第 44 卷 第 10 期
2017 年 10 月

中 国 激 光
CHINESE JOURNAL OF LASERS

Vol. 44, No. 10
October, 2017

强激光作用下导光镜面温度场的影响因素分析

孟令武[1,2], 邵 帅[1]

[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

摘要 为降低导光镜面激光辐照区的温度梯度,利用有限体积法求解三维湍流传热方程,得到激光辐照区温度场分布,研究了矩形流道尺寸参数、冷却液的浓度与流速等因素对导光镜面平均温升和温升差的影响,并设计了双流道结构。结果表明,对于单流道,镜面辐照区温度场不随其几何中心呈对称分布,最高温度点位于流道下游;增大流道截面尺寸和冷却液流速可以提高换热效果;流道不同面之间的温度分布并不相同;乙二醇冷却液浓度越高,换热效果越差;相比于单流道结构,双流道结构的平均温升降低幅度最大可达 17.79%,温升差降低幅度最大可达 67.97%。

关键词 激光光学; 强激光; 导光镜; 温度场; 计算流体力学

中图分类号 TN243 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201744.1001004

Influence Factors Analysis of Temperature Field of Light Guide Mirror Surface Under High Power Laser

Meng Lingwu[1,2], Shao Shuai[1]

[1]*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*;

[2]*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract In order to reduce the temperature gradient of the laser irradiation zone of the light guide mirror surface, the three-dimensional steady turbulent flow and heat transfer equations are solved with the finite volume method, and the temperature field of the laser irradiation zone is analyzed. The effects of rectangular channel size, concentration and velocity of coolant on average temperature rise and temperature rise difference of the light guide mirror surface are studied. Accordingly, a dual-channel structure is designed. Results show that for the single channel, the temperature field of the irradiation zone is not symmetrical around the geometric center and the highest temperature point is located at the downstream of the irradiation zone. The heat transfer efficiency can be improved by the increase of the cross-section size and the coolant velocity. In addition, the temperature distributions between the different surfaces of the channels are not the same. The higher the concentration of the ethylene glycol coolant, the worse the heat transfer effect. The average temperature and the temperature rise difference of the dual-channel structure can be reduced by up to 17.79% and 67.97%, respectively, compared with those of the single-channel structure.

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

OCIS codes 140.3320; 230.4040; 350.5340; 350.6830

收稿日期: 2017-05-03; **收到修改稿日期**: 2017-06-14

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项目(09J52SCN90)

作者简介: 孟令武(1993—),男,硕士研究生,主要从事强激光作用下导光镜液冷技术方面的研究。
E-mail: 1033951377@qq.com

导师简介: 邵 帅(1978—),女,博士,副研究员,主要从事光机结构的研究与设计方面的研究。
E-mail: shaoshuaiciomp@163.com(**通信联系人**)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　引　言

高能激光器作为激光研究的前沿，广泛应用于国防军事、工业制造、航空航天等领域[1-5]。但高能激光光束需经过导光光路才能到达预定目标。光束传输过程中光束能量过高，易使导光镜面因温度不均产生热畸变，影响最终的光束质量，严重制约高能激光器的应用[6-8]。主动冷却技术由于换热效率高而成为导光镜冷却的主要方式，近年来一直是国内外的研究热点[9-10]。

目前常用的温控技术主要包括风冷、液冷、热管等。风冷技术分为自然冷却和强迫冷却，自然冷却的散热能力十分有限，一般不超过 0.08 W/cm^2；而强迫风冷会产生较大的噪音和振动，不适用于导光镜。热管技术通过管壳内物质的蒸发冷凝过程来实现热量传递，导热性能好，广泛应用于工业中，但是微型热管技术并不成熟。而液冷技术具有噪音小、效率高等优点，且微通道液冷技术相对成熟。因此，本文优选液冷技术进行主动冷却。

国内在强激光液冷镜方面研究较为深入的机构有华中科技大学[11-16]和国防科学技术大学[17]。但这些研究都是基于较为复杂的层流状态的热变形效应。由于热变形是镜面温度分布不均导致的，所以可以基于温度差进行比较，镜面的平均温升和温升差越低，镜面的热变形越小。同时，相对于层流，湍流对镜面的温度控制效果更好。

