

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВА СМЕСИ НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ И ВОЗДУХА

Б.-Ц. Линь, В.-С. Ли, Ч.-Цз. Чжу, Х.-Л. Лу, Чж.-Г. Лу, Ц.-Ч. Ли

Государственная лаборатория угольных ресурсов и обеспечения безопасной добычи  
Китайский университет горного дела и технологии, 221008 Суючжоу, Цзянсу, Китай, lixia242@163.com

Исследовались параметры взрыва порошка наночастиц алюминия размером 35, 75 и 100 нм в 20-литровой сферической взрывной камере. Результаты экспериментов показали, что максимальное давление взрыва и максимальная скорость роста давления зависят главным образом от концентрации пыли. При концентрациях ниже  $1000 \text{ г/см}^3$  максимальное давление взрыва с увеличением концентрации постепенно растет, достигая максимума, а при концентрациях выше  $1250 \text{ г/см}^3$  — убывает. Аналогичное поведение характерно и для зависимости максимальной скорости роста давления от концентрации пыли. Установлено, что нижние концентрационные пределы взрыва нанопорошка алюминия с размерами частиц 35, 75 и 100 нм составляют 5, 10 и  $10 \text{ г/см}^3$  соответственно, в то время как нижние концентрационные пределы обычных алюминиевых порошков  $50 \text{ г/см}^3$ .

Ключевые слова: нанопорошки, взрыв пыли, давление взрыва, концентрационные пределы взрыва.

### ВВЕДЕНИЕ

Порошки алюминия широко применяются в различных областях техники. Добавление к твердому топливу ультрадисперсного порошка алюминия с размером частиц  $0.1 \div 1 \text{ мкм}$  позволяет значительно увеличить удельный импульс ракетного топлива и летные характеристики ракеты [1]. Но в связи с применением ультрадисперсных порошков алюминия важное значение приобретают вопросы взрыво- и пожаробезопасности. Характеристики и механизм взрыва порошков алюминия и других материалов с учетом влияния различных факторов изучались многими исследователями. В работе [2] экспериментально и теоретически исследованы характеристики взрыва порошков алюминия в сферическом герметичном контейнере с воспламенением в центре камеры. В [3] проведен сравнительный анализ времени задержки воспламенения, влияния размера и концентрации пыли на параметры взрыва TNT, RDX и муки и рассмотрен на качественном уровне процесс взрыва этих материалов. В [4] в 20-литровой сферической взрывной камере изу-

чено поведение взрыва алюминиевой пудры в виде чешуек, порошка RDX и их смесей. С использованием технологий DTA-TG, PDSC и SEM в работе [5] исследованы параметры горения ракетных топлив с ультрадисперсными алюминиевыми порошками и предложена модель горения. Показано, что в области средних давлений ультрадисперсные порошки алюминия могут воспламеняться непосредственно на поверхности, что приводит к увеличению скорости горения топлива. В работе [6] проведено исследование горения твердого ракетного топлива с двойным окислителем (перхлорат аммония/НМХ) при давлениях  $0.03 \div 0.1 \text{ МПа}$ . Показано, что скорости горения ракетного топлива существенно зависят от размера частиц алюминиевого порошка и коэффициента избытка окислителя. Например, при замене порошка алюминия микронных размеров АСД-4 на ультрадисперсный порошок Alex скорость горения возрастает. Результаты проведенных исследований оказались весьма полезны для применения в промышленном масштабе. Однако нанопорошки алюминия (размер частиц  $1 \div 100 \text{ нм}$ ) все еще изучены недостаточно. В настоящей работе изложены результаты экспериментального исследования параметров взрывов нанопорошков алюминия с размером частиц 35, 75 и 100 нм.

Bai-Quan Lin, Wen-Xia Li, Chuan-Jie Zhu, Hai-Long Lu, Zhen-Guo Lu, Qing-Zhao Li.  
State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining,  
Faculty of Safety Engineering, China University of Mining  
and Technology, Xuzhou, Jiangsu Province, 221008, China.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЗРЫВНАЯ СИСТЕМА

Характеристики взрыва пыли тесно связаны с оборудованием и условиями проведения эксперимента [7–9]. Все параметры взрыва пыли, такие как температура воспламенения, минимальная концентрация взрыва (нижний предел взрыва), минимальная энергия воспламенения, давление взрыва и скорость роста давления, не являются характеристиками материала, но существенно зависят от условий окружающей среды и экспериментальных методов. В настоящее время для исследования взрывов пылей используют три типа контейнеров — трубчатые, цилиндрические и сферические. Описываемый эксперимент проводили в 20-литровой сферической взрывной камере, а параметры взрыва (давление, максимальная скорость роста давления, пределы взрыва (обычно исследуется нижний предел), концентрационный предел кислорода) определяли согласно международному стандарту ISO6184-1.

