

强爆炸光辐射作用下材料的能量耦合特性

高银军 高丽红 张相华 马壮 刘峰 彭国良 田宙

Energy coupling characteristic of materials under thermal radiation produced by strong explosion

GAO Yin-jun, GAO Li-hong, ZHANG Xiang-hua, MA Zhuang, LIU Feng, PENG Guo-liang, TIAN Zhou

引用本文:

高银军, 高丽红, 张相华, 马壮, 刘峰, 彭国良, 田宙. 强爆炸光辐射作用下材料的能量耦合特性[J]. *中国光学*, 2020, 13(6): 1267-1275. doi: 10.37188/CO.2020-0053

GAO Yin-jun, GAO Li-hong, ZHANG Xiang-hua, MA Zhuang, LIU Feng, PENG Guo-liang, TIAN Zhou. Energy coupling characteristic of materials under thermal radiation produced by strong explosion[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1267-1275. doi: 10.37188/CO.2020-0053

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0053>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

人工触发闪电通道的辐射特性分析

Analysis of radiation evolution characteristics of the artificial triggered lightning channel

中国光学. 2019, 12(3): 670 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0670>

基于红外辐射特性系统实现对面目标测量

Opposite target measurement based on infrared radiation characteristic system

中国光学. 2018, 11(5): 804 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0804>

双色荧光辐射差分超分辨显微系统研究

Dual-color fluorescence emission difference super-resolution microscopy

中国光学. 2018, 11(3): 329 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0329>

光纤光栅与受激布里渊信号的耦合特性

Coupling characteristics between fiber grating and stimulated Brillouin signal

中国光学. 2017, 10(4): 484 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0484>

空气导热作用下Nd:YAG晶体温场特性

Temperature field of Nd: YAG crystal under air heat transfer

中国光学. 2019, 12(3): 686 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0686>

半主动激光制导能量传输与模拟技术

Semi-active laser-guided energy transmission and simulation technology

中国光学. 2019, 12(2): 256 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0256>

文章编号 2095-1531(2020)06-1267-09

强爆炸光辐射作用下材料的能量耦合特性

高银军^{1,3}, 高丽红^{1,2}, 张相华³, 马 壮^{1,2*}, 刘 峰^{3,4}, 彭国良^{3,4}, 田 宙³

(1. 北京理工大学 材料学院, 北京 100081;

2. 北京理工大学 冲击环境材料技术重点实验室, 北京 100081;

3. 西北核技术研究院, 陕西西安 710024;

4. 西北核技术研究院 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西西安 710024)

摘要: 为了获取强爆炸光辐射作用下材料的能量耦合特性, 发展了强爆炸辐射源参数以及光辐射传输的物理模型和计算方法, 计算给出了不同条件下目标位置处的光辐射谱特征。利用材料光谱反射率测量方法, 结合光辐射耦合系数计算方法获取了几类材料的能量耦合系数。结果显示: 金属、陶瓷材料的光辐射耦合系数相对较小, 而碳纤维环氧复合材料的耦合系数可达 0.92; 采用实际光辐射能谱计算的耦合系数比近似 6000 K 黑体谱的结果要高, 最大约 14%。以铝材料为例, 光辐射耦合系数随当量及爆心距离增加均表现出逐渐减小的趋势, 但总体变化幅度不大。

关键词: 强爆炸; 光辐射; 谱分布; 能量耦合特性

中图分类号: O432.1; O381

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2020-0053

Energy coupling characteristic of materials under thermal radiation produced by strong explosion

GAO Yin-jun^{1,3}, GAO Li-hong^{1,2}, ZHANG Xiang-hua³, MA Zhuang^{1,2*},

LIU Feng^{3,4}, PENG Guo-liang^{3,4}, TIAN Zhou³

(1. *School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

2. *National Key of Laboratory of Science and Technology on Materials under Shock and Impact, Beijing 100081, China;*

3. *Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;*

4. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)*

* *Corresponding author, E-mail: hstrong929@bit.edu.cn*

Abstract: To obtain the energy coupling characteristic of materials under strong explosive thermal radiation, a physical model for calculating radiation source parameters and atmospheric transmission is constructed, and

收稿日期: 2020-03-31; 修订日期: 2020-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51772027, No. 91330205)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51772027, No. 91330205)

the characteristics of the radiation spectrum at the target location under different conditions are obtained. The energy coupling coefficients of several kinds of materials are produced by spectral reflectance measurement and by calculating the average absorption coefficient of thermal radiation. The coupling coefficients of metal and ceramic materials are relatively small while it can be as high as 0.92 for carbon fiber epoxy composites. The coupling coefficient calculated from the actual thermal radiation spectrum is higher than that calculated from 6000 K blackbody radiation spectrum, and the maximum difference is about 14%. Taking aluminum material as an example, the coupling coefficient of thermal radiation decreases gradually with the increase of explosion yield and distance, but the overall variation is small.