本文主要分析了流道尺寸参数、冷却液的浓度与流速对导光铜镜镜面温度场的影响；并设计了流道结构，其温控效果相对于传统单流道结构有较大提高。

2　理论分析

根据牛顿冷却公式[18]

$$q_{\mathrm{conv}}=\alpha_{\mathrm{i}}A_{\mathrm{conv}}\Delta T \tag{1}$$

分析整个传热冷却过程，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。该冷却过程涉及的主要传热方式为流道与冷却液之间的强制对流传热。

在本文所分析的结构中，对流换热面积为

$$A_{\mathrm{conv}}=\sum_{i=1}^{n}2(wL_i+hL_i+wh), \tag{2}$$

式中 L_i 为第 i 流道的长度，w 和 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

$$\alpha_i=\frac{Nu\cdot\kappa_{\mathrm{f}}}{d_{\mathrm{e}}}, \tag{3}$$

$$d_{\mathrm{e}}=\frac{2wh}{w+h}, \tag{4}$$

式中 Nu 为努塞尔数，κ_{f} 为冷却液热导率，d_{e} 为水力直径。

$$Nu=0.023Re^{0.8}Pr^{0.4},\ Re=\frac{\rho v d_{\mathrm{e}}}{\mu},\ Pr=\frac{\mu c_p}{\kappa_{\mathrm{f}}}, \tag{5}$$

式中 Re 为雷诺数，Pr 为普朗特数，ρ 为冷却液密度，v 为冷却液速度，μ 为冷却液动力黏度，c_p 为比热容。由(4)式、(5)式可以看出，影响换热系数的因素主要包括流道的宽和高、冷却液的流速、冷却液的类型(即物性参数的影响)。

3　导光镜模型

3.1　几何模型

导光镜几何模型如图 1 所示，具体参数如表 1 所示，流道宽、高、间隔分别用 w，h，e 表示。各流道模型具体参数如表 2 所示，其中 d_{e} 和 n 分别代表流道的水力直径和流道数目。铜及乙二醇溶液的物性参数如表 3 所示。

表 1　导光镜几何参数

Table 1　Geometrical parameters of the light guide mirror

Parameter	a /mm	b /mm	L_1 /mm	L_2 /mm	L_3 /mm	L_4 /mm	H /mm	h_1 /mm
Value	95	75	200	80	160	100	20	3

