

УДК 539.9+518.517.948

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МУАРОВОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР ПО ИНФРАКРАСНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ПЛАМЕНИ ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТАВА

Вэнг Хью, Ву Донглу*, Пэн Гонгпэй

Department of Applied Chemistry, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, P. R. China
wangxue@pub.jlonline.com

*Department of Applied Physics, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, P. R. China

Измерение поля температур пламени горящего пиротехнического состава по его инфракрасному излучению представляет собой трудную проблему из-за высокой яркости и большой концентрации частиц конденсированной фазы. В данной работе муаровая дефлектомография применена к измерениям мгновенного поля температур при горении пиротехнической смеси. Четко наблюдались границы области горения. Восстановлено распределение показателя преломления осесимметричной области горения путем использования численного обращения интегрального уравнения Абеля, а также выполнена реконструкция распределения температур в горизонтальном сечении. Определено максимальное значение температуры пламени.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение поля температур пламени по инфракрасному излучению пиротехнической смеси всегда представляет собой сложную задачу пиротехники. Обычно температура измеряется термопарой [1], КАРС-спектрометром и т. д. Метод измерения температуры термопарой относится к числу контактных. Поверхность термопары быстро покрывается порошковым налетом, что вносит ошибку в измерение температур для сильнозапыленных пламен. Метод КАРС-спектроскопии не приспособлен к измерениям в пламенах с относительно сильным фоновым излучением. Что касается других бесконтактных оптических методов, таких как теневой, шпирен, интерферометрический и т. п. [2], исследования показывают, что теневые и шпирен-методы весьма несовершенны и могут дать лишь качественные результаты из-за влияния высокой яркости, задымленности, поглощения и рассеяния излучения. Хотя интерферограммы пламени в свободном потоке и были получены, количественные результаты получить не удалось, так как из-за влияния конденсированных частиц и больших температурных различий между областью измерений и окружающим газом опорные полосы на интерферограмме пропадают или рвутся. В данной работе упомянутые

недостатки преодолены путем использования отклоняющей муаровой томографии применительно к измерениям температур пламени пиротехнической смеси, при этом получена четкая граница поля горения.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Отклонение полосы муара происходит при прохождении луча света сквозь фазовый объект. Это отклонение можно использовать для восстановления показателя преломления среды, а далее по соотношению между этим показателем и температурой можно вычислить и распределение температур. Муаровые полосы формируются при прохождении луча света через муаровую решетку. Когда луч света проходит сквозь фазовую неоднородность между решетками, сдвиг муаровой полосы отражает угол отклонения луча в этой неоднородности.

Поскольку пиротехническая смесь была приготовлена в виде цилиндрического образца, поле горения в эксперименте было приблизительно аксиально-симметрично.

В предположении, что ось симметрии пламени ориентирована вдоль оси Y , муаровые полосы (при прохождении света сквозь две решетки Рончи, спроецированные на плоскость XOY) также отклоняются в направле-

нии Y . Согласно теории муаровой отклоняющей томографии угол отклонения луча, проходящего сквозь фазовый объект в виде пламени, дается формулой

$$\varphi = \frac{1}{n_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial[n(x, y) - n_0]}{\partial y} dx. \quad (1)$$

Здесь n_0 — коэффициент преломления в вакууме*, $n(x, y)$ — коэффициент преломления пламени.

Обозначим через Δ шаг решеток, а через θ — угол между ними. Тогда для однородного показателя преломления получается параллельная система полос с равномерным шагом:

$$d' = \frac{d}{2 \sin(\theta/2)} \approx \frac{d}{\theta}, \quad (2)$$

где d — постоянная решетки. Для неоднородного поля горения соотношение между углом отклонения и сдвигом полос $D(x, y)$ выглядит так:

$$D(x, y) = \frac{\varphi \Delta}{2 \operatorname{tg}(\theta/2)}. \quad (3)$$

Из (2), (3) получаем

$$\varphi = \frac{D d \operatorname{tg}(\theta/2)}{d' \Delta \sin(\theta/2)}. \quad (4)$$

Для практических измерений, когда угол между решетками относительно мал, угол отклонения можно записать в виде

$$\varphi = \frac{D d}{d' \Delta}. \quad (5)$$

Если постоянная решетки задана, угол отклонения может быть определен по относительному сдвигу. Предположим, что в цилиндрической системе координат Y — ось симметрии. Для луча света, прошедшего сквозь пламя в направлении y' , угол отклонения находим по формуле (1):

$$\varphi(y') = \frac{y'}{n_0} \int_r^{\infty} \frac{\partial n(r)}{\partial r} \frac{dr}{(r^2 - y'^2)^{1/2}}. \quad (6)$$

После преобразования Абеля [3] получаем следующую формулу:

$$n(r) - n_0 = -\frac{n_0}{\pi} \int_r^{\infty} \frac{\varphi(y')}{(r^2 - y'^2)^{1/2}}, \quad (7)$$

где φ задана формулой (5). Применяв численное интегрирование, можно получить решение интегрального уравнения Абеля и тем самым вычислить симметричное распределение коэффициента преломления $n(r)$. Далее находим плотность ρ по формуле Гладстона — Дэйла [4]:

$$(n - 1) = k\rho. \quad (8)$$

Здесь k — константа. Наконец, подставляя плотность в уравнение состояния газа, получим осесимметричное распределение температуры по формуле

$$T = mp/R\rho, \quad (9)$$

где p — давление, m — средняя молекулярная масса газа, R — газовая постоянная.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальная установка показана на рис. 1. В эксперименте использовалась пиротехническая смесь (Mg/политрифторэтан/ BaO_2 в соотношении 2,03/1,47/2,50 (г)), которая была спрессована в цилиндр диаметром 8 мм, который помещался в центральную часть лазерного пучка. После зажигания пиротехнической смеси регистрировалась проекция мгновенного состояния поля горения. Для этого применялась камера со скоростью регистрации 8000 кадр/с. Далее картина муаровых полос передавалась в компьютер и обрабатывалась. С помощью системы измерений (см. рис. 1) можно собрать изображения проекций, а затем для любого произвольного момента времени провести реконструкцию потока. Экспериментальный кадр с изображением системы сдвинутых муаровых полос, созданных полем горения, приведен на рис. 2. Расстояние между решетками $\Delta = 1,66$ см, реперная температура $T = 500$ К. После обработки фотографии, представленной на рис. 2, была получена система сдвинутых муаровых полос (рис. 3). С помощью этого изображения можно определить углы отклонения φ , а по формулам (7)–(9) вычислить поле температур пламени.

