

文章编号:1006-9941(2019)03-0210-06

# 微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料的制备及力学性能

张硕,丁亚军,应三九

(南京理工大学 化工学院,江苏 南京 210094)

**摘要:** 以硝化纤维素(NC)、太根(TEGN)、黑索今(RDX)为含能基体,热塑性弹性体-甲基丙烯酸甲酯(MMA)为粘结剂,通过溶剂法挤压成型工艺,利用超临界二氧化碳(SC-CO<sub>2</sub>)发泡技术制备了微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料,通过扫描电子显微镜和筒支梁冲击仪分别研究了该复合材料的泡孔形貌和力学性能。结果表明,提高饱和压力和有利于减小泡孔尺寸提高泡孔密度;随着发泡温度的增加,泡孔尺寸逐渐增大,泡孔密度呈现出先增大后减小的趋势;热塑性弹性体的含量由 5% 提高到 15% 时,冲击强度可提高 37.74%;饱和压力为 10~25 MPa 时,微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料的冲击强度由 3.21 kJ·m<sup>-2</sup> 提高到 4.31 kJ·m<sup>-2</sup>,但是随着发泡温度的增加,冲击强度却逐渐下降;泡孔尺寸、泡孔密度皆是影响微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料力学性能的重要因素,致密均匀的泡孔结构可有效改善力学性能。

**关键词:** 可燃复合材料;超临界二氧化碳(SC-CO<sub>2</sub>);微孔发泡;泡孔形貌;冲击强度

**中图分类号:** TJ55; TQ562

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2018172

## 1 引言

含能微孔复合材料具有能量可调、燃速快、耐热性高、低易损性等特点<sup>[1]</sup>,可广泛应用于可燃药筒<sup>[2]</sup>、无壳弹药<sup>[3]</sup>及其它可燃元器件等方面。为了解决可燃元器件达到一定厚度时产生的燃尽性差、燃速慢等问题,在一定条件下对含能复合材料进行发泡处理,使其内部形成致密均匀的微孔结构,燃烧时部分高温高压气体产物透入到孔隙中,点燃孔隙壁,形成对流燃烧,瞬间燃烧面积和能量传递强度都远远超出常规发射药平行层燃烧的状况<sup>[4]</sup>,达到渐增性燃烧的效果,提高可燃元器件燃尽性和能量利用率。同时,通过控制所形成微孔的泡孔密度、泡孔尺寸还可以在一定范围内对其进行燃速调节。但是含能微孔复合材料在取代金属壳体时由于其配方中存在着大量的固体炸药(如黑索今(RDX)、奥克托今(HMX)等),因此力学性能是制约其

应用的瓶颈技术。

前人研究表明,聚合物材料的泡孔结构是影响其力学性能的重要因素之一<sup>[5]</sup>。Wang 等<sup>[6]</sup>制备出一种可调节泡孔结构的纳米级微孔聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)/热塑性聚氨酯(TPU)复合材料,与微米级微孔纯 PMMA 相比,其拉伸韧性和冲击韧性得到显著提高。Daryadel 等<sup>[7]</sup>研究了聚丙烯(PP)/纳米颗粒 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合材料的发泡行为,发现通过控制纳米粒子填充物的含量及发泡工艺参数可以提高泡孔成核密度,改善冲击强度和硬度。Yang 等<sup>[8]</sup>利用超临界二氧化碳(SC-CO<sub>2</sub>)发泡法获得了具有高泡孔密度和小泡孔尺寸的聚苯乙烯(PS)/聚四氟乙烯(PTFE)复合材料,与发泡前相比,该材料的拉伸强度和吸声性能得到改善。目前对于含能发泡材料泡孔结构及力学性能方面的研究较少,但是从非含能高分子材料发泡可知,若发泡材料的泡孔比内部的裂纹缺陷尺寸小时,则发泡材料中的泡孔将不会破坏材料的力学性能。若微孔能起到钝化银纹尖端的作用,即能够通过吸收大量的能量来阻止银纹的进一步扩展时,致密的微孔甚至有助于改善材料的力学性能<sup>[9]</sup>,但是发泡后的含能材料由于各组分间粘结力减弱和受力截面面积的减小,其力学性能可能下降。因此,可通过探究各发泡条件下泡孔结构

