

ПЕРЕДАЧА ГОРЕНИЯ В ВЫСОКОПОРИСТЫХ НАНОТЕРМИТАХ ЧЕРЕЗ ИНЕРТНЫЕ ПРЕГРАДЫ

В. Г. Кириленко¹, А. Ю. Долгобородов², М. А. Бражников³

Аннотация: Представлены результаты экспериментального исследования с помощью высокоскоростной видеосъемки распространения горения нанотермитов (НТ) Al/CuO через инертные преграды в замкнутых оболочках (трубках) из кварцевого стекла. В качестве инертных преград были использованы вискоза и воздушные промежутки. При прохождении преграды из вискозы скорость распространения светящегося фронта (которую авторы связывают со скоростью горения) заметно падала, но после входа в НТ — восстанавливалась до исходной величины. Что касается воздушных промежутков, то при разлете в воздух скорость увеличивалась в 2–3 раза, затем устанавливался обычный режим распространения. Наличие в трубке с термитной смесью воздушных промежутков позволяет значительно снизить массу этой смеси при незначительном уменьшении средней скорости горения по сравнению с полностью заполненной трубкой той же длины.

Ключевые слова: нанотермиты; инертная преграда; пористость; градиент давления; горение

DOI: 10.30826/CE23160308

EDN: MUTZCD

Литература

1. *Pantoya M., Granier J.* The effect of slow heating rates on the reaction mechanisms of nano and micron composite thermite reactions // *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2006. Vol. 85. P. 37–43. doi: 10.1007/s10973-005-7342-z.
2. *Energetic nanomaterials: Synthesis, characterization, and application* / Eds. V. E. Zarko, A. A. Gromov. — Amsterdam: Elsevier, 2016. 485 p.
3. *Nano-energetic materials: Energy, environment and sustainability* / Eds. S. Bhattacharya, A. K. Agarwal, T. Rajagopalan, V. K. Patel. — 1st ed. — Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. 305 p.
4. *Yetter R. A.* Progress towards nanoengineered energetic materials // *P. Combust. Inst.*, 2021. Vol. 38. No. 1. P. 57–81. doi: 10.1016/j.proci.2020.09.008.
5. *Polis M., Stolarczyk A., Glosz K., Jarosz T., Vadis Q.* Nanothermite? A review of recent progress // *Materials*, 2022. Vol. 15. No. 9. P. 3215. doi: 10.3390/ma15093215.
6. *Weismiller M. R., Malchi J. Y., Yetter R. A., Foley T. J.* Dependence of flame propagation on pressure and pressurizing gas for an Al/CuO nanoscale thermite // *P. Combust. Inst.*, 2009. Vol. 32. P. 1895–1903. doi: 10.1016/j.proci.2008.06.191.
7. *Densmore J. M., Sullivan K. T., Gash A. E., Kuntz J. D.* Expansion behavior and temperature mapping of thermites in burn tubes as a function of fill length // *Propell. Explos. Pyrot.*, 2014. Vol. 39. P. 416–422. doi: 10.1002/prep.201400024.
8. *Egan G., Zachariah M.* Commentary on the heat transfer mechanisms controlling propagation in nanothermites // *Combust. Flame*, 2015. Vol. 162. Iss. 7. P. 2959–2961. doi: 10.1016/j.combustflame.2015.04.013.
9. *Baijot V., Rouhani M., Rossi C., Esteve A.* A multi-phase micro-kinetic model for simulating aluminum-based thermite reactions // *Combust. Flame*, 2017. Vol. 180. P. 10–19. doi: 10.1016/j.combustflame.2017.02.031.
10. *Jacob R., Kline D., Zachariah M.* High speed 2-dimensional temperature measurements of nanothermite composites: Probing thermal vs. gas generation effects // *J. Appl. Phys.*, 2018. Vol. 123. Iss. 11. doi: 10.1063/1.5021890.
11. *Wang Y., Dai Ji, Xu J., Shen Y., Wang Ch., Ye Y., Shen R.* Experimental and numerical investigations of the effect of charge density and scale on the heat transfer behavior of Al/CuO nano-thermite // *Vacuum*, 2021. Vol. 184. doi: 10.1016/j.vacuum.2020.109878.
12. *Dolgorodov A. Yu., Kirilenko V. G., Brazhnikov M. A., Grishin L. I., Kuskov M. L., Valyano G. E.* Ignition of nanothermites by a laser diode pulse // *Defence Technology*, 2022. Vol. 18. No. 2. P. 194–204. doi: 10.1016/j.dt.2021.01.006.
13. *Кириленко В. Г., Гришин Л. И., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А., Кусков М. Л., Вальяно Г. Е.* Особенности горения нанотермитов на основе нано-алюминия при лазерном инициировании // *Горение и взрыв*, 2022. Т. 15. № 1. С. 82–97.
14. *Sanders V., Asay B., Foley T., Tappan B., Pacheco A., Son S.* Reaction propagation of four nanoscale energetic compos-

