

等离子体普克尔盒中对流换热强度及其增强

张 君 张雄军 吴登生 田晓琳 魏晓峰

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 基于有限体积数值方法, 给出传统脉冲工作模式下等离子体普克尔盒内流固耦合对流换热系数, 根据重复频率应用下热学要求, 对放电腔进行重新设计以增大对流换热强度。数值模拟显示: 由于工作气压低、抽速小、放电腔设计未考虑热学需求, 传统工作模式下对流换热系数太低, 为 $1.01 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 通过改变流体抽速、流体工作气压、增加进出口管道、改变进出口管道排布方式、增大进出口管道管径有效地提高了对流换热强度, 对流换热系数达到 $8.02 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

关键词 光学器件; 热效应; 流固耦合; 电光开关; 对流换热; 温度场; 重复频率

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS200929s1.0368

Convective Heat Transfer Intensity and Its Enhancing in Plasma Electrodes Pockels' Cell

Zhang Jun Zhang Xiongjun Wu Dengsheng Tian Xiaolin Wei Xiaofeng

(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Based on the finite volume modular, the coefficient of convective heat transfer is studied, when plasma electrodes Pockels' cell is operated at conventional pulse mode. Considering requirement of thermodynamics, the discharge cavity is redesigned to enhance convective heat transfer. The results indicate: at conventional mode, the coefficient of convective heat transfer is too small, $1.01 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, because of low operation pressure, low pumping speed, no considering of thermodynamics requirement. By pushing the pumping speed, increasing operating pressure, augmenting pipe diameter, and redesigning arrangement of inlets and outlets, coefficient of convective heat transfer is enhanced prominently, which reaches to $8.02 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Key words optical devices; heating effect; fluid-solid coupled; electro-optic switch; convective heat transfer; temperature distribution; repetition frequency

1 引 言

在采用多程放大技术方案的平均功率激光系统中, 通常采用重复频率普克尔盒隔离反向激光和避免自激振荡^[1~3]。在重复频率应用下, 由于对激光的线性吸收, 电光晶体中将产生热沉积, 导致热透镜、应力、退偏、双折射等不良效应, 使激光光束质量、输出功率下降, 甚至造成光路中光学元件的破坏, 严重限制了固体激光器的最大平均输出功率和亮度^[4~6]。等离子体电极普克尔盒光开关采用光学透明的等离子体作为施加开关脉冲的电极, 可以纵向使用, 同时可采用薄晶体, 定标到大口径, 从而减少了热问题, 将成为中等口径至大口径(数十至数百

mm)平均功率光开关的理想选择。但热问题的分析与控制仍是研制重复频率等离子体电光开关的前提。

前人在研究重复频率等离子体电光开关热问题时, 对流换热边界往往建立在假设的基础上^[7, 8]。本文建立了研究重复频率等离子体电光开关热效应的流固耦合传热有限体积模块, 研究了流体抽速、工作气压、进出口管道管径、管道排布方式对对流换热强度的影响。

2 流固耦合对流换热模型

基本的大口径等离子体电极普克尔盒(PEPC)的

结构如图 1 所示,它主要由两个放电室夹着一片装有电光晶体的绝缘隔板组成,在两个放电室的外侧,用光窗真空密封。放电室上方和下方分别装着阴极和阳极,此外,在放电室的壳体上还装有抽气,进气、真空测量以及电极馈电接口。真空系统将放电室抽空

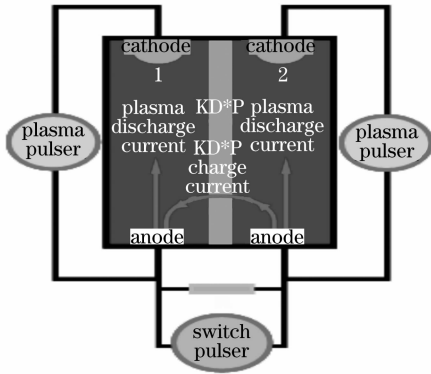


图 1 等离子体电极普克尔盒结构示意图

Fig. 1 Configuration of the plasma electrodes Pockels' cell

后,注入工作气体(He 或 Ne),等离子体放电脉冲发生器输出的高电压脉冲加于阴-阳极之间,产生辉光放电,形成大面积等离子体,覆盖于晶体两侧。然后,开关脉冲发生器产生的准矩形电压脉冲通过等离子体电极加于晶体两侧。在电场作用下,晶体产生双折射,使通过晶体的线偏振光改变偏振方向。

