

多相爆轰管的优化设计及其制备纳米氧化钛材料的探索研究

罗 宁, 曹小龙, 蒋 立, 袁翊硕, 牟恭雨, 索云琛

(中国矿业大学, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 以 3 种前驱气体 ($\text{CH}_4\text{-2O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{-0.5O}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{-2.5O}_2$) 进行爆轰试验, 研究了初始压力对爆轰参数的影响及规律, 以测得的预混气爆轰压力、速度、胞格等性能参数表征了预混气爆轰特性。以测得的爆轰参数为依据自主设计了长度 2 m、内径 80 mm、壁厚 8 mm、点火能量为 40 J 的爆轰管道。在自主设计的爆轰管道内采用氢气、氧气和四氯化钛为混合前驱体, 通过气液爆轰法合成了纳米二氧化钛, 采用 TEM 对产物进行了表征, 结果表明获得的纳米二氧化钛其球形或者类球形颗粒为 20~150 nm。

关键词: 爆轰管优化设计; 爆轰压力; 爆轰速度; 爆轰胞格; 纳米二氧化钛

中图分类号: TB383

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)07-2709-07

爆轰是爆炸的最高形式, 爆轰过程可以快速释放化学能量^[1], 利用爆轰法制备纳米材料是爆轰的重要应用且是国际热点研究之一, 其原理为利用爆轰产生的高温高压环境破坏前驱体物质原来的结构, 使所有或部分原子进行重新排列, 生成新的纳米材料^[2]。多相爆轰管是合成纳米结构材料的重要工具, 但是极少有文献对多相爆轰管进行全面的爆轰参数分析和设计^[3-6]。

根据前人的研究和前期实验基础, 目前爆轰法制备纳米材料一般选取甲烷-氧气、氢气-氧气、乙炔-氧气等可燃气体作为前驱体的一部分以此合成相应的纳米材料^[7-12]。因此, 在设计多相爆轰管道前, 通过 3 种可燃气体的爆轰试验, 为多相爆轰管的设计提供理论上的依据, 并以此为基础设计出多相爆轰管, 最后在自主设计的多相爆轰管内成功合成了纳米二氧化钛材料。

1 可燃气体爆轰试验

1.1 试验原理与方法

有效地测量预混气爆轰压力、速度、胞格等性能参数, 对于表征预混气爆轰特性以及多相爆轰管的设计具有重要意义^[13]。因此, 首先在长 2 m、管径为 36 mm 的圆形管道中, 对不同初始压力下的 $\text{CH}_4\text{-2O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{-0.5O}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{-2.5O}_2$ 3 种预混气体的爆轰特性进行试验研究, 获得爆轰管内不同初压下的爆轰流场参数关

系, 为多相爆轰管的设计提供初始参考依据。

试验装置如图 1 所示, 主要由爆轰管、点火系统、数据采集系统、配气系统构成。爆轰管道由驱动段和测试段组成, 其中驱动段长度为 1.5 m、内径为 48 mm。测试段长度为 2 m、内径为 36 mm。采用 PCB 压力传感器(型号 113B24, 响应频率: 500 kHz, 量程: 0~3.9 MPa, 输出电压: 0~5 V)来记录测试段内爆轰波到达时的压力。爆轰管测试段安装有 4 个压力传感器, 每 2 个压力传感器之间相邻间距为 14 cm, 根据爆轰波到达的时间来计算爆轰波在相邻测点的传播速度, 并通过 GASEQ 程序^[14]计算预混气体在不同初始压力下的爆轰波理论 C-J 速度。采用道尔顿分压法配置预混气体, 并在预混罐内静置 24 h 使气体充分混合。实验前, 首先使用真空泵将整个爆轰管道抽真空至 -0.1 MPa, 之后打开进气阀门使预混罐内气体进入爆轰管道内, 通过电子压力表控制进气量来达到预定的试验初始压力, 每次试验前, 将烟熏板放入管道尾端, 使烟熏板紧贴壁面以记录胞格。

1.2 气体组分

本研究中采用的实验气体为 $\text{CH}_4\text{-O}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{-O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{-O}_2$, 具体参数如表 1 所示。

1.3 爆轰管内不同预混气体的爆轰压力

由于末端反射压力造成压力传感器数据测量值过

收稿日期: 2021-12-08

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFA0711800); 国家自然科学基金(12072363, 11502282)

作者简介: 罗 宁, 男, 1980 年生, 博士, 教授, 中国矿业大学力学与土木工程学院, 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏徐州 221116, E-mail: nluo@cumt.edu.cn

