УДК 550.32

ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ В УСОВЕРШЕНСТВОВАННОМ МЕТОДЕ ДВУХЦВЕТНОЙ ПИРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВЫХ ПЛАМЕН

R. Liu¹, F.-F. Hu², D.-Y. Li³, C.-X. Zhao⁴, Y.-F. Cheng³

¹Technical Department of Library, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, PR China ²School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, PR China

³School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, PR China, cyf518@mail.ustc.edu.cn

⁴College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210001, PR China

Знание распределения температуры в процессе горения необходимо для оценки состояния процесса, мониторинга безопасности и диагностики аварийных ситуаций, связанных с использованием горючих газов. Традиционный метод двухцветной пирометрии не позволяет измерять температуру газового пламени, если в пламени нет серых тел. Авторы усовершенствовали метод двухцветной пирометрии путем использования вспомогательных порошков как источника серых тел и спроектировали соответствующую установку для визуализации процесса горения горючих газов и измерения температуры. Чтобы повысить точность измерения температуры, было изучено влияние типа порошка, размера частиц и их концентрации, а также времени задержки инициирования воспламенения. После проведения многочисленных тестов установлено, что наилучшие результаты измерений достигаются для смеси Н₂/воздух (30/70 %) при использовании порошка вольфрама со средним размером частиц 7.9 мкм, концентрацией частиц 21 г/м³ и временем задержки инициирования воспламенения 80 мс. Корректность полученных в указанных условиях результатов была подтверждена результатами предыдущих исследований.

Ключевые слова: измерение температуры, горючий газ, двухцветный пирометр, горение газа.

DOI 10.15372/FGV2022.9217

ВВЕДЕНИЕ

Горючие газы (в дальнейшем этот термин используется и для смесей горючих газов с окислителем) являются важным источником энергии. Двумерное распределение температуры в газовых турбинах, многосопловых горелках и печах электростанций относится к категории основных знаний, необходимых для оценки состояния процесса горения. Кроме того, мониторинг локальных изменений температуры во времени позволяет контролировать нестабильность процесса горения [1]. В присутствии воздуха и источников зажигания горючие газы могут легко воспламеняться и наносить серьезный ущерб окружающей среде и людям. Температура является важным параметром для мониторинга безопасности и диагностики аварийных ситуаций, что имеет большое

Cheng Y.-F., 2023.

значение для хранения, транспортировки и использования горючих газов.

Существует много методов измерения температуры. Базовый из них основан на термоэлектрическом эффекте. В целом методы измерения температуры можно разделить на контактные и бесконтактные [2]. Контактные методы предполагают прямое контактирование термопары или, например, оптоволоконного датчика [3] со средой. Однако в условиях высоких температур это приводит к существенным недостаткам, таким как короткий срок службы датчиков, восприимчивость к электромагнитным помехам, слабая коррозионная стойкость, низкая скорость отклика и низкая точность измерений [4]. В последние годы, благодаря постоянному совершенствованию фотоэлектрических устройств, быстро развиваются бесконтактные методы измерения высоких температур. Среди таких методов радиационной термометрии наиболее типичными являются методы инфракрасной термометрии и двухцветной пирометрии. Применение современных ин-

[©] Liu R., Hu F.-F., Li D.-Y., Zhao C.-X.,

фракрасных тепловизоров позволяет избежать использования большого количества термопар и при этом получить хорошее пространственное и временное разрешение. Однако использование инфракрасной термометрии требует знания таких оптических характеристик пламени, как коэффициент пропускания и излучательная способность [5]. При использовании бесконтактного метода двухцветной пирометрии не требуется знать оптические параметры пламени [6]. В основе метода двухцветной пирометрии лежит закон Планка. В рамках этого метода обычно предполагается, что излучательная способность объекта исследования в используемом диапазоне длин волн не меняется, т. е. его можно считать серым телом [7]. Метод двухцветной пирометрии уже применялся для измерения температуры горения жидких топлив, газовзвесей, взрывчатых веществ и т. д. Например, в работе [8] данные, полученные методом двухцветной пирометрии, использовались для тестирования оптимизированной модели, позволяющей оценить термическую опасность, связанную со взрывами облаков паров сжиженного природного газа. Этот метод использовался также для изучения тепловой структуры пламен, возникающих при горении газовзвесей нано- и микроразмерных частиц алюминия [9], и для визуализации распределения температуры в огненном шаре, образующемся при взрыве заряда тротила [10].