收稿日期:2018-06-27;修回日期:2018-07-24

网络出版日期:2018-10-30

作者简介:张硕(1993-),女,硕士研究生,主要从事含能微孔复合材料制备与性能研究。e-mail:zhangshuo1234t@163.com

通信联系人:丁亚军(1990-),男,讲师,主要从事发射药及装药技术的研究。e-mail:dyyj@njjust.edu.cn

引用本文:张硕,丁亚军,应三九.微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料的制备及力学性能[J].含能材料,2019,27(3):210-215.

ZHANG Shuo, DING Ya-jun, YING San-jiu. Fabrication and Mechanical Properties of Micro-porous NC/TEGN/RDX Composites[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(3):210-215.

对含能材料力学性能的影响规律,进而控制泡孔结构,提高含能材料力学性能。

为此,本研究通过 SC-CO<sub>2</sub> 发泡技术制备了微孔硝化纤维素/太根/黑索今(NC/TEGN/RDX)复合材料。采用扫描电子显微镜(SEM)和筒支梁冲击仪研究了发泡条件对其泡孔形貌及力学性能的影响规律,探究了热塑性弹性体含量对微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料力学性能的影响。

## 2 实验部分

### 2.1 试剂与仪器

CO<sub>2</sub> 气体,纯度≥99.9%,南京文达特种气体有限公司;超细 RDX,10 μm,西安北方惠安化学工业有限公司;太根吸收药片(TEGN NC tablet),NC 含量 67.75%,TEGN 含量 32.25%,四川 255 厂;甲基丙烯酸甲酯(MMA),南京五一厂;乙醇、乙酸乙酯:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

超临界流体装置:HA 型,南通华安超临界流体萃取有限公司;高压釜,受限发泡模具,自制;捏合机,江苏国茂减速机集团有限公司;电子天平:ALC-110.4 型,德国艾科勒 ACCULAB 公司;恒温油浴锅:HH-WOC,南京科尔仪器设备有限公司;扫描电子显微镜:QUANTA FEG 250 型,美国 FEI 公司;筒支梁冲击试验机:ZBC50,深圳新三思材料检测有限公司。

### 2.2 NC/TEGN/RDX 复合材料的制备

将太根吸收药片、RDX、热塑性弹性体按一定的质量百分比(60:35:5、55:35:10、50:35:15)加入捏合机中,并加入适量的乙酸乙酯。捏合时间为 60 min,捏合温度为 35 °C。将捏合后的物料填充入压药模具中,利用油压机压制成型。然后将成型后的物料在 60 °C 水浴烘箱中烘干 3 天,充分驱除物料中的乙酸乙酯,将内挥发组分含量降低至 0.5% 以下。制备出三种不同配方的片状复合材料并裁剪成合适的样条备用。

### 2.3 微孔发泡工艺

采用分步升温法制备了微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料,其工艺流程为:(1)将样品固定在受限发泡模具内放入高压釜中固定,打开气源阀门,用小流量气体吹扫 1 min 以排尽高压釜中的空气后,关闭放气阀;(2)低温冷却槽的温度设为 2 °C,开启增压泵,将 CO<sub>2</sub> 注入高压容器内至压力上升到设定值(即饱和压力  $p_s$ )后,关闭高压釜上的阀门;(3)将高压釜放入恒温水浴中保压,饱和温度  $T_s$ ;(4)达到饱和时间  $t_s$ 后,开启放气阀

放掉气体,打开高压釜,取出受限发泡模具;(5)迅速将受限发泡模具及样品转移至已设定发泡温度  $T_f$  的恒温水浴锅中进行升温法发泡,达到预定的发泡时间  $t_f$  后迅速放入冷水中冷却定型;(6)取出样品,置于水浴烘箱中干燥。受限发泡工艺如图 1 所示。