Key words: strong explosion; thermal radiation; spectral distribution; energy coupling coefficient

1 引言

强爆炸光辐射是一种重要的热毁伤效应源^[1-4]。大气层强爆炸过程中光辐射所占能量接近 35%，是目标毁伤过程不可忽视的因素。每平方米百焦强度的光辐射会导致有机材料等易燃物发生燃烧等显著的热破坏效应^[5-6]。对于金属、陶瓷、复合材料等热稳定性较好的材料，虽然光辐射不一定产生宏观的热破坏效应，但由于材料温升导致的力学性能下降，会对目标后续力学效应带来显著影响。

从物理过程来说，材料在光辐射环境下首先发生能量沉积，随之产生热效应，因而材料的光辐射能量沉积是决定光辐射效应的主要因素。通常用能量耦合特性来表征光与物质相互作用中能量沉积的大小^[7-8]。在强激光辐照效应研究中，材料的耦合系数主要决定于单色光波长^[9-12]。而对于光辐射来说，由于其光谱涵盖紫外、可见和红外部分（约 0.3~4.5 μm），光谱耦合特性与实际光辐射谱分布密切相关。现阶段有关光辐射理论研究中^[1-3]，以太阳光谱或 6000 K 等效黑体谱作为光辐射的近似光谱，这种光谱近似对于材料光辐射耦合特性的影响暂无定量分析；文献 [13-14] 中采用 0.7 和 0.2 分别作为钢和有机材料光辐射吸收系数，计算了目标光辐射热效应，但并未说明吸收系数的来源及其可靠性。

本文主要针对强爆炸光辐射作用下材料的能量耦合特性开展研究，构建了完整的辐射源参数计算、大气传输计算物理模型，获取了目标位置处光辐射能谱特征。在此基础上，通过材料光谱

反射率测量，结合光辐射平均吸收系数计算方法给出了几类材料的能量耦合系数。定量分析了采用实际光辐射和等效黑体辐射所得到的耦合系数差异，并进一步给出了材料耦合系数随强爆炸当量及目标距离的变化关系，为光辐射效应研究提供有力支撑。

2 计算模型及方法

2.1 耦合系数的计算方法

从能量沉积过程来看，光辐射在材料中主要发生反射、吸收和透射 3 个过程。对于波长为 λ 的单色光，当材料为不透明介质时，材料吸收率 A_λ 、反射率 R_λ 满足以下关系：

$$A_\lambda + R_\lambda = 1 \quad (1)$$

对于实际光辐射而言，其光谱范围较宽，涵盖紫外、可见和红外部分，因此光辐射的耦合系数与谱分布密切相关。定义平均吸收系数为：

$$A = \frac{\sum A_\lambda D_\lambda d\lambda}{\sum D_\lambda d\lambda} = \frac{\sum (1 - R_\lambda) D_\lambda d\lambda}{\sum D_\lambda d\lambda} \quad (2)$$

其中， D_λ 为光谱中波长为 λ 的能量比例，当其为实际光辐射谱分布时， A 即光辐射耦合系数。显然，要获取材料的光辐射耦合系数，必须同时给出光谱分布和材料的光谱反射率。

2.2 光谱分布计算模型

目标位置的光谱分布取决于两个因素：一是辐射源的特征，也即爆炸火球的辐射特征，其从根本上决定了光源的初始参数；另一个是大气传输。由于光辐射属于连续谱，涵盖波长范围较宽，

其在大气中传输时不同波长的光辐射衰减特征有所不同, 导致目标位置处的光辐射与初始辐射特征出现差异。为获得目标位置的光谱分布, 需要针对上述两个过程分别开展。

2.2.1 源参数计算方法

火球是强爆炸光辐射的辐射源, 其发展演化包含了辐射输运与流体强耦合的过程, 因而, 针对火球发展的数值模拟, 必须建立在辐射流体力学^[15]的基础上。基于灰体近似^[16-17]的处理方法给出了火球发展的半径、辐射总强度等参数规律, 但对于能谱特征来说, 灰体近似遇到了本质困难。本文构建了多群辐射流体力学模型^[18-19], 为获取辐射源能谱特征奠定基础。

在局域热动力平衡(LTE)假定下, 描述强爆炸火球发展的多群辐射流体力学方程, 如式(3)所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla p = -M^1 \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho e' \right) + \nabla \cdot \left[\left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho e' + p \right) v \right] = -M^0 \\ M^0 = \sum_g M_g^0 = \sum_g \frac{\partial E_g}{\partial t} + \nabla \cdot F_g \\ M^1 = \sum_g M_g^1 = \sum_g \frac{1}{c^2} \frac{\partial F_g}{\partial t} + \nabla \cdot P_g \end{cases} \quad (3)$$

