

文章编号:1006-9941(2018)12-1049-07

基于未反应核模型的叠氮多孔铜合成影响因素分析

张蕾^{1,2},张方²,王燕兰²,姜元勇³,杨利¹,陈建华²,张蕊²

(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081; 2.陕西应用物理化学研究所应用物理化学国家级重点实验室,陕西 西安 710061; 3.东北大学工程力学研究所,辽宁 沈阳 110004)

摘要: 针对叠氮多孔铜的气固原位合成过程中各参数之间的匹配关系问题,建立了二维稳态气固未反应核数学模型,对叠氮多孔铜原位合成过程中的晶体生长机制和动态过程进行模拟,得到了叠氮多孔铜的原位反应速率以及固体转化率与前驱体多孔铜的粒径、孔隙率、装药高度以及反应时间等因素之间的关系。同时选取一组孔隙率约为80%,高度为1 mm,粒径分别为50,100,200,500 nm的前驱体多孔铜进行叠氮化铜合成实验分析。结果表明,四种不同条件下的试验数据与模拟仿真数据的产物成分比变化趋势一致,且最大偏差仅为2.1%。

关键词: 气固反应;叠氮多孔铜;微元体动力学;原位反应;未反应核模型

中图分类号: TJ55; O64

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2018243

1 引言

微小型火工品的发展对爆炸序列提出低电压、低极限起爆药量、集成化、器件化等要求,而传统起爆药受其制备工艺及装药方式的限制,已经不能满足该发展要求^[1-3]。叠氮化铜起爆太安的药量仅为叠氮化铅的六分之一左右^[4],可最大程度地减少单兵武器所携带的敏感药剂药量,提高武器安全性,并降低了输入能量,满足微爆炸序列对起爆药的要求。此外,铜离子比铅离子等重金属更具有环境优势^[5-6]。因此,叠氮化铜起爆药的相关研究是MEMS微爆炸序列应用的一个重要方向。

2008年,Gerald Laib等^[7]将铜沉积在基片上形成铜薄膜,再通过原位叠氮化反应形成叠氮化铜薄膜,可用于起爆下一级装药。2012年,张方等^[8-9]在国内首次采用氢气泡模板法原位合成了多孔铜叠氮化物,实现了叠氮化铜应用的可能性。2015年,王燕兰等^[10]以定向碳纳米管阵列为工作电极,采用电化学沉积法制备填充纳米铜颗粒的碳纳米管阵列,并采用气-固原位

反应法获得填充叠氮化铜的碳纳米管含能阵列。2016年,李兵等^[11]将块状的纳米多孔铜与气体叠氮酸反应制得了块状的铜叠氮化物装药,提高了装药密度;Wang等^[12]用碳化有机金属框架(MOFs)作为前驱体骨架原位制备叠氮化铜,该结构有效地降低了叠氮化铜的静电感度(1.6 mJ)。由国内外研究现状可看出,目前叠氮化铜的研究主要集中在制备及性能方面,而对其合成机理以及反应过程的模拟仿真研究相对较少。

叠氮化铜的原位合成过程是一个典型的气-固化学反应过程,其合成机理符合未反应核模型,为提高叠氮化铜合成效率,目前的研究主要以获得大比表面积的前驱体多孔铜来实现。因此,本研究建立了叠氮化过程的二维稳态气固未反应核数学模型,并对叠氮多孔铜原位合成过程中的晶体生长机制和动态过程进行模拟,得到了叠氮化反应速率、固体转化率与前驱体多孔铜的粒径、孔隙率、装药厚度以及反应时间等因素之间的关系。将该结果与纳米金属结构的空隙控制技术相结合,以评估叠氮化铜的合成工艺,为进一步研究及优化叠氮多孔铜爆炸性能提供理论依据。

2 叠氮多孔铜合成影响因素分析

叠氮多孔铜的前驱体多孔铜采用氢气泡模板法沉

收稿日期:2018-08-31;修回日期:2018-09-14

网络出版日期:2018-10-15

作者简介:张蕾(1986-),女,工程师,在读博士,主要从事新型含能材料的制备及性能研究。e-mail: ggy628@163.com

引用本文:张蕾,张方,王燕兰,等.基于未反应核模型的叠氮多孔铜合成影响因素分析[J].含能材料,2018,26(12):1049-1055.

ZHANG Lei,ZHANG Fang,WANG Yan-lan, et al. Kinetic Study of Reaction of Copper Azide Based on Shrinking Core Model[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao),2018,26(12):1049-1055.

