

УДК 536.46

УЛУЧШЕНИЕ ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТИ И РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ БОРА ЗА СЧЕТ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ

J. Liu, D. Q. Wang, Z. M. Zhang, F. S. Li

National Special Superfine Powder Engineering Research Center of China, School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, 210094 Nanjing, P. R. China, jie_liu_njust@126.com

Бор является одним из наиболее ценных компонентов ракетного топлива. Однако высокая температура кипения оксида бора (B_2O_3) на его поверхности ($1860^\circ C$) затрудняет контакт между активным бором и окислителем в ходе процессов горения и воспламенения. В результате энергия воспламенения бора оказывается выше, а скорость горения — ниже. Для повышения эффективности воспламенения, а также реакционной способности бора его поверхность была модифицирована путем очистки растворителем, наращивания поверхности, а также изготовления его композита с алюминием, имеющим высокую температуру кипения. Композитные частицы, состоящие из бора, очищенного при помощи этанола, и толстых хлопьев алюминия, обозначаемые EB/TF-Al, продемонстрировали наилучшую реакционную способность, на 96.6 % большую в сравнении с композитными частицами, состоящими из чистого бора и толстых хлопьев алюминия (RB/TF-Al). Композитные частицы, состоящие из бора с наращенной поверхностью и толстых хлопьев алюминия (KHB-3/TF-Al), имеют минимальную энергию воспламенения, на 29.1 % ниже в сравнении с чистым бором. Поскольку модификация поверхности бора приводит к улучшению воспламеняемости, а также к увеличению его реакционной способности, ожидается, что такой подход позволит улучшить характеристики ракетного топлива на основе бора.

Ключевые слова: бор, модификация поверхности, энергия воспламенения, скорость реакции, ракетное топливо на основе бора.

DOI 10.15372/FGV2022.9250
EDN EFEWAW

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- В — бор,
RB — необработанный бор,
WB — бор, поверхность которого очищена водой,
EB — бор, поверхность которого очищена этанолом,
EAB — бор, поверхность которого очищена этилацетатом,
KHB — бор с наращенной поверхностью,
AP — перхлорат аммония,
KH550 — 3-аминопропилтриэтоксисилан,
RAI — необработанный алюминий,
TF-Al — алюминий в виде толстых хлопьев,
XPS — рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия,
FESEM — полевая эмиссионная сканирующая электронная микроскопия,
DSC — дифференциальная сканирующая калориметрия,
TG — термогравиметрия.

ВВЕДЕНИЕ

Ракетные топлива оказывают критическое влияние на качество ракетных двигателей и их эксплуатационные характеристики [1–3]. Согласно классификации по добавкам, ракетные топлива делятся на топлива на основе алюминия, магния и бора [4–8]. Теоретически рассчитанное самое большое количество тепла выделяется при использовании богатых смесей топлива на основе В [9–11]. Однако слой оксида B_2O_3 на поверхности В, характеризуемый сильно различающимися температурами плавления ($450^\circ C$) и кипения ($1860^\circ C$), блокирует контакт активного В и окислителя [12–14]. В ходе воспламенения частиц В возможны испарение B_2O_3 и диффузия внутреннего активного В и окислителя внутри оксида B_2O_3 [15–17]. Вследствие контакта активного В и окислителя происходит химическая реакция [18, 19]. Однако температура кипения B_2O_3 слишком высока для того, чтобы данное вещество испарилось, что замедляет скорость диффузии В и окислителя в оксиде B_2O_3 [20, 21]. Таким образом, бор плохо воспламеняется и имеет низкую скорость горения.

Для решения проблем высокой энергии воспламенения и низкой реакционной способности В, возникающих из-за образования B_2O_3 , были разработаны и исследованы подходы, заключающиеся в очистке поверхности, наращивании поверхности и изготовлении композита с реакционноспособными толстыми хлопьями алюминия (TF-Al) [22]. Процедуры очистки и наращивания поверхности позволили бы сократить содержание B_2O_3 на поверхности В и тем самым уменьшить влияние B_2O_3 на процессы горения и воспламенения В. Кроме того, TF-Al характеризуется большой удельной поверхностью и высоким содержанием реакционноспособного Al, что может ускорить процесс газификации B_2O_3 на поверхности В за счет тепла, выделяющегося при горении.

Оксид B_2O_3 на поверхности В легко поглощает влагу из воздуха, образуя борную кислоту ($B(OH)_3$). Бор не растворим в воде, кислоте, этаноле, эфирах и т. д., в то время как B_2O_3 и $B(OH)_3$ растворимы в воде, этаноле и этилацетате. Таким образом, вода, этанол и этилацетат способны удалить примеси с поверхности В без потери активного компонента внутри [12, 23, 24].

3-аминопропилтриэтиоксисилан (KH550) является широко используемым модификатором поверхности [25–27]. В ходе химической реакции KH550 с примесями на поверхности В (B_2O_3 и $B(OH)_3$) органические группы соединяются с поверхностью В, изменяя тем самым состав и свойства его поверхности.

Более того, присоединенные группы на поверхности могут увеличить силу взаимодействия частиц, что сделает соединение композитных частиц В/Al более плотным. Таким образом, эффективность переноса массы и тепла между частицами увеличивается, и, следовательно, воспламеняемость и реакционная способность В улучшаются. Температура горения Al очень высокая по сравнению с другими топливами на основе металлов, что может способствовать испарению B_2O_3 с поверхности В [28–31]. Таким образом, композитные частицы В/Al могут улучшить эффективность воспламенения и реакционную способность В.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

1.1. Материалы

Аморфный порошок бора ($D_{50} = 2$ мкм, чистотой 95 %) был приобретен в Пекин-

ском институте цветных металлов (Beijing Institute of Nonferrous Metals). Сферический алюминиевый порошок ($D_{50} = 25$ мкм, чистотой 99 %) предоставлен компанией «Gaizhou Heli Aluminum Powder Co., Ltd». Диаметр циркониевых шариков для шлифовки составлял $D = 1.10$ мм. Перхлорат аммония ($D_{50} = 10$ мкм) приобретен в компании «Sinopharm Chemical Reagent Co., Ltd». Безводный этанол и этилацетат предоставлены компанией «Nanjing Chemical Reagent Co., Ltd». 3-аминопропилтриэтиоксисилан (KH550) приобретен в компании «Shanghai McLean Biochemical Technology Co., Ltd».