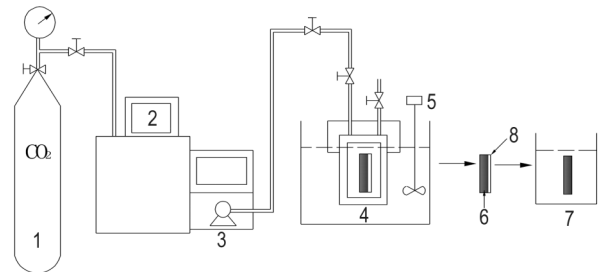


图 1 受限发泡工艺流程图

1—CO<sub>2</sub> 气瓶, 2—循环冷却系统, 3—增压泵, 4—高压釜, 5—水浴锅, 6—饱和样品, 7—水浴升温发泡, 8—受限发泡模具  
**Fig.1** Flow chart of constrained foaming process  
 1—CO<sub>2</sub> cylinders, 2—cooling circulation system, 3—booster pump, 4—high pressure vessel, 5—thermostatic water-bath, 6—saturated samples, 7—heating and foaming in water-bath, 8—constrained foaming mould

### 2.4 泡孔形貌的表征

采用 SEM 表征微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料的内部泡孔形貌。采用 Image-Pro 图像分析软件对泡孔直径及泡孔密度等微观参数进行分析统计。所统计的泡孔直径的平均值则是平均泡孔直径,泡孔密度为单位面积的泡孔数量,泡孔的平均直径和泡孔密度可以由式(1)和式(2)计算获得。

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{n} \quad (1)$$

$$N_0 = \left( \frac{nM^2}{A} \right)^{3/2} \quad (2)$$

式中,  $d_i$  为单个泡孔的泡孔直径, μm;  $N_0$  为每立方厘米聚合物中的泡孔数, cell·cm<sup>-3</sup>;  $A$  为统计区域 SEM 照片的面积, cm<sup>2</sup>;  $M$  为图像放大的倍数;  $n$  为所计泡孔的数量。

### 2.5 力学性能测试

按照 GJB 5472.2-2005《半可燃药筒试验方法》测试冲击强度。测试温度为室温,每组试验平行测定 3 次,取其算术平均值。

## 3 结果与讨论

### 3.1 微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料泡孔结构研究

#### 3.1.1 饱和压力对泡孔形貌的影响

分步升温法发泡过程中,饱和压力对气体溶解量

有直接影响,并影响泡孔成核及长大过程。发泡倍率 1.1,饱和时间 10 h,发泡温度 90 °C,发泡时间 60 s 的条件下,不同饱和压力下的微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料泡孔结构的 SEM 图见图 2,由图 2 可知,不同饱和压力条件下的样品内部皆已完全发泡,大量独立泡孔生成且均匀性良好,其泡孔密度及泡孔直径的统计结果如图 3 所示。从图 3 可以发现饱和压力为 10~25 MPa 时,泡孔直径由 0.57  $\mu\text{m}$  下降到 0.45  $\mu\text{m}$ ,但是随着饱和压力的增大,泡孔密度却逐渐增大,由  $4.70 \times 10^{11} \text{ cell} \cdot \text{cm}^{-3}$  增加到  $1.22 \times 10^{12} \text{ cell} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,增幅为 159.36%。这是由于饱和压力对微孔 NC/TEGN/RDX

