

文章编号:1006-9941(2009)02-0173-05

TNT 炸药熔铸结晶成型过程 μ CT 实验研究

田 勇^{1,2}, 刘 石¹, 张伟斌², 戴 斌², 周红萍², 罗 观²

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100080; 2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:利用微焦点工业 CT(μ CT)对 TNT 炸药熔铸结晶成型过程进行了在线监测试验研究,获得了成型过程 TNT 炸药结晶与成型质量的三维细观结构及其分布的演化特征与规律。结果表明:炸药结晶凝固速度在初始阶段最快,随后逐渐降低;在凝固过程中缩孔存在逐渐增大直至稳定、交联的现象;靠近侧壁和底部部位的缩孔少、CT 值高,相应密度值也高。在保温、不补缩状态下熔态 TNT 浇铸凝固后的细小缩孔率为 7.13%,集中缩孔与细小缩孔体积之和大于所浇铸悬浮液体积的 20%;药柱下部与中下部直至中部截面的线密度差约 1.5%~8%,表层与浅表层直至靠近中心部位的线密度差则达 5%~18%。

关键词:材料科学;微焦点工业 CT(μ CT);TNT 炸药;熔铸成型;结晶

中图分类号:TJ55

文献标识码:A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.02.011

1 引 言

炸药熔铸是一种当前国内外广泛使用的装药技术,主要适用于 TNT 单质炸药或以 TNT 为液相载体的混合炸药。炸药熔铸过程伴随着复杂的物理变化过程,其中一个最重要和最受关注的变化就是物态变化,即熔融态炸药浇铸到模具中后,随着温度降低,液相炸药将逐渐结晶变成固体,而这一过程将在很大程度上决定熔铸成型体的质量特性,进而影响装药的使用性能。长期以来,由于 TNT 结晶行为与形态的复杂性和缺乏能够有效监测结晶过程的可视化非破坏检测手段,对炸药熔铸结晶成型过程的认识仍主要依赖于传统的相变分析和热力学分析与数值模拟,以及对成型体最终质量检验推演获得的经验知识。对于深入分析成型过程、优化熔铸工艺和提高成型体质量而言,还迫切需要寻求精密、有效的在线非破坏检测方法以实现熔铸炸药成型过程结晶与质量特性演化的深入观察研究。文献[1]报道了采用超声透射方法实现对炸药熔铸凝固成型过程的监测,获得了炸药凝固过程中超声参量的变化曲线,分析了与过程相关联的成型体内部质量特征。但该方法比较宏观和定性,难以获得成型过程细节特征和进行精细分析。文献[2-8]研究表明, μ CT 技术在研究材料内部结构细节方面独具优势。因此,本工作利用 μ CT 技术,探索定量描述 TNT

炸药熔铸成型过程的结晶、收缩和密度分布等特征。

2 实验过程

2.1 炸药熔铸成型

熔铸炸药采用纯 TNT,以保温不补缩方式凝固成型,模具采用 PVC 材料,规格 $\Phi 70$ mm \times 195 mm,壁厚 2.5 mm;验证试验采用金属模具,规格 $\Phi 110$ mm \times 130 mm,壁厚 10 mm,浇铸及成型样品如图 1 所示。浇铸时温度为 86 $^{\circ}$ C,环境温度控制在 20 $^{\circ}$ C。

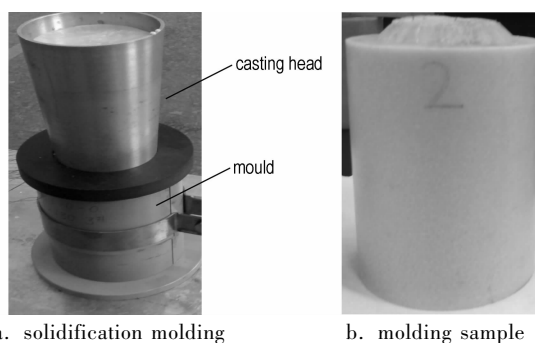


图 1 TNT 炸药浇铸及凝固成型

Fig. 1 TNT explosive casting and solidification molding

2.2 实验装置与方法

实验用工业 CT 系统采用 225 kV X 射线管和平板探测器,系统分辨率 5 μ m。系统样品台承重 100 kg,样品台可自动旋转并在 Z-轴方向平移。炸药浇铸凝固成型时,样品置于样品台上旋转 360 $^{\circ}$ 同时由平板探测器接收 X 射线图像,样品内部细节体元分辨尺寸是样品至射线源的距离和探测器至射线源距离的函数,体元分辨尺寸 $V = P/M$,其中 $M = FDD/FOD$, P 为探测