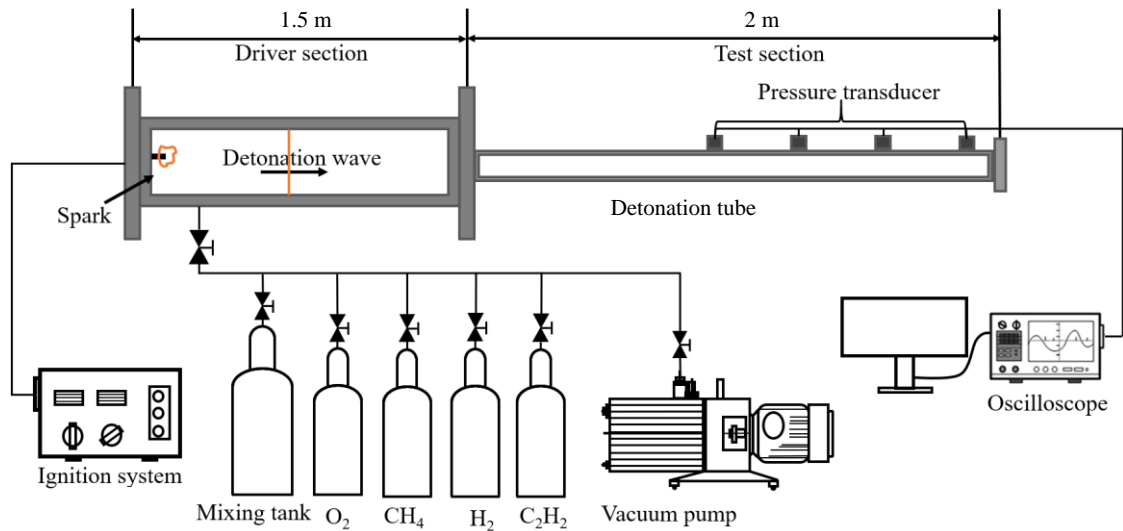


图 1 可燃气体爆轰试验装置

Fig.1 Combustible gas detonation test device

表 1 预混气体中反应物的详细成分

Table 1 Details of reactant composition in the premixed gas

No.	Gas component	Mole ratio
1#	CH ₄ -O ₂	1:2
2#	H ₂ -O ₂	1:0.5
3#	C ₂ H ₂ -O ₂	1:2.5

大，因此取前 3 个传感器的测量值作为试验数据。从图 2 可以看到 3 种预混气的初始压力越高，总体上各点峰值压力也越大。随着 p_0 的增加，预混气体化学反应总能量释放量增加，导致混合物的分子运动速率增加，化学反应更快进行，前驱冲击波获得更多的能量，因此爆轰压力也越来越高^[15]。结合 3 种预混气体所有初始压力和爆轰压力测试数据，可以得到，爆轰压力近似为初始压力的 17~36 倍^[16]。爆轰合成试验一般在 1 个大气压下进行，因此，设计多相爆轰管时考虑的爆轰动态压力为

1.7~3.6 MPa。

1.4 爆轰管内不同预混气体的爆轰速度

图 3 为爆轰速度随初始压力变化趋势，试验结果与 C-J 理论爆轰速度较为接近，受边界层效应的影响^[17]，平均爆速均小于理论爆速。3 种预混气体的爆轰速度随初始压力的减小整体呈下降趋势，并逐渐远离理论的 C-J 爆轰速度。甲烷-氧气在初始压力为 10 和 60 kPa 时，爆轰速度分别为 1736 和 2321 m/s，在初始压力小于 15 kPa 后，甲烷-氧气预混气体的爆轰速度迅速下降，出现爆轰极限现象^[18]，这一现象表明爆轰波出现不稳定传播现象，是非常不利于爆轰合成试验的，在试验中应避免出现这种现象。甲烷-氧气、乙炔-氧气在初始压力为 10 kPa 时，速度亏损分别为 24%、5%，60 kPa 时为 2%、3%。氢气-氧气在初始压力为 15 kPa 时，速度亏损为 9%，在初始压力为 60 kPa 时，速度亏损为 2%。由此可见，虽然爆轰波速度小于理论 C-J 值，但是初始压力的升高