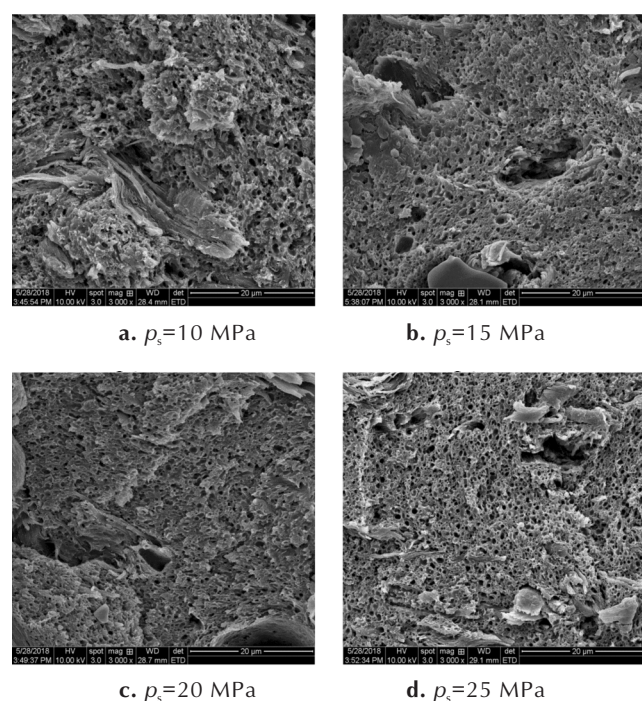


图 2 不同饱和压力下微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料的断面形貌  
Fig.2 The section morphology of micro-porous NC/TEGN/RDX composites at different saturation pressures

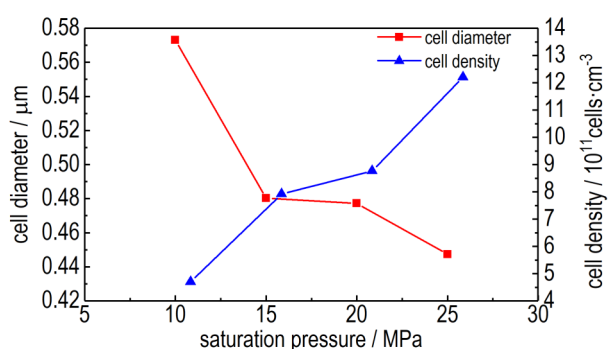


图 3 泡孔直径和泡孔密度随饱和压力的变化曲线  
Fig.3 Variation curves of cell diameter and cell density with saturation pressures

复合材料形貌的影响主要体现在两个方面,一是随着饱和压力的增大,SC-CO<sub>2</sub>在基体中的溶解量增加,而气泡成长的动力由压差提供,因此提高饱和压力可以显著提高成核动力和成核速率,增大泡孔尺寸<sup>[10]</sup>。另一方面,SC-CO<sub>2</sub>对聚合物基体有增塑作用,基体对SC-CO<sub>2</sub>溶解量的增加的同时降低了聚合物的黏弹性,降低了成核所需克服的能垒,增大了成核密度,使得泡孔更加致密均匀。由此可知,提高饱和压力有利于减小泡孔尺寸提高泡孔密度。但是高压的饱和条件对实验设备及安全性都提出了更高的要求,因此饱和压力不宜过高,在满足发泡条件及实验室安全要求的基础上,本文所需的饱和压力应尽量控制在 30 MPa 以下。

### 3.1.2 发泡温度对泡孔形貌的影响

发泡倍率为 1.1,饱和压力为 15 MPa,饱和时间为 10 h,发泡时间为 60 s 时,不同发泡温度下制备的微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料泡孔结构的形貌见图 4,由

