

导光镜镜面温度场的模拟分析

孟令武^{1,2}, 邵 帅¹, 乔 健³

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033 ;

2. 中国科学院大学, 北京 100049 ; 3. 佛山科学技术学院 机电工程学院, 广东 佛山 528000)

摘 要: 为降低导光镜镜面热变形, 采用有限体积法求解三维湍流传热方程, 获得了镜面激光辐照区的温度场。文中主要讨论了激光功率、辐照时间、冷却液流速、镜体材料、流道与镜面距离等因素对镜面温度场的影响, 并以辐照区平均温度和标准温度偏差作为主要指标进行冷却效果评价。结果表明, 激光功率越大, 各个方向上的温度越大; 激光辐照发生的初始阶段温升增加较快, 后期趋于平缓; 流速越大, 平均温度越低, 标准温度偏差越小; 镜体材料的性质对温度场也有不同影响; 流道与镜面距离对铜镜的温度场影响不大。

关键词: 强激光; 导光镜; 温度场; 计算流体力学

中图分类号: TN243 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1106008

Simulation analysis of the temperature field of the light guide mirror on mirror surface

Meng Lingwu^{1,2}, Shao Shuai¹, Qiao Jian³

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Foshan University, Foshan 528000, China)

Abstract: In order to reduce the thermal deformation of the light guide mirror, the finite volume method was employed to solve the three-dimensional turbulent heat transfer equation and the temperature field of the laser irradiated region was obtained. In this thesis, the effects of laser power, irradiation time, coolant velocity, mirror materials, the distance between channel and mirror on the temperature field were discussed. The average temperature and the standard deviation of temperature of irradiation zone were regarded as the main indexes to evaluate the cooling effect. It is found that the greater the laser power is, the greater the temperature in various directions is. The temperature rise is faster in the initial stage of laser irradiation and it tends to be gradual in the latter. The larger the coolant velocity is, the lower the average temperature and the standard deviation of temperature are. Different properties of the mirror materials also have influence on the heat transfer effect, but the distance between channel and mirror has little effect on the temperature field of the copper mirror.

Key words: high power laser; light guide mirror; temperature field; computational fluid dynamics

收稿日期: 2018-06-05; 修订日期: 2018-07-03

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助(09J52SCN90)

作者简介: 孟令武(1993-), 男, 硕士生, 主要从事强激光作用下导光镜液冷技术方面的研究。Email: menglingwu5414@163.com

导师简介: 邵帅(1978-), 女, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事光机结构与设计方面的研究。Email: shaoshuaiciomp@163.com

0 引言

高功率激光因其良好的准直性,被广泛应用在国防军事、加工制造、航空航天等各领域^[1-5]。但在激光应用系统中,高能激光器发出的激光光束需要经过某些光电装备中的导光光路才能得到更好地利用。在整个光束传输过程中,导光镜吸收光束能量,造成镜面温度过高,产生热变形,最终影响光束传输,而这已经成为制约高功率激光应用的主要障碍^[6-7]。目前,液冷技术作为主流冷却技术,一直是国内外研究热点。

国内在液冷镜方面研究较多的是华中科技大学^[8-10]。但这些研究有两个基本特点:一是均基于层流进行研究,并未涉及湍流;二是研究对象均为激光腔镜,属于激光发生系统,这也是当前主要研究方向。文中研究的是某光电装备中导光镜镜面温度场问题,属于激光应用系统。此外,液冷镜中冷却液的流动状态为湍流。

分析整个光束传输和传热冷却过程,镜面温度场的主要影响因素有热源问题、液冷通道结构问题、周围环境问题、镜体材料问题等。在液冷镜通道结构确定之后,镜面温度场的主要影响因素是热源问题和镜体材料问题,其中热源问题包括激光功率和辐照时间两方面。文中从热膨胀和热弹性两方面对镜面热变形进行分析,发现镜面温升和温度分布是热变形的主要原因,并相应提出平均温度和标准温度偏差这两个指标来进行镜面温度场的比较评价,镜面的平均温度和标准偏差越低,镜面的热变形越小。