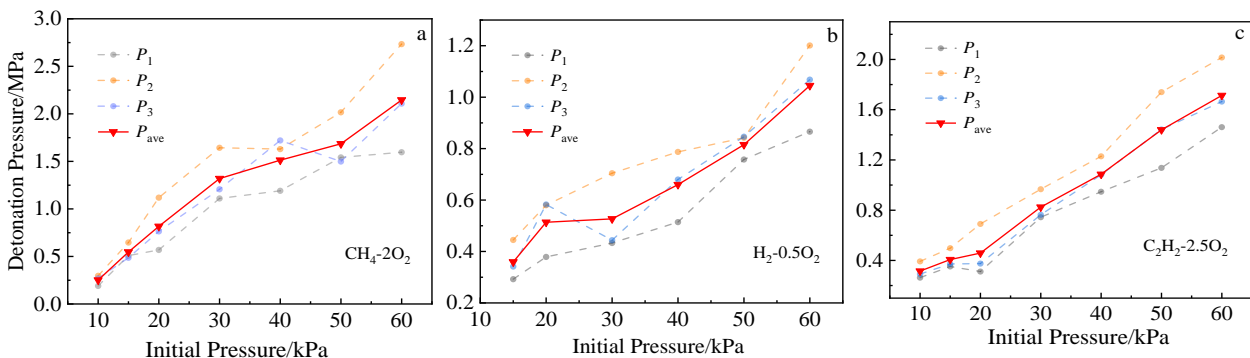


图 2 不同预混气体爆轰压力随初始压力的变化

Fig.2 Variation of detonation pressure of different premixed gas with initial pressure: (a) CH₄-2O₂, (b) H₂-0.5O₂, and (c) C₂H₂-2.5O₂

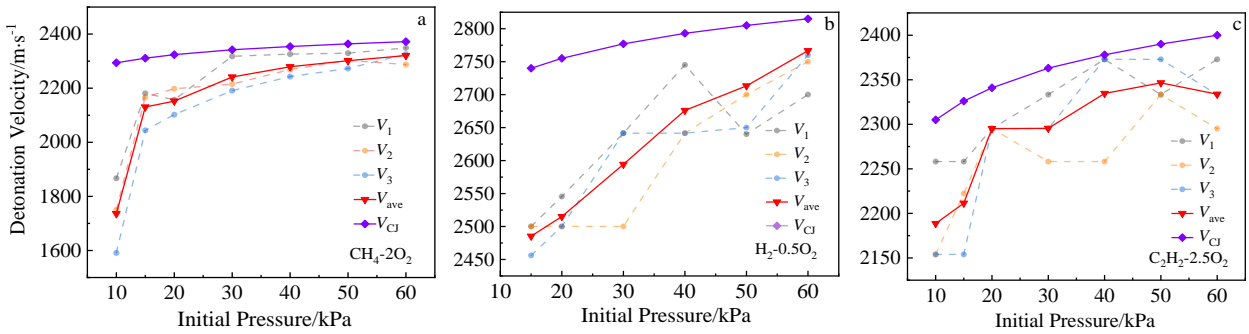


图 3 不同预混气体爆轰速度随初始压力的变化

Fig.3 Variation of detonation velocity of different premixed gas with initial pressure: (a) CH₄-2O₂, (b) H₂-0.5O₂, and (c) C₂H₂-2.5O₂

可以减弱边界层效应的不利影响, 较高的初始压力产生的速度亏损不会对爆轰合成产生非常明显的影响。

1.5 预混气体胞格尺寸与不同初始压力的关系

胞格尺寸大小对于表征预混气的临界起爆能和爆燃向爆轰转捩距离有着非常重要的意义。由图 4 看出, 对于同一种预混气体, 初始压力的减小会导致爆轰胞格增大, 甲烷-氧气的爆轰胞格尺寸在初始压力 20 kPa 时最大, 为 24 mm, 而在初始压力 60 kPa 时最小, 仅为 6.24 mm。由于初始压力降低造成气体浓度的减少, 降低了气体中的活化因子含量, 触发化学反应所需的能量增多, 导致诱导区的距离增加, 所以爆轰胞格尺寸增加, 这与 Ng 模型预测的胞格变化趋势相一致^[19]。胞格尺寸的大小为 $\lambda(C_2H_2) < \lambda(H_2) < \lambda(CH_4)$, 乙炔的胞格尺寸要明显小于氢气、甲烷的胞格尺寸, 这是因为氢气、甲烷的敏感性低于乙炔, 乙炔爆轰过程中的诱导