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

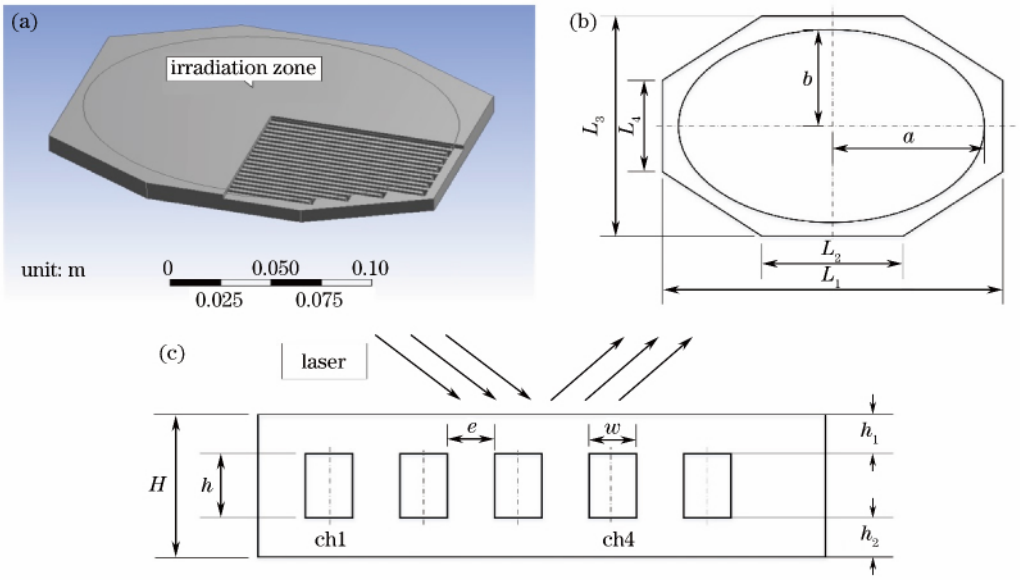

图 1　导光镜几何模型。(a)导光镜整体结构图;(b)导光镜整体尺寸图;(c)流道截面示意图

Fig. 1　Geometry model of light guide mirror. (a) Structure of the light guide mirror; (b) size of the light guide mirror; (c) cross section of the channels

表 2　流道截面几何参数

Table 2　Geometrical parameters of cross sections of the channels

Parameter	Model												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
w /mm	2	2	2	2	2	2.5	3	3.5	4	2	2	2	2
h /mm	10	11	12	13	14	14	14	14	14	14	14	14	14
d_e /mm	3.333	3.385	3.429	3.467	3.500	4.242	4.941	5.600	6.222	3.500	3.500	3.500	3.500
e /mm	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2.5	3	3.5	4
n	37	37	37	37	37	33	29	27	25	33	29	27	25

表 3　铜和乙二醇水溶液的物性参数

Table 3　Physical properties of copper and glycol aqueous solutions

Material	Volume fraction /%	Density / (kg·m^{-3})	Specific heat / (kJ·kg^{-1}·K^{-1})	Heat conductivity / (W·m^{-1}·K^{-1})	Viscosity / (10^{-3}kg·m^{-1}·s^{-1})
Cu		8933.00	0.380	391.000	
Water	0	998.20	4.820	0.600	1.003
Glycol aqueous solution	40	1059.68	3.468	0.415	2.960
Glycol aqueous solution	45	1066.52	3.375	0.398	3.450
Glycol aqueous solution	50	1073.35	3.281	0.380	3.940
Glycol aqueous solution	55	1079.81	3.183	0.365	4.660
Glycol aqueous solution	60	1086.27	3.084	0.349	5.380

3.2　有限元模型

使用 FLUENT 软件进行模拟,选用 SIMPLE 算法,选择的湍流模型为标准 k-ε 两方程模式。对有限元模型做如下假设:1)强激光的功率为 30 kW,导光镜为系统第 1 块导光镜,镜面所受辐射功率为30 kW。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。本文采用强激光光束的反射率为 99%,镜面的吸收功率为 300 W,热流密度为 13403 W/m^2。2)传热和流场模型设置为三维稳态模型。3)由于镜面的温升较小,所以假定冷却液和铜镜的物性参数在整个过程中恒定不变。4)在该模型中,雷诺数 Re 的范围为 6506～61787,可以认为其流动状态是湍流[18]。5)设定镜体的初始温度、环境温度和冷却液温度均为 20 ℃。

将冷却液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[19]如下:

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1）质量守恒方程，即连续性方程：

$$\frac{\partial v_x}{\partial x}+\frac{\partial v_y}{\partial y}+\frac{\partial v_z}{\partial z}=0, \tag{6}$$

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 Navier-Stokes(N-S)方程：

$$\rho_{\text{fluid}}(v\cdot\nabla v)=-\nabla p+\mu_{\text{fluid}}\nabla^2 v, \tag{7}$$

式中 ρ_{fluid} 为流体密度，μ_{fluid} 为流体动力黏度，∇p 为压力差。

3）能量守恒方程：

$$\rho_{\text{fluid}}c_{p,\text{fluid}}(v\cdot\nabla v)=\kappa_{\text{fluid}}\nabla^2 T_{\text{fluid}}, \tag{8}$$

式中 $c_{p,\text{fluid}}$ 为流体比热容，κ_{fluid} 为流体热导率，T_{fluid} 为流体温度。

4）三维连续弹性体的稳态温度方程：

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\rho q=\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t}, \tag{9}$$