其中, ρ 为空气密度, v 为空气速度, p 为空气压强, e' 为空气内能。方程后两项为各群内光辐射输运的总能量(M^0)和总动量(M^1), 下标 g 为 1,2,3...即分群数目。 E_g 、 F_g 、 P_g 、 M_g^0 、 M_g^1 分别为第 g 群辐射能密度、辐射能流、辐射压强张量及光辐射输运能量和动量。具体计算如式(4)所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial E_g}{\partial t} + \nabla \cdot F_g = c k_g \int_{\gamma_{g-1}}^{\gamma_g} \left[\frac{4\pi}{c} B(\gamma) - E(\gamma) \right] d\gamma + \frac{v}{c} k_g \int_{\gamma_{g-1}}^{\gamma_g} F(\gamma) d\gamma \\ \quad = c k_g (B_g - E_g) + \frac{K_g}{c} v \cdot F_g \\ \frac{1}{c^2} \frac{\partial F_g}{\partial t} + \nabla \cdot P_g = -\frac{1}{c} k_g \int_{\gamma_{g-1}}^{\gamma_g} F(\gamma) d\gamma + \frac{4\pi}{c^2} k_g v \int_{\gamma_{g-1}}^{\gamma_g} B(\gamma) d\gamma + \frac{v}{c} k_g \int_{\gamma_{g-1}}^{\gamma_g} P(\gamma) d\gamma \\ \quad = \frac{K_g}{c} (-F_g + v B_g + v \cdot P_g) \end{cases} \quad (4)$$

其中, c 为光速, k_g 为第 g 群吸收系数, γ 为光子频率。由于各群光子能量具有上限和下限, 因此采用 γ_g 、 γ_{g-1} 分别标记第 g 群光子频率的上限和下限。 E_γ 、 F_γ 和 P_γ 分别为辐射能密度、辐射能流及辐射压强张量函数, $B(\gamma)$ 为黑体辐射谱分布,

$B_g = \frac{4\pi}{c} \int_{\gamma_{g-1}}^{\gamma_g} B(\gamma) d\gamma$ 为黑体辐射下第 g 群辐射能密度。空气的状态方程采用实际空气状态方程^[17]。

光辐射按照能量分为 21 群, 不同群(group, g)所对应的光子能量(photon energy, p_e) 范围见表 1。

表 1 不同群内光子能量范围 (21 群)
Tab. 1 Photon energy in different groups (21)

g	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
p_e (eV)	0.01-0.5	0.5-1.0	1.0-1.8	1.8-2.1	2.1-2.5	2.5-3.1	3.1-4.0	4.0-7.0	7.0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
g	14	15	16	17	18	19	20	21					
p_e (eV)	100-200	200-400	400-1000	1000-2 000	2 000-5 000	5 000-10 000	10 000-20 000	20 000-80 000					

针对上述模型, 采用算子分裂的数值求解方法, 直接获得火球半径 $r_f(t)$ 以及不同波长范围的辐射能流 F_g 。火球辐射过程中, 光谱主要集中在 0.3~4.0 μm 波段, 对应于 2~8 群的辐射能量。由于分群数目及其对应的辐射参数(k_g) 限制, 计算出的光谱分布特征不够精细。考虑到火球在整个

后期发展阶段^[1-2] 其光谱与黑体辐射接近, 通过式(5)计算得到火球的有效温度, 从而对其能谱特征进行细致表征。10 kt 当量下的火球半径及有效温度计算结果见图 1。

$$\sigma T_e^4 = \sum_g F_g(r_f) \quad (5)$$

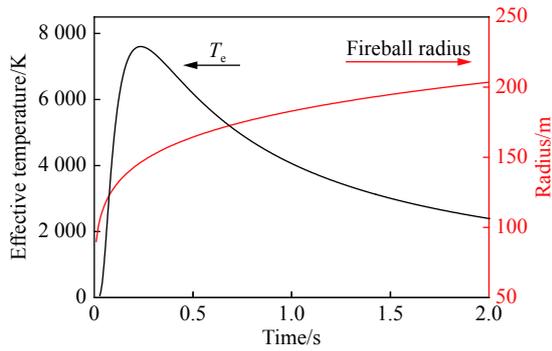


图 1 当量 10 kt 下不同时刻火球半径及有效温度的计算结果

Fig. 1 Calculated results of the fireball's radius and effective temperature at different moments with 10 kt explosion yield

2.2.2 光辐射大气传输

光辐射从火球表面向整个空间传输,在辐射源近似为球面光源的情况下,距离爆心距离 R 处、波长为 λ 的光辐射强度为^[20-21]:

$$E_{\lambda} = \frac{P_{\lambda}^{\text{total}}}{4\pi R^2} \tau_{\lambda}, \quad (6)$$