区相对较短, 所以胞格尺寸也相对较小。胞格尺寸与初始压力满足:

$$\lambda = CP_0^{-\alpha} \tag{1}$$

其中, λ 为胞格尺寸, mm; C 为常数; P_0 为混合物初始压力, kPa; α 为指数。拟合后的函数关系见表 2, 由此, 不同初始压力下的胞格尺寸大小均可计算得到, 这将为爆轰管的长度和点火能量的设计提供依据。

2 多相爆轰管结构设计

2.1 多相爆轰管长度和内径的设计

爆轰波的起爆存在爆燃向爆轰转捩这一现象, 而爆燃向爆轰的转捩需要一定的距离即 L_{DDT} 距离, 爆轰管的长度必须满足 $L > L_{DDT}$ 。Kuznetsov 等^[20]在光滑管道中进行了氢氧混合气的爆轰实验, 对于管道内径 $D > 20\lambda$ 时, 预混气发生爆轰时的位置 X_D 处的湍动程度 $\delta(X_D) > 10\lambda$

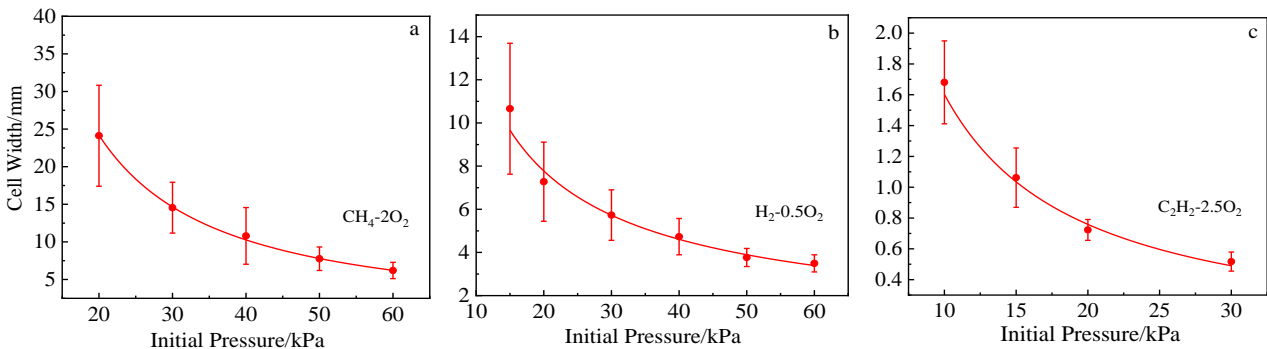


图 4 不同预混气体胞格尺寸随初始压力的变化

Fig.4 Variation of cell size of different premixed gas with initial pressure: (a) CH₄-2O₂, (b) H₂-0.5O₂, and (c) C₂H₂-2.5O₂

表 2 爆轰胞格尺寸与初始压力之间的拟合关系参数

Table 2 Parameters for fitting relationship between detonation cell size and initial pressure

Premixed gas	Fitting function
CH ₄ -2O ₂	$\lambda = 981.5P_0^{-1.236}$
H ₂ -0.5O ₂	$\lambda = 74.577P_0^{-0.755}$
C ₂ H ₂ -2.5O ₂	$\lambda = 19.205P_0^{-1.078}$

时即可发生爆轰。通过表 2 预测甲烷在常温常压、当量比为 1 的条件下, 其与氧气混合物的胞格尺寸为 3 mm, 通过在点火端附近加入 Shchelkin 金属螺旋线来缩短约一半的 DDT 距离, 其在驱动段管内的 DDT 距离在 300 mm 左右^[21]。因此, 设计爆轰管长度为 2 m, 其它气体的爆轰胞格在同一初始压力下都小于甲烷-氧气的胞格

大小, 预混气从爆燃到达爆轰时的所需湍动程度均低于甲烷-氧气, 所以在 2 m 长的爆轰管内, 大部分前驱气体都可以形成稳定的爆轰。

对于管道内的预混气爆轰失效现象, Lee 等人^[22]对于爆轰极限给出的临界条件为 $\lambda = \pi d$, 只要管道直径满足 $d > \lambda/\pi$, 爆轰即可在管道内稳定传播。在爆轰合成试验条件内, 爆轰胞格不超过 100 mm 的混合气体, 其爆轰均可在 36 mm 内径的爆轰管道内稳定传播。综合考虑反应放热、合成产物生成量等原因, 选择 $R=80$ mm 作为爆轰管的设计半径。