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, vladkiril@gmail.com

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Объединенный институт высоких температур Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», aldol@ihed.ras.ru

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, birze@inbox.ru

- ites (Al/MoO₃, Al/WO₃, Al/CuO, and Bi₂O₃) // J. Propul. Power, 2007. Vol. 23. P. 707–714. doi: 10.2514/1.26089.
15. Sullivan K., Zachariah M. R. Simultaneous pressure and optical measurements of nanoaluminum thermites: Investigating the reaction mechanism // J. Propul. Power, 2010. Vol. 26. P. 467–472. doi: 10.2514/1.45834.
 16. Saceleanu F., Idir M., Chaumeix N., Wen J. Z. Combustion characteristics of physically mixed 40 nm aluminum/copper oxide nanothermites using laser ignition // Front. Chem., 2018. Vol. 6. Article 465. doi: 10.3389/fchem.2018.00465.
 17. Jabraoui H., Esteve A., Schoenitz M., Dreizin E., Rossi C. Atomic scale insights into the first reaction stages prior to Al/CuO nanothermite ignition: Influence of porosity // ACS Appl. Mater. Inter., 2022. Vol. 14. No. 25. P. 29451–29461. doi: 10.1021/acami.2c07069.
 18. Guen M. Y., Miller A. V. Method for production of metal aerosols. SU Patent 814432, 1961.
 19. Kuskov M. L., Zhigach A. N., Leipunskii I. O., Gorbachev A. N., Afanasenkova E. S., Safronova O. A. Combined equipment for synthesis of ultrafine metals and metal compounds powders via flow-levitation and crucible methods // IOP Conf. Ser. — Mat. Sci., 2019. P. 558:012022. doi: 10.1088/1757-899X/558/1/012022.
 20. Streletskii A. N., Kolbanev I. V., Vorobieva G. A., Dolgoborodov A. Y., Kirilenko V. G., Yankovskii B. D. Kinetics of mechanical activation of Al/CuO thermitite // J. Material Sci., 2018. Vol. 53. No. 19. P. 13550–13559. doi: 10.1007/s10853-018-2412-3.
 21. Долгобородов А. Ю., Кириленко В. Г., Стрелецкий А. Н., Колбанев И. В., А. А. Шевченко А. А., Янковский Б. Д., Ананьев С. Ю., Вальяно Г. Е. Механоактивированный термитный состав Al/CuO // Горение и взрыв, 2018. Т. 11. № 3. С. 117–124.
 22. Кириленко В. Г., Гришин Л. И., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А. Лазерное инициирование нанотермитов Al/CuO и Al/Bi₂O₃ // Горение и взрыв, 2020. Т. 13. № 1. С. 145–155.
 23. Li Yong, Li Jian, Liu Xian, Wu Bei. Test and analysis of the porosity of cotton fiber assembly // J. Eng. Fiber. Fabr., 2021. Vol. 16. P. 1–7. doi: 10.1177/15589250211024225.

Поступила в редакцию 28.12.2022