文中主要研究了激光功率、辐照时间、冷却液流速、镜体材料、流道与镜面距离等因素对强激光作用下导光镜镜面温度场的影响,并通过分析比较,得到了一些有价值的结论。

1 理论分析

1.1 传热理论

分析液冷镜的整个换热过程,其涉及的传热方式主要有镜体与周围空气之间的热传导和冷却液与流道之间的强制对流传热,而由于镜体温升较小,镜体与空气之间的辐射可以忽略不计。

根据傅里叶定律推导出三维连续弹性体的非稳态温度方程^[11]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \Phi$$

$$\Phi = \frac{4P\eta}{\pi ab} \quad (1)$$

式中: ρ 为冷却液密度; c_p 为冷却液比热容; t 为时间; T 为物体内部温度; λ_x 、 λ_y 、 λ_z 为各方向导热率。

根据牛顿冷却公式^[11]:

$$q_{\text{conv}} = \alpha_i A_{\text{conv}} \Delta T \quad (2)$$

式中: q_{conv} 为热量大小; α_i 为对流换热系数; A_{conv} 为热对流面积; ΔT 为流道与冷却液的温差。

在文中所分析的结构中,对流换热面积为:

$$A_{\text{conv}} = \sum_{i=1}^n 2(wL_i + hL_i + wh) \quad (3)$$

式中: L_i 为第*i*流道的长度; w 、 h 为流道的宽和高; n 为流道总数。

第*i*流道的对流换热系数为:

$$\alpha_i = \frac{N_u \lambda_f}{d_e} \quad (4)$$

$$d_e = \frac{2wh}{w+h} \quad (5)$$

式中: N_u 为努塞尔数; λ_f 为冷却液导热率; d_e 为水力直径。

$$N_u = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho v d_e}{\mu}$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda_f} \quad (6)$$

式中: Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; v 为冷却液速度; μ 为冷却液动力粘度。

1.2 控制方程

在文中研究中,冷却液是水,可以看作不可压缩的牛顿流体。在上述假设条件下,流体控制方程^[12]如下。

(1) 质量守恒方程,即连续性方程:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

式中: V_x 、 V_y 、 V_z 为流体速度在*x*、*y*、*z*方向上的分量。

(2) 动量守恒方程,即 N-S 方程:

$$\rho_{\text{fluid}}(V \nabla V) = -\nabla p + \mu_{\text{fluid}} \nabla^2 V \quad (8)$$

式中: ρ_{fluid} 为流体密度; μ_{fluid} 为流体动力粘度; ∇p 为压力差。

(3) 能量守恒方程:

$$\rho_{\text{fluid}} c_p (V \nabla V) = k_{\text{fluid}} \nabla^2 T_{\text{fluid}} \quad (9)$$

式中: k_{fluid} 为流体导热率。

$$\begin{aligned} q' &= -\lambda \frac{\partial t}{\partial y}(y=0) \\ h &= -\frac{\lambda}{\Delta t} \frac{\partial t}{\partial y}(y=0) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\frac{\partial t}{\partial y}(y=0)$ 为贴壁处壁面法线方向上的流体温度变化率; λ 为流体的导热系数。

(4) 整体导光镜能量方程:

$$q = \rho V c g \Delta T \quad (11)$$

式中: q 为镜子吸收热量大小; V 为导光镜体积; ΔT 为镜体温升。

1.3 热变形理论

导光镜的热变形包括轴向热膨胀和热弹性位移两部分, 其中热膨胀是由镜面吸热温度升高引起的, 热弹性位移则是由镜体表面的温度分布不均造成的。在大部分情况下, 热弹性位移造成的变形要远远