收稿日期:2008-09-11;修回日期:2009-01-08

基金项目:中物院重大基金资助项目(2005Z0504)

作者简介:田勇(1967-),男,研究员,博士研究生,从事含能材料无损检测技术研究及应用工作。

器分辨尺寸, μm ; M 为成像放大倍数; FDD 为射线源至探测器距离, mm ; FOD 为射线源至样品距离, mm 。

炸药凝固过程中 CT 检测的电压为 220 kV, 电流为 300 μA , 共监测 4.5 h, 其中凝固开始 1 h 内每隔 5 min 检测一次, 1~2 h 内每隔 10 min 检测一次, 2 h 后每隔 30 min 检测一次, 每次检测过程都在 2 min 内完成。图像重建则由 10 个处理器进行, 处理时间约 5 min。

3 试验结果

图 2~图 4 给出了 TNT 熔铸成型过程结晶行为的径向、局部轴向和成型药柱中轴面的 CT 切片结果, 图中灰度较暗的部分为 TNT 液相, 灰度较亮的部分为 TNT 结晶体, 结晶体中间的黑色小孔为 TNT 结晶收缩形成的细小缩孔。

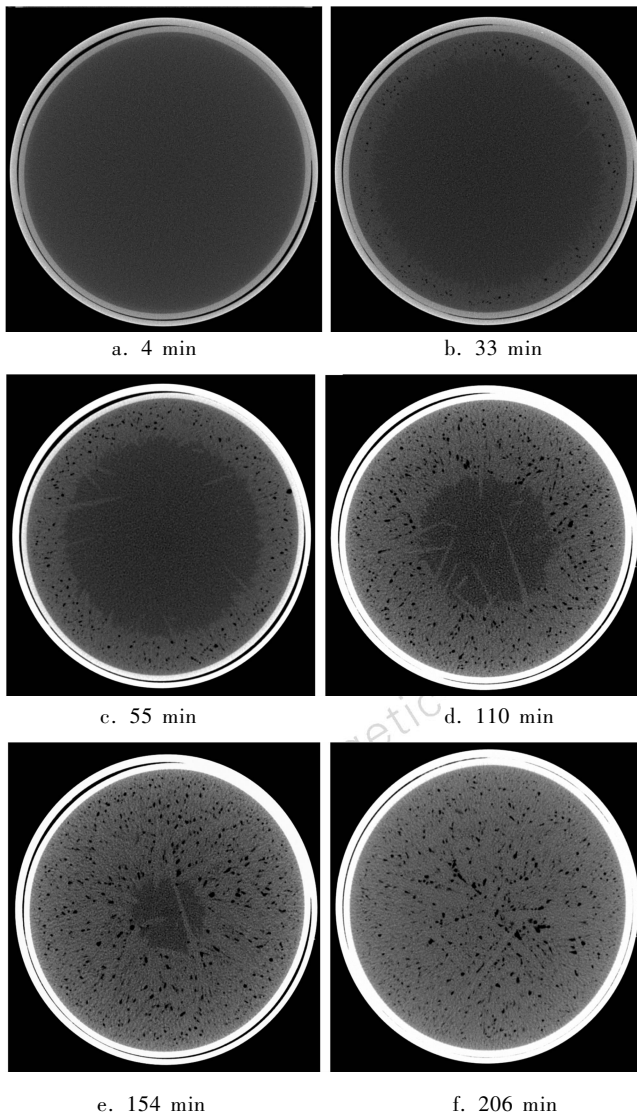


图 2 TNT 炸药熔铸成型过程径向 CT 切片

Fig. 2 CT radial slices of TNT explosive casting molding process

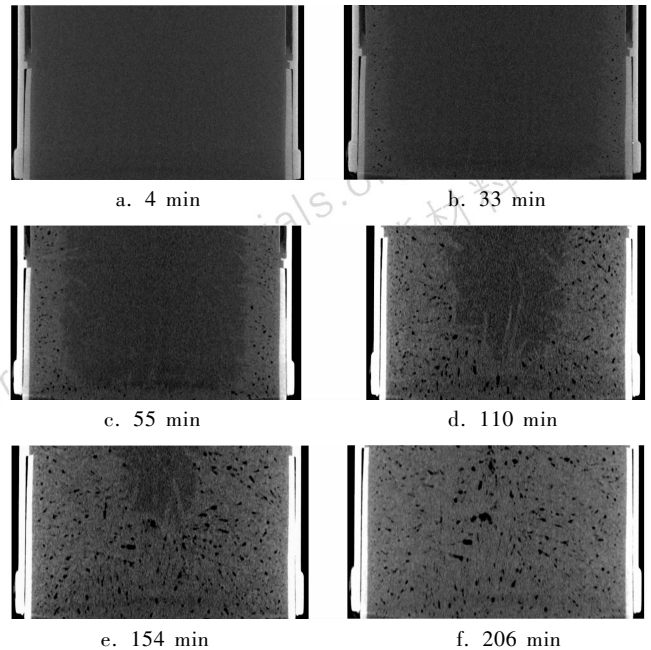


图 3 TNT 炸药熔铸成型过程中轴面 CT 切片

Fig. 3 CT middle axis slices of TNT explosive

casting molding process

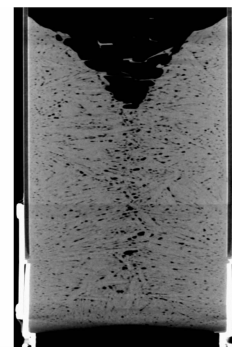


图 4 TNT 炸药熔铸成型药柱

Fig. 4 Casting molding TNT column

4 讨论与分析

4.1 凝固速度