1.2. Подготовка образцов

1.2.1. Очистка порошка бора

Вначале проводилась очистка исходного порошка бора (RB) растворителем. RB и растворитель (деионизированная вода, этанол и этилацетат) в соотношении 1 : 10 перемешивались в колбе со скоростью 500 об/мин при 60 °C в течение 4 ч. Затем следовали процедура всасывающей фильтрации, промывка и сушка. В конечном счете получали чистый бор. В зависимости от используемого растворителя, т. е. деионизированной воды, этанола и этилацетата, будем обозначать его как WB, EB и EAB соответственно.

1.2.2. Нарашивание поверхности порошка бора

Связующий агент 3-аминопропилтриэтиоксисилан (KH550) использовался для модификации поверхности бора. Предварительно KH550 был полностью гидролизован в спиртоводной жидкости определенного состава и добавлен по каплям в реакционную колбу для получения образцов с модифицированной поверхностью и различным массовым соотношением. Обозначения KHB-1, KHB-3, KHB-5 и KHB-10 соответствуют массе KH550 1, 3, 5 и 10 % от массы RB.

1.2.3. Композитные частицы В/Al

Композитные частицы В/Al готовились следующим образом (рис. 1). Сначала путем измельчения в шаровой мельнице получали толстые хлопья алюминия (TF-Al). Затем TF-Al, бор (в 5 раз большей массы, чем TF-Al) и

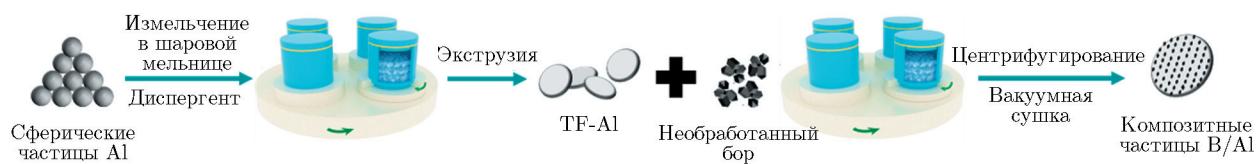


Рис. 1. Процесс подготовки композитных частиц B/Al с использованием шаровой мельницы

шарики из циркония (в 120 раз большей массы, чем TF-Al) добавляли в резервуар шаровой мельницы с этианолом в качестве диспергирующего агента и охлаждающей жидкости. Измельчение проводилось в планетарной шаровой мельнице (QM-3SP4, «Nanjing University Instrument Factory») со скоростью 300 об/мин в течение 4 ч. Смешанная суспензия пропускалась через стандартное сито для отделения гранул и дисперсных частиц. Твердую фазу, полученную после диспергирования, поместили в центрифугу (CT14D, «Tianmei (China) Scientific Instrument Co., Ltd»), а затем проводилась вакуумная сушка при температуре 60 °C в течение 12 ч, после чего получились композитные частицы B/Al.

1.3. Характеристики

1.3.1. Композиционные и морфологические характеристики

Поверхностный состав очищенного бора определялся методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS, Thermo Scientific K-Alpha+, монохроматизированный источник рентгеновского излучения Al K_{α} , 1486.6 эВ). Структура функциональной группы поверхности присадки определялась с помощью ИК фурье-спектрометра (Thermo Scientific Nicolet 6700). Морфология образцов изучалась с помощью полевой эмиссионной сканирующей электронной микроскопии (FESEM, Thermo Scientific Quanta 250FEG).

1.3.2. Термические характеристики

Термические характеристики образцов определялись при помощи дифференциального сканирующего калориметрического анализа в потоке воздуха (DSC, TA, SDT 650), при этом диапазон температур составлял 50–900 °C, скорость потока воздуха — 20 мл/мин, скорость нагрева — 5, 10, 15 и 20 °C/мин.



Рис. 2. Схема оборудования для испытаний на воспламеняемость и горючесть

1.3.3. Испытания на воспламеняемость и горючесть

Схема оборудования для испытаний на воспламеняемость и горючесть показана на рис. 2. Образец представлял собой смесь модифицированного топлива (15.3 % по массе) и перхлората аммония (АР). Перед испытанием 40 мг порошка образца наносили на пластинку диаметром 13 мм. Образцы нагревали и поджигали в режиме постоянного давления с помощью никромовой проволоки, подключенной к внешнему источнику питания постоянного тока. Для каждого образца проводилось по три измерения и результаты осреднялись с целью уменьшения экспериментальной погрешности. В испытаниях на воспламеняемость время, проходящее от генерации электрического тока до внезапного увеличения интенсивности светового сигнала, вызванного горением образца, считалось временем задержки воспламенения данного образца.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Композиционные и морфологические характеристики образцов

2.1.1. Очистка бора

Для анализа поверхностного состава необработанного бора и очищенного растворителем