式中 q 为铜镜热源密度，t 为时间，T 为物体内部温度。

由(9)式可知，导光镜热变形取决于其温度场。因此，将镜面辐照区的温度场作为标准是有理论依据的。

4　影响因素分析

4.1　流道尺寸参数对辐照区温度场的影响

不同尺寸的微通道液冷镜的镜面温度分布只是温度值不同，其分布趋势大体一致，所以只列出了 Model 5 的温度分布云图，如图 2 所示。可以看出，辐照区温度场并不沿其几何中心呈对称分布，且温度最高点分布在辐照区偏下部分。一是由于冷却液流动过程中存在能量损失；二是由于换热过程中，冷却液温度逐渐增大，与铜镜间的温差减小，换热效果变差。

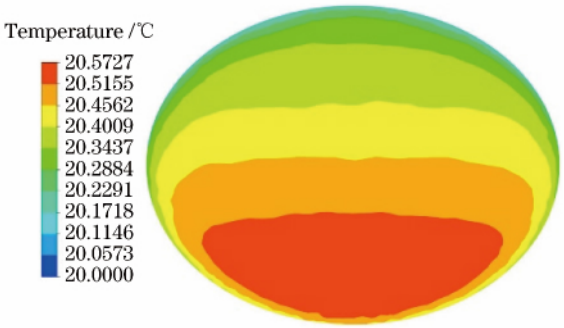

图 2　镜面辐照区温度分布云图

Fig. 2　Contour of temperature distribution of the mirror irradiation zone

图 3 为冷却液流速为 1 m/s 时平均温升和温升差随流道参数的变化，由图可知，随着流道宽度 w 或高度 h 的增大，平均温升和温升差均减小。但若 w 或 h 过大，会使弯道处流速和冲击过大，因此可以选择宽度 $w=4$ mm，高度 $h=14$ mm 的矩形流道。流道间距 e 对平均温升和温升差的影响较小，这是由于铜的热导率较大，各点温度几乎相等；流道间距变化较小时，流道数目变化较小，对冷却效果影响不明显。

此外，不同流道面的换热系数不同。图 4 分析了不同面上温度随 x 轴坐标的变化。以 Model 5，冷却液流速 $v=1$ m/s 为例，选择第一条通道、中间流道、最后一条流道这 3 条流道的 3 个面进行分析，以靠近热源一侧为 Face 1，侧壁为 Face 2，远离热源一侧为 Face 3。

从图 4 中可以得出：各个流道的 3 个面之间的温度大小趋势相同，都是 Face 1 温度最高，Face 3 温度最低。不同流道之间的不同面的温度不尽相同，第一条流道温度最低，最后一条流道温度最高，这是由于冷却液温度升高造成换热系数不同，进而造成温度分布不均。各个流道的曲线表现并不相同，以中间流道为例，Face 1 曲线与 x 轴呈对称分布，而 Face 2 和 Face 3 曲线与 x 轴波动频繁，并无明显规律。这是由于 Face 1