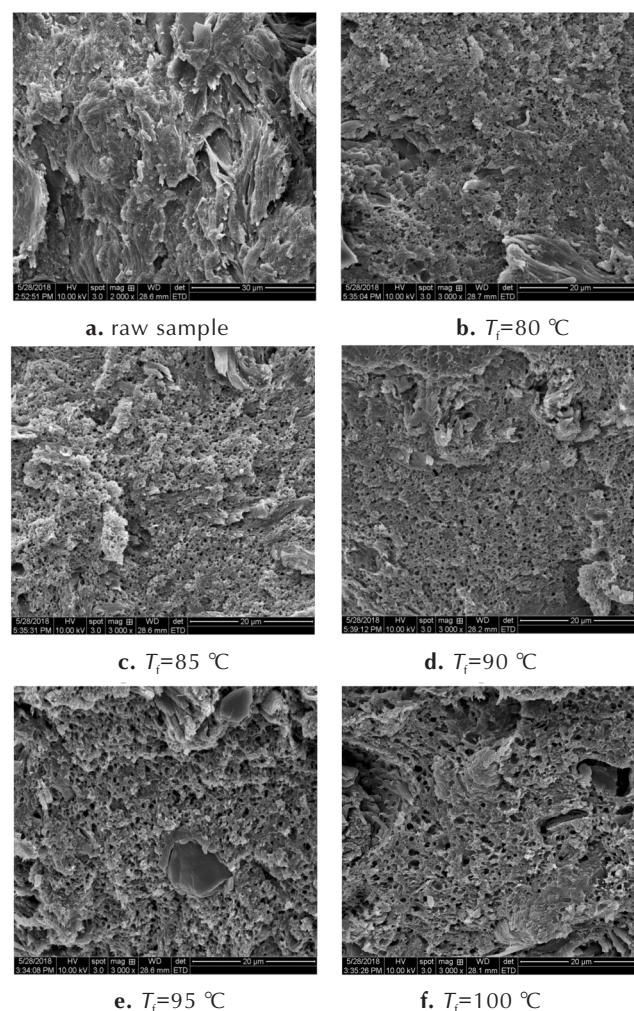


图 4 不同发泡温度下微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料的断面形貌  
Fig.4 The section morphology of micro-porous NC/TEGN/RDX composites at different foaming temperatures

图 4 可知,各发泡温度条件下样品内部皆生成了大量的泡孔,且泡孔尺寸随发泡温度的升高而明显增大,其泡孔密度及泡孔直径的统计结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,随着发泡温度的增加,泡孔直径逐渐增大,泡孔密度呈现出先增大后减小的趋势。当发泡温度为 80 °C 时,泡孔结构还不完整,泡孔间距较大,泡孔尺寸较小,仅为 0.40  $\mu\text{m}$ ,说明在此温度下,泡孔成核率低且膨胀过程中所需克服的阻力较大,发泡较为困难。当发泡温度增加到 85 °C 时,由于气体的扩散系数增大,单位时间内进入泡孔的气体增加,不仅能有效的生成大量的成核点,也为泡孔长大提供了能量和动力,因此无论是泡孔直径还是泡孔密度都有所增大。但是当温度进一步升高,微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料基体的黏弹性降低,泡孔在增长过程中的阻力进一步减小,泡孔直径增大,当发泡温度超过 90 °C 时,甚至有些泡孔出现合并坍塌等现象,从而使泡孔密度急剧降低,发泡温度为 85~100 °C,泡孔密度由  $9.36 \times 10^{11} \text{ cell} \cdot \text{cm}^{-3}$  降低到  $4.53 \times 10^{11} \text{ cell} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,降幅为 51.60%。因此在微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料的制备过程中不宜采用过高的发泡温度,为了保证泡孔彼此独立且致密均匀,适宜的发泡温度应控制在为 85 °C 左右。

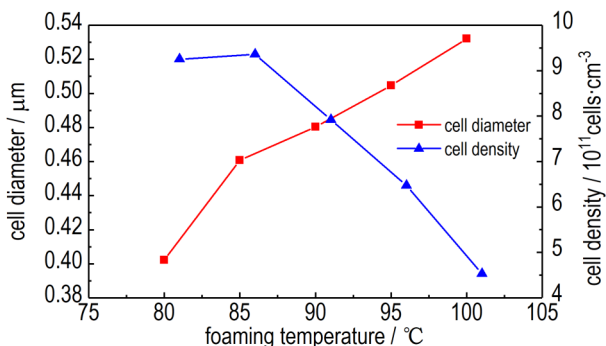


图 5 泡孔直径和泡孔密度随发泡温度的变化曲线

Fig.5 Variation curves of cell diameter and cell density with foaming temperatures