根据图 2 和图 3 中的液/固界面在不同时间的位置, 可获得 TNT 炸药凝固过程的平均相界面移动速度或凝固速率, 其中切片位置的径向平均凝固速度的测量结果见表 1。从表 1 的结果看炸药径向凝固速度在开始凝固时最快, 随着凝固过程的推进而逐渐降低; 另外, 从图 1 和图 2 中炸药轴向凝固的位置及凝固时间可知, 轴向凝固速度逐渐降低的变化规律与径向凝固速度的变化规律相同。

4.2 结晶特征

分析图 2 和图 3 发现, 在液态 TNT 开始凝固时基本结晶为细小的晶体(表现为细等轴晶区), 而在形成

一层致密细晶层后, TNT 便结晶为较为粗大的柱晶、枝晶直至凝固结束, 伴随形成的缩孔也逐渐增大, 凝固后成型药柱的中上部则形成较大的 V 字型缩孔 (见图 4)。主要原因是由于 TNT 炸药初始凝固时因受模壁的影响使导热加快导致表面药液温度梯度加大, 从而形成表面细等轴晶区, 而随着凝固厚度的增加, 使导热速度降低导致内层药液温度梯度降低, 从而形成柱状或枝状晶区。上述结果表明柱状晶、枝晶向等轴晶转变取决于 TNT 液相中的温度梯度 (G) 及凝固速度 (R), G/R 值增加会造成柱状晶、枝晶区宽度的增加, 而 G/R 值减小将有利于形成等轴晶, 其结晶形状与 G/R 的关系如图 5 所示。

表 1 切片位置的径向平均凝固速度

Table 1 The average solidification rate of radial at slices

solidification time/min	average rate/mm · min ⁻¹
0 - 10	0.55
10 - 15	0.42
15 - 20	0.23
35 - 40	0.20
65 - 75	0.19
85 - 95	0.06

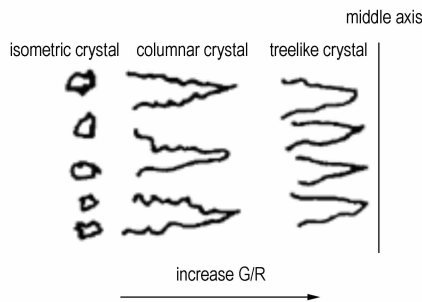


图 5 固/液相界面形状及与 G/R 值的关系
Fig. 5 Solid/liquid interface and the relationship between G/R and interface shape