其中, E_{λ} 是波长为 λ 、距离爆点 R 处的光辐射通量, τ_{λ} 为对应波长下的大气透过率。 $P_{\lambda}^{\text{total}}$ 为火球表面辐射出的波长 λ 附近的光辐射总功率。当火球半径为 $r_f(t)$ 、有效温度为 T_e 时,其计算方法为:

$$P_{\lambda}^{\text{total}} = \int_{t_0}^{t_{\infty}} 4\pi r_f^2(t) P_{\lambda}(t) dt \\ = \int_{t_0}^{t_{\infty}} 4\pi r_f^2(t) \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\hbar c^2}{\lambda^5 e^{hc/k\lambda T_e} - 1} d\lambda \right] dt, \quad (7)$$

其中 λ_1 和 λ_2 为包含波长 λ 的某个积分区间; $P_{\lambda}(t)$ 为对应区间的光辐射强度, \hbar 为普朗克常数, k 为波尔兹曼常数。 t_0 和 t_{∞} 分别为光辐射的初始和结束时间。

不同波长下的大气透过率 τ_{λ} 对光辐射传输具有重要影响。严格计算大气透过率,需要依据吸收和散射理论^[22] 分别计算大气各粒子对光的衰减效应。早期工程计算采用与波长无关的大气透过率经验计算方法^[1]。为提高模型计算可信度,采用 MODTRAN 大气传输模块实现不同大气条件下、具有一定光谱精度的大气透过率计算^[23-24]。

2.3 光谱分布特征

利用上述方法可以完整计算出爆炸条件下的

光辐射谱分布特征。大气条件对光传输具有较大影响,为了便于与实测数据做对比分析,本文大气模式统一为中纬度夏季,能见度取 23 km,采用沙漠气溶胶类型,爆点位于 1 km 高度、测点高度 0 km,其他大气参数按照 MODTRAN 标准大气模式进行设定。由于缺少全谱范围内的细致测量结果,依据光辐射在紫外(小于 0.4 μm)、可见(0.4~0.76 μm)和红外(大于 0.76 μm)部分所占比例的测量结果^[1,3],对光谱特征计算方法进行验证。计算结果与实测对比见图 2。由图 2 可以看出:除个别距离(约 10 km 和 25 km)处可见和红外比例数据与实测数据有一定偏离外,其他总体符合的都较好。

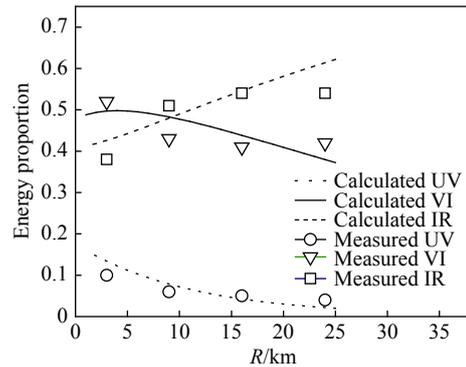


图 2 光辐射可见、红外和紫外波段能量比例的实测结果与计算结果的对比

Fig. 2 Comparison of measured and calculated energy ratios in visible, infrared and ultraviolet bands of thermal radiation

进一步根据该方法分析不同当量下光辐射谱特征的变化规律。图 3 给出了当量在 1 kt~2 000 kt 下距离爆心投影点 1 km 处的归一化光辐射能谱。由图 3 可以看出:随着当量的增加,光辐射强度峰值所对应的中心波长(λ_M)有一定红移,相应地短波方向的光能量有所减少,而长波方向的光辐射能量则逐渐增加。

根据维恩位移定律: $\lambda_M = \frac{0.29 \times 10^{-2}}{T}$ 知,中心波长越长、对应的等效黑体温度越低,也即意味着:随着爆炸当量的增加,相同距离处的光辐射能谱所对应的等效温度是降低的。表 2 列举出了几种当量下光辐射中心波长及其对应的等效黑体温度。对比来看:从 20 kt 小当量变化到 2 000 kt 大当量时,等效温度变化约为 11%。

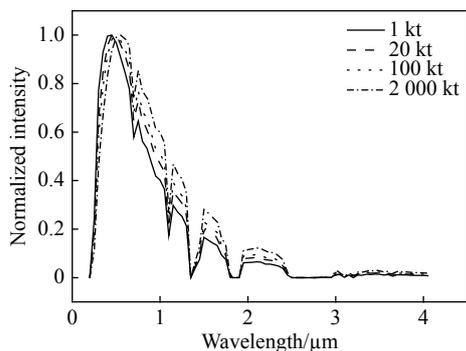


图 3 不同当量下距爆心投影点 1 km 的归一化光辐射能谱

Fig. 3 Normalized spectral distribution under different explosion yields at a range of 1 km from the center of burst projection point