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

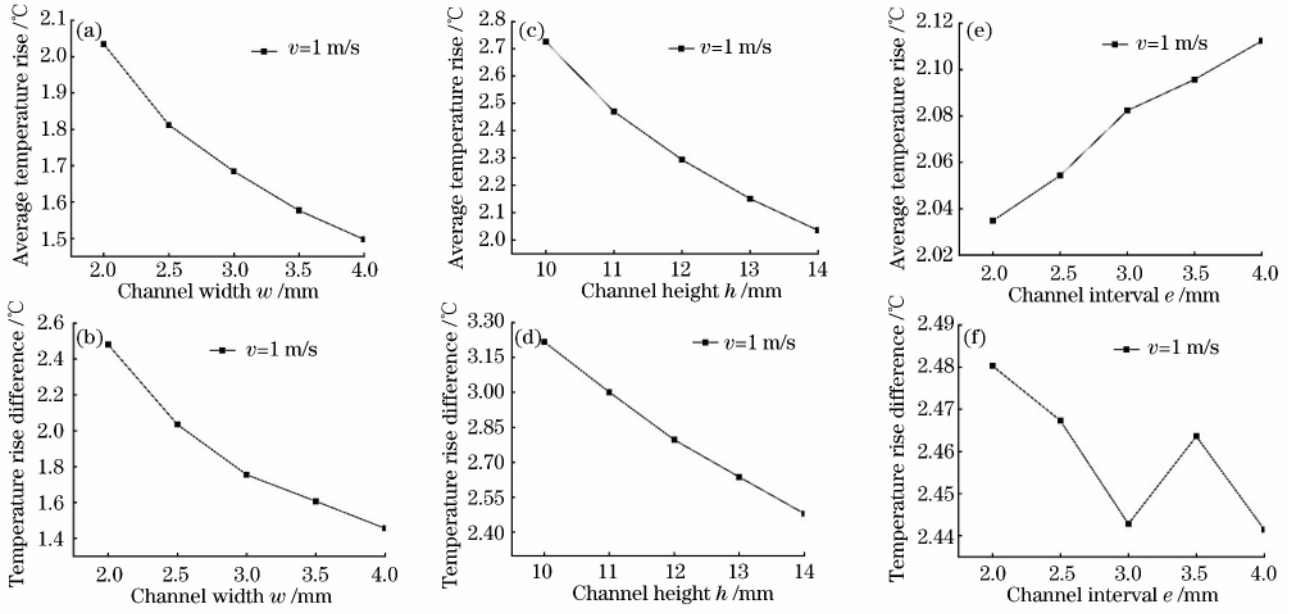

图 3　(a)平均温升和(b)温升差在不同流道宽度下的变化；(c)平均温升和(d)温升差在不同流道高度下的变化；(e)平均温升和(f)温升差在不同流道间隔下的变化

Fig. 3　(a) Average temperature rise and (b) temperature rise difference as a function of the channel width; (c) average temperature rise and (d) temperature rise difference as a function of the channel height; (e) average temperature rise and (f) temperature rise difference as a function of the channel interval

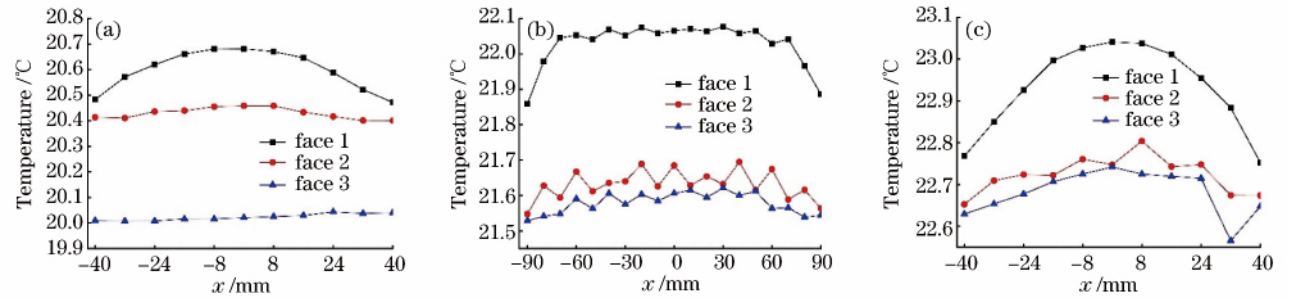

图 4　流道不同面的温度随 x 轴的变化图。(a)第一条流道；(b)中间流道；(c)最后一条流道

Fig. 4　Change of the temperatures of different faces along the x axis for different channels. (a) The first channel; (b) the middle channel; (c) the last channel

靠近热源，从结构看，主要传热材料是铜，温度分布较为规律。x 正向比负向温度稍高，是由于冷却液温度升高导致换热系数降低。而 Face 2 和 Face 3 面的温度在传热过程中经过了冷却液，冷却液处于湍流流动状态中，性质不稳定，所以导致温度分布不规律。

4.2　冷却液流速对辐照区温度场的影响

以 Model 1、Model 5、Model 9 为例，分析了不同流速下镜面平均温升和温升差的变化，结果如图 5 所示。由图可知，不同模型下，随着流速 v 的增大，平均温升和温升差均减小，且减小趋势逐渐变小。由于水泵水量有限，不能任意增加流速，最高为 10 m/s，且速度过高，温控效果并不会显著提高。