4.3 液/固界面特征

分析图 2 ~ 图 4 可知: 熔态 TNT 药液注入模具后最初的几分钟仍呈现液态, 随后凝固从模具壁开始逐渐向内层推进, 伴随 TNT 结晶凝固的同时产生大量细小缩孔并形成大量的气/固界面直至凝固结束; 在凝固过程中, TNT 液/固界面在开始的 1 h 内基本呈中心对称形状 (平行层凝固), 但在随后的凝固过程中液/固界面开始呈不规则形状 (枝晶形成特性), 同时伴随着粗大的 TNT 枝晶伸向液态 TNT 内部直至凝固全部结束。

在产生 TNT 枝晶过程中, 其晶体呈现较为明显的取向特征, 一种取向基本沿径向排列, 另一种基本沿

轴向排列, 模具尺寸越大这种排列规律越明显 (如图 6 中模具尺寸为 $\Phi 110$ mm \times 130 mm 时的成型 TNT 药柱), 结晶体的取向特征表明其与热应力分布密切相关。

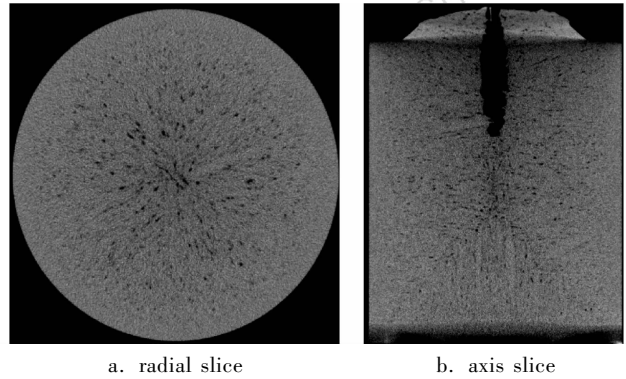


图 6 TNT 炸药熔铸成型的结晶体取向特征

Fig. 6 Tropism characteristic of casting molding TNT crystallization

4.4 收缩特征

根据图 2 ~ 图 4, TNT 炸药凝固成型过程中体积逐渐缩小, 在凝固开始的一段时间内 (细等轴晶区) 以液态收缩为主, 而在柱状晶和枝晶区则以凝固收缩为主, 其主要体现形式为晶体长大和形成缩孔。其中 TNT 炸药凝固过程中缩孔主要有在铸件中上部的集中缩孔和分散于结晶体周围的细小缩孔 (主要集中在柱状晶和枝晶区)。另外, 从图 2 和图 3 还可以发现伴随在 TNT 结晶凝固时产生的大量细小缩孔逐渐增大直至稳定、缩孔交联的现象。

炸药浇铸件的收缩是很重要的性能, 它主要影响爆轰性能和安全性能, 本文根据式 (1) 对 TNT 浇铸凝固的体积收缩率 (α_v) 进行定量计算。

$$\alpha_v = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, α_v 、 V_0 、 V 分别为体收缩率, 熔态 TNT 炸药浇铸时的体积和凝固成型后的固态体积, 其中 α_v 为无量纲单位, V_0 、 V 单位为 mm^3 。

根据图 4 中成型的药柱顶部含有大的集中缩孔和内部细小缩孔 (中轴面缩孔提取结果如图 7 所示), 表 2 给出了利用 CT 灰度分离技术获得的浇铸样品内部细小缩孔的位置及体积数据, 获得保温、不补缩状态下熔态 TNT 浇铸凝固后的细小缩孔率为 7.13%, 集中缩孔与细小缩孔体积之和大于所浇铸悬浮液体积的 20%。

4.5 密度分布特征

根据 CT 成像原理可知 CT 值与材料密度成正比关系, 因此分别选取图 4 中成型样品内部距侧壁 2 mm、8 mm、30 mm 和距模具底部 21 mm、50 mm、