表 2 不同当量下光辐射中心波长及其对应的等效黑体温度

Tab.2 Central wavelength of thermal radiation under different explosion yields and their equivalent blackbody temperatures

当量/kt	20	100	2000
中心波长/ μm	0.46	0.48	0.52
等效温度/K	6.3×10^3	6.0×10^3	5.6×10^3

进一步考虑爆心距离对于光谱的影响。图 4 给出了 20 kt 下不同距离处光辐射归一化能谱分布图。由图 4 可以看出: 随着距离的增加, 光辐射能谱的变化趋势与当量增加时相似。从能量构成来看: 距离越远, 短波范围的光辐射能量越小, 而长波方向的光辐射能量越多, 其主要原因还在于大气对短波吸收较强, 而长波衰减较小。

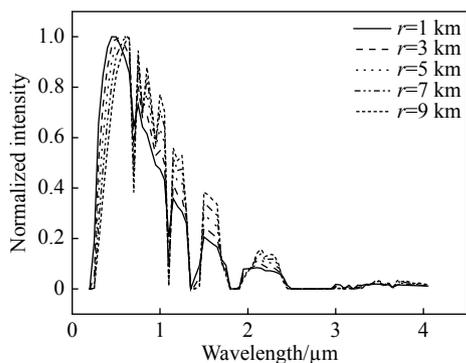


图 4 20 kt 下不同距离处光辐射归一化能谱

Fig. 4 Normalized spectral distribution of thermal radiation at different distances when the explosion yield is 20 kt

3 材料光谱耦合系数计算

3.1 光谱反射率测量

材料反射率的测量主要依靠积分球, 积分球测量原理^[9, 12]及测量光路见图 5。

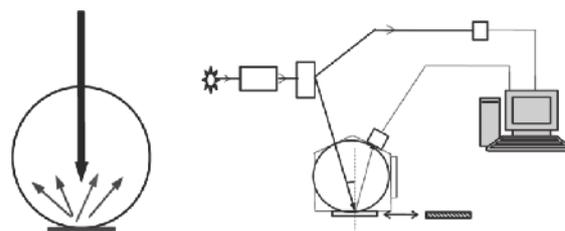


图 5 材料光谱反射率测量原理及示意图

Fig. 5 Principle and schematic diagram of the spectral reflectivity measurement system for different materials

实验中波长范围为 0.2~2.5 μm , 涵盖了光辐射的主要光谱区域, 能量约占光辐射总能量的 97% 以上。上述范围的光谱反射率测量能够反映材料在光辐射下的能量耦合特性。选取常用的金属(铝、铜和银)、陶瓷(TiO_2)以及碳纤维环氧树脂进行分析, 反射率测量结果见图 6。

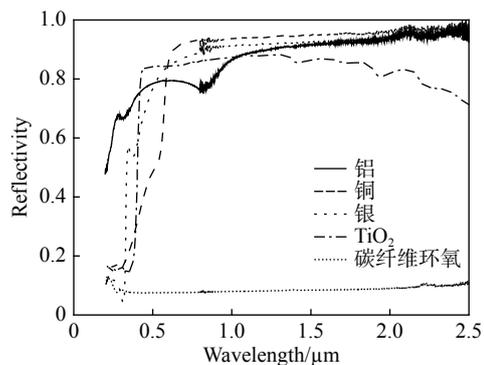


图 6 几类材料在 0.2~2.0 μm 范围内的光谱反射率

Fig. 6 Spectral reflectances of typical materials in the range of 0.2 ~ 2.0 μm

3.2 耦合系数计算及分析

由铝材料反射率计算得到的吸收系数和光辐射能谱分布见图 7。光谱计算中波长间隔 $d\lambda$ 为 0.05 μm , 因此按照 0.05 μm 的等波长间距, 将光谱范围进行重新划分, 相应的材料吸收率取对应波长范围内的平均值。进一步根据式(2), 计算得到铝材料的光辐射耦合系数为 0.19。

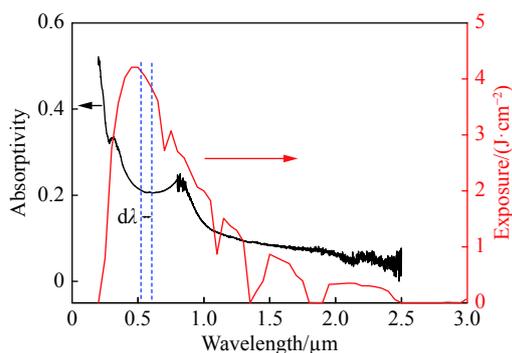


图 7 铝材料光谱吸收率及光辐射能谱分布

Fig. 7 Spectral absorptivity of aluminum material and its thermal spectrum distribution