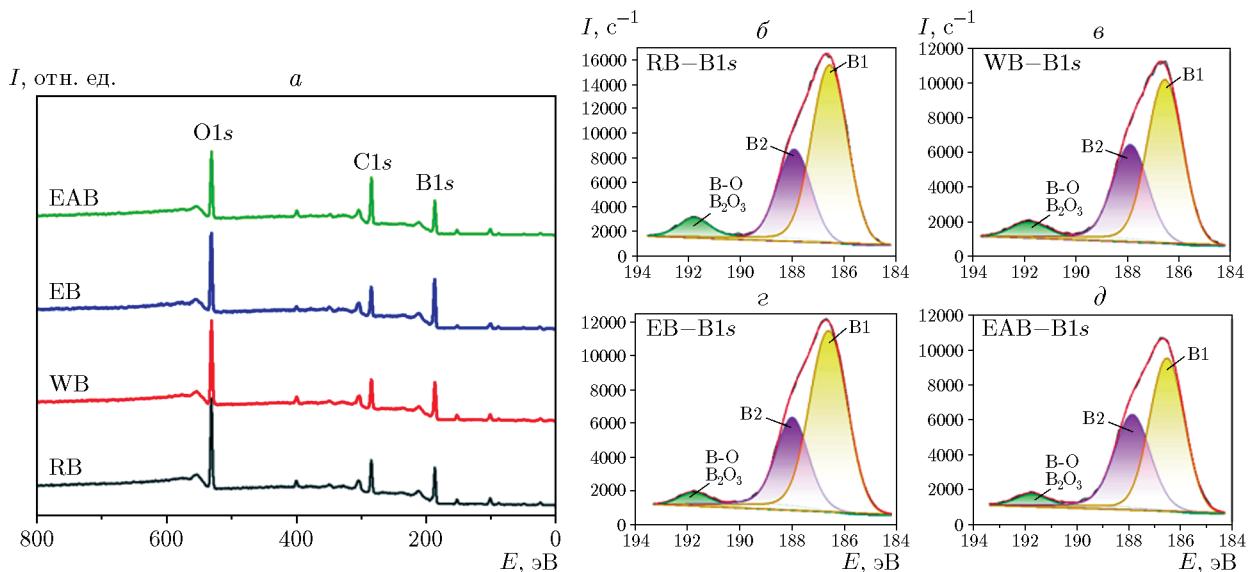


Рис. 3. XPS-спектры поверхности образцов (а) и спектры высокого разрешения B1s образцов RB (б), WB (в), EB (г) и EAB (д)

Таблица 1

Состав поверхности бора, обработанного различными растворителями

Образец	B1, %	B2, %	B ₂ O ₃ , %	B, %	O, %	B/O
RB	30.35	62.59	7.06	61.91	14.70	4.2116
WB	35.27	58.77	5.95	58.88	13.74	4.2853
EB	30.70	65.90	3.40	65.08	14.02	4.6419
EAB	38.33	56.79	4.88	57.44	12.78	4.4945

использовался метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Как видно из рис. 3, а, характерные пики для O1s, C1s и B1s наблюдаются при энергии $E = 531.9$, 284.8 и 187.9 эВ соответственно. Спектры высокого разрешения B1s необработанного бора (RB) и очищенного деионизированной водой (WB), этанолом (EB) и этилацетатом (EAB) показаны на рис. 3, б–д соответственно. Пиковые значения интенсивности исследуемых образцов и доля площади каждого пика приведены в табл. 1. Три пика спектров высокого разрешения B1s 191.8, 187.9 и 186.6 эВ указывают соответственно на три вида связи бора: B—B (B1); не полностью окисленный B (B_xO , $1 < x < 6$, B2); B_2O_3 [32, 33]. Содержание B_2O_3 соответствует следующей закономерности: EB < EAB < WB < RB. Это указывает на то, что деионизированная вода, этанол и этилацетат позволяют снизить содержание B_2O_3 на поверхности B. При этом использование этилацетата

дает самое низкое содержание B_2O_3 , которое на 51.84 % ниже, чем в случае RB. Соотношение B/O оказывается максимальным в случае EB. Эти результаты показали, что этанол может уменьшить количество примеси B_2O_3 на поверхности бора и, таким образом, очистить его.

2.1.2. Наращивание поверхности бора

На рис. 4 показаны инфракрасные фурье-спектры образцов. Образец RB имеет широкий пик при $3552 \div 3223$ см⁻¹, что вызвано образованием борной кислоты в результате реакции B_2O_3 с H_2O на поверхности B в окружающей среде. Борная кислота $B(OH)_3$ на поверхности B образует пики поглощения при 737, 2 223 и 2 931 см⁻¹, а колебательные пики поглощения для связи B—O в B_2O_3 наблюдались при 1 086 и 1 633 см⁻¹ соответственно. В спектре исходного материала КН550 пики поглоще-

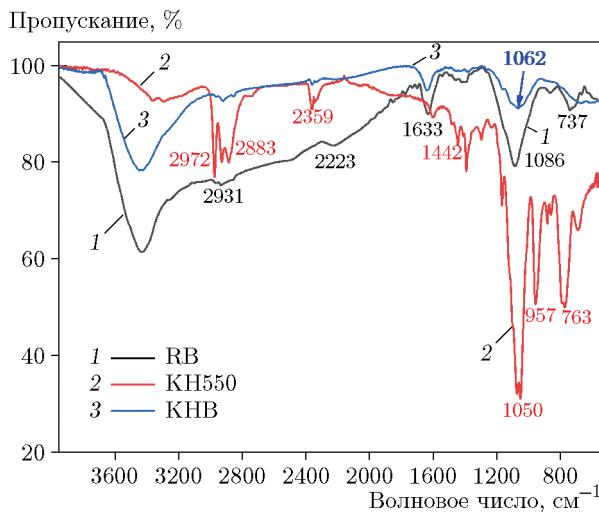


Рис. 4. ИК фурье-спектры RB, KH550 и KHB

ния для связи Si—O—C наблюдаются при 957 и 763 см⁻¹, а пик для Si—O зарегистрирован при 1 050 см⁻¹ [34]. Пики между 2 972 и 2 883 см⁻¹, а также при 2 359 см⁻¹ соответствуют связям C—H и C—C в KH550, а пик при 1 442 см⁻¹ есть пик поглощения NH₂. В спектре KHB пики находятся между 2 972 и 2 883 см⁻¹, а также при 1 442 см⁻¹, т. е. соответствуют харак-

терным пикам для KH550. Кроме того, характерный для связи Si—O—B пик при 1 062 см⁻¹ указывает на то, что KH550 успешно присоединяется к поверхности B.