### Экспериментальная установка

Сосуд представляет собой полую сферу, устойчивую к взрыву (рис. 1). Водяная рубашка служит для диссипации тепла взрыва. Пыль диспергируется внутрь сферы из пылевого контейнера высокого давления с использованием быстродействующего клапана и сопла. Устройство для зажигания состоит из двух пиротехнических воспламенителей, потребляющих 5 кДж энергии каждый, и располагается в центре сферы. Профиль давления — время регистрируется пьезоэлектрическим датчиком (как показано на рис. 1).

### Параметры взрыва пыли

Рост давления при взрыве пыли такой же, как при взрыве газа [4]. В рамках каждого запуска при фиксированной концентрации пыли давление взрыва обозначается как  $p_m$ , а скорость роста давления — как  $(dp/dt)_m$ . Максимальное давление взрыва  $p_m$  определялось как максимальное избыточное давление, возникающее в закрытом сосуде при взрыве взрывоопасной среды, состояние которой в каждом конкретном опыте соответствовало стандартным атмосферным условиям. Величина  $p_{max}$  является максимальным значением давления взрыва  $p_m$ , а  $(dp/dt)_{max}$  — максимальным значением скорости роста давления  $(dp/dt)_m$ , которые

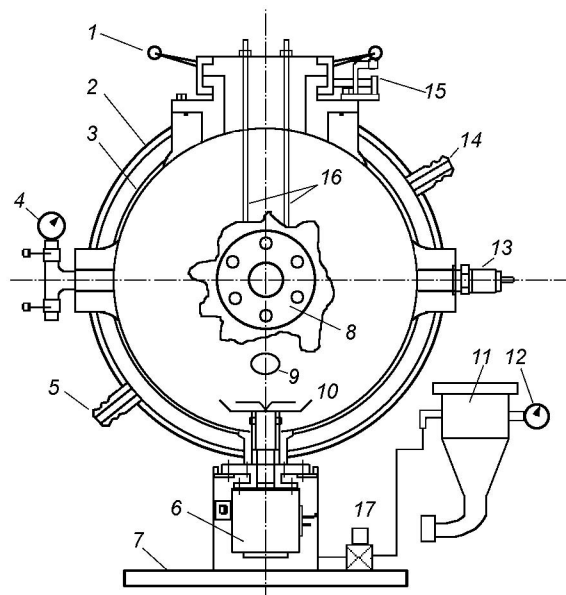


Рис. 1. Схема 20-литровой сферической взрывной камеры:

1 — ручка, 2 — внешняя камера, 3 — внутренняя камера, 4 — вакуумметр, 5 — входное отверстие для рециркуляционной воды, 6 — быстродействующий клапан, 7 — станина, 8 — смотровое окно, 9 — отверстие для ввода газообразного топлива с воздухом, 10 — распылительный клапан, 11 — контейнер с образцами пыли, 12 — датчик выходного сигнала, 13 — датчик давления, 14 — выходное отверстие для рециркуляционной воды, 15 — защитная блокировка, 16 — электрод для зажигания, 17 — электромагнитный клапан

определяли из экспериментов, проводимых во всем диапазоне концентраций пыли, где возможен взрыв.

Поскольку концентрация пыли существенно влияет на параметры взрыва, характеристики, используемые для описания интенсивности взрыва пыли, такие как  $p_{max}$  и максимальная  $(dp/dt)_{max}$ , определяли главным образом при оптимальном соотношении концентраций пыли и воздуха. В целом объем контейнера мало влиял на  $p_{max}$ , но существенно влиял на величину  $(dp/dt)_{max}$  [9–11]. В работе [9] установлено следующее соотношение для случая взрыва пыли в сосуде:

$$(dp/dt)_{max} V^{1/3} = K_{st} = \text{const},$$

где  $V$  — объем сосуда. Константа взрыва пыли  $K_{st}$  зависит в основном от типа топлива. Однако уровень турбулентности взрыва, распределение частиц по размерам и энергия воспламенения также оказывают некоторое влия-

яние. Величина  $K_{st}$  равна максимальной скорости роста давления в цилиндрическом контейнере объемом  $1 \text{ м}^3$ . Она часто используется при сравнении максимальных скоростей роста давления при взрыве, поскольку не зависит от объема контейнера. Таким образом, в некоторой степени интенсивность взрыва пыли может быть описана максимальным давлением взрыва  $p_{\max}$  и константой  $K_{st}$  [11, 12].

