

多光谱测量材料冲击辐射特性的温度反演算法

张宁超^{1*}, 杨帆¹, 任娟², 杜岳涛¹, 王鹏^{1**}, 刘福生³¹西安工业大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710021;²西安工业大学理学院, 陕西 西安 710021;³西南交通大学先进材料教育部重点实验室, 四川 成都 610031

摘要 材料的冲击辐射温度是高温-高压作用下状态方程研究的重要物理参量,对武器研制、科学研究和工业制造意义重大。针对冲击辐射温度具有瞬时非接触、测量环境噪声复杂、温度反演发射率不可测等特点,设计了一种新的温度反演方法,以提高温度获取精度。根据约束优化理论,将乘子罚函数法与粒子群算法相结合,实现两种模型的串联,并改进粒子群-乘子罚函数算法。结果表明该混合模型求解方法充分结合了两种单一算法的优势,提高了冲击辐射测试数据的温度反演精度与运算效率,为研究材料冲击辐射的真实温度提供了保障。

关键词 测量; 多光谱测量; 辐射特性; 温度; 反演算法

中图分类号 O432.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0912003

Temperature Inversion Algorithm for Multi-Spectral Measurement of Material Shock Radiation Characteristics

Zhang Ningchao^{1*}, Yang Fan¹, Ren Juan², Du Yuetao¹, Wang Peng^{1**}, Liu Fusheng³

¹College of Electronics and Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;

²School of Science, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;

³Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China

Abstract The shock radiation temperature of materials is an important physical parameter for the study of equation of state under the action of high temperature and high pressure, which is of great significance to weapon development, scientific research, and industrial manufacturing. Aiming at the characteristics of instantaneous non-contact, complex measurement environmental noise, and unmeasurable emissivity inverted by temperature, a new temperature inversion method is designed to improve the accuracy of temperature acquisition. According to the constrained optimization theory, the multiplier penalty function method and particle swarm optimization (PSO) algorithm are combined to realize the series of the two models, and the PSO-multiplier penalty function algorithm is improved. The results show that the hybrid model solving method fully combines the advantages of the two single algorithms and improves the temperature inversion accuracy and operation efficiency of the test data of impact radiation. It provides a guarantee for studying the real temperature of material under impact radiation.

Key words measurement; multi-spectral measurement; radiation characteristics; temperature; inverse algorithm

收稿日期: 2021-08-20; 修回日期: 2021-11-01; 录用日期: 2021-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(12004292)、陕西省科技厅重点研发计划(2021KWZ-20, 2020GY-192)、陕西省教育厅科学基金(20JK0688)

通信作者: *ningchaozhang@163.com; **peng_watu@163.com

1 引言

温度是表征物质热力学状态的重要物理参量,冲击辐射温度的测量对于核能聚变和状态方程的研究尤为重要^[1]。冲击辐射温度产生的条件较为特殊,与冲击产生的动能和材料物性有密切关系,尤其是武器弹药性能测试总伴随着冲击辐射温度场的产生,通过辐射温度的精准测量可以有效获取武器弹药的设计合格率和毁伤程度^[2]。早期测量冲击辐射温度的方法主要是热电偶计法和双色测温法。热电偶计法属于接触式测量法,该方法存在测量范围窄、响应慢等缺陷,对环境的要求比较严格。双色测温法直接对光辐射信息进行检测,无需接触被测物体,该方法对双色波长的选择较为苛刻、操作困难^[3]。多光谱法是对双色测温法的改进,具有响应快、高精度等特点,通过测量多个通道下的辐射信息并结合黑体辐射定律以及物体发射率可以获得被测目标的真实温度。但是发射率作为连接黑体与灰体之间的物理介质,与物体本身的材料特性以及所处环境等因素相关,受到多种参数的影响,数值信息获取困难。因此,物体发射率的获取成为了多光谱法测量冲击辐射温度反演的关键所在^[4-5]。

早期 Svet^[6]采用近似假定发射率模型,计算得到了目标温度与物体发射率数值。为了解决发射率模型的选取问题,提出以维恩辐射定律为基础,利用辐射分量求解被测目标物体发射率与目标温度值的方法。Smurov 等^[7]将对数发射率模型与最小二乘法相结合,仿真计算了金属材料的表面温度值,改善了模型的适用性。Qiu 等^[8]采用数据拟合的方法对物体发射率与目标温度值进行求解,通过插值和最小二乘法在误差最小时获取发射率与目标温度。Urtiew 等^[9]通过分析不同发射率模型的辐射测温结果,将自动寻阶理论引入发射率和温度求解,构建了自动识别发射率模型的方法。McQueen 等^[10]提出将非线性拟合理论引入物体发射率与目标温度的求解问题中,采用遗传算法的逐步迭代理论完成最优化搜索求解。该方法不依赖于梯度信息的获取,被广泛应用于非线性问题求解。张福才小组认为后向传播(BP)神经网络在优化求解问题方面有一定缺陷,寻优过程极易因陷入局部搜索而只能寻找到该区域内的最优解^[11-12]。同时发现遗传算法(GA)可有效解决该问题,因此提出了 GA-BP 算法,该方法有效提升了温度反演求解的准确度。孙崐等^[13]利用亮温趋近法获取温度起始值的方案,计算出更

加精确的物体发射率与目标温度。顾伟宏等^[14]基于对原始二次测量法的研究,针对迭代寻优求解的终止条件进行修改,构建出一种温度求解方法,该方法获得的物体发射率变化趋势与假定的物体发射率变化趋势接近。杨艺帆等^[15]根据非黑体下的普朗克辐射定律获得包含物体发射率与目标温度的欠定方程组,通过采用牛顿迭代法进行求解,获得发射率与目标温度值。该方法有效地解决了物体发射率与波长函数关系模型的获取问题,但温度初值与发射率初值的选取对求解影响较大。朱泽忠等^[16]提出发射率基函数不变法,将自动寻阶理论与逐步回归法相结合,找出一种通用的发射率基函数,通过解出不同材料发射率基函数的参数值获得接近真实情况的发射率函数。由于发射率值易受多种因素的影响,因此该算法的适用性较差。

上述研究表明,多光谱辐射温度的求解最终归于物体发射率的求解问题,物体发射率的获取成为阻碍温度求解的核心问题。常见的物体发射率求解方法包括了历史经验法、理论模型法和智能算法。历史经验法和理论模型都存在适用性差的问题,都需要被测材料精确的高温高压历史数据,而高温高压下材料的参数测量不确定性非常高,部分物理参量都是数值模拟结果,并不能证明模型结论的真实性。智能算法能有效地克服该类缺陷,但高求解精度需要大量的实验数据进行训练支撑,数据库越丰富庞大,其获得的结果越精确,该方法得到的结果存在随机性。本文针对智能算法的随机性等产生的误差,提出了科学合理的发射率求解模型与温度反演方法,建立温度反演模型,提高了温度求解的准确性与计算运行效率。