积制得,具体的制备流程参考文献[13]。在制备过程中,通过改变沉积电流的大小、沉积时间、电解液浓度、添加剂种类等工艺参数条件,则可得到不同粒径尺寸、孔隙率结构以及厚度的前驱体多孔铜,控制不同电流及不同沉积时间条件下得到的多孔铜的表面形貌如图1所示。

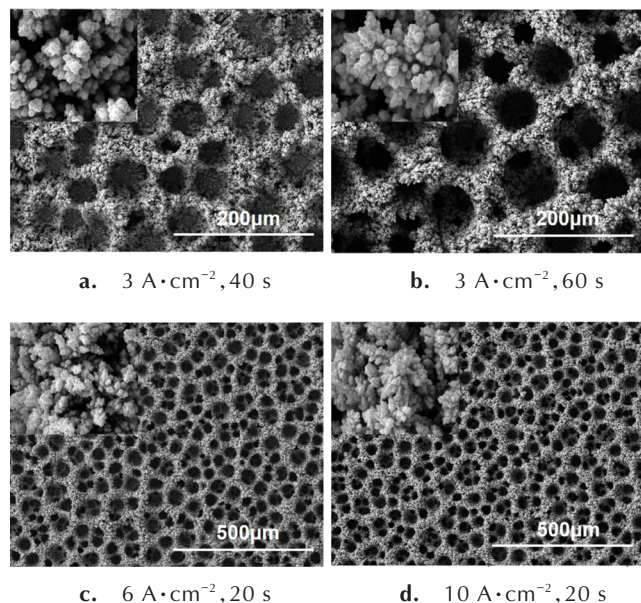


图1 不同条件下的前驱体多孔铜电镜照片

Fig.1 SEM images of porous copper precursors under different conditions

由图1可看出,沉积条件不同,所得到的前驱体多孔铜的粒径和孔隙率不同。当沉积电流相同时,沉积时间越长,前驱体多孔铜高度越高(图1a,图1b);当沉积时间相同时,沉积电流越大,得到的前驱体多孔铜粒径越大,孔隙越小(图1c,图1d)。前驱体多孔铜经原位气固叠氮化反应后即可形成叠氮多孔铜。在原位气固叠氮化反应过程中,通过控制反应时间以及叠氮酸气体的浓度,同样可以得到不同形貌和结构的叠氮化产物。控制叠氮化反应时间分别为1,2,4,6 h所形成叠氮化产物的表观形貌如图2所示,从图2中可明显看出,随着反应时间的增长,叠氮化反应产物的粒径在逐渐增大。

从上述叠氮多孔铜的制备结果可看出,前驱体多孔铜的粒径、孔隙率、装药厚度以及叠氮化反应时间等因素是影响叠氮多孔铜形成的主要因素,因此,在特定的装药尺寸下,如何设计前驱体多孔铜的结构以及原位叠氮化反应条件,以提高叠氮化产物中叠氮化铜的比例,是目前合成实验必须解决的问题,而该过程可通过未反应核模型建模分析得出。

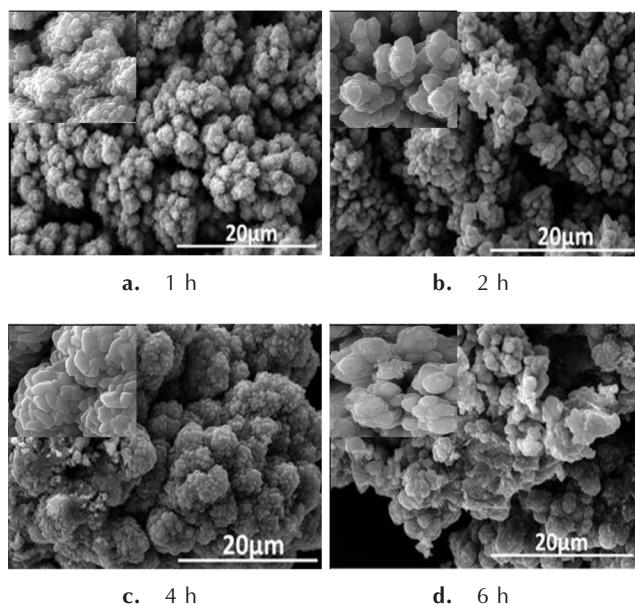
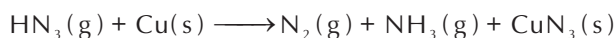


图2 不同叠氮化时间下的叠氮化产物电镜照片

Fig.2 SEM images of azide products under different azide time

3 未反应核模型的建立及计算方法

叠氮多孔铜的合成化学反应式为:



该过程为典型的气固化学反应过程,可采用未反应核模型进行描述。未反应核模型主要用于描述气-固化学反应进程中球形颗粒的反应和传质过程^[14-16]。基于该模型的铜颗粒叠氮化过程的模型示意图如图3所示。其中, r_c 为未反应颗粒半径, m ; r_s 为颗粒初始半径, m 。