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

$p$ - $t$ -Диаграмма взрыва нанопорошков алюминия показана на рис. 2 (размер частиц  $d = 100 \text{ нм}$ , концентрация  $C = 125 \text{ г/см}^3$ ). Взрыв нанопорошков алюминия можно разделить на три стадии:

1) область повышения давления, где тепло, выделяющееся от горения наночастиц алюминия, превышает тепловые потери в окружающую среду, что приводит к повышению давления взрыва;

2) область максимального давления, где значение  $p_{\max}$  сильно зависит от термодинамических характеристик пыли и химической кинетики в целом;

3) область понижения давления, где сказывается влияние потерь энергии в окружающую среду.

На начальном этапе взрыв наночастиц алюминия можно рассматривать как процесс быстрого горения в сочетании с нестационарным двухфазным течением газа и частиц, что

аналогично взрыву обычного порошка алюминия [2, 13]. Тепло, выделяющееся в процессе горения, нагревает несгоревшие частицы за счет конвективного теплопереноса в газе и теплового излучения пламени. Когда температура частиц достигает температуры воспламенения, зона предварительного нагрева становится зоной горения и скорость горения увеличивается с ростом давления. Такие цепные реакции ускоряют распространение пламени до тех пор, пока вся пыль не выгорит, затем давление достигает значения  $p_{\max}$  [5, 14–18].

### Влияние концентрации пыли

На рис. 3 представлена зависимость максимального давления взрыва пылевоздушной смеси нанопорошка алюминия от концентрации пыли. Здесь же для сравнения приведены данные для частиц алюминия обычных размеров. Из рис. 3 следует что максимальное давление взрыва нанопорошков алюминия выше, чем у обычных алюминиевых порошков. Это связано с тем, что частицы большего диаметра сгорают не полностью из-за недостатка кислорода при быстром распространении горения. С уменьшением размера частиц увеличение удельной площади поверхности, доступной кислороду, ускоряет горение частиц, что приводит к росту скорости тепловыделения в процессе горения.

Влияние концентрации на максимальную скорость роста давления  $(dp/dt)_{\max}$  иллюстри-

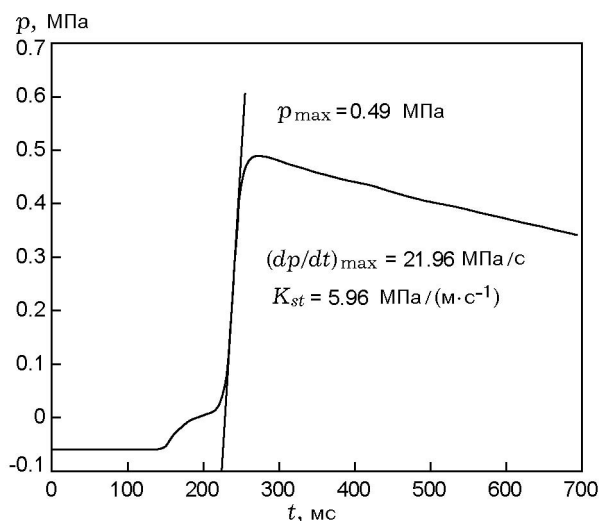


Рис. 2. Изменение давления при взрыве наночастиц алюминия ( $V = 20 \text{ л}$ ,  $C = 125 \text{ г/м}^3$ )