2 温度反演模型构建

基于普朗克黑体辐射定律,多光谱辐射温度的求解最终归于物体发射率的求解。在多通道辐射高温计中,假定通道参数为 n ,则 n 个通道在不同波长下可获得 n 个输出信号。当真实温度为 T 时,第 i 个通道可以测得此时的输出信号值 V_i :

$$V_i = A_{\lambda_i} \cdot \epsilon(\lambda_i, T) \cdot \frac{\lambda_i^{-5}}{\exp(c_2/\lambda_i T)}, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, n, \quad (1)$$

式中: $\epsilon(\lambda_i, T)$ 是真实温度 T 下的目标光谱发射率; A_{λ_i} 为检定常数; c_2 为常量; λ_i 为波长。

辐射亮度温度是测量某波长下物体辐射能量时,黑体中该波长对应的温度值,根据亮温定义,

可得

$$V_i = A_{\lambda_i} \cdot \frac{\lambda_i^{-5}}{\exp(c_2/\lambda_i T')}, \quad \epsilon(\lambda_i, T) = 1, \quad (2)$$

式中: T' 为辐射亮度温度。

在黑体中, 物体材料的发射率近似为 1。若此时的温度为 T_0 , 则在同一波长通道下可以测得此时的输出值 V'_i 为

$$V'_i = A_{\lambda_i} \cdot \frac{\lambda_i^{-5}}{\exp(c_2/\lambda_i T_0)}, \quad \epsilon(\lambda_i, T) = 1. \quad (3)$$

结合式(2)、(3), 进行整理变换可得

$$\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T'} = \frac{\lambda_i}{c_2} \cdot \ln\left(\frac{V_i}{V'_i}\right). \quad (4)$$

式(4)中 5 个物理参量中, 波长、黑体温度、同一通道下的黑体输出信号与实际输出信号可通过实验测量得到, 物体辐射亮度温度为未知量, 通过公式求解可求得, 辐射亮度温度与真实温度的关系是

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T'} = \frac{\lambda_i}{c_2} \cdot \ln \epsilon(\lambda_i, T), \quad (5)$$

式(5)中波长 λ_i 与辐射亮度温度 T' 为实验测量数据, 真实温度 T 与物体发射率 ϵ 为未知参量。多通道特征波长 λ 由仪器标定获得。辐射亮度温度 T' 通过实验测量数据计算得到, 只剩两个未知参量真温 T 与发射率 ϵ 未知。当已知两者中任意一个参数数值时, 通过求解式(5)可获得另一个未知参量。由于实验测量的是同一物体的辐射真实温度, 因此理想状态下各个通道求解出的真实温度值相同, 故可得

$$\sum_{i=1}^8 \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^8 T_i}{8} - T_i \right) \right]^2 = 0, \quad (6)$$

式中: $(\sum_{i=1}^8 T_i)/8$ 为 8 通道辐射高温计真实温度的均值。实际中式(6)差值不会恒等于零, 只能是无限趋于零的极小值, 因此可将其转换为最优化求解问题:

$$\min f = \sum_{i=1}^8 \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^8 T_i}{8} - T_i \right) \right]^2. \quad (7)$$

将式(6)代入式(7), 可得

$$\min f = \sum_{i=1}^8 \left\{ \frac{\sum_{i=1}^8 \left[\frac{1}{T'} + \frac{\lambda_i}{c_2} \ln \epsilon(\lambda_i, T) \right]}{8} - \frac{1}{\frac{1}{T'} + \frac{\lambda_i}{c_2} \ln \epsilon(\lambda_i, T)} \right\}^2. \quad (8)$$

物体发射率是介于 0 与 1 之间的目标变量, 即 $\epsilon(\lambda_i, T) \in [0, 1]$, 则最优化求解问题可转化为约束优化问题, 通过约束优化算法可获得物体的真实温度值。采用多光谱法求解冲击辐射温度约束优化模型:

$$\begin{cases} \min f = \sum_{i=1}^8 \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^8 T_i}{8} - T_i \right) \right]^2 \\ x_i \leq 0 \end{cases}. \quad (9)$$

3 算法仿真

虽然普朗克定律涵盖了物体(黑体)辐射亮度、温度与辐射波长三者之间的函数关系, 但实际物体本身并不是黑体, 测量值与黑体辐射亮度值之间存在一个物理参量——物体发射率, 构建的温度反演优化模型中物体发射率成为了阻碍温度求解的唯一未知参量, 是影响冲击辐射温度获取的关键因素。通过引入约束优化理论, 将冲击辐射温度求解转化为利用约束优化方法求解, 解决温度的真实反演, 获取物体发射率与目标温度。

3.1 基于乘子罚函数的多光谱发射率及温度反演

乘子罚函数法是由 Powell 和 Hestenes 两位学者在 1969 年为解决约束下最优化问题而首次提出, 其基本思想是通过将拉格朗日函数引入罚函数算法中, 构造出新的目标函数, 在约束优化求解过程中解决普通罚函数容易陷入“病态”的问题, 进而求解出原目标函数的最优解^[17]。

在罚函数算法中, 罚因子的选取非常重要, 由初始罚因子 M 和放大系数 α 决定, 一般选取 $M \in (0, 1)$ 和 $\alpha \in (1, 5)$ 。为确定最优的 M 值和 α 值, 通过构造 A、B、C 三种具有线性材料特征的发射率模型:

$$\text{model A: } \epsilon(\lambda) = a_0 - a_1 \lambda, \quad (10)$$

$$\text{model B: } \epsilon(\lambda) = a_0 + a_1 \lambda, \quad (11)$$

$$\text{model C: } \epsilon(\lambda) = a_0 + a_1 \lambda + a_2 \lambda^2, \quad (12)$$

式中: $\epsilon(\lambda)$ 为发射率; a_0 、 a_1 和 a_2 为系数。对表 1 中的发射率样本进行训练, 训练中参考温度选取 1200 K, 真实温度选取 2000 K。

设定参数 α 值恒定, 对初始罚因子 M 选取的不同值进行仿真验证, M 的取值范围为 0.1~0.9, 步长间隔为 0.1。对三种发射率样本进行温度反演的结果如表 2 所示, 参数 M 取不同值时, 温度反演结果与真实值接近, 同时不同参数下的反演温度值的误差分布稳定, 且最大相对误差为 1.4%, 这表明该算法在实现温度反演时具有精度较高且稳定性好的优点。

表 1 物体发射率模型
Table 1 Emissivity model of matter

Sample	0.4 nm	0.5 nm	0.6 nm	0.7 nm	0.8 nm	0.9 nm	1 nm	1.1 nm
A	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
B	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
C	0.85	0.80	0.75	0.70	0.70	0.75	0.80	0.85