2.1.3. Морфология композитных частиц B/Al

Морфология образцов показана на рис. 5. На рис. 5, а, в, г видно, что RB образуется путем агломерации различных частиц неправильной формы и морфология обработанного этанолом EB и KHB, модифицированного KH550, практически не меняется по сравнению с RB. Это свидетельствует о том, что как очистка, так и модификация поверхности приводят к изменению B₂O₃ на поверхности B и не влияют на структуру и морфологию внутреннего активного B. Как показано на рис. 5, б, д, е, частицы необработанного Al имеют сферическую форму, а измельченного Al — хлопьевидную, что обеспечивает основу для композитных частиц B/Al. На рис. 5, жс представлена морфология композитных частиц EB/TF-Al. Видно, что часть EB прикрепляется к поверхности TF-Al, а часть EB рассеивается вокруг TF-Al. По сравнению с EB/TF-Al, как показано на рис. 5, з, KHB почти полностью покрывает по-

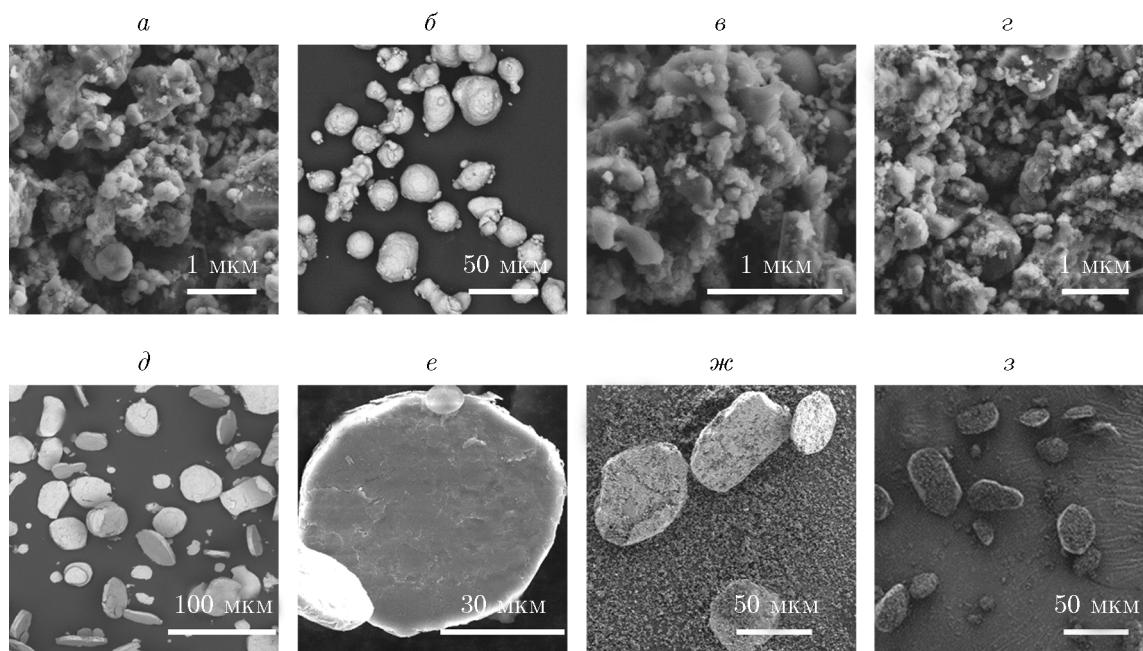


Рис. 5. FESEM-изображения RB (а), RAl (б), EB (в), KHB (г), TF-Al (д, е), EB/TF-Al (жс) и KHB/TF-Al (з)

верхность TF-Al, что указывает на то, что поверхностная прививка KН550 может эффективно способствовать контакту между В и TF-Al. Это делает комбинацию KHB и TF-Al более однородной.

2.2.1. Термические свойства композитных частиц В/Al

Термогравиметрические (TG) кривые для необработанного бора и бора с поверхностной присадкой показаны на рис. 6. Как видно из рис. 6, *a*, увеличение массы m в результате окисления очищенных образцов бора и образцов с наращенной поверхностью происходит более эффективно по сравнению с необработанным бором. Конечная масса RB, WB, EB, EAB, KHB-1, KHB-3, KHB-5 и KHB-10 после высокотемпературного окисления составила $m = 174$, 179, 188, 187, 182, 185, 181 и 179 % соответственно. Конечная масса EB была самой большой среди образцов бора, поверхность которых очищалась растворителем, а конечная масса KHB-3 оказалась самой большой среди образцов, подвергнутых процедуре наращивания поверхности. Кроме того, температура, при которой наблюдалось увеличение массы образцов очищенного бора и с наращенной поверхностью, была ниже, чем у образцов необработанного бора. Это указывает на то, что как очистка В, так и наращивание поверхности В могут улучшить окислительную активность В.

