

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ К УДАРУ: ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ЭНЕРГИИ, ПЕРЕДАЮЩЕЙСЯ ОБРАЗЦУ

К. А. Моногаров¹, Н. В. Муравьев², Д. Б. Мееров³, И. В. Фоменков⁴, А. Н. Пивкина⁵

Аннотация: Известно, что чувствительность к удару не является исключительно внутренним свойством соединения, а зависит от множества факторов, определяемых химическими и физическими свойствами образца, а также типом прибора и условиями измерения. Поэтому сравнение данных по чувствительности, полученных на различных приборах и по разным методикам, затруднено. Более того, даже при использовании однотипных приборов, но разными лабораториями расхождения могут быть существенными. Основываясь на исследованиях, выполненных почти 90 лет назад, в работе предложена относительно простая, но универсальная методика с использованием копра типа ВАМ (Bundesanstalt für Materialforschung), модифицированного для измерения скорости падения и отскока груза. Комбинируя результаты холостых опытов и опытов с образцом энергетического материала (ЭМ) получены абсолютные значения величины энергии, передаваемой образцу и поглощаемой им при энергии удара, соответствующей порогу инициирования. Получаемый во время испытаний энергетический баланс показывает важность своевременного технического обслуживания прибора, так как величина энергии, поглощаемая испытательным прибором, имеющим даже незначительные механические поломки, может сильно возрасти по сравнению с исправным состоянием. Предлагаемая методика позволяет оценить разницу между полной энергией груза, принимаемой в качестве характеристики чувствительности, и реальными значениями энергии, переданной образцу при ударе и поглощенной образцом. Сделан вывод о том, что полученные значения энергии, поглощенной образцом на пороге инициирования, являются более релевантными характеристиками материалов, чем величина полной энергии груза, соответствующая 50%-ной вероятности инициирования реакции в образце.

Ключевые слова: чувствительность к удару; энергетический материал; ВАМ Fallhammer

DOI: 10.30826/CE23160210

EDN: OAYEPD

Выражаем благодарность доктору химических наук Л. Л. Ферштату (ИОХ РАН) за материалы, предоставленные для исследования.

Литература

1. *Licht H.-H.* Performance and sensitivity of explosives // *Propell. Explos. Pyrot.*, 2000. Vol. 25. P. 126–132. doi: 10.1002/1521-4087.
2. *Fried L. E., Manaa M. R., Pagoria P. F., Simpson R. L.* Design and synthesis of energetic materials // *Annu. Rev. Mater. Res.*, 2001. Vol. 31. P. 291–321. doi: 10.1146/annurev.matsci.31.1.291.
3. *Zeman S., Jungová M.* Sensitivity and performance of energetic materials // *Propell. Explos. Pyrot.*, 2016. Vol. 41. P. 426–451. doi: 10.1002/prep.201500351.
4. *Zhang C.* On the energy & safety contradiction of energetic materials and the strategy for developing low-sensitive high-energetic materials // *Hanneng Cailiao / Chinese J. Energetic Materials*, 2018. Vol. 26. P. 2–10. doi: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.01.001.
5. *Muravyev N. V., Meerov D. B., Monogarov K. A., Melnikov I. N., Kosareva E. K., Fershtat L. L., Sheremetev A. B., Dalinger I. L., Fomenkov I. V., Pivkina A. N.* Sensitivity of energetic materials: Evidence of thermodynamic factor on a large array of CHNOFCl compounds // *Chem. Eng. J.*, 2021. Vol. 421. P. 129804. doi: 10.1016/j.cej.2021.129804.
6. *Muravyev N. V., Wozniak D. R., Piercey D. G.* Progress and performance of energetic materials: Open dataset, tool, and implications for synthesis // *J. Mater. Chem. A*, 2022. Vol. 10. P. 11054–11073. doi: 10.1039/D2TA01339H.
7. STANAG 4489. Explosives, impact sensitivity tests. — Brussels: NATO, 1999.

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, kostyk3d@mail.ru

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, muravyev.nikita@ya.ru

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

⁴Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского Российской академии наук, ootx@ineos.ac.ru

