

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЖИГОВОЙ ПЕЧИ НА ПРИНЦИПЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВ*

А. И. Кирдяшкин¹, Р. М. Габбасов², В. Д. Китлер³, А. С. Мазной⁴

Аннотация: Разработка энергоэффективных высокотемпературных печей важна для удешевления производства изделий из тугоплавких керамических материалов. В данной работе экспериментально изучен прототип печи, в которой объем камеры заполнен засыпкой керамических шаров, а источником энергии является горение предварительно перемешанных смесей природного газа с воздухом и кислородом. Архитектура печи позволяет применять два режима горения: (1) фильтрационное горение, когда узкая реакционная зона (волна горения) свободно распространяется по засыпке; (2) принудительная аэродинамическая стабилизация зоны горения вблизи отверстий ввода смеси в объем засыпки. С помощью методов термопарного и спектрометрического измерения температуры экспериментально исследованы режимы работы печи в диапазоне удельных расходов природного газа от 70 до 1070 нл/с/м², коэффициента избытка топлива от 0,4 до 3,3, концентрации кислорода в окислителе от 21 до 30 % (об.). В данных диапазонах обеспечена регулировка температуры засыпки от 1230 до 2220 К. При температуре 2170 К проведено тестовое спекание порошковых образцов из оксида магния, оксида алюминия и шпинели MgAl₂O₄. Установлено, что спекание в режиме движущейся волны горения эффективно для получения изделий с характерным размером до 10 мм. В этом случае засыпка может быть полностью сформирована из образцов, которые подлежат спеканию. Режим принудительной стабилизации эффективен для спекания крупноформатных изделий. Новая печь на принципах горения природного газа в пористой инертной среде может быть востребована для мелкосерийного изготовления керамических изделий.

Ключевые слова: фильтрационное горение; пористая среда; спекание; керамика

DOI: 10.30826/CE20130406

Литература

1. Yang S. I., Wu M. S. Properties of premixed hydrogen/propane/air flame in ceramic granular beds // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2014. Vol. 39. No. 30. P. 17347–17357.
2. Sirotkin F., Fursenko R., Kumar S., Minaev S. Flame anchoring regime of filtration gas combustion: Theory and experiment // *P. Combust. Inst.*, 2017. Vol. 36. No. 3. P. 4383–4389. doi: 10.1016/J.PROCI.2016.06.006.
3. Wang Y., Zeng H., Shi Y., Cai N. Methane partial oxidation in a two-layer porous media burner with Al₂O₃ pellets of different diameters // *Fuel*, 2018. Vol. 217. P. 45–50. doi: 10.1016/J.FUEL.2017.12.088.
4. Howell J. R. R., Hall M. J. J., Ellzey J. L. L. Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media // *Prog. Energ. Combust.*, 1996. Vol. 22. No. 2. P. 121–145. doi: 10.1016/0360-1285(96)00001-9.
5. Ellzey J. L., Belmont E. L., Smith C. H. Heat recirculating reactors: Fundamental research and applications // *Prog. Energ. Combust.*, 2019. Vol. 72. P. 32–58.
6. Kennedy L. A. A., Saveliev A. V. V., Bingue J. P. P., Fridman A. A. A. Filtration combustion of a methane wave in air for oxygen-enriched and oxygen-depleted environments // *P. Combust. Inst.*, 2002. Vol. 29. No. 1. P. 835–841. doi: 10.1016/S1540-7489(02)80107-9.
7. Wang H., Wei C., Zhao P., Ye T. Experimental study on temperature variation in a porous inert media burner for premixed methane air combustion // *Energy*, 2014. Vol. 72. P. 195–200. doi: 10.1016/j.energy.2014.05.024.
8. Shakiba S. A., Ebrahimi R., Shams M., Yazdanfar Z. Effects of foam structure and material on the performance of premixed porous ceramic burner // *P. I. Mech. Eng. A — J. Pow.*, 2015. Vol. 229. No. 2. P. 176–191. doi: 10.1177/0957650914558166.
9. Sobhani S., Mohaddes D., Boigne E., Muhunthan P., Ihme M. Modulation of heat transfer for extended flame stabilization in porous media burners via topology gradation // *P. Combust. Inst.*, 2019. Vol. 37. No. 4. P. 5697–5704. doi: 10.1016/J.PROCI.2018.05.155.
10. Bone W. A. Surface combustion // *J. Frankl. Inst.*, 1912. Vol. 173. No. 2. P. 101–131. doi: 10.1016/S0016-0032(12)91018-2.
11. Cheng Z., Yang J., Zhou L., Liu Y., Wang Q. Characteristics of charcoal combustion and its effects on iron-ore

* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ для ТНЦ СО РАН при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-48-700037).