Однако спектр излучения газов состоит из отдельных полос и отличается от сплошного спектра твердых и жидких веществ. В этом случае поглощение и излучение происходят избирательно, т. е. только в интервале длин волн, охватываемых полосами [11]. Кроме того, при горении газов зачастую образуется очень мало веществ, которые могли бы выполнять роль серых тел и позволить измерять температуру газового пламени методом двухцветной пирометрии. Поэтому в данной работе, чтобы в газовом пламени точно присутствовали серые тела, мы перед воспламенением газовой смеси распыляли в ней твердый порошок. Было изучено влияние типа порошка, размера и концентрации частиц, а также времени задержки инициирования воспламенения (период времени между окончанием распыления порошка и началом воспламенения смеси) на результаты. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами предыдущих исследований. В данной работе предложен простой метод, позволяющий динамически измерять распределение температуры в пламени горючих газов и их смесей.

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Используемые материалы

Используемые метан (CH₄), водород (H₂), ацетилен (C₂H₂) и воздух имели чистоту более 99.99 % и были поставлены компанией «Hefei Hang Lung Electric Technology Co., Ltd» (Китай). Средний диаметр частиц порошков вольфрама (№ 1–4) составлял $d_{50} \approx 7.9, 51.1, 74.6$ и 84.5 мкм, а порошков меди и оксида алюминия (Al₂O₃) — $d_{50} \approx 7.4$ и 7.0 мкм соответственно (все порошки компании «Shanghai Macklin Biochemical Co., Ltd», Китай). Распределения частиц порошков по размерам, измеренные с помощью лазерного анализатора, показаны на рис. 1.



Рис. 1. Распределение по размерам частиц порошков вольфрама (a) и порошков меди и оксида Al_2O_3 (b)



Рис. 2. Схема экспериментальной установки

1.2. Экспериментальная установка

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки, позволяющая наблюдать за процессом горения горючих газов. Основные компоненты установки — надувной шар из латекса, контейнер для порошка, газосмесительное устройство, электромагнитный клапан, электрод зажигания, программируемый логический контроллер (PLC) и высокоскоростная камера. В начале каждого эксперимента горючий газ смешивался с воздухом в газосмесительном устройстве. Затем латексный шар надувался полученной газовой смесью (до тех пор, пока его диаметр не достигал 34 см). После паузы в несколько минут открывался электромагнитный клапан, и в надутый шар распылялся порошок из контейнера (длительность распыления ≈ 1.0 с). Распыление проводилось с помощью смеси из газосмесительного устройства, находящейся при повышенном давлении (0.15 МПа). Итоговый диаметр латексного шара перед воспламенением смеси составлял ≈ 36 см. Длительность задержки инициирования воспламенения подбиралась на основе физических свойств порошка [12]. Управление электромагнитным клапаном, электродом зажигания и высокоскоростной камерой осуществлялось с помощью программируемого логического контроллера, а структура пламени и процесс его распространения фиксировались высокоскоростной камерой NAC MEMRECAM НХ-З (Япония).

Полученные изображения (в оттенках сеporo) обрабатывались с помощью компьютерной программы, написанной на языке Python. Эта система получила название усовершенствованного метода двухцветной пирометрии. Погрешность измерения температуры ниже 8 %.

1.3. Принцип действия и калибровка пирометра

Согласно закону Планка спектральную яркость излучающего тела можно найти следующим образом [13]:

$$L(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \Big(\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \Big)^{-1}, \qquad (1)$$

где $\varepsilon(\lambda, T)$ — спектральная излучательная способность, $C_1 \approx 3.742 \cdot 10^{-16}$ Вт · м² и $C_2 \approx$ 1.4388 · 10⁻² м · К — константы в уравнении Планка, T — температура, К, λ — длина волны, м, $L(\lambda, T)$ — спектральная яркость, Вт/(ср · м³).