小于热膨胀所造成的变形。这就是说, 控制镜面热变形的首要目标是减小温升, 其次是控制温度分布不均。据此, 文中提出两个指标, 即镜面的平均温度 T_{ave} 和标准温度偏差 σ_{sd} , 如下式所示^[13]:

$$T_{ave} = \frac{1}{A_t} \int_{A_t} T dA_t \quad (12)$$

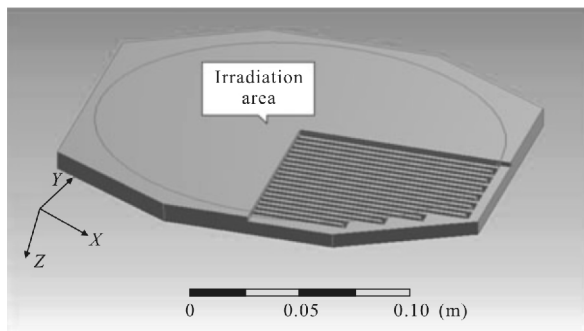
$$\sigma_{sd} = \left(\frac{1}{A_t} \int_{A_t} (T - T_{ave})^2 dA_t \right)^{1/2} \quad (13)$$

式中: A_t 为辐照区面积。

2 液冷镜模型

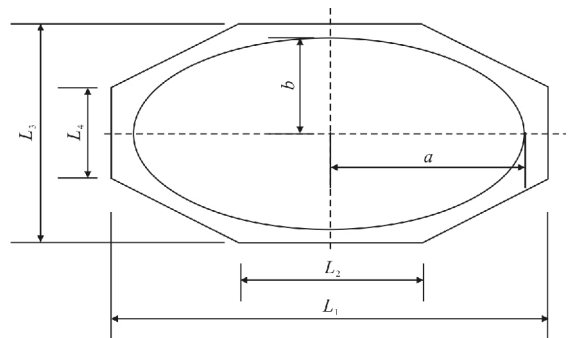
2.1 几何模型

文中研究的导光镜几何模型如图 1 所示, 椭圆形区域为激光光束辐照区, 其具体参数如表 1 所示。



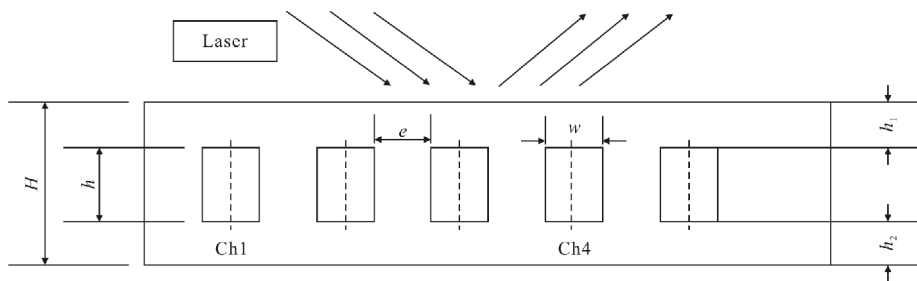
(a) 整体结构图

(a) Schematic structure of the whole geometry model



(b) 整体尺寸图

(b) Overall dimension



(c) 流道截面示意图

(c) Cross section shapes of the channels

图 1 导光镜几何模型

Fig.1 Light guide lens geometry model

表 1 导光镜结构尺寸(单位:mm)

Tab.1 Geometrical parameters of the light guide

lens(Unit:mm)									
a	b	L_1	L_2	L_3	L_4	H	w	h	e
95	75	200	80	160	100	20	2	14	2