### 3.2 微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料力学性能研究

#### 3.2.1 热塑性弹性体含量对力学性能的影响

在控制发泡倍率 1.1 及各发泡条件 ( $p_s=15 \text{ MPa}$ ,  $T_s=40 \text{ °C}$ ,  $T_f=90 \text{ °C}$ ,  $t_s=10 \text{ h}$ ,  $t_f=60 \text{ s}$ ) 一致的情况下,对制备的 3 种不同配方的微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料进行抗冲击性能试验,结果如表 1 所示。

由表 1 可知,随着热塑性弹性体含量从 5% 升高到 15% 时,微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料的抗冲击强度从  $3.10 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$  增加到  $4.27 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,增幅为 37.74%。由此可见,热塑性弹性体可有效改善基体的力学性能,

但是过多的热塑性弹性体的使用可能会导致可燃元器件能量下降,燃烧不全等缺陷<sup>[11]</sup>,因此,应在满足力学性能的前提下适量使用热塑性弹性体。另外,弹性体为 5%、10%、15% 的未发泡样品的冲击强度分别为  $10.52, 11.28, 12.48 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,从表 1 可以看出,发泡后各配方下微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料的冲击强度明显低于其未发泡样品,这是因为虽然微孔的产生可钝化裂纹尖端应力,耗散冲击能量,起到增韧基体的目的,但是发泡后的微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料由于泡孔直径较大且存在通孔塌陷等现象使得承受冲击力的有效截面积减小,该过程带来的韧性损失大于微孔对冲击强度的贡献,从而导致发泡后样品的冲击强度小于未发泡样品。

表 1 热塑性弹性体对冲击强度的影响

Table 1 Effect of TPUE on impact strength

sample	content/ %			impact strength / $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$
	RDX	TEGN NC tablet	MMA	
1	35	60	5	3.10
2	35	55	10	3.58
3	35	50	15	4.27

#### 3.2.2 饱和压力对力学性能的影响

在发泡倍率 1.1、饱和时间 10 h、发泡时间 60 s、发泡温度 90 °C 的条件下,研究了不同饱和压力 (10~25 MPa) 对微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料力学性能的影响,结果见图 6。由图 6 可知,三种配方下的微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料的冲击强度皆随着饱和压力的升高而增大。饱和压力从 10 MPa 上升到 25 MPa 时,含量为 5% MMA 的样品冲击强度从  $3.06 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$  上升到  $4.28 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,增幅为 39.87%,含量为 10% 和 15% MMA 的样品冲击强度增幅分别为 34.27%、53.67%。这是因为增大饱和压力可以显著提高成核