При $C_2/(\lambda T) \gg 1$ закон Планка переходит в закон Вина [14]:

$$M(\lambda, T) = \frac{\varepsilon(\lambda, T)C_1}{\lambda^5 \exp(C_2/\lambda T)}.$$
 (2)

В данном исследовании датчики изображения высокоскоростной камеры с КМОПматрицей (КМОП — комплементарная структура металл — оксид — полупроводник) были однолинзовыми. Использовался фильтр Байера со схемой GRBG, где R, G и B — это красный, зеленый и синий цвета соответственно. Разные цвета соответствуют разным полосам излучения. Как показано на рис. 3, для сбора определенной цветовой составляющей (R, G или B) в каждой точке используется один датчик. Если $T(\lambda)$ — функция отклика камеры для видимого участка спектра $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2]$, то регистрируемую камерой интенсивность света в точке можно найти следующим образом:

$$H = \frac{\pi}{4} A U t \left(\frac{2a}{f'}\right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_T(\lambda) E_t(\lambda) h(\lambda) d(\lambda), \quad (3)$$

	j-2	j - 1	j	$j{+}1$	j+2
i-2	G	R	G	R	G
i-1	В	G	В	G	В
i	G	R	G	R	G
i + 1	В	G	В	G	В
$i{+}2$	G	R	G	R	G

Рис. 3. Используемый в высокоскоростной камере фильтр Байера (схема GRBG)

где A — коэффициент преобразования между выходным током светочувствительного блока и регистрируемой интенсивностью света (насыщенностью серого); U — коэффициент фотоэлектрического преобразования; t — время экспозиции, c; f' — фокусное расстояние объектива, м; a — радиус выходного зрачка объектива, м; $K_T(\lambda)$ — коэффициент пропускания линзы; $H(\lambda)$ — функция спектрального отклика; λ_1 и λ_2 — верхняя и нижняя границы светочувствительности КМОП-датчиков.

В методе двухцветной пирометрии для измерения температуры рассчитывается отношение спектральных яркостей для двух или большего числа длин волн теплового излучения. Случайным образом выберем два основных цвета, например красный и зеленый, затем подставим их параметры в уравнение (3) и рассчитаем значение температуры:

$$T = \frac{C_2(1/\lambda_{\rm G} - 1/\lambda_{\rm R})}{\ln\frac{H_{\rm R}}{H_{\rm G}} - \ln\frac{K_{\rm R}}{K_{\rm G}} - \ln\frac{\varepsilon(\lambda_{\rm R}, T)}{\varepsilon(\lambda_{\rm G}, T)} - 5\ln\frac{\lambda_{\rm G}}{\lambda_{\rm R}}},$$
(4)

где $K_{\rm R}$, K_G — коэффициенты пропорциональности для красного и зеленого каналов соответственно.

Если принять $K = \ln \frac{K_{\rm R}}{K_{\rm G}} + \ln \frac{\varepsilon(\lambda_{\rm R}, T)}{\varepsilon(\lambda_{\rm G}, T)}$, то уравнение (4) можно упростить следующим образом:

$$T = \frac{C_2(1/\lambda_{\rm G} - 1/\lambda_{\rm R})}{\ln\left(H_{\rm R}/H_{\rm G}\right) - K - 5\ln\left(\lambda_{\rm G}/\lambda_{\rm R}\right)},$$
 (5)

где *К* — экспериментально определяемый поправочный коэффициент, который связан только со светочувствительностью датчиков и характеристиками пламени. Его значение может быть получено путем калибровки с помощью вольфрамовой лампы. Теоретически, если для одной точки известны регистрируемые тремя каналами значения интенсивности света, то соответствующее значение температуры может быть рассчитано и без знания реальной излучательной способности объекта. В данной работе для получения информации о температуре выбрано отношение интенсивностей красного и зеленого каналов. Для обработки полученных изображений в оттенках серого использовался алгоритм интерполяции Гамильтона, который позволяет рассчитывать соответствующие значения интенсивности красного, зеленого и синего для каждой точки. Ограничением предлагаемого метода является то, что получаемая таким образом температура фактически представляет собой температуру поверхности, т. е. если мы захотим получить внутреннюю температуру газа с помощью метода двухцветной пирометрии, то нам предстоит еще много работы по трехмерной реконструкции температурного распределения.