在平均功率激光系统中,由于开关晶体的线性吸收,光负荷部分地转变为热负荷。热量部分被放电腔中工作气体带走,部分沉积在开关晶体中。可以看出开关晶体内热分布实际上是一个三维的流固耦合问题,包括开关晶体内热传输模型以及流体强制对流换热模型。关于热传输模型,我们已在文献^[7]做了详细阐述,本文在此基础上进一步讨论强制对流换热模型。

对于不可压缩、常物性、无内热源的三维问题,描写对流换热的完整微分方程组为^[9]

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \\ \rho \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial \tau} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \end{cases} \quad (1)$$

式中第一个方程为连续性方程,第二、三、四方程为纳维-斯托克斯方程,第三个方程为能量守恒方程。其中 F_x, F_y, F_z 是体积力在 x, y, z 方向上的分量。 ρ, η, λ, c_p 分别为流体密度、动力粘度、导热系数以及定压比热容。

3 计算参数

根据设计要求(应用于 10 J, 10 Hz 激光系统),普克尔盒晶体 DKDP 的口径为 60 mm × 60 mm,厚度为 10 mm,宽度、高度、厚度分别沿 x, y, z 轴方向,光沿 z 轴传输。放电腔内径为 $\phi 132$ mm,厚度为 10 mm,流体入口内径为 $\phi 3$ mm,出口内径为 $\phi 6$ mm。为减小计算量,根据对称性,取 1/2 几何结构建立有限体积分析物理模型。模拟计算采用的 DKDP 晶体物性参数为:比热容 700 J/(kg · K),密度为

2355 kg/m³,热传导系数 $k_{11} = k_{22} = 1.9$ W/(m · K), $k_{33} = 2.1$ W/(m · K)。He 气的物性参数为比热容 5200 J/(kg · K),动力粘度为 2.15×10^{-5} m²/s,热传导系数为 0.1255 W/(m · K)。开关晶体对激光吸收产生的热量作为体积热加载,对于单脉冲能量为 10 J,重复频率为 10 Hz 的激光系统,体积热生成率为 13888.9 W/m³。等离子体普克尔盒在单脉冲工作模式下,流体工作气压为 1.4×10^4 Pa,入口流体初始温度为 $T_{inlet} = 293$ K,出口抽速 $v_{outlet} = 2$ L/min。

4 数值模拟结果与讨论

对流换热强度取决于流体流动状态,我们所研究的对象流场为定常的、流体为不可压缩常物性流。为了确定流体是层流还是湍流,我们有必要计算雷诺数,通常雷诺数定义为^[10]:

$$N_{Re} = VD/\eta, \quad (2)$$

式中 V 是放电腔内流体平均速度, D 为特征长度, η 是流体的动力粘度。放电腔的特征长度可以由下式获得

$$D = 4 \times \frac{S_F}{L_T}, \quad (3)$$

式中 S_F 为流动截面积, L_T 为传热周边周长。求得雷诺数 $N_{Re} = 2546.37$, 当流体流过平板时流动由层流向湍流的转折通常发生在 $300000 < N_{Re} < 600000$, 所以数值求解过程中, 流场作层流处理。

4.1 单脉冲工作模式下流固耦合传热

图 2 为放电腔中稳态速度场分布。从图中可以看出, 沿入口、出口通道上流体作层流运动, 而腔内大部分流体几乎保持静止, 限制了换热强度, 同时由于流场分布的不均匀将造成电光晶体上温度分布存在梯度。图 3 给出了稳态下电光晶体温度分布。从图 3 可以发现晶体内存在一定的温度梯度分布, 最高温度为 362.4 K, 最低温度为 353.4 K, 平均温度为 359.5 K。由于流体抽速较小、压强较低, 对流换热系数小, 为 $1.01 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 放电腔内 He 气不能将电光晶体内沉积的热量及时带走, 因此电光晶体内温升较大。