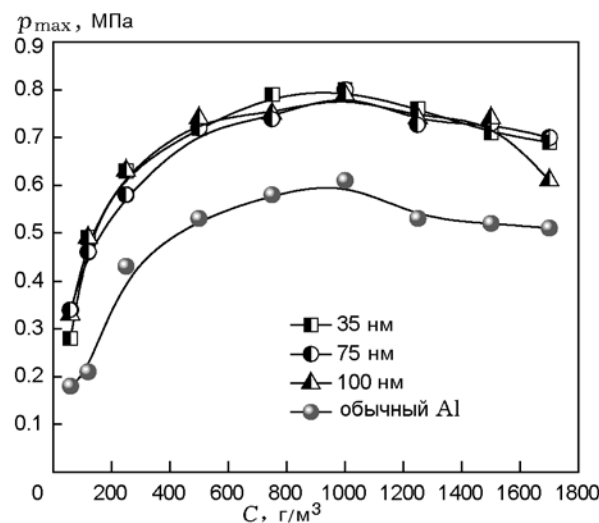


Рис. 3. Влияние концентрации пыли на величину максимального давления

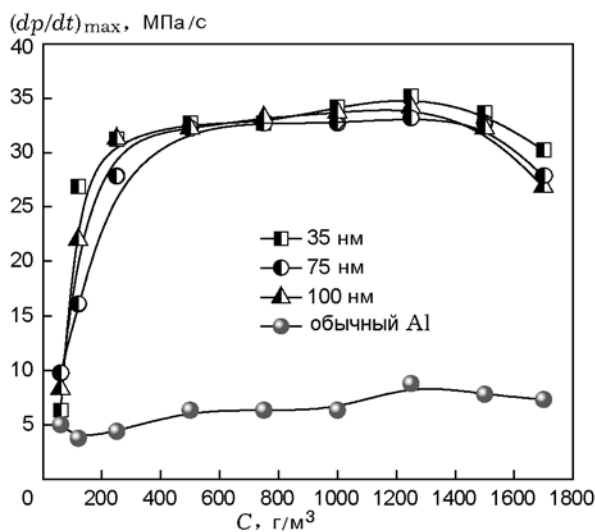


Рис. 4. Влияние концентрации пыли на величину максимальной скорости роста давления

рует рис. 4.

Из экспериментальных данных видно, что взрывные процессы в нанопорошках и обычных порошках алюминия сильно различаются. При одинаковых концентрациях частиц максимальное давление взрыва наночастиц алюминия выше примерно на 0.2 МПа, а максимальная скорость роста давления взрыва больше примерно в  $2 \div 6.5$  раза.

#### Нижний предел взрываемости

Определение нижних пределов взрываемости пыли важно для промышленного производства. Теоретически, взрыва пыли можно избежать только путем регулирования ее концентрации таким образом, чтобы она находилась вне концентрационных пределов воспламенения, т. е. была ниже минимального нижнего предела взрываемости или выше максимального верхнего предела. Последнее условие реализовать сложно: если концентрации лежат вблизи верхнего предела, легко попасть в диапазон воспламенения за счет снижения или неравномерности распределения концентраций частиц в объеме. Поэтому безопасным и эффективным методом обеспечения взрывобезопасности является снижение концентраций пыли ниже минимума нижнего предела взрываемости.

Минимальную концентрацию воспламенения пыли можно установить экспериментально в некотором диапазоне концентраций. В предварительных экспериментах использовали кон-

центрации, кратные  $10 \text{ г/см}^3$ . Если измеряемое (избыточное) давление взрыва равнялось или превышало 0.15 МПа, измерения продолжали с уменьшением уровня концентрации пыли на  $10 \text{ г/см}^3$ , пока во всех трех опытах давление не становилось меньше 0.15 МПа. Напротив, если измеренное давление было меньше 0.15 МПа, эксперимент продолжали с увеличением уровня концентрации пыли на  $10 \text{ г/см}^3$ , пока в трех экспериментах давление не становилось равным или больше 0.15 МПа. Измеренный нижний предел взрываемости  $C_{min}$  образцов пыли находился между  $C_1$  (максимальная концентрация пыли в трех последовательных опытах, в которых давление было меньше 0.15 МПа) и  $C_2$  (минимальная концентрация пыли в трех последовательных опытах, в которых давление было выше 0.15 МПа), так что

$$C_1 < C_{min} < C_2.$$

Если концентрации пыли в экспериментах превышали  $100 \text{ г/см}^3$ , уровень концентрации увеличивался или уменьшался на  $20 \text{ г/см}^3$  во время последующих экспериментов.

В настоящей работе в качестве предварительно тестируемой концентрации выбрано значение  $60 \text{ г/см}^3$ . Из практических соображений шаг по концентрации нанопорошков алюминия взят равным 5 и  $1 \text{ г/см}^3$ . Экспериментальные результаты, полученные вышеописанным методом, представлены в таблице.

