575.
- [14] Yutaka Sumino, Ken H Nagai, Yuji Shitaka, et al. Large-scale vortex lattice emerging from collectively moving microtubules[J]. *Nature*, 2012, 483: 448-452.
- [15] Murugan T, De S, Dora C L, et al. Numerical simulation and PIV study of compressible vortex ring evolution[J]. *Shock*

- Waves, 2012, 22: 69–83.
- [16] Demosthenes Kivotides. Triple vortex ring structure in superfluid helium II[J]. *Science*, 2000, 290: 777.
- [17] ZHANG Tao, Steven W, Sciver Van. Large-scale turbulent flow around a cylinder in counterflow superfluid 4He (He(II))[J]. *Nature Physics*, 2005, 1: 36–38.
- [18] Stephen L Conway, Troy Shinbrot, Benjamin J Glasser. A Taylor vortex analogy in granular flows[J]. *Nature*, 2004, 431: 433–437.
- [19] Hisanori Yagami, Tomomi Uchiyama. Numerical simulation for the transport of solid particles with a vortex ring[J]. *Advanced Powder Technology*, 2011, 22: 115–123.
- [20] 李万平. 计算流体力学[M]. 华中科技大学出版社, 2004.  
LI Wan-ping. Computational fluid dynamics[M]. Huazhong Science and Technology University Press, 2004.
- [21] 高学平. 高等流体力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2005.  
GAO Xue-ping. Advanced Fluid Mechanics[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2005.
- [22] 倪浩清. 工程湍流模式理论综述及展望[J]. 力学进展, 1996, 26: 145–165.  
NI Hao-qing. Current status and development trends of turbulence modeling[J]. *Advances in Mechanics*, 1996, 26: 145–165.
- [23] 张伟斌, 戴斌, 杨雪海, 等. TATB 造型颗粒内部微结构特征[J]. 含能材料, 2013, 21(2): 279–280.  
ZHANG Wei-bin, DAI Bin, YANG Xue-hai, et al. Microstructures characterization of TATB-based granules by high resolution x-ray computed tomography[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(2): 279–280.
- [24] 童秉纲, 尹协远, 朱克勤. 涡旋理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.  
TONG Bing-gang, YI Xie-yuan, ZHU Ke-qin. Vortex theory[M]. Hefei: China Science and Technology University Press, 2009.
- [25] ZHANG Wei-bin, HUANG Hui, TIAN Yong, et al. Characterization of RDX-based thermosetting plastic bonded explosive by cone-beam micro-focus computed tomography[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2012, 30: 196–208.
- [26] 张伟斌, 田勇, 杨仍才, 等. RDX 晶体颗粒压制密度分布的  $\mu$ CT 试验研究[J]. 含能材料, 2012, 20(5): 565–570.  
ZHANG Wei-bin, TIAN Yong, YANG Reng-cai, et al. Study on Pressing Density Distribution of RDX Crystals with a Cone-beam Micro-focus Computed Tomography[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(5): 565–570.

## Condensed Vortexes in TATB Granules Driven by Fluid-solids Coupled Turbulent Flows

ZHANG Wei-bin, YANG Xue-hai, YANG Reng-cai, DAI Bin, XIAO Li, YANG Cun-feng

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

**Abstract:** X-ray micro-tomography(X- $\mu$ CT) was applied to obtain the complete three-dimensional (3D) recordings of TATB-based granules at micrometre resolution. Vortexes are preserved by condensation and encrustation with binder. 3D visualization of structures arrangement and vertical-layer can solve outstanding questions about the nature of vortexes. The morphological features of vortexes such as single-vortex, double-vortex, multi-vortex, vortex-in-vortex in the granules indicate the mode of turbulence development. The dense-layer and vortical-layer reveal the turbulent mass transfer effect of TATB crystals. X- $\mu$ CT provides a method of non-invasive analysis for probing the very limits of vortexes and insight into condensed vortexes during the emergence turbulence.

**Key words:** fluid mechanics; TATB granulating; fluid-solids coupled turbulent flows; structures of granules; vortex; X-ray micro-tomography(X- $\mu$ CT)

**CLC number:** TJ55; O35

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.019