На рис. 7 показаны кривые, полученные при помощи дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC). Для очищенного В при скорости нагрева 10 °C/мин пиковая температура реакции RB, WB, EB и EAB составляла 768, 763, 760 и 765 °C соответственно (рис. 7, *b*). Самое низкое ее значение оказалось у EB, что свидетельствует о наибольшей реакционной способности EB среди образцов очищенного В. Способность этанола эффективно снижать содержание B_2O_3 на поверхности В, в свою очередь, приводит к ослаблению влияния B_2O_3 на окисление В. Таким образом, EB обладает самой высокой реакционной способностью среди образцов очищенного В. Термические характеристики и воспламеняемость EB/TF-Al были также исследованы в данной работе. DSC-кривые, полученные для В с наращенной поверхностью при скорости нагрева 10 °C/мин, приведены на рис. 7, *b*. Значения пиковой температуры реакции RB, KHB-1, KHB-3, KHB-5 и KHB-10 составляли 768, 772, 771, 772 и 771 °C соответственно. KHB-3 обладает самой низкой пиковой температурой и самой высокой реакционной способностью. DSC-кривые для RB/TF-Al, EB/TF-Al и KHB/TF-Al при скоростях нагрева 5, 10, 15, 20 °C/мин представлены на рис. 7, *g, d, e* соответственно.

Данные о кинетике реакций для изученных образцов получены методом Киссингдже-ра [35, 36] по формуле

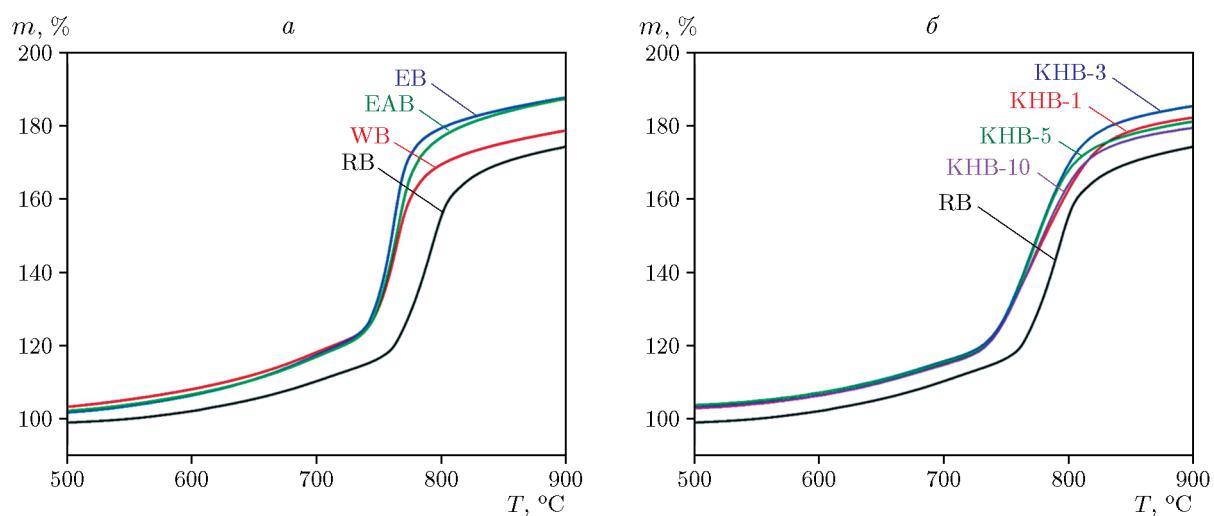


Рис. 6. TG-кривые очищенного бора (*a*) и бора с наращенной поверхностью (*b*)

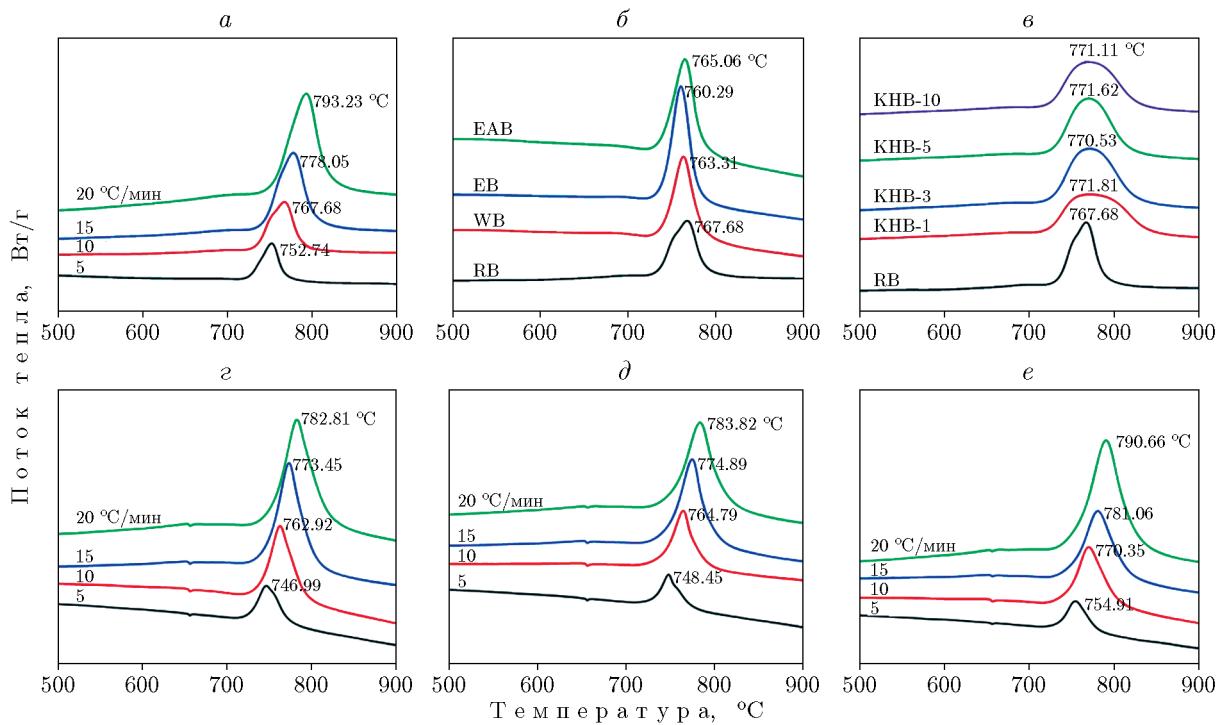


Рис. 7. DSC-кривые необработанного бора (а), очищенного бора (б), бора с наращенной поверхностью (в), RB/TF-Al (г), EB/TF-Al (д), KHB/TF-Al (е)