2.2 多相爆轰管点火能量的设计

爆轰的直接起爆是指爆炸源在瞬间产生具有强烈能量的激波并作用在可燃气体上, 不产生火焰加速的 DDT 阶段而直接形成的爆轰现象^[1]。Lee 等人^[23,24]将起爆能量和爆轰胞格结构联系在一起, 提出预测爆轰直接起爆的临界能量的半经验表面能模型:

$$4\pi R_*^2 = \pi \left(\frac{d_c}{2} \right)^2 \quad (2)$$

其中, R_* 为内核半径, d_c 为临界管径。

根据强冲击波理论, 冲击波能量为:

$$E_C = 4\pi I \gamma p_0 M_S^2 R_S^3 \quad (3)$$

其中, E_C 为临界起爆能量, I 为积分常数, γ 为比热容比, P_0 为初始压力, M_S 为激波的马赫数, R_S 为爆炸半径。

根据 Zeldovich 准则, 冲击波能量衰减至 $M_S = M_{CJ}$ 时, R_S 应该等于 R_* 。而对于没有稀释的氢气、低分子烃类的爆轰临界管径与胞格之间的关系满足 $d_c = 13\lambda$, 将其与声速 $c_0 = \sqrt{\gamma_0 P_0 / \rho_0} = \sqrt{\gamma_0 P_0 v_0}$ 一起代入式(3)中, 得:

$$E_C = 4\pi \gamma p_0 M_{CJ}^2 I \left(\frac{13\lambda}{4} \right)^3 = \frac{2197}{16} \pi \rho_0 I D_{CJ}^2 \lambda^3 \quad (4)$$

其中, M_{CJ} 为 CJ 马赫数, c_0 为初始混合物声速, γ_0 为初始混合物比热容比, ρ_0 为初始混合物密度, v_0 为初始混合物比容, D_{CJ} 为爆轰波速度, λ 为胞格尺寸。

一般多相爆轰合成的初始压力是 100 kPa, 经式(4)计算后可得表 3 中 3 种前驱气体的起爆能, 3 种气体临界起爆能量的大小顺序为 $E_C(C_2H_2) < E_C(H_2) < E_C(CH_4)$, 由于 CH_4 的爆轰敏感性较低, CH_4-2O_2 需要的临界起爆能也明显大于其它 2 种混合气体, 选择使用 40 J 的高能点火器可以满足直接起爆的能量需求。

考虑气体加热、壁面传热、安全性能等问题, 管道壁厚 δ 设计为 8 mm。

2.3 爆轰管强度的校核

爆轰管材质选用 Q235 钢, 强度校核遵循一般抗爆防护构造物设计中所用的方法^[25-27], 由于测量的爆轰波压力为动态压力波, 因此这里的载荷采用动载荷对

表 3 预混气临界起爆能

Table 3 Critical initiation energy of premixed gas	
Premixed gas	Critical initiation energy/J
CH ₄ -2O ₂	40.75
H ₂ -0.5O ₂	8.75
C ₂ H ₂ -2.5O ₂	4×10 ⁻³

应的等效静载荷, 即:

$$P_e = P_{max} C_d \quad (5)$$

其中, C_d 为动载系数, P_{max} 为动载荷峰值, P_e 为动载荷对应的等效静载。

根据一维无阻尼强迫振动理论^[28], 即:

$$x'' + \omega^2 x = \frac{F(t)}{m} \quad (6)$$

其中, ω 为角频率, $F(t)$ 为外力, m 为物体质量, x 为物体位移, x'' 为位移的二阶导数。

图 5 为典型的压力波形图, 图中波形近似为三角波形, 其第 1 个主峰脉宽 $t_1 = 3.6 \times 10^{-4}$ s, 对于柱壳, 如果只考虑扩展振动的基频, 则自振周期为:

$$T_0 = 2\pi \frac{R}{\sqrt{E/\rho}} \quad (7)$$

其中, R 为爆轰管内径, E 为弹性模量, ρ 为材料密度。

根据自主设计的爆轰管半径 R , 可得 $T_0 = 1.07 \times 10^{-4}$ s, 由于主峰脉宽 $t_1 > 3T_0/8$, 可得动载系数解 C_d :

$$C_d = 2 \left(1 - \frac{1}{\omega t_1} \tan^{-1} \omega t_1 \right) \quad (8)$$

根据弹性力学圆管内受压作用问题^[29]可得解为: 径向应力:

$$\sigma_\rho = \frac{\frac{R_{out}^2}{r^2} - 1}{\frac{R_{out}^2}{R_{in}^2} - 1} P \quad (9)$$