Перед проведением экспериментов измерительную систему необходимо откалибровать. Вольфрам является металлом с самой высокой температурой плавления (3643 К), а температуру вольфрамовой проволоки можно задать с помощью определенных значений напряжения и тока [9], поэтому в качестве температурного эталона для калибровки системы была выбрана лампа с вольфрамовой нитью. Калибровка температуры проходила следующим образом. Сначала использовалась высокоскоростная камера для получения изображений лампы накаливания с вольфрамовой нитью. Затем с помощью программы, написанной на языке Python, устанавливалось соотношение между температурой и отношением $H_{\mathrm{R}}/H_{\mathrm{G}}$. Это соотношение аппроксимировалось прямой линией (рис. 4), и наконец получался поправочный коэффициент К, который представляет собой наклон этой линии.



Рис. 4. Полученное в результате калибровки с помощью вольфрамовой лампы соотношение между температурой и отношением $H_{\rm R}/H_{\rm G}$



Рис. 5. Распределение температуры в пламенах смесей: $a - CH_4$ /воздух (10/90 %) при t = 28 мс, $\delta - H_2$ /воздух (30/70 %) при t = 5.0 мс, $\epsilon - C_2H_2$ /воздух (18/82 %) при t = 28 мс

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Характеристики горения типичных горючих газовых смесей

Процессы распространения пламени в смесях $CH_4/воздух$ (10/90 %), $H_2/воздух$ (30/70 %) и $C_2H_2/воздух$ (18/82 %) регистрировались высокоскоростной камерой. Изображения пламен смесей $CH_4/воздух$ и $H_2/воздух$ оказались довольно тусклыми, а для смеси $C_2H_2/воздух$ получены более яркие изображения пламени. Распределения температуры в пламенах трех смесей, измеренные традиционным методом двухцветной пирометрии (без вспомогательных серых тел), показаны на рис. 5.

Видно, что в случае смесей СН₄/воздух и H_2 /воздух измеренную температуру пламени невозможно отличить от температуры окружающей среды, что, очевидно, неверно. Однако в случае смеси С₂H₂/воздух температура пламени находится в диапазоне 2300 ÷ 2700 K, что соответствует результатам расчетов, выполненных в работе [15] по программе Chemkin. Различия в результатах, полученных традиционным методом двухцветной пирометрии, следует отнести к количеству серых тел в пламени. В отличие от CH₄ и H₂, при сгорании C₂H₂ образуется много сажи [16], ее частицы могут выступать в роли серых тел в рамках метода двухцветной пирометрии. На основе этих результатов мы решили к газовым смесям, при горении которых было мало серых тел, добавить путем распыления твердые частицы, а затем снова измерили распределение температуры в пламени методом двухцветной пирометрии.

2.2. Факторы влияния в усовершенствованном методе двухцветной пирометрии

Для того чтобы повысить точность измерения усовершенствованным методом двухцветной пирометрии, было изучено влияние типа порошка, размера частиц и их концентрации, а также времени задержки инициирования воспламенения.

2.2.1. Порошки

Для проведения экспериментов в качестве источника серых тел выбраны порошки вольфрама, меди и оксида алюминия (Al_2O_3) , средние диаметры частиц 7.9, 7.4 и 7.0 мкм соответственно. Масса добавляемого порошка равнялась 1 г. Соответствующая концентрация частиц после распыления в латексном шаре составляла примерно 41 г/м³. Время задержки инициирования воспламенения 40 мс. На рис. 6 показан процесс распространения пламени в смеси СН₄/воздух (10/90 %) при наличии распыленного порошка Al₂O₃. В этом случае по сравнению со смесью без распыленного порошка Al₂O₃ пламя видно более отчетливо. Распыленные частицы поглощают тепло из газового пламени, а их тепловое излучение собственно и используется для определения температуры, поэтому необходимо изучить их тепловые свойства и физические параметры.