Таблица 2

Химико-кинетические параметры образцов

Образец	Линейное уравнение аппроксимации	R^2	E_a , кДж/моль	A , с^{-1}
RB/TF-Al	$y = 26.982 - 39.991x$	0.996	332.488	$2.089 \cdot 10^{16}$
EB/TF-Al	$y = 27.639 - 40.733x$	0.998	338.658	$4.107 \cdot 10^{16}$
KHB-3/TF-Al	$y = 27.338 - 40.676x$	0.994	338.178	$3.034 \cdot 10^{16}$

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_a^2}\right) = -\frac{E_a}{RT_a} + \ln\left(\frac{AR}{E_a}\right), \quad (1)$$

где β — скорость нагрева, К/мин; T_a — максимальная экзотермическая температура образцов, К; R — газовая постоянная (8.314 Дж/(моль·К)); E_a — энергия активации, Дж/моль; A — предэкспоненциальный множитель.

Химико-кинетические параметры образцов приведены в табл. 2. Значение R^2 линейного уравнения, использованного для аппроксимации, для всех образцов превышало 0.99, что свидетельствует о надежности расчетов. Энергия активации E_a для RB/TF-Al, EB/TF-Al и KHB-3/TF-Al оказывалась одинаковой. Однако предэкспоненциальный множитель A в слу-

чае EB/TF-Al равнялся $4.107 \cdot 10^{16}$ с⁻¹, что больше на 96.6 % соответствующей величины для RB/TF-Al и на 35.4 % больше по сравнению с KHB-3/TF-Al. Это указывает на то, что EB/TF-Al обладает самой высокой реакционной способностью. Также нужно отметить, что реакционная способность композитных частиц В/Al может быть эффективно улучшена путем удаления B_2O_3 с поверхности В.

2.2.2. Воспламеняемость композитных частиц В/Al

Типичные сигналы от воспламенения и диаграммы энергии воспламенения образцов при атмосферном давлении показаны на рис. 8. Как следует из рис. 8, *a*, в экспериментах время задержки воспламенения определяется как

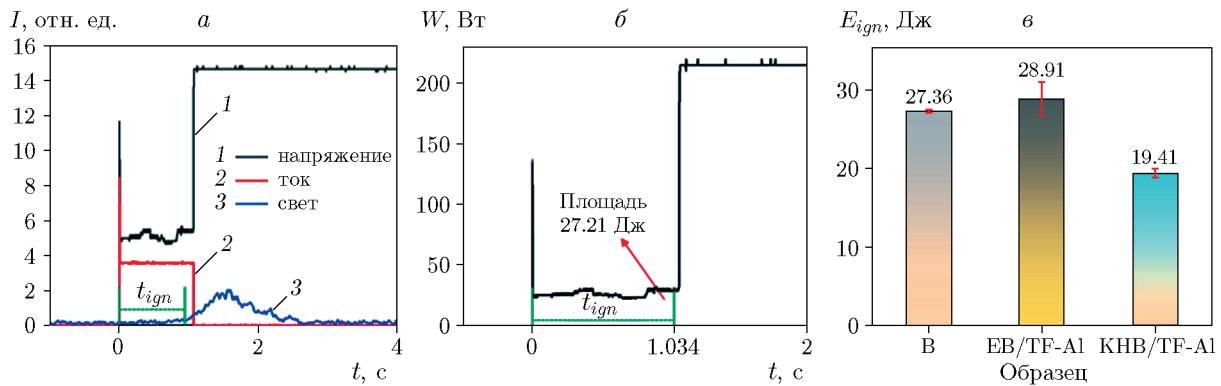


Рис. 8. Типичная диаграмма сигнала воспламенения (*а*), диаграмма для расчета энергии воспламенения образцов (*б*) и результаты расчета энергии воспламенения (*в*)

время, прошедшее между генерацией тока, вызванного горением образца, и внезапным увеличением светового сигнала. Энергия воспламенения образца рассчитывалась по формуле [37, 38]

$$E_{ign} = \int_0^t UI dt_{ign} \text{ [Дж]}, \quad (2)$$

где *t_{ign}* — время задержки воспламенения, с; *U* — напряжение, В; *I* — сила тока, А.

Согласно рис. 8,*в* энергия воспламенения RB, EB/TF-Al и KHB-3/TF-Al составляют *E_{ign}* = 27.36, 28.91, 19.4 Дж соответственно. Как энергия воспламенения, так и величина ошибки оказались самыми большими у EB/TF-Al, что может быть вызвано неплотным соединением EB и TF-Al (как показано на рис. 5,*ж*, EB был рассыпан вокруг TF-Al). В соответствии с реакционными характеристиками бора (температура его воспламенения обычно выше 1800 К), Al (температура его воспламенения обычно выше 1400 К) и AP (начальная температура его разложения около 580 К), возможный процесс воспламенения посредством электрического нагрева может быть следующим. Первой реакцией является термическое разложение AP, которое обеспечивает необходимое количество тепла и компонентов окислителей. За ней следует реакция возгорания Al и B. Однако, поскольку Al воспламеняется легче, чем B, возможно, что Al воспламняется и сгорает первым, выделяя значительное количество тепла, а затем воспламеняется и сгорает B. Если частицы прочно связанны друг с другом, тепло, выделяемое в результате реакции предварительно окисленных частиц, может быстро передаваться неокислен-