¹Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, kirdyashkin_a@mail.ru

²Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, ramilus@yandex.ru

³Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, vladimir.kitler@mail.ru

⁴Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, maznoy_a@mail.ru

- sintering performance // *Appl. Energ.*, 2016. Vol. 161. P. 364–374. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.09.095.
12. *Ripoll N., Silvestre C., Paredes E., Toledo M.* Hydrogen production from algae biomass in rich natural gas – air filtration combustion // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2017. Vol. 42. No. 8. P. 5513–5522. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.03.082.
13. *Lóh N. J., Simão L., Faller C. A., De Noni A., Montedo O. R. K.* A review of two-step sintering for ceramics // *Ceram. Int.*, 2016. Vol. 42. No. 11. P. 12556–12572. doi: 10.1016/j.ceramint.2016.05.065.
14. *García D. E., Hotza D., Janssen R.* Building a sintering front through fast firing // *Int. J. Appl. Ceram. Tec.*, 2011. Vol. 8. No. 6. P. 1486–1493. doi: 10.1111/j.1744-7402.2011.02609.x.
15. *German R.* Sintering: From empirical observations to scientific principles. — Elsevier Inc., 2014. 536 p. doi: 10.1016/C2012-0-00717-X.
16. *Todd R. I.* Flash sintering of ceramics: A short review // 4th Advanced Ceramics and Applications Conference Proceedings / Eds. B. Lee, R. Gadow, V. Mitic. — Atlantic Press, 2017. P. 1–12. doi: 10.2991/978-94-6239-213-7_1.
17. *Gulyaev I. P., Dolmatov A. V.* Spectral-brightness pyrometry: Radiometric measurements of non-uniform temperature distributions // *Int. J. Heat Mass Tran.*, 2018. Vol. 116. P. 1016–1025. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.084.
18. *Magunov A. N.* Spectral pyrometry (review) // *Instrum. Exp. Tech.*, 2009. Vol. 52. No. 4. P. 451–472. doi: 10.1134/S0020441209040010.
19. *Salamatov V. G., Kirdyashkin A. I., Kitler V. D., Gabbasiov R. M.* Combustion of composite Ni–Al fibers // *J. Phys. Conf. Ser.*, 2018. Vol. 1115. No. 4. P. 42033. doi: 10.1088/1742-6596/1115/4/042033.
20. *Maznoy A., Kirdyashkin A., Kitler V., Pichugin N., Salamatov V., Tcoi K.* Self-propagating high-temperature synthesis of macroporous B₂ + L₁₂ Ni–Al intermetallics used in cylindrical radiant burners // *J. Alloy. Compd.*, 2019. Vol. 792. P. 561–573. doi: 10.1016/j.jallcom.2019.04.023.
21. *Bakry A., Al-Salaymeh A., Al-Muhtaseb A. H., Abu-Jrai A., Trimis D.* Adiabatic premixed combustion in a gaseous fuel porous inert media under high pressure and temperature: Novel flame stabilization technique // *Fuel*, 2011. Vol. 90. No. 2. P. 647–658. doi: 10.1016/j.fuel.2010.09.050.
22. *Catapan R. C., Oliveira A. A. M., Costa M.* Non-uniform velocity profile mechanism for flame stabilization in a porous radiant burner // *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2011. Vol. 35. No. 1. P. 172–179. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2010.08.017.
23. *Moffat R. J.* Describing the uncertainties in experimental results // *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 1988. Vol. 1. No. 1. P. 3–17. doi: 10.1016/0894-1777(88)90043-x.
24. *Goodwin D. G., Speth R. L., Moffat H. K., Weber B. W.* Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes, 2018. doi: 10.5281/zenodo.1174508.
25. *Smith G. P., Golden D. M., Frenklach M., Moriarty N. W., Eiteneer B., Goldenberg M., Bowman C. T., Hanson R. K., Song S., Gardiner W. C., Jr., Lissianski V. V., Qin Z.* GRI-Mech 3.0. http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
26. *Zhdanok S., Kennedy L. A., Koester G.* Superadiabatic combustion of methane air mixtures under filtration in a packed bed // *Combust. Flame*, 1995. Vol. 100. No. 1-2. P. 221–231. doi: 10.1016/0010-2180(94)00064-y.

Поступила в редакцию 14.11.2020