表 2 不同 M 值下三种模型的温度反演结果

Table 2 Temperature inversion results of three models with different values of M

Sample	$M=0.1$	$M=0.2$	$M=0.3$	$M=0.4$	$M=0.5$	$M=0.6$	$M=0.7$	$M=0.8$	$M=0.9$
A	2016.31	2017.42	1982.83	1983.56	2016.71	2016.37	1982.74	2016.91	1983.57
B	1972.83	2026.23	2026.87	2026.13	1972.03	2026.62	2026.92	1973.60	2027.52
C	2009.04	2008.54	2009.20	2008.15	1991.54	1991.54	1991.54	2008.95	2009.65

根据表 2 中温度反演的结果,求解出参数 M 选取不同值时对应的物体发射率数值。如图 1 所示,同一物体的发射率分布呈现两种趋势,模型 A 中 M 值为 0.3,0.4,0.7,0.9 时的发射率高于标准值, M 值为 0.1,0.2,0.5,0.6,0.8 时的发射率低于标准值;B 模型中 M 值为 0.1,0.5,0.8 时的发射率高于

标准值, M 值为 0.2,0.3,0.4,0.6,0.7,0.9 时发射率低于标准值;C 模型中 M 值为 0.5,0.6,0.7 时发射率高于标准值, M 值为 0.1,0.2,0.3,0.4,0.8,0.9 时发射率低于标准值。对于三类模型,不同 M 值时的发射率反演变化趋势与真实值趋势一致且接近。

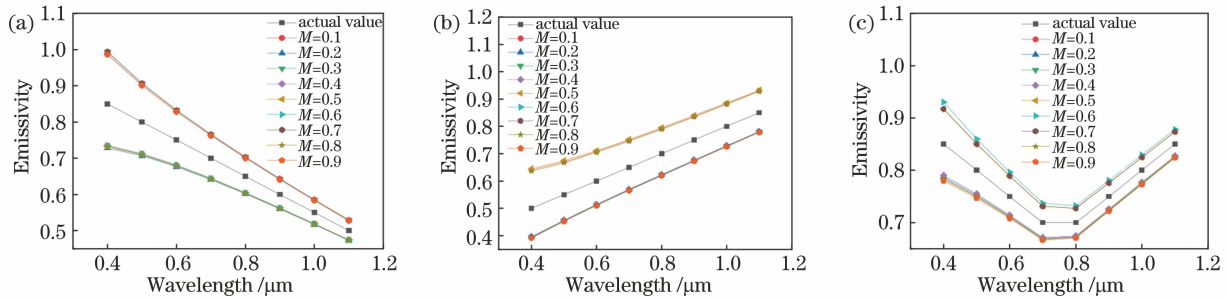


图 1 不同 M 值时三种模型的发射率。(a)模型 A;(b)模型 B;(c)模型 C

Fig. 1 Emissivity of three models with different values of M . (a) Model A; (b) model B; (c) model C

如果设定参数 M 值恒定,选取不同放大系数 α 进行仿真验证, α 取值范围为 2~4.5,步长为 0.5。对三种发射率样本进行温度反演的实验结果如表 3 所

示,温度反演结果与真实值较为接近,同一种物体发射率样本在不同 α 值时的温度反演的结果误差分布趋于稳定,接近真实温度值,最大相对误差为 1.7%。

表 3 不同 α 值时三种模型的温度反演值

Table 3 Temperature inversion results of three models with different values of α

Sample	2	2.5	3	3.5	4	4.5
A	2015.15	1984.11	2014.61	1985.88	1984.77	2015.18
B	1967.40	2033.94	1966.74	1967.68	2032.56	2033.46
C	2006.01	2007.79	2006.77	2007.44	1992.73	2006.85

根据表 3 中温度反演结果,求解 α 选取不同值时的物体发射率数值。如图 2 所示,同一物体发射率分布有两种,模型 A、B、C 在 α 值为 4 时的发射率都高于标准值, α 值为 2.5,3,3.5,4.5 时发射率低于标准值,三类模型的发射率反演变化趋势与真实

值趋势一致且接近。

将乘子罚函数算法应用于辐射温度的反演中,对于线性均匀材料的发射率样本,初始罚因子 M 值的选取直接影响反演精度,不同 M 值下温度反演的结果误差分布趋于稳定,其最大误差为 1.4%,这表

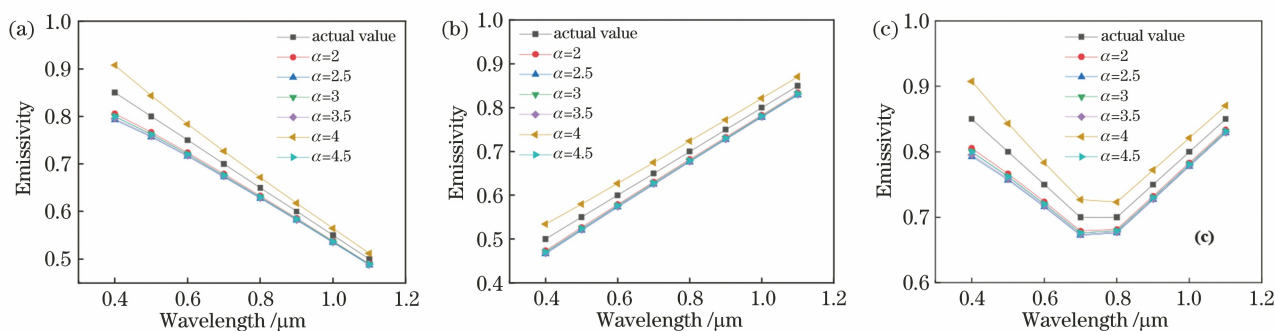


图 2 不同 α 值时三种模型的发射率。(a)模型 A;(b)模型 B;(c)模型 C

Fig. 2 Emissivity of three models with different values of α . (a) Model A; (b) model B; (c) model C

明该算法对于温度反演求解的可行性。放大系数 α 的取值对温度反演精度影响较小,但 α 的不同取值对算法的运行效率影响比较明显。通过综合对比分析可得,针对均匀线性材料温度反演,乘子罚函数算法中的参数选取的最佳值为:初始罚因子 $M=0.1$,放大系数 $\alpha=2$ 。

3.2 基于改进粒子群算法的多光谱发射率及温度反演

粒子群算法(PSO)是由 Kennedy 等^[18]提出的一种行为算法,通过对鸟群的觅食行为进行观察,总结其行为规律,进而得到了一种智能优化算法。该算法主要分为个体与群体两部分。个体飞行过程经过搜寻搜索范围,寻找到经历过的最优目标解位置 $p_{best}=(p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{in})$, n 为粒子群的粒子数;群体由个体构成,通过搜寻所有个体所经过的最优目标解位置,选取其中的最佳值作为整个群体的最优目标解位置 P_g 。粒子在搜寻目标过程中,其飞行速度 $V_i=(v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{in})$,粒子的最优目标解位置 $X_i=(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in})$,迭代更新可表示为

$$v_{id} = \omega \cdot v_{id} + c_1 \cdot R \cdot (p_{id} - x_{id}) + c_2 \cdot R \cdot (p_{gd} - x_{id}), \quad (13)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id}, \quad (14)$$