从图3中可以看出,随着叠氮化反应的进行,铜颗粒的未反应核逐渐减小,并逐渐被叠氮化铜包裹。由

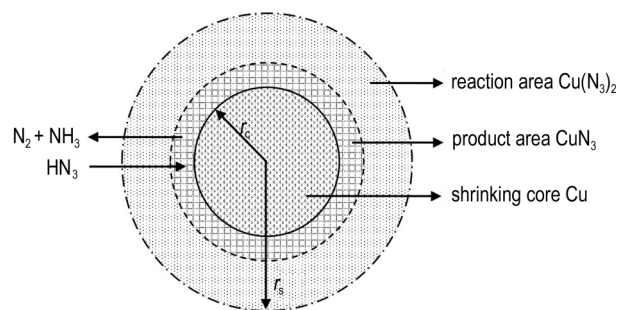


图3 基于未反应核模型的铜颗粒叠氮化过程的模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of the gas-solid reaction process (shrinking core model) for copper azide

于叠氮化反应只能发生在叠氮酸气体与铜颗粒接触的界面上,因此只有当叠氮酸气体与铜颗粒接触时,才可能发生化学反应。在叠氮化反应过程中,叠氮酸气体依次通过产物层外表面的气体滞留膜和固体产物层,才可以到达铜颗粒的未反应核表面与铜颗粒接触,发生化学反应,化学反应产生的产物气体也依次经过固体产物层和气体滞留膜到达主气流中。

由氢气泡模版法沉积得到的多孔铜是由单颗铜颗粒堆积而成^[8],因此,首先需要建立单颗粒微观模型,即基于单颗粒动力学的未反应核模型;其次建立宏观模型,即将未反应核模型由单颗粒动力学推广到微元体动力学,建模参数以实验结果的平均值作为依据。建模分析中叠氮酸的气体传质过程采用拟稳态假设。由于未反应核半径的减小速度远远小于气体的传质速率,且宏观模型中原位叠氮化反应在径向和轴向同时发生,根据该原理,本研究建立叠氮多孔铜合成过程的二维稳态气固未反应核数学模型,如式(1)所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} (nC_A) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (D_{eA} r \frac{\partial C_A}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_{eA} \frac{\partial C_A}{\partial z}) - R_A \\ z = 0, C_A = C_0; z = H, \frac{\partial C_A}{\partial z} = 0 \\ r = 0, \frac{\partial C_A}{\partial r} = 0; r = R, \frac{\partial C_A}{\partial r} = 0 \\ t = 0, \frac{\partial C_A}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

模型中,未反应核半径满足方程:

$$\left(\frac{r_c^2 - r_s^2}{2} - \frac{r_c^3 - r_s^3}{3r_s} \right) / D_{eA} + (r_c - r_s) / k_r = - \frac{bM_{Cu}}{a\rho_{Cu}} \int_0^t C_A dt \quad (2)$$

式中, C_A 为 HN_3 气体浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; D_{eA} 为 HN_3 气体的有效扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; H 为装药厚度, mm ; k_r 为界面化学反应速率, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; t 为反应时间, s 。

宏观建模过程须将未反应核模型由单颗粒动力学推广到微元体动力学,需要找到它们之间的联系。由于未反应核模型属于界面反应模型,所以颗粒的综合反应速率与颗粒的表面积直接相关,即微元体内颗粒的表面积,该值受孔隙率、颗粒排列方式、粒径及颗粒形状等因素的影响。对于同等粒径的多孔铜,微元体内颗粒的表面积可以表示为:

$$S_v = \frac{3(1-n)}{r_s} \quad (3)$$

式中, n 为多孔铜的孔隙率,无量纲。

这样,微元体的综合反应速率可以用叠氮酸气体的消耗表示,即:

$$R_A = \frac{3(1-n)}{r_s} \cdot \frac{C_A}{\frac{r_s(r_s - r_c)}{r_c} \cdot \frac{1}{D_{eA}} + \left(\frac{r_s}{r_c}\right)^2 \cdot \frac{1}{k_r}} \quad (4)$$

微元体内的固体转化率则为:

$$X_v = (1-n) \times \left(1 - \left(\frac{r_s}{r_c}\right)^3\right) \times 100\% \quad (5)$$

通过上述理论建立气固反应模型即可得到叠氮化反应速率(R_A)、固体转化率(X_v)与多孔铜前驱体的粒径(r_s)、孔隙率(n)、装药厚度(H)以及反应时间(t)等因素之间的关系。

4 模拟结果及分析

4.1 粒径的影响

粒径是影响气固反应固体转化率的主要因素。图4和图5给出了在 $H=1 \text{ mm}$, $C_A=0.04 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $n=90\%$ 的条件下,通过未反应核模型模拟前驱体多孔铜粒径(50, 100, 200, 500 nm)随时间的变化对叠氮化铜固体转化率的影响。从图4可看出,随着铜颗粒半径的增大,相同装药腔体内, $\text{Cu}(\text{N}_3)_2$ 的固体转化率随时间