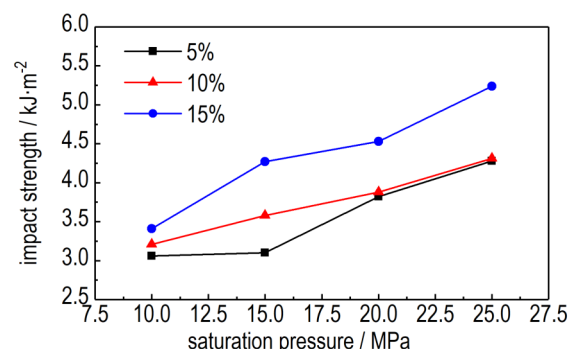


图 6 饱和压力对冲击强度的影响

Fig.6 Effects of saturation pressure on impact strength

速率增大成核密度(图3),从而减小泡孔尺寸,使材料更加致密。因此,增大饱和压力可有效提高微孔NC/TEGN/RDX复合材料的冲击强度。

### 3.2.3 发泡温度对力学性能的影响

在发泡倍率1.1、饱和时间10 h、饱和压力15 MPa、发泡时间60 s的条件下,研究了不同发泡温度(80~100 °C)对微孔NC/TEGN/RDX复合材料力学性能的影响,结果见图7。由图7可知,三种配方下的微孔NC/TEGN/RDX复合材料的冲击强度皆随着发泡温度的升高而逐渐降低。发泡温度从80 °C上升到100 °C时,含量为5%MMA的样品冲击强度从3.38 kJ·m<sup>-2</sup>下降到2.37 kJ·m<sup>-2</sup>,降幅高达29.88%,含量为10%和15%胶体的样品冲击强度降幅分别为22.45%、14.06%。这是因为随着发泡温度的升高,泡孔直径逐渐增大(图5),大泡孔数量增多,使泡孔合并与塌陷的几率上升,因此材料容易出现应力集中现象,另外,随着发泡温度的增加,尤其在85 °C之后,聚合物基体中单位体积内泡孔所占比例增大,即发泡后材料抵抗外界载荷的实际有效承载面积不断减少,多重因素最终导致材料的冲击强度随发泡温度的增加而逐渐降低。

研究制备的各工艺条件下微孔NC/TEGN/RDX复合材料的抗冲击强度范围为2.37~5.24 kJ·m<sup>-2</sup>,虽然与未发泡样品相比有了显著地降低,但是与杨伟涛<sup>[12]</sup>制备的PMMA/RDX发泡材料的冲击强度范围1.38~1.40 kJ·m<sup>-2</sup>相比,通过配方和工艺参数的改变,其力学性能已经有了很大的提高。

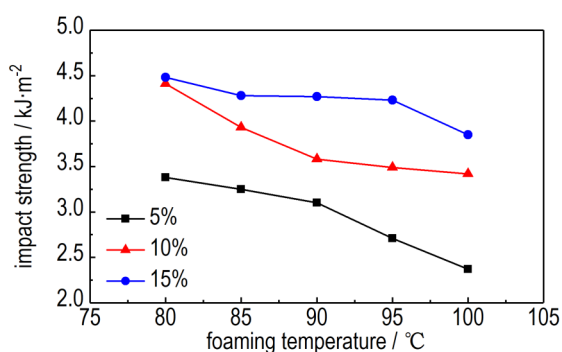


图7 发泡温度对冲击强度的影响

Fig.7 Effects of foaming temperature on impact strength

## 4 结论

(1) 提高饱和压力可有效减小泡孔尺寸,增加泡孔密度,使泡孔更加致密均匀;随着发泡温度的增加,

微孔NC/TEGN/RDX复合材料的泡孔尺寸逐渐增大,泡孔密度呈现出先增大后减小的趋势。过高的发泡温度会导致RDX颗粒与聚合物基体的粘结力下降,甚至出现RDX颗粒脱落、泡孔合并的现象。

(2) 饱和压力和热塑性弹性体含量的提高均可有效改善基体的力学性能。但是材料的冲击强度却随着发泡温度的增加而下降,因此需要合理的控制发泡温度,达到制备出致密均匀泡孔的目的,综合泡孔形貌及力学性能的实验结果,适宜的发泡温度应控制在85 °C左右。

(3) 微孔NC/TEGN/RDX复合材料的泡孔结构是影响其力学性能的重要因素之一,致密、独立、均匀的微孔结构可有效提高材料的力学性能;大尺寸、低密度甚至出现泡孔合并的微孔结构则会降低材料的力学性能。