式中:下标 d 为解的个数; ω 是粒子的飞行惯性所产生的权重因子; c_1, c_2 是粒子飞行中向目标接近时速度迭代所产生的加速常数; R 为区间 $0 \sim 1$ 的随机值。

标准粒子群算法一般使用线性惯性权重的方法:初期惯性权重重大,有利于全局搜索;后期惯性权重小,有利于局部寻优。本文采用了 ω 迭代渐变函数,通过线性迭代的方式对惯性权重 ω 进行迭代更新。加速常数 c_1, c_2 代表粒子在运动过程中自身认知能力与社会群体认知能力靠拢至种群适应度的权重,本文采用了改进粒子群算法(IPSO),通过加速常数迭代的异步变化法,满足粒子在前期良好的社

会认知和后期较强的个体认知,从而更容易找到最优解。基于表 1 的数据进行验证,选取 c_1, c_2 为定值 1.49445, ω 分别为定值、线性迭代结果、改进迭代结果^[19-21]。不同 ω 下三种模型的反演温度结果如表 4 所示。其中参考温度为 1200 K,真实温度为 2000 K。在三种样本模型下, ω 改进迭代法反演结果优于其他两种,反演温度的最大相对误差为 2%。计算得到 ω 不同值时的发射率如图 3 所示,三种方法下的物体发射率趋势与样本发射率趋势相同, ω 改进迭代后样本发射率的相对误差更小。

表 4 不同 ω 下三种模型的反演温度值

Table 4 Inversion temperature results of three models with different values of ω K

Sample	Fixed value	Linear iteration	Improved iterative
	ω	value ω	value ω
A	2037.1	2027.6	2016.6
B	2043.6	1951.2	1961.3
C	2020.1	2003.6	2003.1

当选取 ω 为改进迭代结果, c_1, c_2 分别为定值 1.49445 和 c_1, c_2 改进迭代后的温度反演结果如表 5 所示,在三种样本模型下, c_1, c_2 改进迭代后反演的结果优于 c_1, c_2 取定值的结果,最大相对误差为 2.5%。根据反演温度计算 c_1, c_2 为不同取值时的发射率,如图 4 所示,两种方法的物体发射率趋势与样本发射率趋势相同, c_1, c_2 经改进迭代后样本发射率的相对误差更小。

表 5 不同 c_1, c_2 下三种模型的反演温度值

Table 5 Temperature inversion results of three models with different values of c_1 and c_2 K

Sample	Fixed values	Improved iterative values
	c_1 and c_2	c_1 and c_2
A	2034.1	2026.7
B	1950.4	1970.1
C	2043.8	2035.2

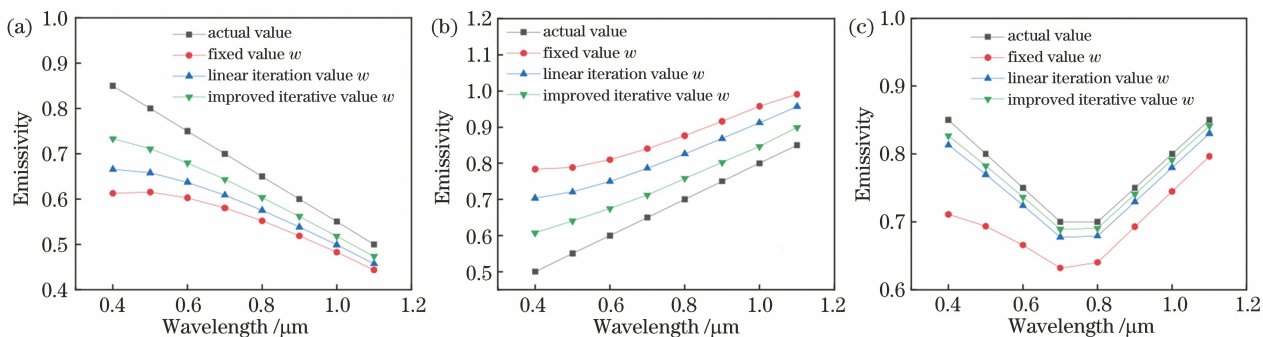


图 3 不同 w 值时三种模型的发射率。(a)模型 A;(b)模型 B;(c)模型 C

Fig. 3 Emissivity of three models with different values of w . (a) Model A; (b) model B; (c) model C

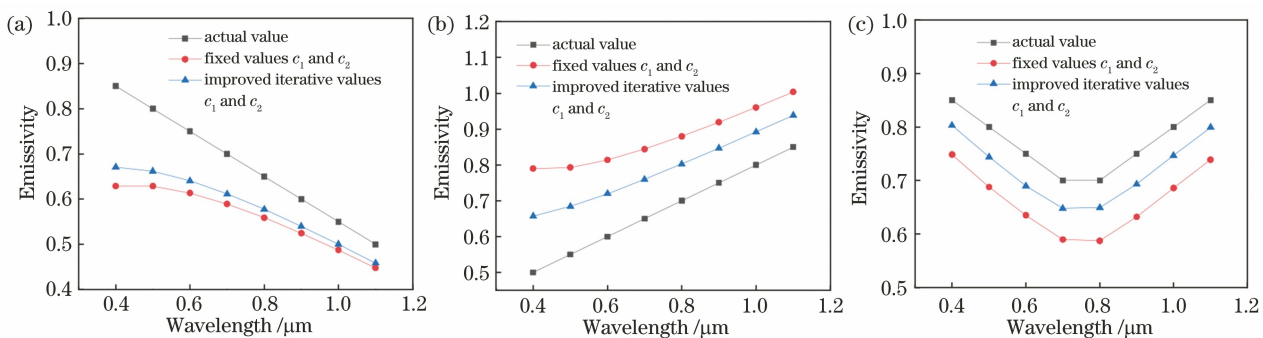


图 4 不同加速常数下的发射率结果。(a)模型 A;(b)模型 B;(c)模型 C

Fig. 4 Emissivity of three models with different values of c_1 and c_2 . (a) Model A; (b) model B; (c) model C

将粒子群算法应用于辐射温度的反演中,惯性权重 w 和加速常数 c_1 、 c_2 对反演结果有较大的影响,求解的结果是局部最优解还是全局最优解由其决定。同时,两个参量的迭代进化次数与种群规模对最终的求解结果和程序运行时间有很大影响,通过比较实验结果,发现选用改进迭代后的 w 和 c_1 、 c_2 反演得到的温度、发射率的精度以及算法运行效率明显提高,但粒子群算法在反演精度及稳定性方面略低于乘法函数算法。