环向应力:

$$\sigma_\phi = \frac{\frac{R_{out}^2}{r^2} + 1}{\frac{R_{out}^2}{R_{in}^2} - 1} P \quad (10)$$

其中, R_{in} 为爆轰管内径, R_{out} 为爆轰管外径, P 为管内压力, r 为任意半径, σ_ρ 为径向应力, σ_ϕ 为环向应力。

设计的爆轰管需要重复使用, 因此在许用工况下爆轰管不能发生塑性变形, 依据第三强度理论, 等效应力为 $[\sigma] = \sigma_\phi - \sigma_\rho$, 取 Q235 钢的屈服强度 235 MPa 为许用应力, 则爆轰管安全判定条件为:

$$\sigma_{\phi} - \sigma_p < 235 \text{ MPa} \tag{11}$$

将式(7)、(8)、(9)代入式(10)得:

$$P_{\max} < \frac{1}{C_d} \cdot \frac{R_{\text{out}}^2 - R_{\text{in}}^2}{2R_{\text{in}}^2} \cdot 235 \text{ MPa} \tag{12}$$

经计算得到爆轰动态压力的允许值为 14 MPa, 结合 1 个大气压下的实验条件, 爆轰可达到的最大压力值为 1.7~3.6 MPa, 试验压力值小于允许压力值, 所以设计的爆轰管符合安全要求。

3 多相爆轰管的应用

为了检验自主设计的多相爆轰管是否满足实际爆轰合成要求, 选用胞格尺寸大小适中、点火能量适中的氢气-氧气作为先驱体进行纳米材料的制备探索, 反应物具体成分见表 4。

3.1 试验流程

试验流程如下: 实验前采用道尔顿分压法配置先驱体气体, 并在预混罐内静置 24 h 使气体充分混合, 利用真空泵将气液爆轰管内的气压抽至真空-0.1 MPa, 然后通过雾化系统把 TiCl₄ 加到管中, 将提前在配气室配比好的预混气体填充到爆轰管内, 随后加热至 380~550 K, 静置 10~20 min, 使气液先驱体混合物混合均匀。用 40 J 高能点火器点火, 完全反应后卸下两端的法兰盘, 收集爆轰管内壁上的产物并用去离子

水和乙醇清洗, 去除杂质。最后利用真空干燥箱干燥 60 min, 除去产物表面附着的水和乙醇。将制备的纳米材料样品使用透射电子显微镜 (TEM) 进行表征。

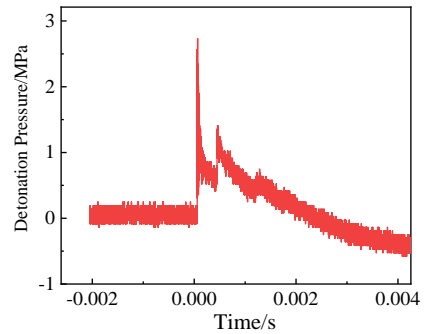


图 5 典型压力载荷波形图

Fig.5 Typical pressure load waveform diagram

表 4 样品中反应物成分的信息

Sample	Precursor ratio, O ₂ :H ₂ :TiCl ₄	Initial temperature/K	Initial pressure/MPa
1#	1.0:2.0:1.0	423	0.1
2#	2.0:2.0:1.0	423	0.1
3#	1.0:2.0:1.5	423	0.1