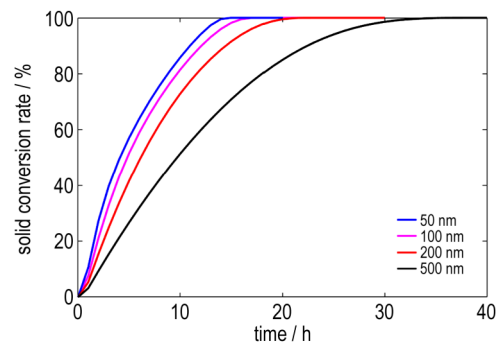


图4 前驱体多孔铜粒径对叠氮化铜固体转化率的影响

Fig.4 Effects of precursor diameter on solid conversion rate of copper azide

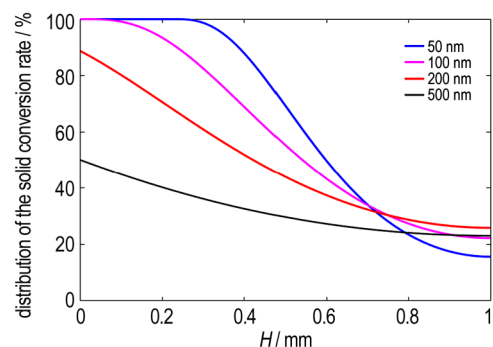


图5 反应到第5h时前驱体中叠氮化铜的固体转化率分布

Fig.5 The solid conversion ratio distribution of copper azide in the precursor at the fifth hour of the azide reaction

逐渐增长,当粒径增大到 500 nm 时,其叠氮化反应时间显著增长,从图中可看出其完全叠氮化需要 36 h。图 5 为同等条件下,在反应进行到第 5 h 时,不同粒径的前驱体在 1 mm 装药厚度中的固体转化率分布图,可看出粒径越小,自装药面向下反应越快,但是四种粒径的叠氮化反应均在 0.7 mm 附近显著减缓。由微元体动力学分析可知,这是由于颗粒半径越大,单位体积内颗粒的表面积越小,化学反应速率降低,因此由化学反应引起的反应气体及产物气体的体积减小量就会减弱,进而导致反应进程减缓,当颗粒半径增大到一定程度时,化学反应则无法继续进行。综上分析可知,前驱体多孔铜的粒径不大于 200 nm 时叠氮多孔铜合成效率较高。

4.2 孔隙率的影响

孔隙率是决定气固反应叠氮化进程的主要因素。图 6~图 8 为在 $H=1\text{ mm}$, $C_A=0.04\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 前驱体平均粒径为 200 nm 的条件下,通过未反应核模型建模分析前驱体孔隙率分别为 60%、70%、80% 以及 90% 时对叠氮化铜固体转化率的影响。从图 6 中可看出,孔隙率对固体转化率的影响高于粒径的影响,当孔隙

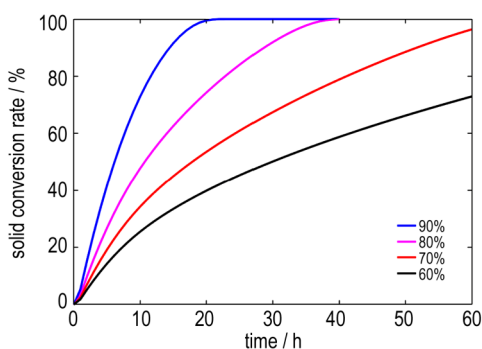


图 6 前驱体多孔铜的孔隙率对叠氮化铜固体转化率的影响
Fig.6 Effects of precursor porosities on the solid conversion rate of copper azide

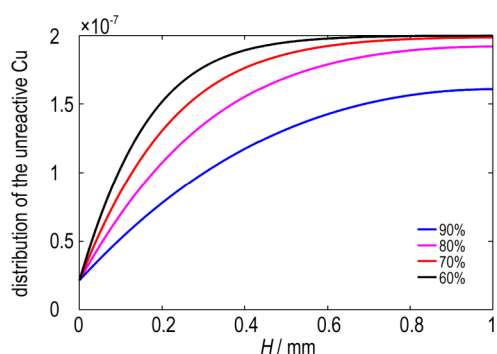


图 7 反应到第 10 h 铜颗粒的粒径分布
Fig.7 The particle size distribution of the copper particles at the tenth hour of the azide reaction