3.3 基于改进粒子群-乘子罚函数的多光谱发射率及温度反演算法

粒子群算法在温度反演的过程中,除去加速常数与惯性权重这两个重要的参量之外,迭代进化次数与种群规模对最终的求解结果以及程序运行时间有很大影响,因此算法模型的准确性较低,容易因发生迭代早熟而陷入局部搜索范围内最优化,每次寻优产生的结果存在非固定性。乘子罚函数算法模型稳定性好,计算精度高,但算法的初始值选择较为困难,选值结果与真值的接近程度与程序的运行时间有着密切的关联。考虑两种算法各自的优势与不足,本文结合乘子罚函数法模型精度高以及粒子群算法模型效率高的特点,实现两种模型的堆叠结合,

设计出改进粒子群-乘子罚函数算法。其算法思想是先利用粒子群算法求解目标问题,得到该问题的近似目标解,然后将该近似解设定为乘子罚函数算法的初始值,从而求解出目标问题的真实最优解。这样做的目的就是克服乘法函数初始值选取难度大的问题,同时发挥其算法稳定性好以及样本量需求少的特点,算法具体步骤如图5所示。图5中 x_{best}

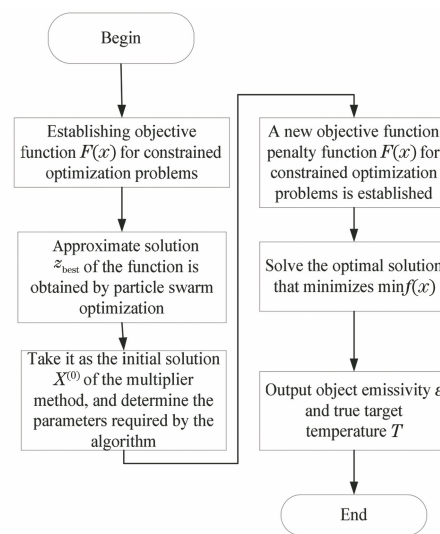


图 5 组合算法流程图

Fig. 5 Combined algorithm flow diagram

表示利用粒子群算法求得的目标函数的近似解。

实验设定如表 6 所示的 8 个有效波长,对 A、B、C 三种发射率模型进行求解,每类别取 9 组发射率样本,如表 7 所示,选取其中的 8 组作为训练样本,参考温度设定为 1200 K,选取真实温度为 2000 K,在此基础上每次分别增加 30 K,共取 3 组真温样本值,用于测试算法在不同温度下求解的稳定性。

表 6 8 通道有效波长

Table 6 Effective wavelengths of 8 channels

Channel No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Wavelength / μm	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1

其中采用每类样本的第一组数据作为仿真实验测试组,针对该数据改进粒子群-乘子罚函数法并对数据进行真温反演,同时使用最小二乘法 and BP 神经网络对相同的样本进行了仿真训练,三种方法对温度的反演结果如表 8 所示。

只有当假设的发射率与物体的真实发射率接近,最小二乘法的温度反演结果才接近真实值,因此神经网络法和改进的粒子群-乘子罚函数算法的反演效果优于最小二乘法。但 BP 神经网络算法需要准备大量的真实实验数据库,数据库的规模越大且数量越多,求解出的结果的准确性越高。改进粒子群-乘子罚函数算法克服了该缺陷,其中温度误差范围为 50 $^{\circ}\text{C}$,最大相对误差为 2.067%,反演结果优势明显。图 6~8 分别为三种方法得到的三种模型的发射率数值。

表 8 三种方法得到的三种模型的温度反演值

Table 8 Temperature inversion results of three models obtained by three methods

Emissivity model	Reference temperature / K	Least squares method		BP neural network		IPSO-multiplier penalty function	
		Temperature / K	Relative error / %	Temperature / K	Relative error / %	Temperature / K	Relative error / %
A1	2000	1943.75	-2.8125	2032.31	1.61550	2022.21	1.1105000
B1		1961.49	-1.9255	2020.43	1.02150	2007.43	0.3715000
C1		1979.20	-1.0400	2042.25	2.11250	2041.34	2.0670000
A1	2030	1926.64	-5.0916	2052.07	1.08719	2053.04	1.1349754
B1		1954.46	-3.7212	2036.25	0.30788	2037.62	0.3753695
C1		1982.25	-2.3522	2062.71	1.61133	2047.73	0.8733990
A1	2060	1951.92	-5.2466	2074.75	0.71602	2073.72	0.6660194
B1		1980.49	-3.8597	2054.28	-0.27770	2067.18	0.3485437
C1		2009.03	-2.4743	2086.01	1.26262	2048.05	-1.0655340

表 7 8 通道发射率样本

Table 7 Emissivity samples of 8 channels

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8
A1	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
A2	0.85	0.83	0.81	0.79	0.77	0.75	0.73	0.71
A3	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
A4	0.80	0.78	0.76	0.74	0.72	0.70	0.68	0.66
A5	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
A6	0.75	0.73	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63	0.61
A7	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
A8	0.70	0.68	0.66	0.64	0.62	0.60	0.58	0.56
A9	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
B1	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
B2	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	0.81	0.83	0.85
B3	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
B4	0.66	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80
B5	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
B6	0.61	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.73	0.75
B7	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
B8	0.56	0.58	0.60	0.62	0.64	0.66	0.68	0.70
B9	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
C1	0.85	0.80	0.75	0.70	0.70	0.75	0.80	0.85
C2	0.80	0.78	0.76	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82
C3	0.78	0.76	0.74	0.72	0.70	0.72	0.74	0.76
C4	0.76	0.74	0.72	0.70	0.68	0.70	0.72	0.74
C5	0.75	0.70	0.65	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
C6	0.74	0.72	0.70	0.68	0.66	0.68	0.70	0.72
C7	0.72	0.70	0.68	0.66	0.68	0.70	0.72	0.74
C8	0.70	0.68	0.66	0.64	0.62	0.64	0.66	0.68
C9	0.68	0.66	0.64	0.62	0.60	0.62	0.64	0.66

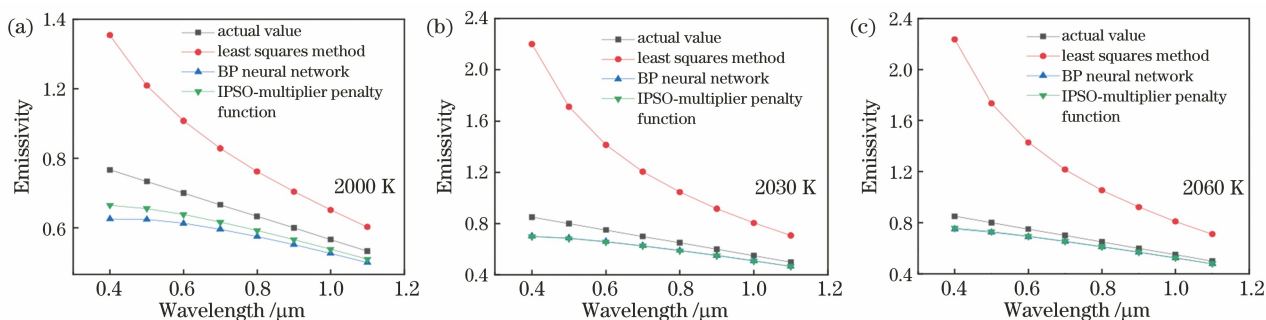


图 6 不同算法得到的模型 A 的发射率。(a) 样本温度为 2000 K; (b) 样本温度为 2030 K; (c) 样本温度为 2060 K
 Fig. 6 Emissivity of model A obtained by different algorithms. (a) Sample temperature is 2000 K; (b) sample temperature is 2030 K; (c) sample temperature is 2060 K