2.2 有限元模型

对有限元模型进行如下假设:(1) 假设光强均匀分布在辐照区且镜体表面的热载荷全由导光镜表面吸收的光强转化而来,目前关于强激光光束的导光镜反射率为 99.8%,激光功率分别为 20、30、50 kW,镜面吸收功率分别为 40、60、100 W,热流密度分别为 1 788、2 682、4 470 W/m²。(2) 由于镜面的温升较小,所以假定水流和铜镜的物性参数在整个过程中恒定不变。(3) 在文中研究的模型中,假定流速为 1 m/s,此时雷诺数 Re 为 3 476,认为其流动状态是湍流^[12]。(4) 设定镜体的初始温度、环境温度和冷却液温度均为 20℃。文中使用 FLUENT 软件来进行模拟,选用 SIMPLE 算法,湍流模型为标准 $k-\varepsilon$ 两方程模式。SIMPLE 算法属于分离解法中的压力修正法,应用十分广泛;而标准 $k-\varepsilon$ 模式是应用最广泛的的两方程粘性封闭模式,用于不可压缩/可压缩湍流,计算精度较高,迭代量和计算时间较为合适。

3 结果与分析

3.1 激光功率大小对辐照区温度场的影响

在实际工程中,光电装备所承接的激光源功率并非固定,这对镜面温度场的变化会产生一定影响。此节以激光功率 P 分别为 20、30、50 kW 时的情况为例,分析不同功率下镜面平均温度和标准温度偏差随 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的变化。如图 2~图 4 所示。

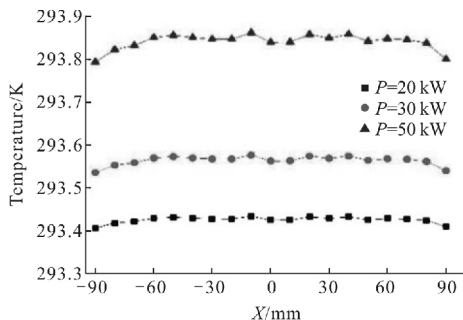


图 2 不同 P 下辐照区 X 轴温度变化图

Fig.2 Changes of irradiated region temperature along the X axis with different powers

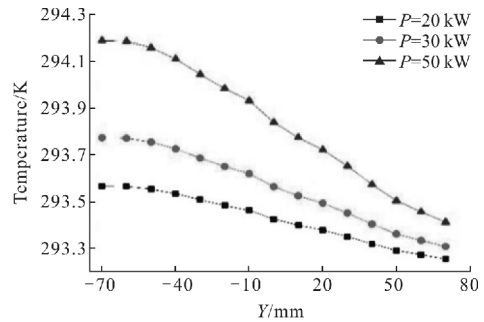


图 3 不同 P 下辐照区 Y 轴温度变化图

Fig.3 Changes of irradiated region temperature along the Y axis with different powers

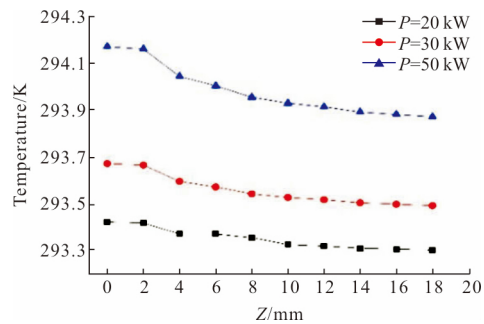


图 4 不同 P 下辐照区 Z 轴温度变化图

Fig.4 Changes of irradiated region temperature along the Z axis with different powers

由图 2 可以看出,功率越高,镜面平均温度越高。 X 方向上的温度并没有明显变化。 Y 方向上的温度逐渐减小,这是由于水在流动过程中存在能量损失;且在换热过程中,水的温度逐渐增大,与铜镜镜体间的温差减小,换热效率降低。 Z 方向上的温度逐渐减小后趋于稳定。

3.2 激光辐照时间对温度场的影响

此节以激光功率 P 分别为 20、30、50 kW 时的情况为例,分析不同辐照时间下镜面平均温度和标准温度偏差的变化。

由图 5、6 可以看出,激光功率越高,不同辐照时间下镜面平均温度和标准温度偏差越高。镜面温度分布对激光辐照时间的敏感度是不同的。在激光照射的前 20 s 内,平均温度和标准温度偏差上升较快,且激光功率越高,上升速度越快,敏感度越高;在 20~50 s 之间,平均温度和标准温度偏差上升较为缓慢;50 s 之后,平均温度和标准温度偏差达到稳态。