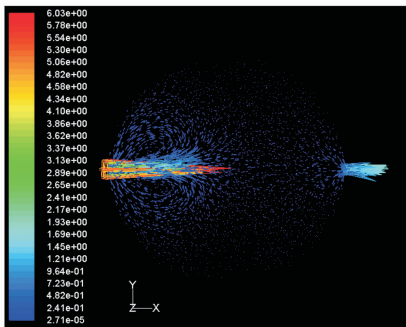


图 2 放电腔中稳态速度场分布

Fig. 2 Steady state velocity distribution in discharge cavity

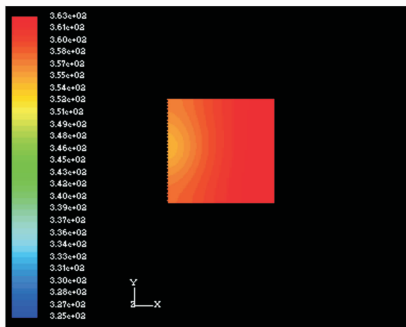


图 3 稳态温度分布

Fig. 3 Steady state temperature distribution

由于最终所关注的是电光晶体中温度分布, 图 4、图 5 分别给出晶体内流固耦合面上沿流体流动方向、沿垂直于流体流动方向上温度分布。从图 4 可以看出, 沿流体流动方向晶体温升逐渐增加, 温差为 8.6 K, 这是由卡路里加热造成的。从图 5 中可以看出, y 方向上温度场关于 x 轴对称, 流体通道上温度最低为 360.18 K, 晶体边界处温度值达到最大, 为 360.88 K, 沿 y 方向温度梯度较小。

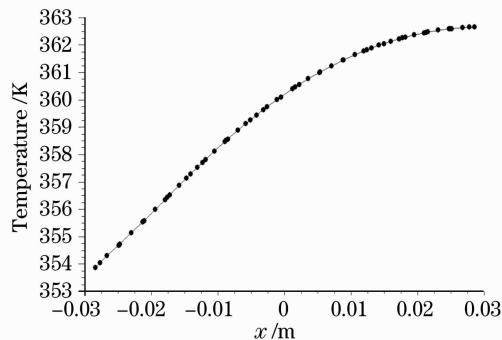


图 4 晶体上沿流体流动方向温度分布

Fig. 4 Temperature distribution along x axis in DKDP

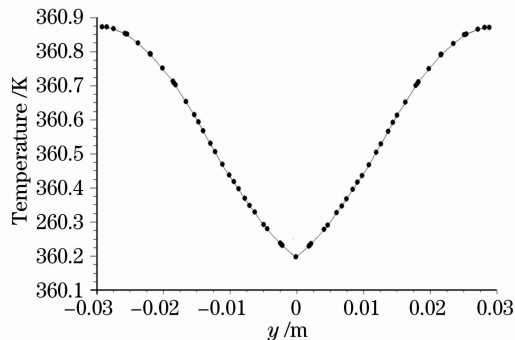


图 5 晶体上垂流流体流动方向上温度分布

Fig. 5 Temperature distribution along y axis in DKDP

从以上分析可以看出, 等离子体放电腔内流体换热系数太小, 不能将晶体内热沉积及时、有效地带走。为了将电光晶体内温升、温度梯度控制在一定范围内, 有必要提高流固耦合面对流换热系数的大小和均匀性。

4.2 工作气压、流体抽速对对流换热强度的影响

对流换热是在流体流动过程中发生的热量传递现象, 它是依靠流体指质点的移动进行热量传递的。对流换热系数的确定是解决对流换热问题的关键, 影响对流换热系数的主要因素包括: 流体的物理性质、流体流动起因、流体流动状态、流体相态变化情况、以及传热面的形状、尺寸、相对位置等。下面考察抽速、放电腔内压强、进气口和出气口管径、排列

方式对对流换热系数和 DKDP 晶体内温升的影响。

图 6 给出了放电腔内压强、流体抽速对对流换热系数的影响。从图中可以看出,随着抽速、压强的增大,对流换热系数显著增加。抽速增大,一方面减小层流“有效膜层”的厚度,另一方面增大膜层内温度梯度,从而对流换热强度增强。 $c_p\rho$ 代表单位体积流体所具有的热容量,压强增大, $c_p\rho$ 值越大,表示流体携带热量的能力愈强,对流传热强度愈强。当流体抽速为 7 L/min、压强为 5.0×10^4 Pa 时,对流换热系数为 $6.870 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