70 mm的截面分析其线密度分布特征,CT 值结果如图 8 所示,结果显示越靠近侧壁和底部部位的缩孔少、CT 值高,相应密度值越高,而越靠近中部则由于形成较多的较大尺寸缩孔,CT 均值则降低越明显(见表 3),相应密度值降低也越明显,对应成型药柱的下部与中下部直至中部截面的线密度差约 1.5% ~ 8%,而成型药柱的表层与浅表层直至靠近中心部位的线密度差则达 5% ~ 18%。

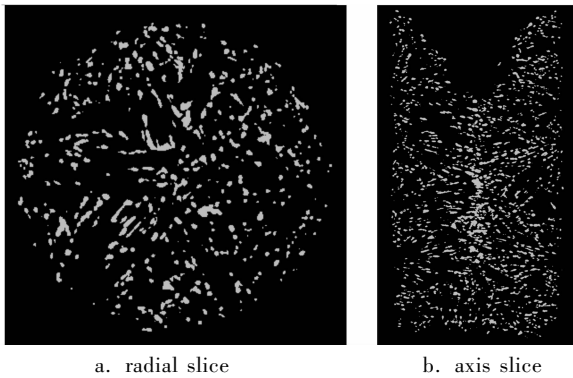


图 7 TNT 熔铸炸药内部细小缩孔 CT 分布图

Fig. 7 CT distribution of inner shrink hole of casting molding TNT

表 2 TNT 熔铸炸药内部缩孔位置及体积

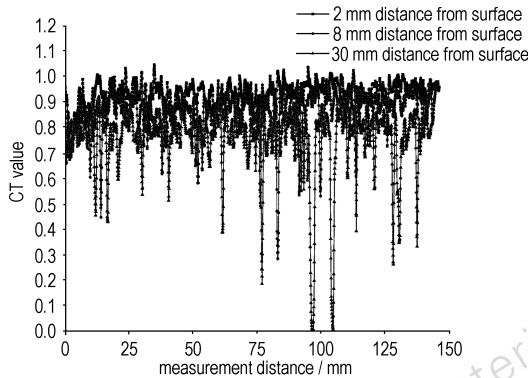
Table 2 The location and volume of inner shrink hole of casting molding TNT

slices	X-axis /mm	Y-axis /mm	Z-axis /mm	volume /mm ³	CT value mean
83	18.25	61.59	16.3	8.8137	6839.54
87	71.54	33.09	17.08	0.5132	7403.04
89	62.17	57.49	17.47	0.6694	6938.40
91	85.20	52.22	17.86	0.5578	8117.87
.....
788	20.59	48.70	153.92	0.5132	8557.88
789	25.28	40.31	154.11	0.9074	8517.65
934	76.03	81.89	182.41	0.1339	8596.89
935	50.26	23.33	182.61	0.6620	8098.26
935	79.35	74.47	182.61	0.1711	8561.13

表 3 浇铸件内部不同截面线密度 CT 均值

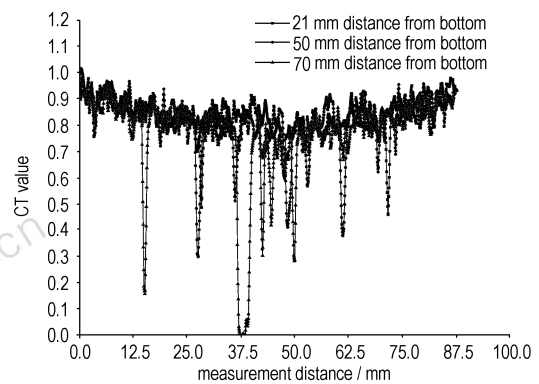
Table 3 The average CT value of linear density at different sections

distance from bottom/mm	21	50	70
CT average value/opacity	0.836	0.822	0.770
distance from surface/mm	2	8	30
CT average value/opacity	0.926	0.874	0.757