ным частицам в твердой фазе. Когда неокисленные частицы нагреваются до определенной температуры, начинается реакция окисления с выделением тепла, что приводит к окислению близлежащих частиц. Однако если соединение частиц образца относительно рыхлое, то между ними находится больше компонентов газовой фазы, что препятствует теплообмену между частицами и, в свою очередь, затрудняет воспламенение. Следовательно, энергия воспламенения EB/TF-Al оказывается выше. Однако из-за непрочного соединения частиц окисленные компоненты, образующиеся при разложении AP, легко диффундируют к поверхности частиц, что способствует протеканию химической реакции. Из-за влияния множества факторов на процесс воспламенения результаты измерения энергии воспламенения EB/TF-Al с более слабыми связями между частицами имеют большую погрешность. По сравнению с EB/TF-Al, модификатор KHB-3 плотно прилегает к поверхности TF-Al, что позволяет легче передавать тепло близлежащим частицам. Так, энергия воспламенения KHB-3/TF-Al оказалась наименьшей, 19.41 Дж, что на 29.1 % меньше аналогичной величины для RB. При этом погрешность определения энергии воспламенения KHB-3/TF-Al также была небольшой.

ВЫВОДЫ

Для улучшения воспламеняемости и реакционной способности бора были приготовлены и исследованы очищенный B, частицы B с наращенной поверхностью и композитные частицы B/Al. Очистка бора этанолом способствует уменьшению содержания примеси B₂O₃, что

делает бор более реакционноспособным. А наращивание поверхности приводит к изменению состава и свойств поверхности бора и делает соединение композитных частиц B/Al более прочным, облегчая тем самым передачу тепла соседним частицам. Это приводит к тому, что энергия воспламенения КНВ-3/TF-Al снижается на 29.1 % по сравнению с RB.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mason B. P., Roland C. M. Solid propellants // Rubber Chem. Technol. — 2019. — V. 92, N 1. — P. 1–24. — DOI: 10.5254/rct.19.80456.
2. Lysien K., Stolarczyk A., Jarosz T. Solid propellant formulations: A review of recent progress and utilized components // Materials. — 2021. — V. 14, N 21. — P. 1–17. — DOI: 10.3390/ma14216657.
3. Chaturvedi S., Dave P. N. Solid propellants: AP/HTPB composite propellants // Arab. J. Chem. — 2019. — V. 12, N 8. — P. 2061–2068. — DOI: 10.1016/j.arabjc.2014.12.033.
4. Liu T., Chen X., Xu H. X., et al. The effect of Li-Al alloy on combustion performance of B/PTFE fuel-rich propellant // Adv. Mater. Res. — 2014. — V. 904. — P. 222–227. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.904.222.
5. Pang W., Fan X., Zhao F., et al. Effects of different metal fuels on the characteristics for HTPB-based fuel rich solid propellants // Propell., Explos., Pyrotech. — 2013. — V. 38, N 6. — P. 852–859. — DOI: 10.1002/prep.201200182.
6. Ramakrishnan M., Chakravarthy S. R., Kandasamy J., Sarathy R. Development of nano-Al based highly metalized fuel-rich propellant for water ramjet propulsion applications // Propell., Explos., Pyrotech. — 2020. — V. 45, N 7. — P. 1026–1040. — DOI: 10.1002/prep.201900384.
7. Zheng J., Wang W., Chen X., Zhou C., Xu J. Experimental research on aluminium–magnesium fuel-rich propellant under high strain rates // Mater. Res. Innovations. — 2015. — V. 19, N 8 (suppl.). — P. S8-245–S8-250. — DOI: 10.1179/1432891715Z.0000000001668.
8. Huang X., Zhang M., Lin C., et al. Comparison on ignition and combustion of AlMgB composite fuel and B fuel // Chem. Eng. J. — 2022. — V. 450, Pt. 2. — 138133. — DOI: 10.1016/j.cej.2022.138133.
9. Kim M., Kim J., Khil T. Characteristics of fuel-rich solid propellants with boron powder and the combustion products // J. Korean Soc. Propul. Eng. — 2022. — V. 26, N 1. — P. 12–19. — DOI: 10.6108/KSPE.2022.26.1.012.
10. Yogeshkumar V., Rathi N., Ramakrishna P. A. Solid fuel rich propellant development for use in a ramjet to propel an artillery shell // Def. Sci. J. — 2020. — V. 70, N 3. — P. 329–335. — DOI: 0.14429/dsj.70.15061.
11. Рашковский С. А., Милехин Ю. М., Федорычев А. В., Якуш С. Е. Механизм стабилизации горения в канале заряда твердого топлива в прямоточном воздушно-реактивном двигателе // Докл. РАН. Химия, науки о материалах. — 2020. — Т. 490, № 1. — С. 51–56. — DOI: 10.31857/S2686953520010136. — EDN: EANFVW.
12. Liu X., Gonzales J., Schoenitz M., Dreizin E. L. Effect of purity and surface modification on stability and oxidation kinetics of boron powders // Thermochim. Acta. — 2017. — V. 652, N 10. — P. 17–23. — DOI: 10.1016/j.tca.2017.03.007.
13. Mishra R. K., Dubey K. S. Glass forming ability of materials: A thermodynamic approach // J. Non-Cryst. Solids. — 2009. — V. 355, N 45–47. — P. 2199–2204. — DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2009.08.003.
14. Kalb J. A., Spaepen F., Wuttig M. Kinetics of crystal nucleation in undercooled droplets of Sb- and Te-based alloys used for phase change recording // J. Appl. Phys. — 2005. — V. 98, N 5. — 054910. — DOI: 10.1063/1.2037870.
15. Young G., Sullivan K., Zachariah M. R., Yu K. Combustion characteristics of boron nanoparticles // Combust. Flame. — 2009. — V. 156, N 2. — P. 322–333. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2008.10.007.
16. Ao W., Yang W., Wang Y., et al. Ignition and combustion of boron particles at one to ten standard atmosphere // J. Propul. Power. — 2014. — V. 30, N 3. — P. 760–764. — DOI: 10.2514/1.B35054.
17. King M. K. Boron particle ignition in hot gas streams // Combust. Sci. Technol. — 1973. — V. 8, N 5–6. — P. 255–273. — DOI: 10.1080/00102207308946648.
18. Xu P., Liu J., Chen X., et al. Ignition and combustion of boron particles coated by modified materials with various action mechanisms // Combust. Flame. — 2022. — V. 242. — 112208. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2022.112208.
19. Yu D., Kong C. D., Zhuo J. K., et al. Oxidation characteristics of boron particles // Sci. China Technol. Sci. — 2015. — V. 58, N 12. — P. 2016–2024. — DOI: 10.1007/s11431-015-5841-0.
- 20.Ao B., Чжоу Цз.-Х., Лю Цз.-Ч., Ян В.-Цз., Ван Ю., Ли Х.-Р. Кинетическая модель воспламенения частицы бора, основанная на механизме диффузии кислорода и $(BO)_n$ // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 3. — С. 21–31. — EDN: SMICTF.
21. Liang D., Liu J., Li H., Zhou J., Cen K. Generation and evolution of surface oxide layer of amorphous boron during thermal oxidation: A