4.3　冷却液浓度对辐照区温度场的影响

水由于冰点为 0 ℃而不能适应严寒环境。为此，选择冰点低于－25 ℃的乙二醇水溶液为冷却液。以 Model 5 模型为例，在流速为 1 m/s 时进行模拟，得到不同浓度下镜面温度场分布，结果如图 6 所示。

如图 6 所示，随着浓度的增加，平均温升和温升差都越来越大。因此，选择乙二醇水溶液作为冷却液时，在满足冰点要求的条件下，尽量选择浓度较低的冷却液。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

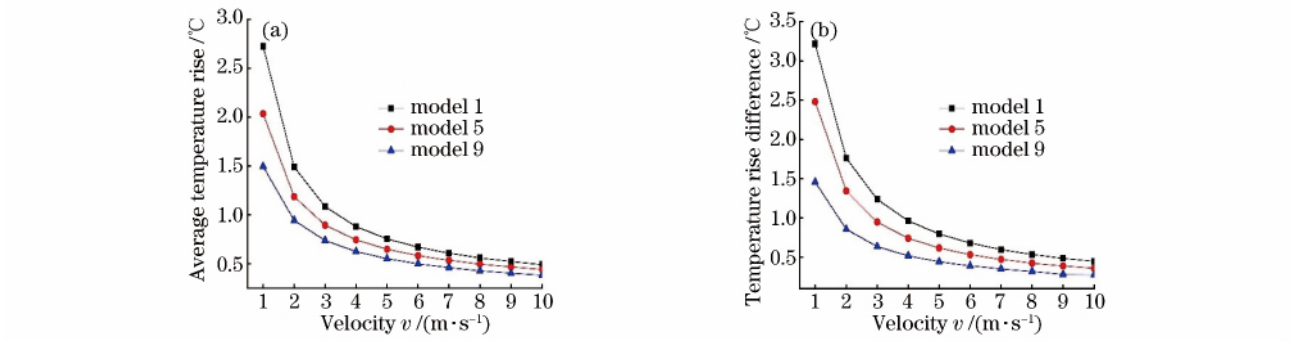

图 5　镜面辐照区温度场的(a)平均温升和(b)温升差在不同流速下的变化

Fig. 5　(a) Average temperature rise and (b) temperature rise difference of the mirror irradiation zone as a function of velocity

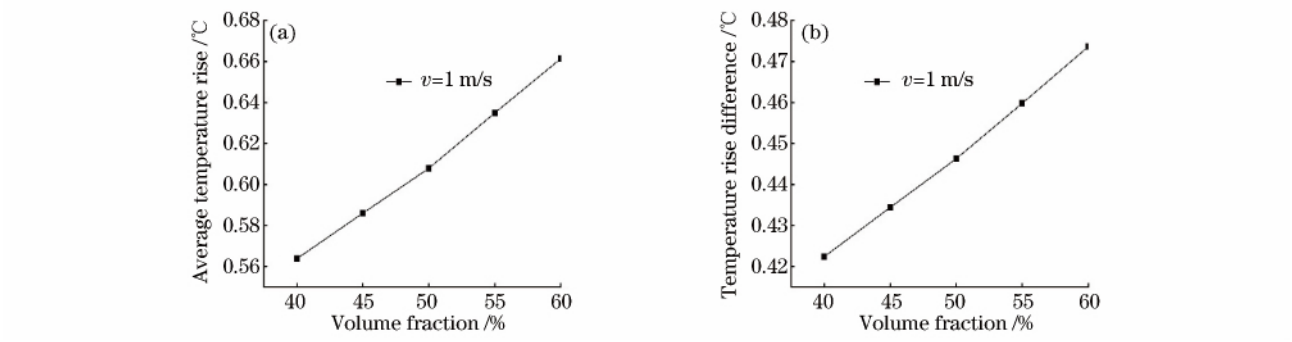

图 6　镜面辐照区温度场的(a)平均温升和(b)温升差在不同浓度下的变化

Fig. 6　(a) Average temperature rise and (b) temperature rise difference of the mirror irradiation zone as a function of concentration