Описанная методика была применена для реконструкции поля температур в горизонтальном сечении, находящемся на расстоянии

*Точнее, в окружающей пламя среде. (Прим. пер.)

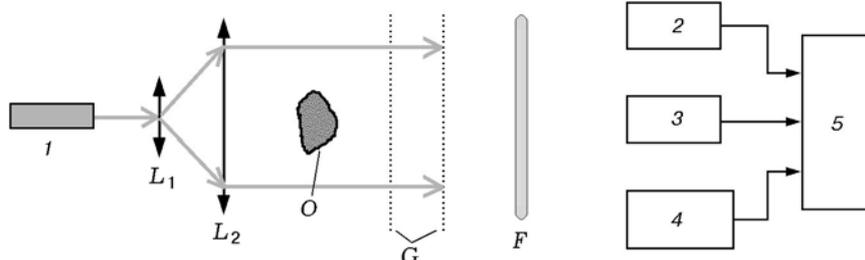


Рис. 1. Схема измерения температур методом муаровой томографии:

1 — лазер He-Ne; L_1 — линза, расширяющая пучок, L_2 — коллиматор, O — объект, G — решетки Рончи (20 линий/мм) для формирования муара, F — фильтр для обрезания фонового излучения; 2 — система наблюдения; 3 — камера; 4 — система сбора изображений; 5 — компьютер

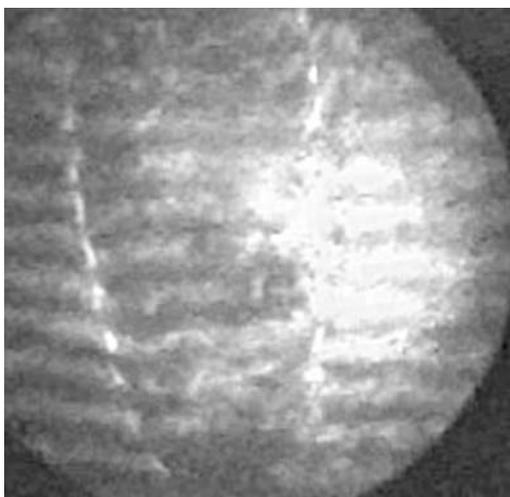


Рис. 2. Картина отклонений муаровых полос в поле горения пиротехнического состава



Рис. 3. Картина отклонений муаровых полос после обработки фотографий

4 см от образца. Распределение полученного поля температур показано на рис. 4. Максимальная температура пламени в этом сечении составляет 3243 К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены поле температур и максимальные значения температур в пламени пиротехнического состава в условиях сильной яркости и повышенной концентрации конденсированных частиц. При восстановлении поля температур методом смещения муаровых полос ошибка зависит, в первую очередь, от точности измерения сдвигов. Кроме того, точность обработки данных зависит и от точности системы сбора. В процессе перевода фотографии, полученной высокоскоростной камерой, в цифровое изображение, чем выше пространственное разрешение этого изображения, тем более тонкая

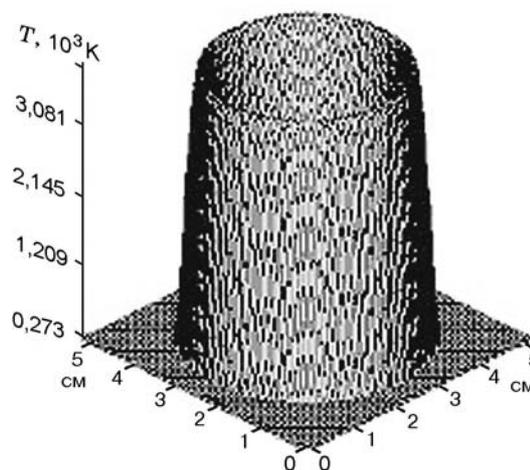


Рис. 4. Реконструированное поле температур в горизонтальном сечении образца

структура изображения разрешается. В данных экспериментальных условиях разрешение цифрового изображения составляло 320×240 .

Дополнительно для регистрации муаровых полос, формируемых от пламени с высокой яркостью, не только применялся фильтр для исключения нерабочего спектрального диапазона, но и использовался лазер с его преимуществами в виде хорошей направленности и малой расходимости пучка, что позволило увеличить расстояние между решеткой и измеряемой областью для увеличения резкости муаровых полос. В данном эксперименте это расстояние составило 20 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kubota N., Serizawa C.** Combustion process of Mg/TF pyrotechnics // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1987. V. 12. P. 145–148.
2. **Vest C. M.** Interferometry of strong refracting axisymmetric phase objects // Appl. Opt. 1975. V. 14, N 7. P. 1601–1606.
3. **Deans S. R.** Radon and Abel Transforms. Florida: CRC Press, 1996.
4. **Vest C. M.** Tomography for properties of materials that bend rays: A tutorial // Appl. Opt. 1985. N 12. P. 4089–4094.

Поступила в редакцию 30/III 2000 г.