- micro/nanofabricated slice measurement // Propell., Explos., Pyrotech. — 2017. — V. 42, N 5. — P. 532–540. — DOI: 10.1002/prep.201600221.
22. Wang D., Cao X., Liu J., et al. TF-Al/TiC highly reactive composite particle for application potential in solid propellants // Chem. Eng. J. — 2021. — V. 425. — 130674. — DOI: 10.1016/j.cej.2021.130674.
 23. Mursalat M., Schoenitz M., Dreizin E. L., et al. Spherical boron powders prepared by mechanical milling in immiscible liquids // Powder Technol. — 2021. — V. 388. — P. 41–50. — DOI: 10.1016/j.powtec.2021.04.063.
 24. Chintersingh K.-L., Schoenitz M., Dreizin E. L. Oxidation kinetics and combustion of boron particles with modified surface // Combust. Flame. — 2016. — V. 173. — P. 288–295. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.08.027.
 25. Zheng W.-C., Xu W.-C., Zhang H., et al. Preparation and properties of silane coupling agent modified steel slag as functional filler for anti-corrosion coating // J. Iron Steel Res. Int. — 2023. — V. 30. — P. 708–716. — DOI: 10.1007/s42243-022-00843-y.
 26. Peng X., Qin J., Huang D., Zeng Z., Tang C. Enhancement on thermal and mechanical properties of insulating paper cellulose modified by silane coupling agent grafted hBN // Macromol. Mater. Eng. — 2022. — V. 307, N 11. — 2200424. — DOI: 10.1002/mame.202200424.
 27. He H., Wu P., Yang Z., et al. A facile way to modify polyester fabric to enhance the adhesion behavior to rubber // Coatings. — 2022. — V. 12, N 9. — 1344. — DOI: 10.3390/coatings12091344.
 28. McCollum J., Pantoya M. L., Iacono S. T. Activating aluminum reactivity with fluoropolymer coatings for improved energetic composite combustion // ACS Appl. Mater. Interfaces. — 2015. — V. 7, N 33. — P. 18742–18749. — DOI: 10.1021/acsami.5b05238.
 29. Qin Y., Yu H., Wang D., et al. Preparation and characterization of energetic composite films with mutual reactions based on B/PVDF mosaic structure // Chem. Eng. J. — 2023. — V. 451. — 138792. — DOI: 10.1016/j.cej.2022.138792.
 30. Abdel-Hafez A. A., Brodt M. W., Carney J. R., Lightstone J. M. Laser dispersion and ignition of metal fuel particles // Rev. Sci. Instrum. — 2011. — V. 82, N 6. — 064101. — DOI: 10.1063/1.3598341.
 31. Liang D., Xiao R., Liu J., Wang Y. Ignition and heterogeneous combustion of aluminum boride and boron–aluminum blend // Aerosp. Sci. Technol. — 2019. — V. 84. — P. 1081–1091. — DOI: 10.1016/j.ast.2018.11.046.
 32. Kazahaya T., Hirose M. Coordination number of doped boron atoms in photochemically-deposited amorphous silicon studied by X-ray photoelectron spectroscopy // Jpn. J. Appl. Phys. — 1986. — V. 25, N 1. — L75–L77. — DOI: 10.1143/JJAP.25.L75.
 33. Yamauchi J., Yoshimoto Y., Suwa Y. X-ray photoelectron spectroscopy analysis of boron defects in silicon crystal: A first-principles study // J. Appl. Phys. — 2016. — V. 119, N 17. — 175704. — DOI: 10.1063/1.4948572.
 34. Li H., Wang R., Hu H., Liu W. Surface modification of self-healing poly(urea-formaldehyde) microcapsules using silane-coupling agent // Appl. Surf. Sci. — 2008. — V. 255, N 5, Pt 1. — P. 1894–1900. — DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.06.170.
 35. Blaine R. L., Kissinger H. E. Homer Kissinger and the Kissinger equation // Thermochim. Acta. — 2012. — V. 540. — P. 1–6. — DOI: 10.1016/j.tca.2012.04.008.
 36. Zheng Z., Zhang W., Yu C., et al. Integration of the 3DOM Al/Co₃O₄ nanothermite film with a semiconductor bridge to realize a high-output micro-energetic igniter // RSC Adv. — 2018. — N 8. — P. 2552–2560. — DOI: 10.1039/C7RA11293A.
 37. Shi K., Guo X., Chen L., et al. Alcohol-thermal synthesis of approximately core-shell structured Al@CuO nanothermite with improved heat-release and combustion characteristics // Combust. Flame. — 2021. — V. 228. — P. 331–339. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.02.008.

Поступила в редакцию 07.11.2022.

После доработки 20.03.2023.

Принята к публикации 24.05.2023.