4.4　流道布局对辐照区温度场的影响

由 4.1 可以得出结论，单一流道温度分布不均匀。为此，设计了双流道布局，结构如图 7 所示。

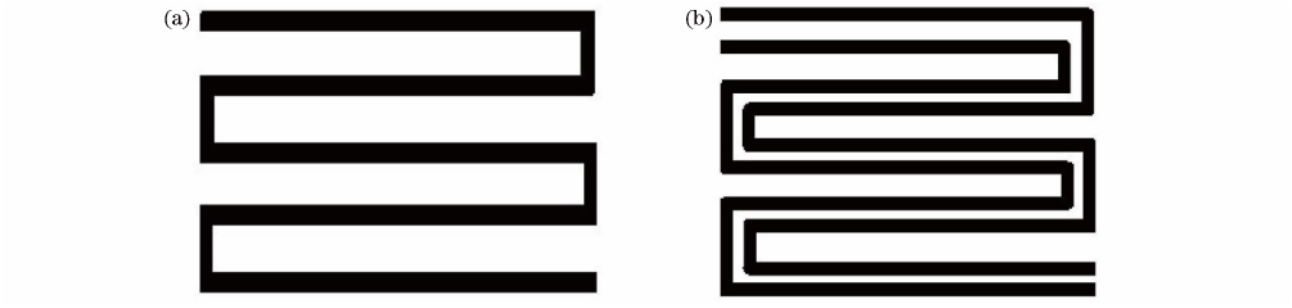

图 7　(a)单流道布局示意图；(b)双流道布局示意图

Fig. 7　Schematic of (a) single-channel layout and (b) dual-channel layout

表 4 和表 5 比较了不同流道布局下的平均温升和温升差，其中 Δ 表示其降低幅度。由表 4 和表 5 可以看出，双流道比单流道换热效果要好，平均温升降低幅度最大可达 17.79%，温升差降低幅度最大可达 67.97%。随着速度的增大，二者差距逐步减小。

表 4　不同流道布局下平均温升比较

Table 4　Comparison of the average temperature rise in different channel layouts

Velocity v /(m·s^{-1})	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Average temperature rise for single-channel layout /℃	2.0348	1.1863	0.8947	0.7431	0.6484	0.5826	0.534	0.4965	0.4666	0.4419
Average temperature rise for dual-channel layout /℃	1.7068	1.0071	0.7671	0.6424	0.5645	0.5107	0.4707	0.4398	0.415	0.3945
Δ /%	16.12	17.79	16.63	15.68	14.86	14.08	13.45	12.89	12.43	12.02

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 5　不同流道布局下温升差比较

Table 5　Comparison of the temperature rise difference in different channel layouts

Velocity v /(m·s^{-1})	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperature rise difference for single-channel layout /℃	2.4803	1.3431	0.9459	0.7412	0.6162	0.5318	0.4708	0.4238	0.3871	0.3573
Temperature rise difference for dual-channel layout /℃	0.7944	0.4815	0.366	0.3035	0.2643	0.2363	0.2151	0.1989	0.1866	0.1767
Δ /%	67.97	64.15	61.31	59.05	57.11	55.57	54.31	53.07	51.80	50.55

5　结　论

通过不同截面尺寸的流道、冷却液的浓度及流速、流道布局等方面对导光镜面的温度场进行分析，得出以下结论：1)对于单流道，镜面温度分布并不沿激光辐照区中心呈对称分布，温度最大值位于流道下游；2)流道宽、高和冷却液流速越大，其换热效果越好，镜面平均温升和温升差越小；3)冷却液浓度越高，换热效果越差。流道不同面之间温度分布不同，靠近热源的面温度要比侧壁面和远离热源的面温度低。与单流道相比，双流道布局下的换热效果更好，其中平均温升降低幅度最大可达 17.79%，温升差降低幅度最大可达 67.97%。因此，可以选择宽为 4 mm，高为 14 mm 的双流道结构；同时在选择冷却液时，应该在保证满足冰点要求的基础上，尽量选择浓度低的乙二醇溶液作为冷却液。

参　考　文　献

[1] Wang Xiaolin, Zhou Pu, Su Rongtao, *et al*. Current situation, tendency and challenge of coherent combining of high power fiber lasers[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(2): 0201001.
王小林, 周　朴, 粟荣涛, 等. 高功率光纤激光相干合成的现状、趋势与挑战[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201001.