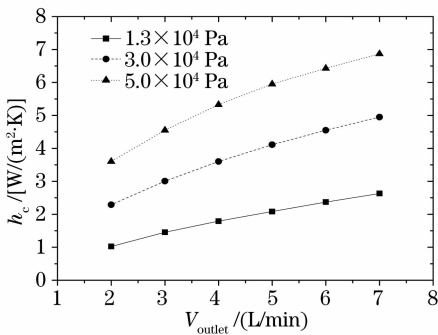


图 6 压强、抽速对对流换热系数的影响

Fig. 6 Dependence of coefficient of convective heat transfer on operating pressure and pumping speed

图 7 给出了不同压强、抽速下 DKDP 晶体内温升情况。每一组曲线从上到下表示该压强下 DKDP 晶体内最高温度、平均温度、最小温度。从图 7 可以看出,当抽速较小时,随着压强增大,晶体内温升迅速减小,抽速较大时,增大压强,温升下降趋缓。同样可以发现,当压强较小时,增大抽速,温升下降明显,而压强较高时,温升随抽速增大下降趋缓。当放电腔内压强为 5.0×10^4 Pa,抽速为 7 L/min 时,DKDP 内平均温度为 298.7 K,温差为 2.3 K。

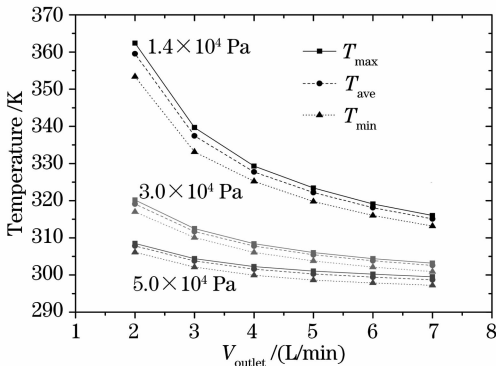


图 7 不同压强、抽速下 DKDP 晶体内温升情况

Fig. 7 Dependence of DKDP temperature distribution on operating pressure and pumping speed

4.3 管道排布方式、进出口管道管径对对流换热强度的影响

表 1 给出进出口管道排布方式、管径大小对对流换热系数和 DKDP 晶体内温升影响,其中流体抽速为 6 L/min,工作气压为 5.0×10^4 Pa。从表中可以看出,随着管径增大,对流换热系数增大,稳态下 DKDP 晶体内平均温度下降。管径较小的时候,2 个进气管道 3 个抽气管道排布方式相比 3 个进气管道 2 个抽气管道排列方式换热强度要高,而且 DKDP 晶体内温差要小。当管径较大时,3 个进气管道 2 个抽气管道排布方式换热强度相对较高,晶体内温差较大。3 个 6 mm 进气管道和 2 个 8 mm 抽气管道的组合,在抽速为 6 L/min 时,流固耦合对流换热系数为 $8.02 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,晶体内平均温度为 295.53 K,换热效果明显优于同样抽速同样工作气压下单个 3 mm 进气管道单个 6 mm 抽气管道组合。这是因为增加流体通道个数以及进气抽气管道管径使得流体进入放电腔内后流场得到进一步扩展,增加有效对流换热面积,从而增强对流换热强度。

图 8 给出 3 个进气管道 2 个抽气管道这种排布方式下放电腔内流体速度场分布。从图 8 可以看出,相对于图 2 所示单进气管道单抽气管道排布方式,放电腔内流场得到较好发展,有利于提高换热强度。