Распределения температуры в пламени смеси CH₄/воздух (в момент t = 15 мс), полученные при использовании разных порошков (W, Cu и Al₂O₃), представлены на рис. 7. При распылении вольфрама (рис. 7,*a*) измеренные значения температуры лежат в диапазоне 1 808 ÷ 2569 K (среднее значение 2 184 K). При использовании меди (рис. 7,*б*) температура изменяется от 1 972 до 3 124 K (среднее значение



Рис. 6. Распространение пламени (изображения в оттенках серого) в смес
и $\rm CH_4/воздух~(10/90~\%)$ с частицами $\rm Al_2O_3$



Рис. 7. Распределение температуры в пламенах смесей CH₄/воздух (10/90 %) с добавлением порошков вольфрама (*a*), меди (*б*), оксида алюминия (*в*) в момент времени t = 15 мс

2 270 К). В случае оксида Al_2O_3 (рис. 7,6) температура находится в диапазоне $505 \div 1387$ К (среднее значение 722 К). В предыдущих исследованиях [17, 18] температура пламени смеси CH_4 /воздух (10/90 %) изменялась от 1800 до 2 300 К. Это означает, что использование порошков меди и оксида алюминия для измерения температуры усовершенствованным методом двухцветной пирометрии дает некорректные результаты, что связано с термическими свойствами этих порошков.

Температура плавления меди составляет 1 356 К (см. таблицу), что намного ниже температуры метановоздушного пламени, поэтому частицы меди тоже участвуют в процессе горения. Именно поэтому максимальная температура в пламени газовой смеси с добавленными частицами меди составила 3 124 К. Что касается порошка Al_2O_3 , то он является негорючим, а его температура плавления — 2 327 К немного выше температуры метановоздушного пламени. При этом теплопроводность в случае Al_2O_3 всего 30 Вт/(м·К), что значительно ниже соответствующих значений для меди и вольфрама. Поэтому частицы оксида алюминия не успевают нагреться до высокой температуры в ходе скоротечного процесса распространения газового пламени. Это объясняет значительно более низкие температуры частиц оксида алюминия (505 ÷ 1387 K), которые были зарегистрированы при использовании усовершенствованного метода двухцветной пирометрии. Эти значения очевидно не отражают температуру газового пламени. Вольфрам имеет высокую температуру плавления и высокую теплопроводность, что позволяет части-

Термические свойства используемых в экспериментах веществ

Вещество	T_m, \mathbf{K}	T_b , K	$\Lambda, \mathrm{Bt}/(\mathrm{M}{\cdot}\mathrm{K})$
Вольфрам	3 643	$6\ 173$	163
Медь	$1 \ 356$	2 835	385
Al_2O_3	2 327	3 273	30

Примечания. Приведенные значения взяты из базы данных свойств материалов MatWeb (http://www.matweb.com/index.aspx). T_m — температура плавления, T_b — температура кипения, Λ — теплопроводность



Рис. 8. Структура пламен смесей CH₄/воздух (10/90 %) с добавлением частиц вольфрама размером 7.9 (a), 51.1 (b), 74.6 (c), 84.5 мкм (c) в момент времени t = 14.5 мс

цам вольфрама не участвовать в процессе горения и быстро нагреваться, поэтому для усовершенствованного метода двухцветной пирометрии вольфрамовый порошок является оптимальным источником серых тел. Нужно отметить, что в газовых пламенах окисление частиц вольфрама все-таки происходит, и это оказывает влияние на результаты измерения температуры. Однако, пока частицы вольфрама не горят, влияние этого источника погрешности можно снизить с помощью калибровочных тестов с термопарами.

2.2.2. Размер частиц порошков вольфрама

В этой серии экспериментов время задержки инициирования воспламенения составляло 40 мс, масса порошка вольфрама 1 г, а соответствующая концентрация частиц равнялась примерно 41 г/м³. На рис. 8 показаны структуры пламен смесей СН₄/воздух в момент времени t = 14.5 мс, когда были добавлены порошки вольфрама со средним диаметром частиц 7.9, 51.1, 74.6 и 84.5 мкм. Чем больше размер частиц, тем быстрее они оседают, что приводит к сужению наблюдаемой зоны пламени. К тому же частицы меньшего размера лучше обмениваются теплом с окружающей средой, т. е. их температура ближе к действительной температуре газового пламени. Поэтому теоретически размер частиц вольфрама должен быть как можно меньше (до тех пор, пока уменьшение размера не приведет к существенной агломерации частиц). В данной работе порошок со средним размером частиц 7.9 мкм (минимальным среди четырех протестированных порошков вольфрама) был признан самым подходящим.