[2] Li Yuan, Chen Zhiping, Wang Penghua. Development status and prospect of high-power laser beam weapons[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S3): 371-374.
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): 371-374.

[3] Endo M, Nagatomo S, Takeda S, *et al*. High-efficiency operation of chemical oxygen-iodine laser using nitrogen as buffer gas[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(3): 393-398.

[4] 汪道友. 激光核聚变快点火新方案研究获重要进展[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(2): 324-324.

[5] Yan Anru, Yang Tiantian, Wang Yanling, *et al*. Effect of tungsten powder particle size and shape on consolidation and microstructure of W-x Cu composites by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0203007.
闫岸如, 杨恬恬, 王燕灵, 等. 钨粉粒度和形状对选区激光熔化 W-x Cu 成形与显微组织的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0203007.

[6] Du Yanyi, An Jianzhu, Shu Xiaojian. Effect of thermal distortion of mirror on characteristics of laser beam in unstable resonator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(8):1333-1338.
杜燕贻, 安建祝, 束小建. 腔镜热变形对非稳腔光场特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(8): 1333-1338.

[7] Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(4): 773-778.
刘泽金, 周　朴, 许晓军. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 773-778.

[8] Hu Xiaochuan, Peng Jiaqi, Zhang Bin. Thermal distortion of deformable mirror and its influence on beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0102003.
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): 0102003.

[9] Tuckerman D B, Pease R F W. High performance heat sinking for VLSI[J]. IEEE Electron Device Letters, 1981, 2(5): 126-129.

[10] Anthony A F M, Hopkins A K. Actively cooled silicon mirrors[C]. SPIE, 1982, 279: 196-203.

[11] Peng Yufeng, Cheng Zuhai. Finite element analyses of thermal distortions of mirror substrates for high power lasers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(1): 5-8.
彭玉峰, 程祖海. 强激光反射镜基体材料的热畸变特性有限元分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(1): 5-8.

[12] Yu Liangying, Zhu Haihong, Cheng Zuhai, *et al*. Analysis of the effects of mirror structure on mirror surface thermo-

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

deformation using finite element methods[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2007, 35(6): 108-110.

余亮英，朱海红，程祖海，等. 强激光反射镜体结构对镜面热变形的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2007，35(6)：108-110.

[13] Hu Panpan, Zhu Haihong, Zuo Duluo. Influence of channel parameters on thermal-deformation of microchannel mirror [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1102001.

胡攀攀，朱海红，左都罗. 流道截面参量对微通道水冷镜热变形的影响[J]. 中国激光，2011，38(11)：1102001.

[14] Hu P P, Zhu H H, He C W, *et al*. Heat transfer and thermal deformation characteristics of liquid-cooled laser mirror [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 6(1): 749065.

[15] Hu P P, Zhu H H, He C W. Optimization design of water-cooled mirror for low thermal deformation[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1): 596-605.

[16] Peng Y F, Cheng Z H, Zhang Y N, *et al*. Temperature distributions and thermal deformations of mirror substrates in laser resonators[J]. Applied Optics, 2001, 40(27): 4824-4830.

[17] Du Shaojun. Study on thermal deformation in high energy laser and transmission system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2001.

杜少军. 高能激光器及其发射系统的热变形研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2001.

[18] Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

杨世铭，陶文铨. 传热学[M]. 北京：高等教育出版社，2006.

[19] Zhang Yeying. Fluid mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.

张也影. 流体力学[M]. 北京：高等教育出版社，1999.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net