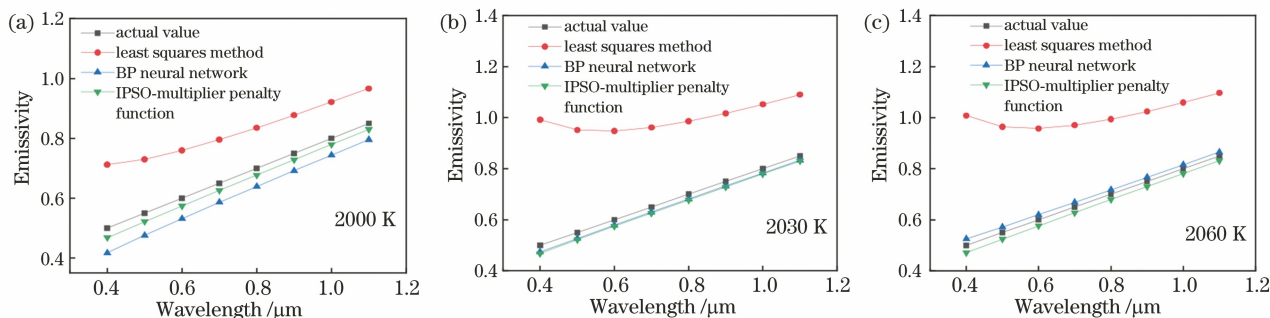


图 7 不同算法得到的模型 B 的发射率。(a) 样本温度为 2000 K; (b) 样本温度为 2030 K; (c) 样本温度为 2060 K
 Fig. 7 Emissivity of model B obtained by different algorithms. (a) Sample temperature is 2000 K; (b) sample temperature is 2030 K; (c) sample temperature is 2060 K

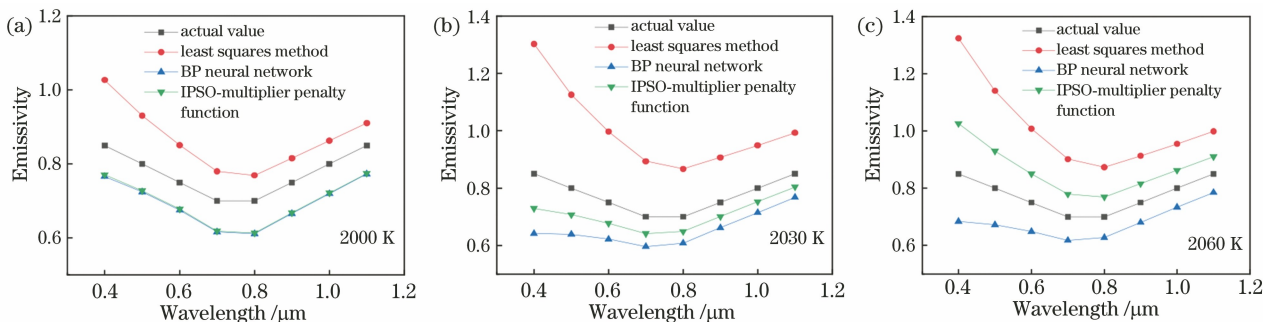


图 8 不同算法得到的模型 C 的发射率。(a) 样本温度为 2000 K; (b) 样本温度为 2030 K; (c) 样本温度为 2060 K
 Fig. 8 Emissivity of model C obtained by different algorithms. (a) Sample temperature is 2000 K; (b) sample temperature is 2030 K; (c) sample temperature is 2060 K

三种方法求解的发射率变化趋势与实际样本的发射率变化趋势一致, BP 神经网络与改进粒子群-乘子罚函数算法求解出的目标发射率数值更接近真实分布情况, 同时改进粒子群-乘子罚函数算法得到的部分反演结果的精度略高于 BP 神经网络模型。但改进粒子群-乘子罚函数算法能够克服 BP 神经网络对样本数据需求量大、运算效率低的缺点, 根据实际工程的需求, 改进粒子群-乘子罚函数算法可用于处理不同温度下的测试数据, 是一种有效的温度反演方法。

3.4 实例验证与分析

在多光谱法测量冲击辐射温度的实验中, 选用多通道辐射高温计来获得离散波长辐射强度的连续变化。本文实验选用 8 通道辐射高温计测试系统, 各通道的中心波长分别为: 0.809, 0.779, 0.702, 0.650, 0.589, 0.533, 0.509, 0.488 μm 。通过采集 8 通道辐射信息随时间的变化数据, 得到光辐射信息。图 9 所示为冲击辐射温度的实验测量系统, 飞片由二级轻气炮发射并与靶面基板发生碰撞, 在金属基板中将产生冲击波, 对其进行冲击压缩, 冲击波通过

金属基板传入后方的透明窗口材料。顶在透明材料后方的光纤束将记录冲击波压缩过程中蓝宝石窗口产生的发光效应,由多通道辐射高温计记录结果并将其导入计算机。

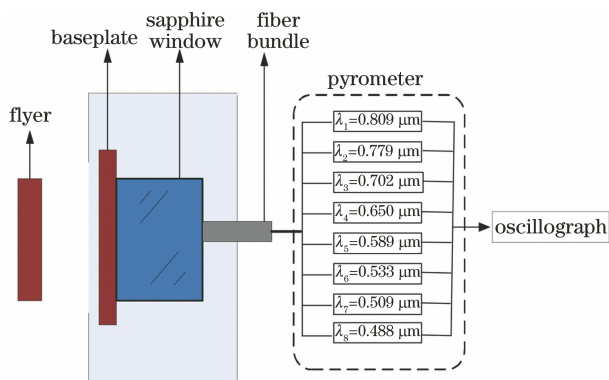


图 9 冲击辐射温度测量实验系统示意图

Fig. 9 Schematic diagram of shock radiation temperature measurement experiment system

图 10 为利用多光谱法测量得到的蓝宝石样品在 36.5 GPa 压力下的光辐射信息。图中给出了 8 个通道的冲击辐射信息随时间的变化值,时刻 t_0 与 t_6 分别对应两个冲击辐射变化的临界情况。当高速飞片撞击材料时,由于材料前界面与空气接触,产生闪光辐射现象, t_0 时刻会出现微小的脉冲尖峰,也说明冲击波从此刻进入蓝宝石样品。当冲击波进