2.2.3. Влияние концентрации частиц порошка вольфрама

В этой серии экспериментов использовался порошок вольфрама со средним диаметром частиц $d_{50} = 7.9$ мкм, а время задержки инициирования воспламенения равнялось 40 мс. Масса порошков вольфрама составляла 0.2, 0.5, 1.0 и 1.5 г, что соответствует концентрации частиц 8, 21, 41 и 62 г/м³ (рис. 9). Теоретически масса



Рис. 9. Структура пламен смесей CH₄/воздух (10/90 %) с добавлением частиц вольфрама концентрацией 8 (a), 21 (b), 41 (b), 62 г/м³ (c) в момент времени t = 18.5 мс

добавляемого вольфрамового порошка должна быть как можно меньше при условии, что его уже достаточно, чтобы соответствовать предъявляемым к нему требованиям, так как избыточное количество порошка приводит к поглощению тепла и снижению температуры газового пламени. При распылении 0.2 г порошка вольфрама (8 г/м³) видимая зона пламени имеет наименьший размер (рис. 9,a), т. е. этого количества порошка недостаточно, чтобы создать необходимую для метода двухцветной пирометрии концентрацию серых тел. Из рис. 9, б-г видно, что при концентрации частиц вольфрама 21 г/м³ видимая зона пламени практически того же размера, как и при более высоких концентрациях частиц (41 и 62 г/м³). Кроме того, при более высоких концентрациях частиц вольфрама пламя выглядит намного ярче, что отрицательно сказывается на точности измерения температуры из-за насыщения сигнала. Из приведенного выше анализа следует, что при использовании усовершенствованного метода двухцветной пирометрии концентрация частиц вольфрама должна составлять 21 г/м³.

2.2.4. Время задержки инициирования воспламенения

Очевидно, что время задержки инициирования воспламенения влияет на то состояние, в котором находятся распыленные частицы. Если время задержки инициирования воспламенения слишком короткое, частицы не успеют распределиться более или менее равномерно. С другой стороны, если сильно задержать инициирование воспламенения смеси, значительная часть частиц успеет осесть. Следовательно, необходимо определить время задержки инициирования, позволяющее добиться оптимального распределения частиц. Воспламенение метановоздушной смеси инициировалось в центре латексного шара, поэтому теоретически форма пламени должна быть сферической. Структура пламени смеси CH_4 /воздух, наблюдаемая при разных временах задержки инициирования воспламенения (0, 40, 80 и 120 мс), показала, что самый лучший результат как в плане наиболее сферической формы пламени, так и в плане наибольшей площади достигнут при времени задержки инициирования 80 мс.

2.3. Измерение температуры в пламени водородовоздушной смеси

Представленные выше результаты позволили определить ключевые параметры усовершенствованного метода двухцветной пирометрии. В качестве источника серых тел следует использовать вольфрамовый порошок с размером частиц 7.9 мкм, масса порошка должна составлять 0.5 г, что соответствует концентрации частиц 21 г/м³, а время задержки инициирования воспламенения должно быть равно 80 мс. Эти параметры были использованы для изучения процесса распространения и распределения температуры в пламени смеси Н₂/воздух (30/70 %). Фотографии приведены на рис. 10. Видно, что пламя имеет сферическую форму. Это указывает на то, что параметры системы были подобраны правильно.