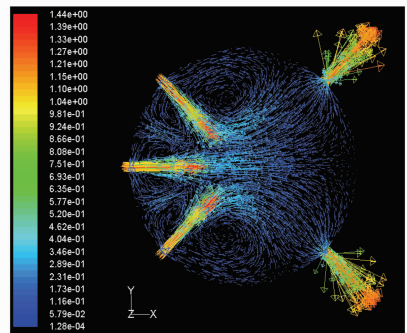


图 8 放电腔内流体速度场分布

Fig. 8 Fluid velocity distribution in discharge cavity

图 9 为流固耦合面上对流换热系数分布,最大值为 $27.32 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,出现在进气口附近,最小值为 $3.71 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,出现在抽气口附近。从图中可以看出,沿流体流动方向对流换热系数减小,这是由卡路里加热流体减小了膜层内温度梯度造成的。图 10 给出流固耦合模型达到热平衡状态后,放电腔内流体温度分布以及光电晶体 DKDP 内温度分布。从图中可以发现,沿流动方向,流体温度升高,晶体温度升高。

表 1 对流换系数及晶体内温升模拟结果

Table 1 Simulated results of coefficient of convective heat transfer and temperature distribution in DKDP

Let arranging		Inlet: 2 Outlet: 3					Inlet: 3 Outlet: 2				
Caliber	Inlet	2 mm	3 mm	3 mm	4 mm	6 mm	2 mm	3 mm	3 mm	4 mm	6 mm
	Outlet	3 mm	4 mm	6 mm	6 mm	8 mm	3 mm	4 mm	6 mm	6 mm	8 mm
$h_c / [W/(m^2 \cdot K)]$		6.79	7.10	7.25	7.31	7.72	6.71	7.00	7.10	7.53	8.02
T_{max} / K		299.81	299.17	298.98	298.71	298.05	299.57	298.84	298.72	298.17	297.73
T_{ave} / K		298.69	298.21	298.06	296.73	296.33	298.85	298.27	298.19	297.55	295.53
T_{min} / K		297.53	296.98	296.78	296.20	295.03	297.27	297.14	297.03	295.66	294.40
T_{sub} / K		2.28	2.19	2.20	2.51	3.02	2.30	1.70	1.69	2.51	3.33

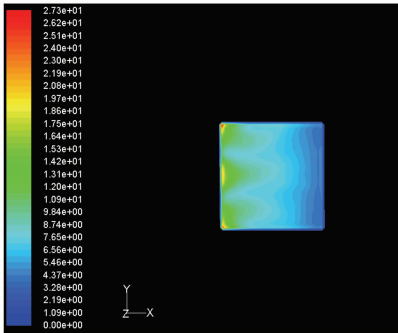


图 9 流固耦合面上对流换系数分布

Fig. 9 Coefficient of convective heat transfer on fluid-solid coupling surface

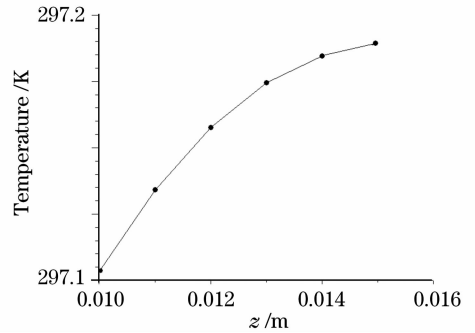


图 12 晶体内沿厚度方向温度分布

Fig. 12 Temperature distribution along z axis in DKDP 出,沿 x 轴,也就是流体流动方向,晶体内温度升高,存在一定温度梯度,整个轴上温差为 2.12 K。从耦合面出发,沿厚度方向,晶体内温度升高,这是晶体内热传导引起的。温差较小,不到 0.1 K。