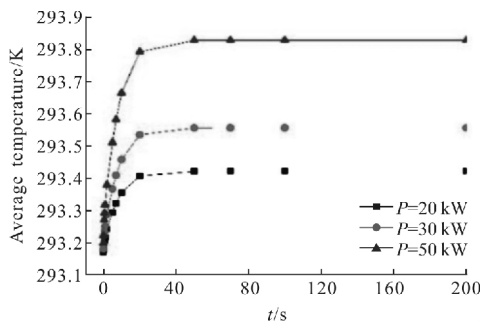


图 5 不同 P 下辐照区平均温度随辐照时间 t 变化图

Fig.5 Changes of the average temperature of irradiated region with irradiation time t with different powers

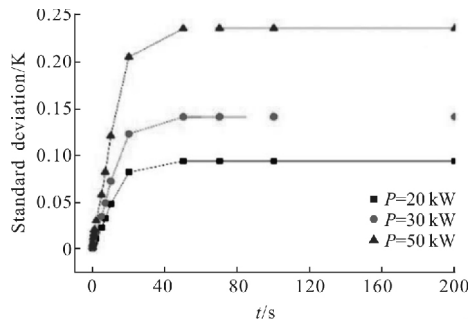


图 6 不同 P 下辐照区标准温度偏差随辐照时间 t 变化图

Fig.6 Changes of the standard deviation of temperature of irradiated region with irradiation time t with different powers

3.3 冷却液流速对温度场的影响

此节以激光功率 P 分别为 20、30、50 kW 时的情况为例，分析不同冷却液流速下镜面平均温度和标准温度偏差的变化。

由图 7、8 可以看出，激光功率越高，不同冷却液流速下的镜面平均温度和标准温度偏差也越高。功率一定时，随冷却液流速的增大，平均温度和标准温

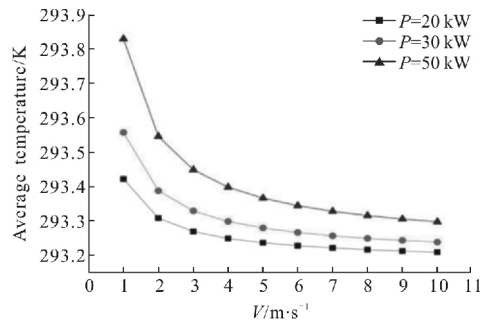


图 7 不同 P 下辐照区平均温度随 V 变化图

Fig.7 Changes of the average temperature of irradiated region with V under different powers

度偏差均逐渐减小，且减小速度越来越小。也就是说，提高流速在一定范围内冷却效果较为明显，到达一定值后，并不能明显增加温控效果。

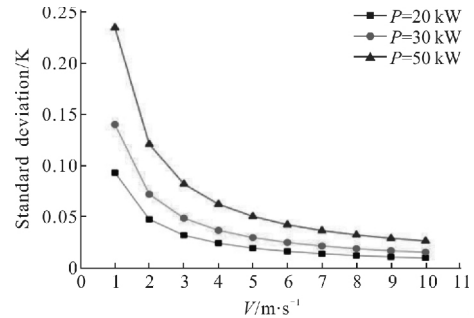


图 8 不同 P 下辐照区标准温度偏差随 V 变化图

Fig.8 Changes of the average temperature of irradiated region with V under different powers

3.4 镜体材料对温度场的影响

此节以 Cu、Si、W、BeO 为例，分析不同镜体材料下镜面平均温度和标准温度偏差随激光功率的变化。具体物性参数如表 2 所示。

表 2 各镜体材料的物性参数

Tab.2 Physical properties of mirror materials

Materials	ρ /kg·m ⁻³	c /J·g ⁻¹ ·K ⁻¹	λ /W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	α /m ² ·s ⁻¹	ρc /J·m ⁻³ ·K ⁻¹
Cu	8 933	380	391	1.151 9E-4	3 394 540
Si	2 329	695	157	9.699 4E-5	1 618 655
W	19 300	130	168	6.695 9E-5	2 509 000
BeO	3 020	1 000	230	7.615 9E-5	3 020 000