入样品材料,随着时间推移,光辐射也逐渐增强, t_6 时刻辐射强度出现明显拐折,这说明辐射受边侧稀疏波或者追赶稀疏波的影响。

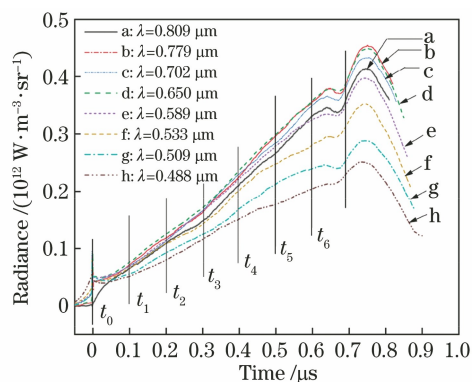


图 10 蓝宝石冲击辐射强度

Fig. 10 Radiation intensity of sapphire under shock

$t_1 \sim t_6$ 时段 6 个时刻点不同波长的辐射强度值如表 9 所示,利用改进粒子群-乘子罚函数算法对测量数据进行反演,获得物体发射率 ϵ 和温度 T 。根据本文对两种算法的分析,将两种算法堆叠结合后,得到模型的最优参数为:乘子罚函数中初始罚因子 M 选取 0.1,放大系数 α 选取 2。改进粒子群算法中选用根据迭代公式得到的迭代后的 ω 和 c_1, c_2 。6 个时刻反演的温度结果如表 10 所示。

表 9 不同时刻 8 通道辐射强度值

Table 9 Radiation intensity of 8 channels at different time

$10^{11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Sr}^{-1}$

Time	Radiation intensity of different wavelength							
	0.488 μm	0.509 μm	0.533 μm	0.589 μm	0.650 μm	0.702 μm	0.779 μm	0.809 μm
t_1	0.516	0.554	0.664	0.688	0.764	0.695	0.715	0.650
t_2	0.801	0.923	0.109	0.115	0.125	1.140	1.180	1.090
t_3	1.160	1.250	1.420	1.650	1.710	1.660	1.630	1.480
t_4	1.510	1.700	2.020	2.220	2.370	2.300	2.260	2.110
t_5	1.770	2.130	2.480	2.800	3.000	2.840	2.970	2.672
t_6	2.040	2.390	2.820	3.250	3.580	3.500	3.560	3.320

表 10 不同时刻的温度反演值

Table 10 Temperature inversion results at different time

Time	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
Temperature /K	3255.4	3415.4	3532.0	3656.3	3649.8	3624.0

多光谱法测量冲击辐射温度的误差因素主要包含三种:1)理论计算过程中采用近似化求解所引起的误差;2)测量仪器在出厂时本身存在的误差;3)冲击辐射温度算法求解中所产生的算法误差。根据测

试波长选取、温度范围、测试仪器参数和算法特性^[22-24],对应的不确定度分别为:理论误差引起的不确定度 $e_t \approx 0.1\%$,仪器误差引起的不确定度 $e_1 \approx 2\%$,实验标定引起的不确定度 $e_\lambda \approx 0.3\%$,算法误

差引起的不确定度 $e_h \approx 3\%$, 因此本文得到的辐射温度总的不确定度 $e = \sqrt{e_i^2 + e_e^2 + e_\lambda^2 + e_h^2} \approx 3.6\%$. 实验得到的光谱中, $t_1 \sim t_2$ 时间段受到界面辐射的影响会有短暂的辐射不稳定, t_6 时刻光谱明显的拐折来源于冲击实验中的后界面追赶波和侧面的边侧稀疏波, 因此 $t_3 \sim t_5$ (200 ns) 时间段是受到界面杂散光和稀疏波干扰最小的蓝宝石辐射发光区间, 对该时段的辐射温度进行加权并引入不确定度, 改进粒子群-乘子罚函数算法对冲击压力为 36.5 GPa 下蓝宝石单晶的辐射温度进行反演, 所得结果为 (3613 ± 130) K. 采用同样的方法分别对蓝宝石在冲击压力为 40 GPa、48 GPa 下的辐射特性^[25]进行了温度反演修正, 所得到的温度值分别为 (3740 ± 134) K、 (3893 ± 140) K. 如图 11 所示, 将本文反演辐射温度与文献[26]报道的蓝宝石在静高压下的熔化温度数据、文献[27-28]报道的蓝宝石冲击辐射温度进行了比较. 该压缩区间属于蓝宝石 Corundum 结构, 也是无相变发生区, 早期冲击实验得到的辐射温度非常分散, 温度值与压力分布无规律而且都远高于对应压力下的熔化温度值. 本文通过对冲击实验测试结果的反演, 获得蓝宝石的辐射温度值与静高压下得到的熔化温度分布趋势接近, 这预示了冲击压缩下蓝宝石物性变化与熔化的相关性.

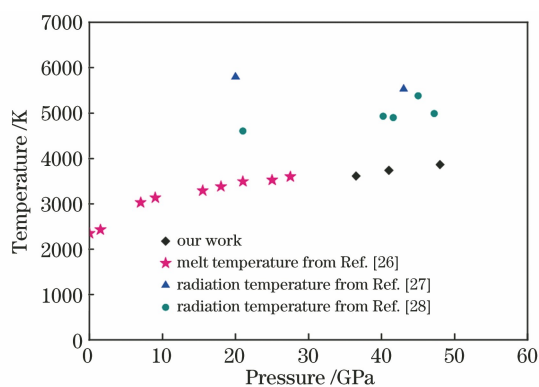


图 11 蓝宝石辐射温度与压力的关系图

Fig. 11 Relationship between radiation temperature and pressure of sapphire

4 结 论

冲击波测温实验中, 由于实验环境复杂, 测试过程因易受到外界干扰而存在很多不确定性, 而且多光谱测温法通过辐射亮度的模型反演获取温度, 要获得材料真实的冲击辐射温度值, 除了精密的测试手段与方法, 温度反演模型与算法的选取非常重要. 通过改善传统求解模型未能兼顾精度与效率的问

题, 针对强冲击环境下光谱辐射信号的特征, 利用乘子罚函数算法和粒子群算法对多光谱辐射温度进行了反演研究. 为了弥补粒子群算法模型的准确性差和乘子罚函数算法模型的初始值影响计算效率的不足, 提出了粒子群与乘子罚函数相结合的温度反演算法, 实现两种模型的堆叠结合. 结果表明该方法充分结合了两种单一算法的优势, 保证了算法的精确度与运算效率, 提高了冲击辐射温度的反演精度, 相对误差小于 2.5%, 实验总体不确定度为 3.6%. 通过对蓝宝石单晶冲击辐射数据的实例分析, 发现该方法反演得到的蓝宝石温度值更接近蓝宝石熔化线, 支持冲击压缩下蓝宝石热辐射的物理特征与产生绝热剪切带的物理机理. 该方法对多光谱测量冲击辐射温度实验具有普适性, 对提高温度反演的精度提供了有效的保障.