⁵Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, alla_pivkina@mail.ru

8. *Simpson L. R., Foltz M. F.* LLNL small-scale drop-hammer impact sensitivity test. Department of Energy, Lawrence Livermore National Laboratory, 1995. Report UCRL-ID-119665. 30 p.
9. U.K. Manual of Tests. Sensitiveness Collaboration Committee (SCC No. 3), 1988.
10. ГОСТ 4545-88. Вещества взрывчатые бризантные. Методы определения характеристик чувствительности к трению при ударном сдвиге. — М.: Госстандарт России, 1996. 15 с.
11. *Боуден Ф. Л., Иоффе А. Д.* Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах / Пер. с англ. — М.: ИЛ, 1955. 119 с. (*Bowden F. P., Yoffe A. D.* Initiation and growth of explosion in liquids and solids. — Cambridge University Press, 1952. 104 p.)
12. *Афанасьев Г. Т., Боболев В. К.* Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. — М.: Наука, 1968. 172 с.
13. *Mullenger D. C.* European impact sensitiveness assessment of solid energetic materials // 14th Pyrotechnics Seminar (International) Proceedings. — Jersey, Channel Islands, U.K., 1989. P. 293.
14. *Coffey C. S., DeVost V. F.* Impact testing of explosives and propellants // Propell. Explos. Pyrot., 1995. Vol. 20. P. 105–115. doi: 10.1002/prep.19950200302.
15. *Zeman S.* Sensitivities of high energy compounds // High energy density materials / Ed. T. M. Klapötke. — Berlin–Heidelberg: Springer, 2007. P. 195–271.
16. *Дубовик А. В.* Чувствительность твердых взрывчатых систем к ударам. — М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2011. 276 с.
17. *Marrs F. W., Manner V. W., Burch A. C., Yeager J. D., Brown G. W., Kay L. M., Buckley R. T., Anderson-Cook C. M., Cawkwell M. J.* Sources of variation in drop-weight impact sensitivity testing of the explosive pentaerythritol tetranitrate // Ind. Eng. Chem. Res., 2021. Vol. 60. P. 5024–5033. doi: 10.1021/acs.iecr.0c06294.
18. *Lee P. R.* Hazard assessment of explosives and propellants // Explosive effects and applications. High-pressure shock compression of condensed matter / Eds. J. A. Zukas, W. Walters. — New York, NY, USA: Springer, 1998. P. 259–339.
19. *Кондриков Б. Н.* Общие закономерности инициирования взрыва при определении чувствительности взрывчатых веществ к ударам и трению // Физика горения и взрыва, 1995. Т. 31. № 2. С. 80–90.
20. *Brown G. W., Sandstrom M. M., Preston D. N., Pollard C. J., Warner K. F., Sorensen D. N., Remmers D. L., Phillips J. J., Shelley T. J., Reyes J. A., Hsu P. C., Reynolds J. G.* Statistical analysis of an inter-laboratory comparison of small-scale safety and thermal testing of RDX // Propell. Explos. Pyrot., 2015. Vol. 40. P. 221–232. doi: 10.1002/prep.201400191.
21. *Walley S. M., Field J. E., Greenaway M. W.* Crystal sensitivities of energetic materials // Materials Sci. Tech. — Lond., 2006. Vol. 22. Iss. 4. P. 402–413. doi: 10.1179/174328406X91122.
22. *Von Oertzen A., Lehmann T.* Considerations on energy deposition with the BAM-Fallhammer // Cent. Eur. J. Energ. Mat., 2016. Vol. 13. P. 273–288. doi: 10.22211/cejem/64955.
23. *Харитон Ю. Б.* Сборник по теории взрывчатых веществ. — М.: Оборонгиз, 1940. 177 с.
24. *Холеев Н. А.* Чувствительность взрывчатых веществ к удару / Под ред. А. Е. Переверзева, В. С. Орешина. — М.: Машиностроение, 1974. 136 с.
25. *Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И.* Физика взрыва. — М.: Физматгиз, 1959. 800 с.
26. *Coffey C. S., DeVost V. F., Yergey B. A.* Critical initiation energy in at least some propellants and explosives subject to impact // JANNAF Propulsion Systems Hazards Subcommittee Meeting Proceedings. — Chemical Propulsion Information Agency Publ., 1986. Vol. 1. P. 579–585.
27. *Mellor A. M., Stoops D. R., Rudy T. P., Hermsen R. W.* Optimization of spark and ESD propellant sensitivity tests: A review // Propell. Explos. Pyrot., 1990. Vol. 15. P. 1–7. doi: 10.1002/prep.19900150102.
28. *Baker P. J., Mellor A. M., Coffey C. S.* Critical impact initiation energies for three HTPB propellants // J. Propul. Power, 1992. Vol. 8. P. 578–585. doi: 10.2514/3.23517.
29. *Пепекин В. И., Лебедев Ю. А.* Критерии оценки параметров детонации для взрывчатого вещества // Докл. Акад. наук СССР, 1977. Т. 234. С. 1391–1394.
30. *Storm C. B., Stine J. R., Kramer J. F.* Sensitivity relationships in energetic materials // Chemistry and physics of energetic materials / Ed. S. N. Bulusu. — Dordrecht, Netherlands: Springer, 1990. P. 605–639.
31. *Keshavarz M. H., Klapötke T. M.* The properties of energetic materials, sensitivity, physical and thermodynamic properties. — 1st ed. — Berlin, Boston: De Gruyter, 2018. 208 p.
32. *Lansford J. L., Barnes B. C., Rice B. M., Jensen K. F.* Building chemical property models for energetic materials from small datasets using a transfer learning approach // J. Chem. Inf. Model., 2022. doi: 10.1021/acs.jcim.2c00841.
33. *Dixon W. J., Mood A. M.* A method for obtaining and analyzing sensitivity data // J. Am. Stat. Assoc., 1948. Vol. 43. P. 109–126.
34. *Šelešový J., Pachman J.* Probit analysis — a promising tool for evaluation of explosive's sensitivity // Cent. Eur. J. Energ. Mat., 2010. Vol. 7. P. 269–278.

Поступила в редакцию 16.03.2023