a. 距侧壁不同截面的线 CT 值分布

a. CT value distribution at different axis sections



b. 距底部不同截面的线 CT 值分布

b. CT value distribution at different radial sections

图 8 浇铸件内部不同截面线密度分布的 CT 值

Fig. 8 CT value of linear density at different sections

5 结 论

(1) 炸药凝固速度在开始凝固时最快,随着凝固过程的推进而逐渐降低。

(2) 开始凝固时 TNT 基本结晶为细小的晶体,在形成一层致密细晶层后,TNT 便结晶为较为粗大的柱晶、枝晶直至凝固结束。

(3) 在产生 TNT 枝晶过程中,其结晶体呈现较为明显的取向特征,一种取向基本沿径向排列,另一种基本沿轴向排列,模具尺寸越大这种取向特征越明显。

(4) TNT 凝固过程中缩孔主要为铸件中上部的集中缩孔和分散于结晶体周围的细小缩孔,在凝固时产生的细小缩孔有逐渐增大直至稳定、交联的现象。在保温、不补缩状态下熔态 TNT 浇铸凝固后的细小缩孔率为 7.13%,集中缩孔与细小缩孔体积之和大于所浇铸悬浮液体积的 20%。

(5) 越靠近侧壁和底部部位的缩孔少、CT 值高,相应密度值越高,而越靠近中部则由于形成较多的较大尺寸缩孔,CT 均值则降低越明显,相应密度值降低

也越明显。在保温、不补缩状态下熔态 TNT 浇铸成型药柱的下部与中下部直至中部截面的线密度差约 1.5% ~ 8%, 而成型药柱的表层与浅表层直至靠近中心部位的线密度差则达 5% ~ 18%。

参考文献:

- [1] ZHANG Wei-bin, TIAN Yong, ZHOU Hong-ping, et al. Process monitoring of cast explosive solidification molding by on-line multichannel ultrasonic measurement [C] // The 17th Conference of Nondestructive Testing, Shanghai, 2008. 10.
- [2] Philip C J Donoghue, Stefan Bengtson, DONG Xi-ping. Synchrotron X-ray tomographic microscopy of fossil embryos [J]. *Nature*, 2006, 442 (10): 680 - 683.
- [3] Brent Daniel Nielsen. Nondestructive soil testing using X-ray computed tomography [C] // Montana State University Bozeman, Montana. November 2004.
- [4] Williams R A, Jia X. Tomographic imaging of particulate systems [J]. *Advanced Power Technol*, 2003, 14(1): 1 - 16.
- [5] Hiroyuki Toda, Tomomi Ohgaki and Kentaro Uesugi. In situ high-resolution X-ray tomography of fracture micromechanisms in aluminium foam [J]. *Industrial Application*, Spring-8: 133 - 134.
- [6] Richard A Ketcham. Three-dimensional grain fabric measurements using high-resolution X-ray computed tomography [J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27: 1217 - 1228.
- [7] Richard A Ketcham, Gerardo J Iturrino. Nondestructive high-resolution visualization and measurement of anisotropic effective porosity in complex lithologies using high-resolution X-ray computed tomography [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 302: 92 - 106.
- [8] LeBret J B, Norton M G, Bahr D F. Examination of crystal defects with high-kV X-ray computed tomography [J]. *Materials Letters*, 2005, 59: 1113 - 1116.

Experimental Study on Crystallization of Casting TNT Explosive During Solidification by High-resolution X-ray CT

TIAN Yong^{1,2}, LIU Shi¹, ZHANG Wei-bin², DAI Bin², ZHOU Hong-ping², LUO Guan²

(1. Academic of Graduate Student, CAS, Beijing 100080, China;

2. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The crystallization characteristics of casting molding of TNT explosive was on-line studied by high-resolution X-ray computed tomography and the three-dimensional structure information and distribution rule were obtained. The results show that the rate of solidification is the highest at starting and slows down. TNT crystal is fine at first and subsequently columned and branch crystal is formed before solidification. The TNT branch crystal has obvious tropism characteristics. The shrink hole is mainly concentrated hole and small hole. The shrink holes intersect and become bigger during solidification and stable at last. They are much smaller at side and bottom and accordingly the density is higher. The volume shrink ratio is over 20% after solidification. The linear density difference between the bottom and the middle is about 1.5% - 8% but up to 5% - 18% between the surface and the center.

Key words: materials science; high-resolution X-ray computed tomography; TNT explosive; casting molding; crystallization behavior