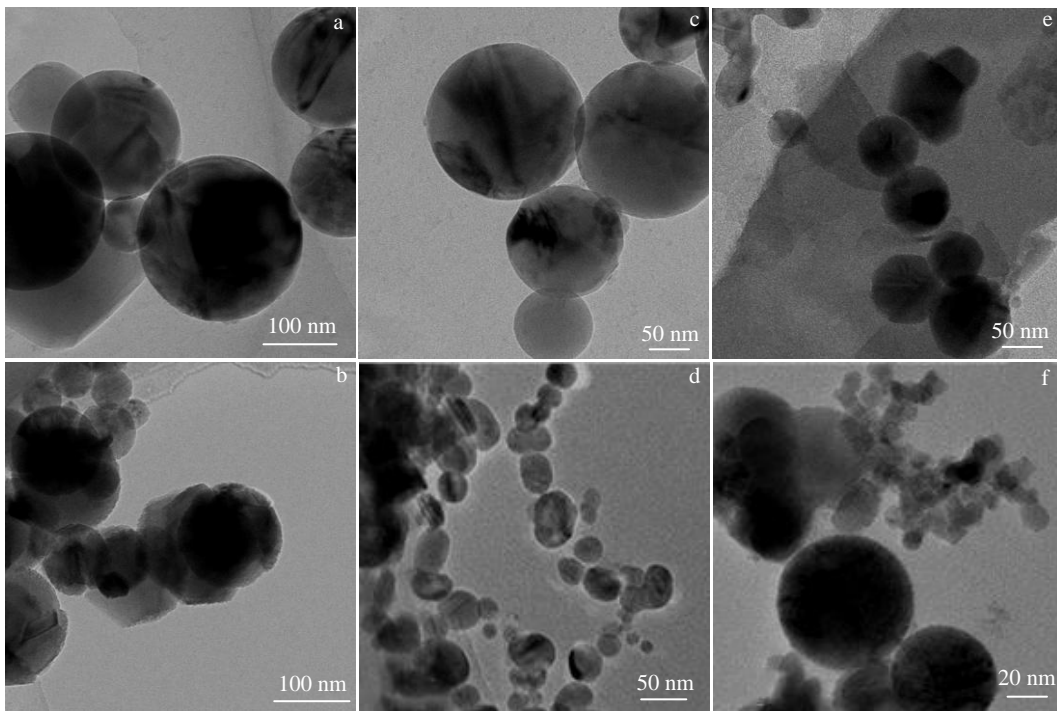


图 6 纳米二氧化钛的 TEM 像

Fig.6 TEM images of nano-TiO₂ samples 1# (a, b), 2# (c, d), and 3# (e, f)

3.2 TEM 表征结果

选取 1#、2#、3#样品进行 TEM 表征, 结果如图 6。图 6a 和 6b 为 1#样品的 TEM 像。1#样品的纳米二氧化钛颗粒主要呈球形或者类球形, 粒径在 30~150 nm, 具有良好的分散性。2#样品主要成分是锐钛矿相二氧化钛(约 86.8%)。从图 6c 和 6d 可以看出, 2#样品主要呈现椭球形, 具有较好的分散性, 粒径相对均匀, 在 40~60 nm 之间。3#样品是纯净的金红石相二氧化钛, 其晶体粒径约为 50 nm, 分散性良好, 从图 6e 和 6f 可以看出只有轻微的团聚现象。因此, 自主设计的爆轰管道可以成功获得纳米二氧化钛, 对合成产物的表征也表明其球形或者类球形颗粒粒径范围在 20~150 nm。

4 结 论

1) 通过 3 种常见的前驱气体 $\text{CH}_4\text{-2O}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{-2.5O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{-0.5O}_2$ 进行爆轰测试, 得到 3 种预混气体的爆轰压力、爆轰速度、爆轰胞格等参数。3 种预混气体在初压为 1 个大气压时的爆轰压力为 1.7~3.6 MPa 左右。受边界层效应影响, 3 种预混气体的爆轰速度随初始压力的减小整体呈下降趋势, 并且爆轰速度亏损也逐渐增大, 继续下降的压力会导致预混气出现爆轰极限现象, 但是初始压力的升高会减弱上述不利影响, 有利于爆轰合成试验的进行。

2) 同一条件下, 3 种预混气体胞格的大小顺序为 $\lambda(\text{C}_2\text{H}_2) < \lambda(\text{H}_2) < \lambda(\text{CH}_4)$ 。计算出的临界起爆能量大小顺序为 $E_c(\text{C}_2\text{H}_2) < E_c(\text{H}_2) < E_c(\text{CH}_4)$ 。依据这些爆轰参数, 自主设计的爆轰管长度为 2 m、内径为 80 mm、厚度为 8 mm、点火能量为 40 J, 根据安全校核准则进行了校核, 自主设计的爆轰管符合安全要求。