参 考 文 献

- [1] 曹涛, 孙浩, 周游, 等. 近地爆炸冲击波传播特性数值模拟与应用[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 187-191.
Cao T, Sun H, Zhou Y, et al. Numerical simulation and application of propagation characteristics of shock wave near ground explosion[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(12): 187-191.
- [2] 占春连, 韩军, 路绍军, 等. 弹药爆炸火焰温度多光谱测温技术研究[J]. 计测技术, 2018, 38(6): 48-52.
Zhan C L, Han J, Lu S J, et al. Research on multi-spectral thermometry for the flame temperature measurement of ammunition explosions [J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38(6): 48-52.
- [3] 李占英, 席兰霞, 刘举鹏, 等. 多光谱辐射测温法应用于测定火工烟火剂燃烧温度[J]. 含能材料, 2010, 18(4): 405-408.
Li Z Y, Xi L X, Liu J P, et al. Flame temperature measurement of pyrotechnic composition using multi-spectral thermometry [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(4): 405-408.
- [4] 卞宇涛, 潘军, 蒋立军, 等. 高温石墨板短波红外光谱发射率-温度变化规律研究[J]. 光学学报, 2021, 41(10): 1030003.
Bian Y T, Pan J, Jiang L J, et al. Study on variation of short wave infrared spectral emissivity of high-temperature graphite plate[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1030003.
- [5] 赵晚梦, 李龙飞, 原泽野, 等. Ti-6Al-4V 合金方向光谱发射率特性研究[J]. 光学学报, 2020, 40(8):

0830002.
Zhao W M, Li L F, Yuan Z Y, et al. Directional spectral emissivity of Ti-6Al-4V alloy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0830002.
- [6] Svet D Y. A new method of measurement of the true temperature and emissivity of non-black body using one component of Wien's spectrum of thermal radiation [J]. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2015, 3(5): 524-529.
- [7] Smurov I, Doubenskaia M. Temperature monitoring by optical methods in laser processing [M]//Majumdar J D, Manna I. *Laser-assisted fabrication of materials*. Springer series in materials science. Heidelberg: Springer, 2012, 161: 375-422.
- [8] Qiu Q R, Liu S, Teng J, et al. A two-stage polynomial method for spectrum emissivity modeling [J]. *Energy Procedia*, 2015, 66: 245-248.
- [9] Urtiew P A, Grover R. Temperature deposition caused by shock interactions with material interfaces [J]. *Journal of Applied Physics*, 1974, 45(1): 140-145.
- [10] McQueen R G, Isaak D G. Characterizing windows for shock wave radiation studies [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1990, 95(B13): 21753.
- [11] 张福才, 孙晓刚, 邢键, 等. 红外多谱线二维辐射温度场重建算法的研究 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(7): 0704003.
Zhang F C, Sun X G, Xing J, et al. Research on reconstruction algorithm of two dimensional radiation temperature field using infrared multi-spectral line [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0704003.
- [12] 张福才, 孙博君, 孙晓刚. 基于多目标极值优化法的多光谱真温反演 [J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0212008.
Zhang F C, Sun B J, Sun X G. Multispectral true temperature inversion based on multi-objective minimization optimization method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0212008.
- [13] 孙崐, 孙晓刚, 于晓洋, 等. 测量爆炸火焰真温的多光谱温度计的研制: 现场实验与测量精度分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(6): 1719-1722.
Sun K, Sun X G, Yu X Y, et al. Development of multi-spectral thermometer for explosion flame true temperature measurement: field experiments and measurement accuracy analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(6): 1719-1722.
- [14] 顾伟宏, 梁家锋, 尹馨, 等. 基于约束优化的多光谱辐射真温反演算法 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(12): 3846-3850.
Gu W H, Liang J F, Yin X, et al. Multi spectral true temperature inversion algorithm based on constrained optimization method [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(12): 3846-3850.
- [15] 杨艺帆, 李喆, 蔡红星, 等. 基于牛顿迭代法高温光谱温度和发射率的反演研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(5): 1471-1476.
Yang Y F, Li Z, Cai H X, et al. Inversion research on the temperature and emissivity of high temperature spectrum based on Newton's method [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(5): 1471-1476.
- [16] 朱泽忠, 沈华, 王念, 等. 基于光谱发射率函数基形式不变的辐射测温技术 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(3): 685-691.
Zhu Z Z, Shen H, Wang N, et al. Radiation temperature measurement technology based on the basis of spectral emissivity function [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(3): 685-691.
- [17] Hestenes M R. Multiplier and gradient methods [J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1969, 4(5): 303-320.
- [18] Kennedy J, Eberhart R C, Shi Y. *The particle swarm [M]//Swarm intelligence*. Amsterdam: Elsevier, 2001: 287-325.
- [19] 李俊, 汪冲, 李波, 等. 基于扰动的精英反向学习粒子群优化算法 [J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(9): 2584-2587, 2591.
Li J, Wang C, Li B, et al. Elite opposition-based particle swarm optimization based on disturbances [J]. *Application Research of Computers*, 2016, 33(9): 2584-2587, 2591.
- [20] van den Bergh F, Engelbrecht A P. A cooperative approach to particle swarm optimization [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2004, 8(3): 225-239.
- [21] Liang J J, Qin A K, Suganthan P N, et al. Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2006, 10(3): 281-295.
- [22] Aymeric A, 徐秋丽, 杨敬贤, 等. 辐射光谱测温法测量误差实验研究 [J]. *光学仪器*, 2018, 40(3): 8-11.
Aymeric A, Xu Q L, Yang J X, et al. Experimental research on measurement error of radiation spectroscopy thermometry [J]. *Optical Instruments*, 2018, 40(3): 8-11.
- [23] 吕金光, 梁静秋, 梁中翥, 等. 空间调制傅里叶变换红外光谱仪分束器楔形误差分析 [J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1030001.

- Lü J G, Liang J Q, Liang Z Z, et al. Analysis of wedge error of beam splitter in spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1030001.
- [24] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- Fei Y T. Error analysis and data process [M]. Beijing: China Machine Press, 1981.
- [25] 张宁超, 任娟, 王鹏, 等. 轻气炮加载下蓝宝石的辐射光谱特性[J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0530002.
- Zhang N C, Ren J, Wang P, et al. Radiation spectral characteristics of sapphire under light-gas gun impact loading [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38 (5): 0530002.
- [26] Shen G, Lazor P. Measurement of melting temperatures of some minerals under lower mantle pressures[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1995, 100(B9): 699-713.
- [27] Kondo K. Window problem and complementary method for shock-temperature measurements of iron [J]. *AIP Conference Proceedings*, 1994, 309: 1555-1558.
- [28] Hare D E, Holmes N C, Webb D J. Shock-wave-induced optical emission from sapphire in the stress range 12 to 45 GPa: images and spectra[J]. *Physical Review B*, 2002, 66(1): 014108.