На рис. 11 показано распределение температуры в пламени смеси $H_2/воздух$ в разные моменты времени. На ранней стадии $(1.5 \div 3.5 \text{ мc})$ температура пламени была равномерной, а ее значения непрерывно росли в ходе распространения пламени. На стадии ускорения горения температура края пламени стала выше температуры центральной его части,



Рис. 10. Распространение пламени (изображения в оттенках серого) в смеси H_2 /воздух (30/70 %) с частицами порошка вольфрама размером 7.9 мкм при их концентрации 41 г/м³



Рис. 11. Распределение температуры в разные моменты времени распространения пламени в смеси H₂/воздух (30/70 %) с добавлением частиц вольфрама размером 7.9 мкм при их концентрации 41 г/м³

при этом они обе увеличились. Кроме того, среднее значение температуры, рассчитанное для каждого момента времени, также увеличилось в ходе распространения пламени (вплоть до момента разрыва латексного шара). Максимальное значение средней температуры пламени смеси H_2 /воздух (30/70 %) составило 2 261 K, что очень близко к значению, экспериментально измеренному в работе [19].

выводы

Предложен усовершенствованный метод двухцветной пирометрии, в котором для определения температуры горения газа используются вспомогательные серые тела. Изучено влияние таких важных для метода факторов, как тип порошка (источника серых тел), размер и концентрация частиц, а также время задержки инициирования воспламенения. Экспериментальные результаты показали, что из трех исследованных порошков (вольфрама, меди и оксида алюминия) вольфрам является наиболее подходящим источником серых тел, так как это вещество обладает нужными термическими свойствами. Теоретически размер частиц порошка вольфрама должен быть как можно меньше, если не учитывать возможную агломерацию частиц. В итоге порошок со средним размером частиц 7.9 мкм (минимальным среди четырех протестированных порошков вольфрама) был признан самым подходящим. Показано, что при низкой концентрации частиц вольфрама количество серых тел может быть недостаточным для применения метода двухцветной пирометрии, тогда как чрезмерная концентрация частиц вольфрама приводит к насыщению сигнала и влияет на точность измерения температуры. Наилучший результат получен при концентрации частиц вольфрама 21 г/м³. Время задержки инициирования воспламенения влияет на то состояние, в котором находятся распыленные частицы, выступающие в роли серых тел. После проведения многочисленных тестов было установлено, что для используемой экспериментальной установки оптимальное время задержки инициирования воспламенения составляет 80 мс. Найденные оптимальные параметры использовались при измерении распределения температуры в пламени смеси H2/воздух (30/70 %) с помощью усовершенствованного метода двухцветной пирометрии. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами предыдущих исследований.

Авторы выражают благодарность проф. Рицу Добаши (Ritsu Dobashi), доценту Тошио Моги (Toshio Mogi) и д-ру По-Джул Чангу (Po-Jul Chang) из Токийского университета (The University of Tokyo) за любезную помощь с методом двухцветной пирометрии.

Авторы выражают благодарность фондам, поддержавшим это исследование: National Natural Science Foundation of China (N 11972046, N 12272001), Outstanding Youth Project of Natural Science Foundation of Anhui Province (N 2108085Y02) и Major Project of Anhui University Natural Science Foundation (N KJ2020ZD30).

ЛИТЕРАТУРА

- Kim T.-K., Ih J.-G. Inverse estimation of the temperature field within a gas-filled duct section by use of acoustic data // Meas. Sci. Technol. — 2015. — V. 26, N 6. — 065403. — DOI: 10.1088/0957-0233/26/6/065403.
- 2. Hu F.-F., Cheng Y.-F., Zhang B.-B., Jiang B.-Y., Liu R. Flame propagation and temperature distribution characteristics of magnesium dust clouds in an open space // Powder Technol. — 2022. — V. 404. — 117513. — DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117513.
- 3. Wang B., Niu Y., Qin X., Yin Y., Ding M. Review of high temperature measurement technology based on sapphire optical fiber // Measurement. — 2021. — V. 184. — 109868. — DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109868.
- 4. Ren X., Zeng D., Wang Y., Xiong G., Agarwal G., Gollner M. Temperature measurement of a turbulent buoyant ethylene diffusion flame using a dual-thermocouple technique // Fire Saf. J. — 2021. — V. 120. — 103061. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103061.
- Blankenhagel P., Wehrstedt K.-D., Mishra K. B., Steinbach J. Thermal radiation assessment of fireballs using infrared camera // J. Loss Prev. Process Ind. — 2018. — V. 54. — P. 246–253. — DOI: 10.1016/j.jlp.2018.04.008.
- 6. Yao Y.-L., Cheng Y.-F., Zhang Q.-W., Xia Y., Hu F.-F., Wang Q., Chen Y. Explosion temperature mapping of emulsion explosives containing TiH₂ powders with the twocolor pyrometer technique // Defence Technol. — 2022. — V. 18, N 10. — P. 1834–1841. — DOI: 10.1016/j.dt.2021.09.020.
- 7. Hossain M. M., Lu G., Sun D., Yan Y. Three-dimensional reconstruction of flame temperature and emissivity distribution using optical tomographic and two-colour pyrometric