按照同样方法, 计算了其他几类材料的光辐射耦合系数, 见表 3。作为光辐射耦合特性研究的近似方法, 通常将光辐射能谱等效为 6000 K 黑体辐射(与太阳光谱相近)。为定量分析上述光谱近似所带来的差异, 对比分析了分别采用实际光谱和等效黑体辐射谱计算的耦合系数, 结果见表 3。

表 3 采用实际光辐射和 6000 K 黑体辐射谱计算的耦合系数

Tab. 3 Coupling coefficients calculated from the actual thermal radiation spectrum and 6000 K blackbody radiation spectrum

材料类型	光辐射耦合系数		
	实际光谱	6000 K 黑体辐射	相差 (%)
金属			
Al	0.19	0.17	-10%
Cu	0.28	0.25	-10%
Ag	0.21	0.18	-14%
陶瓷			
TiO ₂	0.25	0.23	-8%
复合材料			
C/E	0.92	0.89	-3.3%

可以看出: 对于所列举的几类材料, 金属、陶瓷材料的耦合系数相对较小, 这是由于这些材料在整个可见、红外范围内都具有较高的反射率所造成的, 而碳纤维环氧复合材料的耦合系数可达 0.92。利用 6000 K 黑体辐射计算的耦合系数要比实际光谱的结果低, 最大相差可达 14%(Ag 材料)。其原因是由于实际光辐射比 6000 K 等效黑体谱在可见光以上波长(大于 0.4 μm)部分的能量

更高(见表 4), 长波方向的能量占据了光辐射和黑体谱的绝大部分, 也决定了材料光谱耦合特性的主要特征。

表 4 实际光辐射以及 6000 K 黑体在不同光谱区间的能量份额

Tab. 4 Energy proportion in different spectral intervals for actual thermal radiation and 6000 K blackbody

	所占能量比例(%)		
	<0.4 μm	0.4~0.76 μm	>0.76 μm
光辐射	11	40	49
6000 K 黑体辐射	14	43	43

以光辐射辐照下铝材料的实测温升为例, 校验光辐射耦合系数计算的准确性。材料温度计算模型主要是傅立叶热传导方程^[25-26], 铝板厚度为 0.8 mm, 在约 140 J/cm² 的辐照下, 背表面温升实测结果与采用耦合系数分别为 0.19 和 0.17 的计算结果对比见图 8。由图 8 可以看出: 计算给出的材料温升与实测数据总体较为符合; 相对而言, 采用实际光辐射耦合系数(0.19)的计算结果比 6000 K 黑体谱耦合系数(0.17)更加接近实测数据。

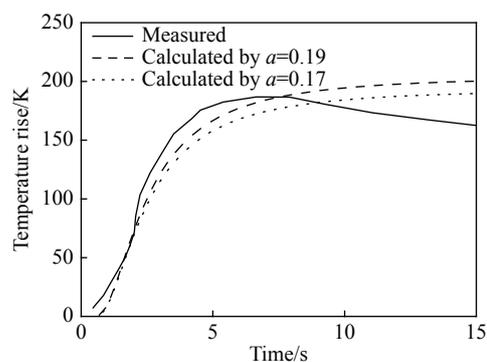


图 8 铝材料背表面温升实测结果与采用耦合系数分别为 0.19 和 0.17 的计算结果对比

Fig. 8 Comparison of the measured temperature rise on the back surface of aluminum material with the calculated results under coupling coefficients of 0.19 and 0.17

如前所述, 光辐射谱特征是与爆炸当量及爆心距离有关的。下面将以铝材料为例, 分析光辐射耦合系数随当量及距离的变化情况。图 9 分别

给出了材料耦合系数随当量的变化情况(距离为 1 km)及随爆心距离(当量 20 kt)的变化情况。

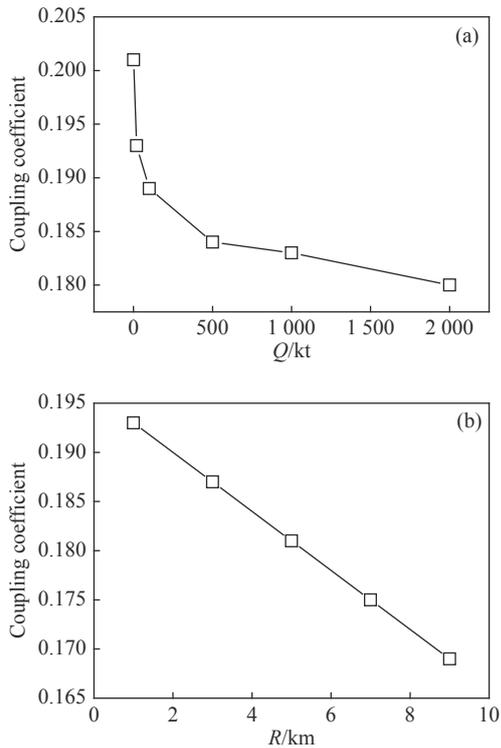


图9 铝材料光辐射耦合系数与当量 (a) 及爆心距离 (b) 的关系

Fig. 9 Relationship between the coupling coefficients of aluminum material and the explosion yield (a) and burst center distance (b)