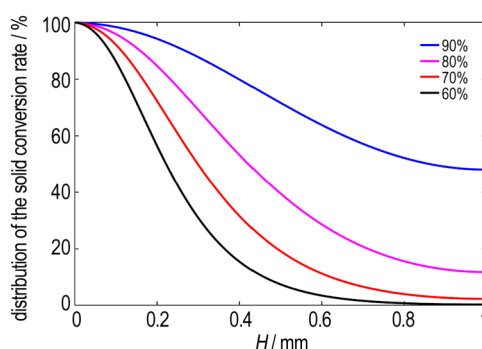


图 8 反应到第 10 h 叠氮化铜的固体转化率分布
Fig.8 The solid conversion ratio distribution of copper azide in the precursor at the tenth hour of the azide reaction

率从 90% 降低到 80% 时,完全叠氮化所需时间延长了近一倍,而当孔隙率缩小到 60% 时,在反应 60 h 时,固体转化率不到 80%。图 7 和图 8 分别为反应进行到第 10 h 时,在装药厚度方向,几种不同孔隙率的前驱体的未反应核半径分布图以及叠氮化铜固体转化率分布图。可看出,当孔隙率缩小至 60% 时,叠氮化反应进程显著减缓,因此,为保证产物叠氮化铜的转化率以及从时间效率和安全性方面考虑,前驱体多孔铜的孔隙率不宜低于 60%,而以不小于 80% 为最佳。

4.3 装药厚度的影响

装药厚度主要影响完全叠氮化的反应时间,以及评估在固定粒径和孔隙率条件下可完全叠氮化的临界高度值。图 9 所示为在 200 nm 粒径、90% 孔隙率以及装药厚度分别为 0.5, 1, 1.5, 2 mm 条件下,通过未反应核模型分析时间对叠氮化铜总体固体转化率的影响。可看出,0.5, 1, 1.5 mm 装药厚度下,完全叠氮化所需的时间分别为 16, 24, 38 h,而当厚度为 2 mm 时,叠氮化反应 50 h 时的固体转化率才能达到 95%,因此,从效益及安全性方面考虑,基于氢气泡模版法制得的单侧通透的前驱体,其装药厚度不宜高于 1.5 mm。

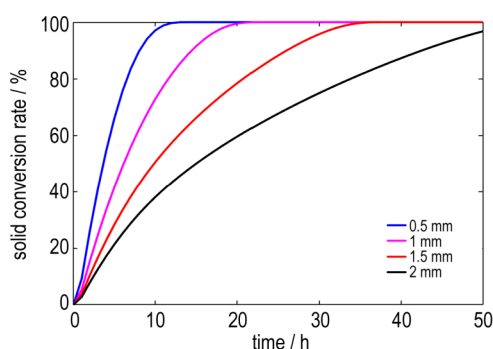


图 9 装药厚度对叠氮化铜固体转化率的影响
Fig.9 Effects of charge thickness on solid conversion rate of copper azide

4.4 反应时间的影响

反应时间主要用于评估叠氮化的反应程度。图10和图11分别为100 nm粒径、2 mm装药厚度以及90%孔隙率下,反应进行3,5,9 h的未反应核半径分布图以及固体转化率分布图。分析图中数据可得到,表面完全叠氮化所需时间为6 h左右,在反应进行到第9 h时,表面向下0.23 mm内的多孔铜均已完成叠氮化,但是由于表面快速生成的叠氮化铜粒径增大,导致其孔隙率缩小,叠氮酸气体向下的渗流速率逐渐减

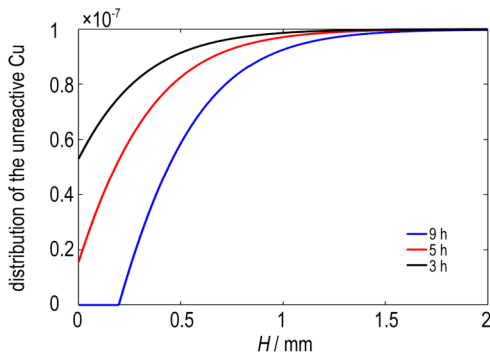


图10 在不同时间点的未反应核半径分布
Fig. 10 Distribution of the unreactive nuclear radius at the different time points

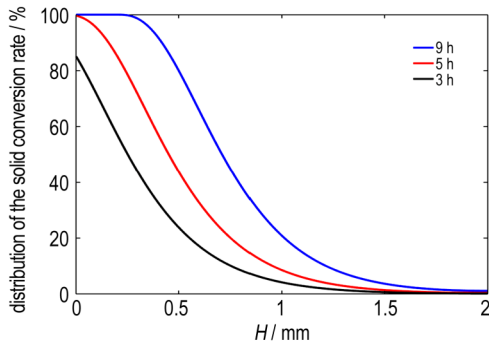


图11 在不同时间点的固体转化率分布
Fig. 11 Distribution of the solid conversion rate at the different time points