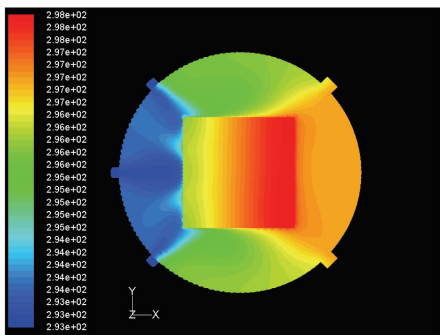


图 10 稳态下温度场分布

Fig. 10 Steady state temperature distribution

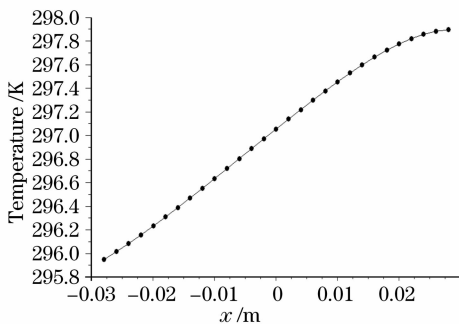


图 11 晶体内沿 x 轴温度分布

Fig. 11 Temperature distribution along x axis in DKDP

图 11、图 12 分别给出了热平衡状态下,电光晶体 DKDP 内沿 x 轴、沿厚度方向温度分布。可以看

5 结 论

本文建立了等离子体普克尔盒流固耦合传热有限体积模型,并应用模型研究了流固耦合传热强度和开关晶体内温升情况。可以看出:传统单脉冲工作模式下,由于未考虑热学要求,传热强度太低,不能满足重复频率应用。为了降低普克尔盒的热效应,通过改变流体抽速、流体工作气压、增加进出口管道、重新设计进出口管道排布方式、增大进出口管道管径有效地提高了对流换热强度,对流换热系数达到 $8.02 W/(m^2 \cdot K)$ 。但为了保证等离子体具有高的电导率,就要求增加等离子体电子密度,减小中性分子密度,即减小放电工作气压,因此放电腔内工作气压不能太高。但在气体放电中,气压、电压、电流、电子密度以及放电均匀性是相互关联的,不能单独靠调整某个参数而达到目的,为了达到热学上高换热强度的要求,需要进一步平衡上述几个物理量。尽管关于增强热交换的研究已经达半个世纪之久,但直到上个世纪末增强对流换热的基本机制还没有

清晰的结论。1998年Guo等^[11]提出一个增强对流换热的新颖原理:减小流体流速方向和温度梯度方向之间夹角是增强对流换热系数的基本机制。为了增强对流换热强度,降低晶体升温,减小晶体温度梯度,可以根据Guo ZY这一协同原理对放电腔结构做进一步优化设计。

参 考 文 献

- 1 A. Bayramian, Status of the Mercury Laser[R]. High Average Power Laser Program Workshop, Rochester NY, 2005
- 2 J. Gardelle, E. Pasini, B. Birel. A new regime of plasma-electrode Pockels cell operation for the laser megajoules project [R]. Proc. IFSA, 2001. 510~513
- 3 Sethian *et al.*. A review of the inertial fusion energy program, final report to FESAC[R]. 2004. 4
- 4 I. P. Khristov, I. V. Tomov, S. M. Saltiel. Self-heating effects in electro-optic light modulators[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1983, **15**: 289~295
- 5 S. Z. Kurtev, O. E. Denchev, S. D. Savov. Effects of thermally induced birefringence in high-output-power electro-optically Q-switched Nd:YAG lasers and their compensation[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(3): 278
- 6 J. Gardelle, E. Pasini, B. Birel. A new regime of plasma-electrode Pockels cell operation for the laser megajoules project [R]. Proc. IFSA, 2001. 510~513
- 7 Zhang Jun, Zhang Xiongjun, Wei Xiaofeng *et al.*. Depolarization loss analysis of electro-optic crystal KDP heated by repetition frequency laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(2): 229~233
张 君,张雄军,魏晓峰等. 重复频率应用下等离子体电光开关热退偏损耗分析[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(2): 229~233
- 8 Cao Dingxiang, Zhang Xiongjun, Zheng Wanguo *et al.*. Simulation of thermodynamics of electro-optic switches for high average power[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 301~303
曹丁象,张雄军,郑万国等. 开关晶体在高平均功率下的热力学特性模拟分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 301~303
- 9 Octave, Levenspiel. Engineering Fluid Mechanics and Heat transfer [M]. Wang Shaoting transl., Tianjing: Tianjing University Press, 1990
Octave, Levenspiel. *工程流体流动与热交换*[M]. 王绍亭译,天津: 天津大学出版社, 1990
- 10 Bergles A E. Heat transfer enhancement—the encouragement and accommodation of high heat fluxes. ASME [J]. *Heat Transfer*, 1997, **119**: 8~19
- 11 Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A novel concept for convective heat transfer enhancement [J]. *Heat Mass Transfer*, 1998, **41**(14): 2221~2225