由图 9、10 可以看出，激光功率越高，镜面平均温度和标准温度偏差也越高。但镜体材料性质对平

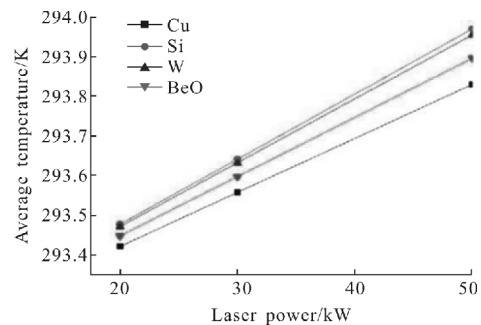


图 9 不同镜体材料下辐照区平均温度随 P 变化图

Fig.9 Changes of the average temperature of irradiated region of different mirror materials with different powers

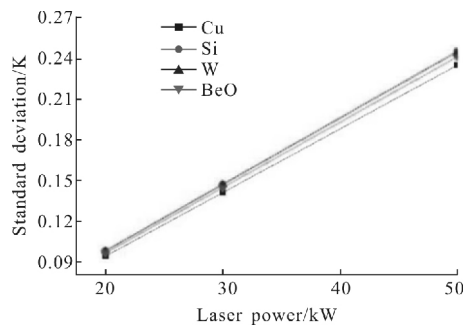


图 10 不同镜体材料下辐照区标准温度偏差随 P 变化图

Fig.10 Changes of the standard deviation of temperature of irradiated region of different mirror materials with different powers

均温度有一定影响。随激光功率的增加,不同材料间的差异更加明显,但对标准温度偏差并无明显差异。这是因为平均温度主要受到镜体材料的比热容和质量乘积的影响(由公式(10)可知),而标准温度偏差受到热扩散率的影响。由表 2 可以看出,密度与比热容乘积越大,温升越小,与图 9 的仿真结果一致,而各个材料的热扩散率几乎相同,所以其标准温度偏差相差较小。选择镜体材料时,在其他条件都满足的情况下,可以优先考虑密度与比热容乘积较大、热扩散率较大的材料。

3.5 流道与辐照镜面的距离 h_1 对温度场的影响

此节以激光功率 P 分别为 20、30、50 kW 时的情况为例,分析不同 h_1 下平均温度和标准温度偏差的变化。

由图 11、12 可以看出, h_1 对辐照区平均温度和标准温度偏差的影响并不明显,这是由于铜的热导率较高而 h_1 变化较小。

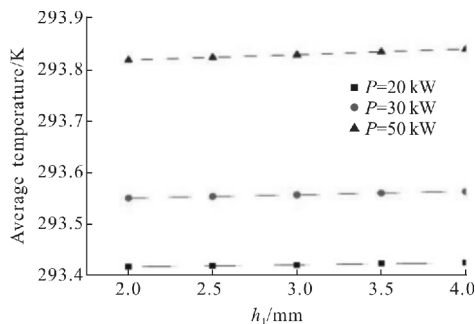


图 11 不同 P 下辐照区平均温度随 h_1 变化图

Fig.11 Changes of the average temperature of irradiated region with h_1 under different powers

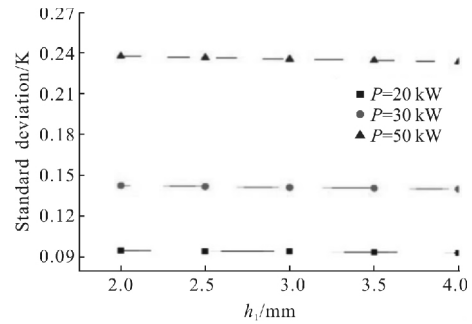


图 12 不同 P 下辐照区标准温度偏差随 h_1 变化图

Fig.12 Changes of the standard deviation of temperature of irradiated region with h_1 under different powers