小,化学反应速率随叠氮酸气体浓度的降低而减缓,所以该时刻在1.5~2 mm高度处的叠氮化反应才刚开始,因此,反应进程也相应加长。

5 实验验证

为进一步验证所建未反应核模型的可靠性,本文在叠氮多孔铜的前驱体的制备过程中,通过设置不同的沉积电流、沉积时间参数,获得一组高度为1 mm,孔隙率约为80%,粒径分别50,100,200,500 nm的前驱体多孔铜。经原位叠氮化反应24 h后取出,并做XRD测试分析,测试结果如图12所示。同时,将该条件下的实验参数带入所建立的未反应核模型中进行建模分析,实验结果和模型分析结果见表1。

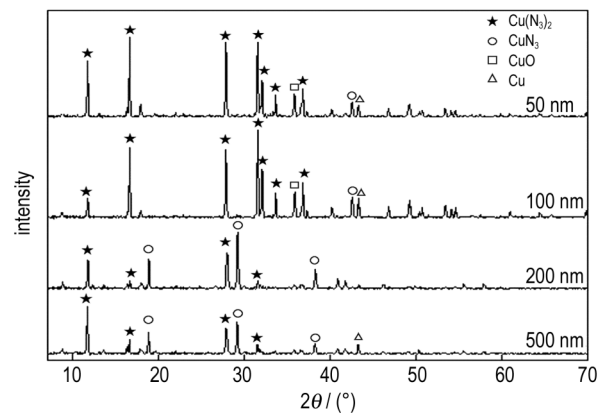


图12 四种不同粒径多孔铜叠氮化产物的XRD对比图
Fig. 12 XRD patterns of the azide products of four different particle size porous copper

从图12以及表1的结果中可看出,基于未反应核模型的仿真结果与实验结果在500 nm粒径条件下契合度较高,而在200 nm粒径条件下存在差异。造成这些偏差的原因是:实际实验过程中,由于50 nm和100 nm粒径的多孔铜粒径较小,存在一定的团聚现

表1 同等参数下试验和未反应核模型所得叠氮化产物的成分质量分数

Table 1 Mass percentage of azide product obtained from experimental and shrinking core model simulation under the same parameters

products	experimental				simulated			
	50 nm	100 nm	200 nm	500 nm	50 nm	100 nm	200 nm	500 nm
CuN ₃	3	8.7	33	59	2.2	9.4	24.7	60.5
Cu(N ₃) ₂	93	86	67	38	97.8	90.6	75.3	35.9
Cu	1.8	2.4	0	3	0	0	0	3.6
CuO	2.2	2.9	0	0	0	0	0	0

象,且制备过程在空气中完成,所得到的多孔铜表面会发生部分氧化,因此其叠氮化产物仍残存少量CuO和未反应的Cu单质。此外,实验中所制备200 nm粒径的多孔铜粒径分布范围相对于其他三种粒径较大,因此其试验过程与仿真过程偏差较大。而模拟仿真过程中所建立的未反应核模型其粒径、孔隙率以及叠氮酸气体的产气量等各个参数都相对均匀,所以模拟仿真结果与实验结果存在一些偏差。但总体而言,四种不同粒径条件下的试验数据与模拟仿真数据的产物成分比变化趋势一致,且对于500 nm大粒径的多孔铜其模拟结果的最大偏差在Cu(N₃)₂处仅为2.1%,即说明该模型能有效地评估叠氮化铜的合成工艺,模拟仿真结果可为研究及优化叠氮多孔铜爆炸性能提供数据支撑。

6 结论

(1) 前驱体多孔铜的粒径、孔隙率以及装药厚度是影响叠氮化铜固体转化率的主要因素,未反应核模型分析结果表明在多孔铜粒径不大于200 nm,孔隙率不小于80%,装药高度不高于1.5 mm条件下,叠氮化反应24 h的固体转化率较高;

(2) 采用实验对粒径分别为50,100,200,500 nm的前驱体多孔铜在相同孔隙率和装药高度条件下的叠氮化反应进行验证,结果表明基于未反应核模型模拟叠氮多孔铜的合成过程与实际实验结果的最大偏差仅为2.1%。

通过未反应核模型方法能够较准确地预测叠氮多孔铜的合成过程,可以显著降低实验成本,提高叠氮多孔铜的合成效率,为实现MEMS火工品芯片化、精密化、批量化装药提供了理论支持。

参考文献:

- [1] Jean D. MEMS micro-detonator based fuzing [C]//The 53rd Annual Fuze Conference: 2009.
- [2] Daniel Jean. MEMS Retard & Impact Sensors [C]//54th Annual NAID Fuze Conference. Kansas City, MO, 2010.
- [3] 褚恩义,张方,张蕊,等.第四代火工品部分概念初步探讨[J].火工品,2018(1):1-5.
CHU En-yi, ZHANG Fang, ZHANG Rui, et al. Preliminary discussion of new concepts of the 4th generation pyrotechnics [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2018(1):1-5.
- [4] Fedoroff B T, Aaronson H A, Reese E F, et al. The encyclopedia of explosives and related items (Volume 1) [M]. United states: National Technical Information Service, 1968: A532-A535.
- [5] Fair H D, Walker R F. Energetic materials. Physics and chemistry of inorganic azides [M]. New York and London: Plenum Press, 1977.
- [6] Pelletier V, Bhattacharyya S, Knoke I, et al. Copper azide confined inside template carbon nanotubes [J]. *Advanced Functional Materials*, 2010,20:3168-3174.
- [7] Laib G. Integrated thin film explosive macro-detonator: US7322294 B1 [P], 2008-1-29.
- [8] ZHANG Fang, WANG Yan-lan, FU Dong-xiao, et al. In-situ preparation of porous copper based nano-energetic composite and its electrical ignition properties [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2013, 38:41-47.
- [9] Zhang F, Wang Y L, Bai Y W, et al. Preparation and characterization of copper azide nanowire array [J]. *Materials Letters*, 2012,89:176-179.
- [10] 王燕兰,张方,张蕾,等.原位反应法制备填充叠氮化铜的碳纳米管阵列[J].含能材料,2016,24(4):386-392.
WANG Yan-lan, ZHANG Fang, ZHANG Lei, et al. In-situ preparation of carbon nanotubes array confined with copper azide [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(4): 386-392.
- [11] 李兵,曾庆轩,李明愉,等.多孔铜尺度对其叠氮化反应的影响[J].含能材料,2016,24(10):995-999.
LI Bing, ZENG Qing-xuan, LI Ming-yu, et al. Influence of porous copper dimension on its azide reaction [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(10): 995-999.
- [12] Wang Q, Feng X, Wang S, et al. Metal-organic framework templated synthesis of copper azide as the primary explosive with low electrostatic sensitivity and excellent initiation ability [J]. *Advanced Materials*. 2016, 28: 5837-5843.
- [13] 张植栋,张方,王燕兰,等.多孔铜叠氮化物的原位合成及性能表征[J].火工品,2015(2):26-28.
ZHANG Zhi-dong, ZHANG Fang, WANG Yan-lan, et al. In-situ preparation and characterization of porous copper azides [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2015(2): 26-28.
- [14] Julian Szekeley, James W Evans, Hong Yong Sohn. Gas-solid reactions [M]. London: Academic Press, 1976.
- [15] 姜元勇.多孔相变材料中的流动与反应[D].沈阳:东北大学,2009.
JIANG Yuan-yong. The interaction between fluid flow and chemical reaction in reactive porous media [D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.
- [16] 姜元勇,徐曾和.填充床中气体流动与气固反应的相互作用[J].化工学报.2006,57(9):2091-2098.
JIANG Yuan-yong, XU Zeng-he. Interaction between flow of gas mixture and gas-solid reaction in a packed bed [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2006, 57(9): 2091-2098.

Kinetic Study of Reaction of Copper Azide Based on Shrinking Core Model

ZHANG Lei^{1,2}, ZHANG Fang², WANG Yan-lan², JIANG Yuan-yong³, YANG Li¹, CHEN Jian-hua², ZHANG Rui²

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physics-chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China; 3. Institute of Engineering Mechanics, Northeastern University, Liaoning 11000, China)

Abstract: Aiming at the matching relationship between various parameters in the gas-solid in-situ synthesis of copper azide, we establish a two-dimensional shrinking core model to simulate the crystal growth mechanism of in-situ synthesis of copper azide and dynamic process. The relationship between the reaction rate of azide porous copper and the solid conversion rate and the diameter of precursor, porosity, charge height and reaction time have been obtained. At the same time, in order to verify the reliability of the model, a set of porous copper precursors with a porosity of approximately 80% and a height of 1 mm and particle diameters of 50, 100, 200 and 500 nm are selected for the analysis of copper azide. Results show that the experimental data of the four different azide products are consistent with the simulated, and the maximum deviation is only 2.1%.