### 参考文献:

- [1] Yang W, Ying S. Burning characteristics of microcellular combustible ordnance materials [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(1): 136-141.
- [2] Weitao Yang, Yuxiang Li, Sanjiu Ying. Burning characteristics of microcellular combustible objects fabricated by a confined foaming process [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2015, 40(1): 27-32.
- [3] Böhnlein-Mauß J, Kröber H. Technology of foamed propellants [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2009, 34(3): 239-244.
- [4] 应三九, 徐复铭. 发射药超临界发泡微孔制备技术研究 [J]. *兵工学报*, 2013, 34(8): 1028-1036.  
YING San-jiu, XU Fu-ming. Study on preparation technology of supercritical foaming micropores for propellant [J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(8): 1028-1036.
- [5] Bledzki A, Kirschling H, Rohleder M, et al. Correlation between injection moulding processing parameters and mechanical properties of microcellular polycarbonate [J]. *Journal of Cellular Plastics*, 2012, 48(4): 301-340.
- [6] Wang G, Zhao J, Mark L, et al. Ultra-tough and super thermal-insulation nanocellular PMMA/TPU [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 32(5): 632-646.
- [7] Mahsa D, Taher A, Rezgar H, et al. Simultaneous decision analysis on the structural and mechanical properties of polymeric microcellular nanocomposites foamed using CO<sub>2</sub> [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, 135(14).
- [8] Yang C, Xing Z, Wang M, et al. Merits of the addition of PTFE micropowder in supercritical carbon dioxide foaming of polypropylene: ultrahigh cell density, high tensile strength, and good sound insulation [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(5): 1498-1505.
- [9] 傅政. 高分子材料强度及破坏行为 [M]. 北京: 北京工业出版社, 2005: 23-29.  
Fu Zheng. Polymer materials strength and failure behavior [M]. Beijing: Beijing Industry Press, 2005: 23-29.
- [10] Fan X, Tan H, Lei Z. Influence of thermoplastic polyurethane

- on mechanical properties of modified double base propellants [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29 (1): 124-128.
- [11] Ding Y, Wei R, Ying S. Solubility and diffusivity of supercritical carbon dioxide in cellulose acetate with cosolvents [J]. *Journal of Elastomers and Plastics*, 2017, 49(1): 23-36.
- [12] 杨伟涛. 基于超临界流体发泡技术微孔可燃药筒的制备与性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.  
YANG Wei-tao. Fabrication and performances of microcellular combustible cartridge case using of supercritical CO<sub>2</sub>[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.

## Fabrication and Mechanical Properties of Micro-porous NC/TEGN/RDX Composites

ZHANG Shuo, DING Ya-jun, YING San-jiu

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Micro-porous combustible composites of NC/TEGN/RDX were fabricated by the extrusion molding process of solvent method and supercritical carbon dioxide (SC-CO<sub>2</sub>) foaming technique using nitrocellulose (NC), triethylene glycol dinitrate (TEGN) and cyclotrimethylenetrinitramine (RDX) as energetic matrix, and thermoplastic elastomer-methyl methacrylate (MMA) as binder. Scanning electron microscopy and impact test of simple supported beam were used to investigate the cell morphology and mechanical property of the composite, respectively. Results show that increasing the saturation pressure is beneficial to reducing the pore size and increasing the pore density. With increasing the foaming temperature, the cell size of the composites gradually increases, and the cell density shows a trend of increasing first and then decreasing. When the content of thermoplastic elastomer increases from 5% to 15%, the impact strength can increase by 37.74%. The impact strength of the micro-porous combustible composites of NC/TEGN/RDX increases from 3.21 kJ·m<sup>-2</sup> to 4.31 kJ·m<sup>-2</sup> when the saturation pressure is in the range of 10 MPa to 25 MPa. However, the impact strength gradually decreases with the increase of foaming temperature. Cell size and cell density are important factors affecting the mechanical properties of NC-based energetic micro-porous composites, and the dense and uniform cell structure can effectively improve the mechanical properties.

**Key words:** combustible composites; supercritical carbon dioxide (SC-CO<sub>2</sub>); microcellular foaming; cell morphology; impact strength

CLC number: TJ55; TQ562

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018172

(责编 张琪)



## 《含能材料》“损伤与点火”专栏征稿

含能材料的损伤特征与点火过程有密切的联系,炸药、推进剂的内部损伤及其对力学特性、安全特性和点火行为的影响规律受到了含能材料学界的高度重视,为推动这一重要研究方向的学术交流,本刊特设立“损伤与点火”专栏。专栏主要征集炸药、推进剂等含能材料的损伤观测与多尺度表征技术、含损伤的本构方程、准静态与动态损伤演化规律、损伤与破坏的宏(细)观模式、损伤对起爆、爆炸、爆轰成长以及非冲击起爆行为的影响等方向的原创性研究论文。来稿请注明“损伤与点火”专栏。

《含能材料》编辑部