Очевидно, что нижний концентрационный предел воспламенения наночастиц алюминия намного ниже, чем у обычного алюминиевого порошка. Это имеет некоторую связь с различием размеров, физических и химических свойств порошков. Но полной уверенности нет, требуются дальнейшие и более глубокие исследования. Следовательно, проведение экспериментов по изучению взрывобезопасности нанопорошков алюминия представляется более сложным.

Нижний предел взрываемости различных частиц размеров

Размер частиц, нм	Нижний предел взрываемости, г/м <sup>3</sup>
35	5
75	10
100	10
Обычный алюминий	50

## ВЫВОДЫ

• При взрыве нанопорошков алюминия максимальное давление примерно на 0.2 МПа выше, а максимальная скорость роста давления примерно в  $2 \div 6.5$  раза больше, чем у обычных алюминиевых порошков при тех же концентрациях.

• Показано, что нижние концентрационные пределы взрываемости нанопорошков алюминия с размерами частиц 35, 75 и 100 нм составляют около 5, 10 и 10 г/см<sup>3</sup> соответственно. Это гораздо ниже значений для обычных алюминиевых порошков — 50 г/см<sup>3</sup>.

## ЛИТЕРАТУРА

1. American Society for Metals: Metals Handbook. 9 Ed. / Translated by Feng-lin Han et al. — Beijing, China: Mechanical Industry Press, 1994. — V. 7.
2. Fan B. C., Ding D. Y., Tang Y. K., et al. The investigation of aluminum dust explosion in a spherical closed vessel // Explosion and Shock. — 1994. — V. 14, N 2. — P. 148–156.
3. Wang P. L., Wang F., Li S., et al. Study on explosion pressure and rate of pressure rise of energetic materials // Ordnance J. — 1995. — V. 16, N 3. — P. 59–63.
4. Chen W. H., Song S. Z., Hu Y. T., et al. Study on dust explosion characteristics of aluminum and RDX // Energetic Mater. — 2003. — V. 11, N 2. — P. 91–93.
5. Deng K. Q., Wang G. T., Wang G. L. Combustion characteristics and combustion model of superfine aluminum // Solid Rocket Technol. — 1996. — V. 19, N 1. — P. 28–34.
6. Архипов В. А., Горбенко М. В., Горбенко Т. И., Савельева Л. А. Влияние ультрадисперсного алюминия на горение смесевых твердых топлив при субатмосферных давлениях // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 1. — С. 47–55.
7. Bartknecht W. Dust Explosions. — Springer, 1990.
8. Eckhoff R. Dust Explosions in the Process Industry. — Elsevier, 2003.
9. Zhao H. Y. The Principles of Gas and Dust Explosion. — Beijing, China: Binjing Inst. of Technology Press, 1995.
10. Hertzberg M., Cashdollar K. L. Knowledge introduction of dust explosion // Explosion-Proof Motor. — 1994. — N 1. — P. 42–51.
11. Explosion-proof and governance of industrial dust. — Beijing, China: Chinese Science and Technology Publ. House, 1990.
12. Zhang S. Z. Basal Principles of Explosions. — Beijing, China: Defense Industry Press, 1988.
13. Liu Q. M., Bai C. H. Explosion induced by combustion of aluminum dust cloud and pentance vapor // J. of Beijing Inst. of Technol. — 1999. — V. 19, N 5. — P. 567–568.
14. Wang G. L., Li S. F., Xia Q., et al. Study on burning capability of superfine aluminum // Ordnance J. — 1996. — V. 17, N 2. — P. 23–26.
15. Liu X. L., Li H. Z., Guo J. G., et al. Experimental study on process of deflagration to detonation of aluminum powder-air mixture // Explosion and Shock. — 1995. — V. 15, N 3. — P. 217–227.
16. Jin L. J., Deng K. Q., Wang G. T., et al. Preliminary study on combustion hot-nature of superfine aluminum // Propulsion Technol. — 1993. — N 6. — P. 68–72.
17. Lin H. M., Yu D. Y., Chen Y. Y. Explosion and countermeasures of magnalium // Light Alloy Processing Technol. — 2001. — V. 29, N 9. — P. 47–48.
18. Hong T., Qin C. S. Numerical simulation on explosion of aluminum in the shock tube // Explosion and Shock. — 2004. — V. 24, N 3. — P. 193–199.

*Поступила в редакцию 10/X 2009 г.,  
в окончательном варианте — 16/III 2010 г.*