4 结 论

文中通过分析激光功率、辐照时间、冷却液流速、镜体材料、流道与镜面距离等因素对导光镜镜面辐照区温度场的影响,得到以下结论:激光功率越高,镜面平均温度越高,且不同方向的温度分布并不相同;在激光辐照初始阶段,镜面辐照区的平均温度和标准偏差上升较快,一定时间后,到达稳态,不再改变;流速越大,镜面平均温度和标准偏差越低;在选择镜体材料时,尽量选择密度与比热容乘积较大且热扩散率较大的材料;而由于铜的热导率较高,流道与镜面之间距离对镜面温度场的影响并不明显。上述结论对光电装备中导光镜的液冷问题有一定借鉴意义。

参考文献:

- [1] Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun. Progress of high power diode laser beam combining[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 517-534. (in Chinese)
王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体激光合束进展[J]. *中国光学*, 2015, 8(4): 517-534.
- [2] Li Yuan, Chen Zhiping, Wang Penghua. Present situation and development trend of high energy laser weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S3): 376-379. (in Chinese)
李源, 陈治平, 王鹏华. 高能激光武器现状及发展趋势[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S3): 376-379.
- [3] Zhou Jianzhong, Wei Denghui, Huang Shu, et al. Microscale laser shock peening on TiN Coating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(11): 2679-2684. (in Chinese)
周建忠, 卫登辉, 黄舒, 等. 微尺度激光喷丸强化 TiN 涂层的表面性能[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11): 2679-2684.

- [4] Ma Chen, Ma Zhuang, Gao Lihong, et al. Laser damage mechanism of phenolic resin coating modified by flake graphite [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(2): 249–255. (in Chinese)
马琛, 马壮, 高丽红, 等. 激光对鳞片石墨改性酚醛树脂涂层的损伤机理[J]. *中国光学*, 2017, 10(2): 249–255.
- [5] Jiao Yang, He Weifeng, Sun Ling, et al. Study on improving mechanical properties of K417 alloy by laser shot peening and aluminizing process[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2274–2279. (in Chinese)
焦阳, 何卫锋, 孙岭, 等. 激光喷丸与渗铝复合工艺提高 K417 合金力学性能研究 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(8): 2274–2279.
- [6] Hu Xiaochuan, Peng Jiaqi, Zhang Bin. Thermal deformation of deformable mirror and its influence on beam quality [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2015, 42(1): 37–45. (in chinese)
胡小川, 彭家琪, 张彬. 变形镜热形变及其对光束质量的影响分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 37–45.
- [7] Zhang Wei, Yu Xinfeng, Zhou Liansheng, et al. In the new image precision optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(11): 3033–3040. (in chinese)
张巍, 于新峰, 周连生, 等. 精密光学系统的热像差[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(11): 3033–3040.
- [8] Chiu H C, Jang J H, Yeh H W, et al. The heat transfer characteristics of liquid cooling heat sink containing microchannels [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2011, 54(1): 34–42.
- [9] Hu Panpan, Zhu Haihong, He Chongwen, et al. Heat transfer and thermal deformation characteristics of liquid-cooled laser mirror [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 12: 749065.
- [10] Hu Panpan, Zhu Haihong, He Chongwen, et al. Heat transfer and thermal deformation characteristics of liquid-cooled laser mirror [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 12: 749065.
- [11] Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] Zhang Yeying. Fluid Mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 1999. (in Chinese)
张也影. 流体力学 [M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [13] Kurnia J C, Sasmito A P, Mujumdar A S. Numerical investigation of laminar heat transfer performance of various cooling channel designs [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(6–7): 1293–1304.