techniques // Meas. Sci. Technol. — 2013. — V. 24, N
 7. — 074010. — DOI: 10.1088/0957-0233/24/7/074010.

- Wang K., He Y., Liu Z., Qian X. Experimental study on optimization models for evaluation of fireball characteristics and thermal hazards induced by LNG vapor cloud explosions based on colorimetric thermometry // J. Hazard. Mater. — 2019. — V. 366. — P. 282–292. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.10.087.
- 9. Chang P.-J., Mogi T., Dobashi R. An investigation on the dust explosion of micron and nano scale aluminium particles // J. Loss Prev. Process Ind. 2021. V. 70. 104437. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104437.
- Densmore J. M., Homan B. E., Biss M. M., McNesby K. L. High-speed two-camera imaging pyrometer for mapping fireball temperatures // Appl. Opt. — 2011. — V. 50, N 33. — P. 6267– 6271. — DOI: 10.1364/AO.50.006267.
- Godoy S. M., Lockwood F. C. Development of a two-colour infrared pyrometer for coal particle temperature measurements during devolatilisation // Fuel. — 1998. — V. 77, N 9-10. — P. 995–999. — DOI: 10.1016/S0016-2361(97)00292-5.
- Cheng Y.-F., Meng X. R., Ma H.-H., et al. Flame propagation behaviors and influential factors of TiH₂ dust explosions at a constant pressure // Int. J. Hydrogen Energy. 2018. V. 43, N 33. P. 16355–16363. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.06.145.
- Keyvan S., Rossow R., Romero C. Blackbody-based calibration for temperature calculations in the visible and near-IR spectral ranges using a spectrometer // Fuel. — 2006. — V. 85, N 5-6. — P. 796–802. — DOI: 10.1016/j.fuel.2005.08.033.
- Huang Y., Yan Y. Transient two-dimensional temperature measurement of open flames by dualspectral image analysis // Trans. Inst. Meas. Control. — 2000. — V. 22, N 5. — P. 371–384. — DOI: 10.1191/014233100701523873.
- 15. Wang W., Cheng Y., Wang R., et al. Flame behaviors and overpressure characteristics of the unconfined acetylene-air deflagration // Energy. — 2022. — V. 246. — 123380. — DOI: 10.1016/j.energy.2022.123380.
- Song S.-X., Cheng Y.-F., Wang W.-T., Wang Z.-H., Zhang B.-B. Explosion behaviors of hybrid C₂H₂/CaC₂ dust in a confined space // J. Hazard. Mater. — 2021. — V. 416. — 125783. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125783.
- 17. Li J., Chou S. K., Yang W. M., Li Z. W. A numerical study on premixed micro-combustion of CH₄-air mixture: Effects of combustor size, geometry and boundary conditions on flame temperature // Chem. Eng. J. — 2009. — V. 150, N 1. — P. 213–222.

- Weigand P., Lückerath R., Meier W. Documentation of flat premixed laminar CH₄/air standard flames: Temperatures and species concentrations. — Inst. of Combust. Technol., German Aerospace Center (DLR), 2003. http://www.dlr. de/vt/datenarchiv.
- 19. **Prucker S., Meier W., Stricker W.** A flat flame burner as calibration source for combustion research: Temperatures and species concentrations

of premixed H_2/air flames // Rev. Sci. Instrum. — 1994. — V. 65, N 9. — P. 2908–2911. — DOI: 10.1063/1.1144637.

Поступила в редакцию 11.08.2022. После доработки 03.11.2022. Принята к публикации 09.11.2022.