参考文献:

- [1] 乔登江. 核爆炸物理概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
QIAO D J. *Conspectus on Physics of Nuclear Weapon* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [2] BRODE H L, HILLENDahl R W, LANDSHOFF R K. Thermal radiation phenomena. Volume V. Radiation hydrodynamics of high temperature air[R]. Sunnyvale: Lockheed Missiles and Space Co., 1967.
- [3] GLASSTONE S, DOLAN P J. *The Effects of Nuclear Weapons* [M]. 3rd ed. Washington, D.C.: United State Department of Defense and the United States Department of Energy, 1977.
- [4] 肇文丽, 张恩山, 李润新. 星载核爆炸光辐射能量分析[C]. 第十届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集, 中国核学会, 中国电子学会, 2000.
ZHAO W L, ZHANG E SH, LI R X. The optical radiation energy analysis of nuclear explosion in the satellite[C]. *Proceedings of the Tenth National Conference on Nuclear Electronics & Nuclear Exploration Technology, China Nuclear Society, China Electronics Society*, 2000. (in Chinese)
- [5] MARRS R E, MOSS W C, WHITLOCK B. Thermal radiation from nuclear detonations in urban environments[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Lab., 2007.
- [6] 庞磊, 张奇. 无约束气云爆炸热辐射伤害效应研究[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(10): 1147-1150.
PANG L, ZHANG Q. Study into injury effect of thermal radiation from unconfined vapor cloud explosion[J].

由图9可以看出: 铝材料光辐射耦合系数随当量以及爆心距离增加均逐渐减小, 但总体变化幅度不大。当量从 1 kt 增加到 2 000 kt, 平均吸收系数从 0.201 减小到 0.180, 减小约 10%; 距离从 1 km 增加到 9 km, 平均吸收系数从 0.193 减小到 0.169, 减小约 13%。对于同一材料而言, 平均吸收系数仅取决于光谱特征, 而光谱特征随当量及距离的变化趋势是相似的(见图3和图4)。正是由于这一点, 导致材料耦合系数随当量和距离增加呈现出相同的变化趋势。

4 结 论

本文提出了一套完整的光辐射耦合系数计算方法, 获取了目标位置处的光谱特征, 计算给出了几类典型材料的光辐射耦合吸收系数。

研究发现: 金属、陶瓷材料在可见和红外部分受高反射率的影响, 它们的耦合系数相对较小, 而碳纤维环氧复合材料的耦合系数可达 0.92。采用实际光辐射能谱计算的耦合系数比 6000 K 黑体谱的结果要高, 最大约为 14%。