Key words: gas-solid reaction; copper azide; volume element kinetics; in-situ reaction; shrinking core model

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018243



向审稿人致谢

2017年,在各级领导的关心和各位同行专家的帮助下,本刊得以顺利出版发行,为此,编辑部特向在2017年11月30日~2018年11月20日为本刊审阅稿件的各位审稿人致谢!(以汉语拼音为序)

- | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 安崇伟 | 敖文 | 霸书红 | 白颖伟 | 毕福强 | 边亮 | 曹端林 | 曾贵玉 | 常新龙 | 陈捷 | 陈科全 | 陈可平 | 陈朗 |
| 陈利魁 | 陈清畴 | 陈荣 | 陈小伟 | 陈智群 | 程广斌 | 池旭辉 | 褚恩义 | 崔庆忠 | 代晚淦 | 邓琼 | 丁黎 | 杜仕国 |
| 杜忠华 | 段晓惠 | 段卓平 | 方向 | 冯晓军 | 冯增国 | 付秋菠 | 付一政 | 高大元 | 高红旭 | 葛红光 | 葛忠学 | 龚俊波 |
| 贡雪东 | 顾文彬 | 顾晓辉 | 桂毓林 | 郭菲 | 韩克华 | 韩民国 | 韩勇 | 何春林 | 何吉宇 | 何卫东 | 何璇 | 何勇 |
| 洪滔 | 胡炳成 | 胡春波 | 胡建新 | 胡荣祖 | 胡松启 | 黄亨建 | 黄靖伦 | 黄明 | 黄石亮 | 黄西成 | 黄寅生 | 黄振亚 |
| 黄正祥 | 黄志萍 | 姬广富 | 贾宪振 | 姜炜 | 蒋建伟 | 蒋榕培 | 蒋新广 | 焦清介 | 焦纬洲 | 解立峰 | 居学海 | 孔德仁 |
| 来蔚鹏 | 李东杰 | 李高春 | 李吉祯 | 李金山 | 李敬明 | 李军 | 李丽洁 | 李亮亮 | 李明 | 李生华 | 李世鹏 | 李伟兵 |
| 李小东 | 李永祥 | 李志敏 | 李志鹏 | 厉刚 | 简向阳 | 刘波 | 刘大斌 | 刘庚冉 | 刘建忠 | 刘健峰 | 刘佩进 | 刘睿 |
| 刘少武 | 刘涛 | 刘亚青 | 刘英哲 | 刘渝 | 刘玉存 | 龙源 | 卢斌 | 卢光明 | 芦艾 | 鲁国林 | 陆明 | 罗军 |
| 罗一鸣 | 罗运军 | 吕子剑 | 马海霞 | 马宏昊 | 马中亮 | 门永锋 | 孟征 | 孟子晖 | 缪云坤 | 倪培君 | 聂福德 | 潘功配 |
| 潘清 | 庞思平 | 庞维强 | 裴翠祥 | 裴明敬 | 裴重华 | 彭汝芳 | 钱立新 | 强洪夫 | 乔相信 | 乔小晶 | 谯志强 | 任慧 |
| 任炜 | 沈锦优 | 沈瑞琪 | 沈兆武 | 盛涤伦 | 宋锦泉 | 宋浦 | 孙成辉 | 孙杰 | 孙占峰 | 谭碧生 | 谭多望 | 唐承志 |
| 唐维 | 田春蓉 | 田先清 | 田勇 | 涂小珍 | 万代红 | 汪斌 | 汪营磊 | 王伯良 | 王伯周 | 王凤英 | 王浩 | 王建华 |
| 王建龙 | 王健 | 王金相 | 王军 | 王康才 | 王涪 | 王亮 | 王庆法 | 王树山 | 王晓 | 王晓峰 | 王煜军 | 王玄玉 |
| 王彦平 | 王占江 | 王肇中 | 王志军 | 王中合 | 韦兴文 | 魏学涛 | 魏智勇 | 温茂萍 | 温玉全 | 文尚刚 | 吴立志 | 吴耀国 |
| 武双章 | 肖继军 | 肖正刚 | 熊鹰 | 胥会祥 | 徐抗震 | 徐瑞娟 | 闫鸿浩 | 严楠 | 严启龙 | 炎正馨 | 杨光成 | 杨建兴 |
| 杨俊清 | 杨黎明 | 杨明华 | 杨荣杰 | 杨毅 | 杨志剑 | 杨宗伟 | 姚维尚 | 叶小军 | 仪建华 | 尹建平 | 余永刚 | 郁红陶 |
| 郁卫飞 | 喻健良 | 袁俊明 | 张朝阳 | 张风顺 | 张国防 | 张嘉恒 | 张建国 | 张建军 | 张江波 | 张龙 | 张蒙正 | 张明安 |
| 张奇 | 张庆华 | 张庆明 | 张同来 | 张为华 | 张伟斌 | 张炜 | 张文超 | 张文全 | 张先锋 | 张延强 | 张勇 | 张远波 |
| 张跃军 | 赵锋 | 赵凤起 | 赵国政 | 赵省向 | 赵孝彬 | 郑申声 | 智小琦 | 钟发春 | 周诚 | 周集义 | 周霖 | 周伟良 |
| 周阳 | 周遵宁 | 朱晨光 | 朱朋 | 朱顺官 | 朱卫华 | 朱左明 | 祝明水 | | | | | |

《含能材料》编辑部
二〇一八年十一月