3) 在自主设计的爆轰管内成功合成了纳米二氧化钛材料, 获得的纳米二氧化钛其球形或者类球形颗粒粒径范围在 20~150 nm。

参考文献 References

- [1] Lee J H S. *The Detonation Phenomenon*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008
- [2] Xiang Junxiang(向俊庠). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019
- [3] Fan Hongzhi(范鸿志). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007
- [4] Chen Qiumin(陈秋敏), Hu Yang(胡洋). *Instrumentation Analysis Monitoring*(仪器仪表与分析监测)[J], 2018(2): 32
- [5] Liu Guanglie(刘光烈). *Chinese Journal of Energetic Materials*(含能材料)[J], 1997(1): 36
- [6] Zhou Ning(周宁), Zhang Bingbing(张冰冰), Sun Quan(孙权) *et al. Industrial Safety and Environmental Protection*(工业安全与环保)[J], 2015, 41(1): 44
- [7] Nepal A, Singh G P, Flanders B N *et al. Nanotechnology*[J], 2013, 24(24): 245 602
- [8] Luo N, Jing H W, Ma Z G *et al. Particuology*[J], 2016, 26: 102
- [9] Yan H H, He C, Li X J *et al. Diamond and Related Materials*[J], 2018, 87: 233
- [10] Luo N, Xiang J X, Shen T *et al. Diamond and Related Materials*[J], 2019, 97: 107 448
- [11] Luo N, Xiang J X, Liang H L *et al. Diamond and Related Materials*[J], 2019, 92: 61
- [12] Xiang J X, Luo N, Yan H H *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2019, 48(10): 3113
- [13] Zhang Bo(张博), Bai Chunhua(白春华). *Gas Detonation Dynamics*(气相爆轰动力学)[M]. Beijing: Science Press, 2012: 104
- [14] Wang L Q, Ma H H, Shen Z W *et al. Applied Thermal Engineering*[J], 2017, 123: 1300
- [15] Li J X, Pan J F, Jiang C *et al. International Journal of Hydrogen Energy*[J], 2019, 44(51): 27 974
- [16] Kundu S, Zanganeh J, Moghtaderi B. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*[J], 2016, 40: 507
- [17] Fay J A. *Physics of Fluids*[J], 1959, 2(3): 283
- [18] Lee J H S, Jesuthasan A, Ng H D. *Proceedings of the Combustion Institute*[J], 2013, 34(2): 1957
- [19] Ng H D, Ju Y G, Lee J H S. *International Journal of Hydrogen Energy*[J], 2007, 32(1): 93
- [20] Kuznetsov M, Alekseev V, Matsukov I *et al. Shock Waves*[J], 2005, 14(3): 205
- [21] Xiong Zhuang(熊壮). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020
- [22] Lee J H S. *Annual Review of Fluid Mechanics*[J], 1984, 16: 311
- [23] Bach G G, Lee J H S. *AIAA Journal*[J], 1970, 8(2): 271
- [24] Zhang B, Kamenskihs V, Ng H D *et al. Proceedings of the Combustion Institute*[J], 2011, 33(2): 2265
- [25] Zhao Shida(赵士达). *Explosion and Shock Waves*(爆炸与冲击)[J], 1989(1): 85
- [26] Hu Bayi(胡八一), Bai Jingsong(柏劲松), Liu Damin(刘大敏) *et al. Pressure Vessel Technology*(压力容器)[J], 2000 (2): 39
- [27] Huang Yu(黄宇). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020

- [28] Zeng Xinchuan(曾心传), Yao Yunsheng(姚运生). *Vibration Theory*(振动理论)[M]. Beijing: Seismological Publishing House, 2013
- [29] Xu Zhilun(徐芝纶). *Elastic Mechanics*(弹性力学)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2018

Optimization Design of Multiphase Detonation Tube and Exploration on Preparation of Nano Titanium Dioxide

Luo Ning, Cao Xiaolong, Jiang Li, Yuan Yishuo, Mou Gongyu, Suo Yunchen
(China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Detonation experiments were carried out with three precursor gases ($\text{CH}_4\text{-2O}_2$, $\text{H}_2\text{-0.5O}_2$, $\text{C}_2\text{H}_2\text{-2.5O}_2$). The influence and law of initial pressure on detonation parameters were studied. The detonation characteristics of premixed gas were characterized by the measured detonation pressure, velocity and cell size. Based on the measured detonation parameters, a detonation duct with length of 2 m, inner diameter of 80 mm, wall thickness of 8 mm and ignition energy of 40 J was designed independently. Nano titanium dioxide was synthesized by gas-liquid detonation with hydrogen, oxygen and titanium tetrachloride as mixed precursors in the independently designed detonation duct. The products were characterized by TEM. The results show that the spherical or quasi spherical particles of the obtained nano titanium dioxide are 20~150 nm.

Key words: optimal design of detonation tube; detonation pressure; detonation velocity; detonation cell size; nano titanium dioxide

Corresponding author: Luo Ning, Ph. D., Professor, State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, P. R. China, E-mail: nluo@cumt.edu.cn