由于光辐射谱特征与爆炸当量及爆心距离相关, 铝材料光辐射耦合系数随当量及爆心距离增加表现出逐渐减小的趋势, 但总体变化幅度不大。

- Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(10): 1147-1150. (in Chinese)
- [7] 孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
SUN CH W. *Laser Irradiation Effect*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [8] 刘峰, 王立君, 王玉恒, 等. 金属材料表面激光耦合系数的反演[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 421-428.
LIU F, WANG L J, WANG Y H, *et al.*. Inversion for laser coupling coefficient on metal material surfaces[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 421-428. (in Chinese)
- [9] 吴丽雄, 叶锡生, 王立君, 等. 激光作用下环氧/硅树脂复合涂层的1.3 μm 反射特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0814002.
WU L X, YE X SH, WANG L J, *et al.*. Reflectance of epoxy/organsilicone composite coating at 1.3 μm under laser irradiation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0814002. (in Chinese)
- [10] 齐立涛. 真空条件下不同波长固体激光烧蚀单晶硅的实验研究[J]. *中国光学*, 2014, 7(3): 442-448.
QI L T. Different wavelength solid-state laser ablation of silicon wafer in vacuum[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 442-448. (in Chinese)
- [11] 王贵兵, 刘仓理. 芳纶纤维复合材料对激光的吸收特性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(11): 1065-1067.
WANG G B, LIU C L. Absorption characteristics of the composite reinforced by polyaryl amide fibers irradiated by high power laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(11): 1065-1067. (in Chinese)
- [12] 张翔宇. 激光辐照下金属样品的能量耦合特性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2016.
ZHANG X Y. *Research on the energy coupling characteristic of metal samples under laser irradiation*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016. (in Chinese)
- [13] 绪梅, 朱继, 王良厚, 等. 核爆炸光辐射对物体热效应的数值模拟[C]. 第十七届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集, 中国电子学会, 2014.
XU M, ZHU J, WANG L H, *et al.*. Thermal effect simulation of nuclear explosion light radiation on objects[C]. *Proceedings of the Seventeenth National Conference on Nuclear Electronics and Nuclear Exploration Technology, Gansu Lanzhou*, 2014. (in Chinese)
- [14] 关志远, 绪梅, 徐鸿明. 橡胶材料的核爆炸热毁伤效应分析[J]. *工兵装备研究*, 2019, 38(3): 45-47.
GUAN ZH Y, XU M, XU H M. Analysis on thermal damage effect of rubber materials by nuclear explosion[J]. *Engineer Equipment Research*, 2019, 38(3): 45-47. (in Chinese)
- [15] SYMBALISTY E M D, ZINN J, WHITAKER R W. RADFLO physics and algorithms[R]. Washington: Los Alamos National Lab., 1995.
- [16] 陈健华, 王心正, 谢龙生, 等. 均匀大气中的强爆炸一维辐射流体力学数值解[J]. *爆炸与冲击*, 1981, 1(2): 37-49.
CHEN J H, WANG X ZH, XIE L SH, *et al.*. An one-dimensional radiation hydrodynamic numerical solution for a strong explosion in uniform atmosphere[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1981, 1(2): 37-49. (in Chinese)
- [17] 田宙, 乔登江, 郭永辉. 不同高度强爆炸早期火球数值研究[J]. *兵工学报*, 2009, 30(8): 1078-1083.
TIAN ZH, QIAO D J, GUO Y H. Numerical investigation of early fireball of strong explosion for different altitudes[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(8): 1078-1083. (in Chinese)
- [18] 高银军, 闫凯, 田宙, 等. 强爆炸早期火球光辐射能谱的数值计算[J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(3): 289-295.
GAO Y J, YAN K, TIAN ZH, *et al.*. Numerical calculation of early fireball radiation spectrum in strong explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(3): 289-295. (in Chinese)
- [19] SHESTAKOV A I, OFFNER S S R. A multigroup diffusion solver using pseudo transient continuation for a radiation-hydrodynamic code with patch-based AMR[J]. *Journal of Computational Physics*, 2008, 227(3): 2154-2186.
- [20] 吴健辉. 核爆炸光辐射特性及探测技术的理论与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
WU J H. *Study on Theory and experiment of the characteristics and detection technology of nuclear explosion radiation*[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009. (in Chinese)
- [21] 高银军, 关奇, 陈志华, 等. 强爆炸热辐射在大气中的传输计算与分析[J]. *现代应用物理*, 2014, 5(3): 191-195.
GAO Y J, GUAN Q, CHEN ZH H, *et al.*. Calculation and analysis of atmospheric transmission of thermal radiation from strong explosion[J]. *Modern Applied Physics*, 2014, 5(3): 191-195. (in Chinese)
- [22] LYU Y Y, GAO SH, XU Q J. Scattering characteristics of C@H₂O composite particle based on Mie light scattering

- theory[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(3): 298-303.
- [23] 吴健辉, 杨坤涛, 张南洋生. 核爆炸光辐射探测中的大气传输性能研究[J]. *应用光学*, 2008, 29(5): 815-820.
WU J H, YANG K T, ZHANG N Y SH. Atmosphere transmission in detection of nuclear explosion light radiation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(5): 815-820. (in Chinese)
- [24] 王飞翔, 郭杰, 许方宇, 等. 不同海拔地区红外大气透过率的计算和测量[J]. *中国光学*, 2019, 12(4): 843-852.
WANG F X, GUO J, XU F Y, *et al.*. Calculation and measurement of infrared atmospheric transmittance at different altitudes[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 843-852. (in Chinese)
- [25] 刘志伟, 路远, 侯典心, 等. 激光辐照VO₂薄膜温度场分布及透射特性研究[J]. *发光学报*, 2018, 39(11): 1604-1612.
LIU ZH W, LU Y, HOU D X, *et al.*. Temperature field distribution and transmittance characteristics of VO₂ films irradiated by laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(11): 1604-1612. (in Chinese)
- [26] 孙毅, 高云国, 邵帅. 高功率激光热效应对合束系统的影响[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(11): 3097-3106.
SUN Y, GAO Y G, SHAO SH. Influence of high power laser thermal effect on beam combination system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(11): 3097-3106. (in Chinese)

作者简介:



高银军(1983—),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,2009年于中国科学技术大学获得硕士学位,主要从事强光与物质相互作用方面的研究。E-mail: gyj@mail.ustc.edu.cn



马 壮(1974—),男,河北昌黎人,博士,教授,博士生导师,1996年、2001年于北京理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事高温高能防护涂层材料和金属/陶瓷复合材料方面的研究。E-mail: hstrong929@bit.edu.cn