

# 内通道液冷镜湍流状态下弯道流阻影响因素分析

孟令武<sup>1,2</sup>, 邵帅<sup>1</sup>, 乔健<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>佛山科学技术学院机电工程学院, 广东 佛山 528000

**摘要** 采用有限体积方法,研究了矩形内通道直角弯道流场及压力损失系数,主要分析通道尺寸、冷却液流速、冷却液浓度等因素对局部流场和压力损失系数的影响规律。结果表明:压力损失系数随流道宽度  $a$  和流道高度  $b$  的增大而逐渐减小,随流道间距  $e$  先下降后略微上升;弯道宽度  $c$  的变化会引起弯道局部流场和压力损失系数发生变化;液流流速越大,压力损失系数越小;冷却液浓度越大,压力损失系数越大。

**关键词** 激光光学; 强激光; 液冷镜; 流道结构; 压力损失系数; 计算流体力学

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0214001

## Influence Factors of Bend Flow Resistance in Turbulent Flow of Inner Channel Liquid Cooled Mirror

Meng Lingwu<sup>1,2</sup>, Shao Shuai<sup>1</sup>, Qiao Jian<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup>School of Mechanical and Electrical Engineering, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China

**Abstract** The flow field and pressure loss coefficient of rectangular inner channel at right-angled bend are studied by the finite volume method. Specifically, the influence of channel size, coolant flow rate and coolant volume fraction on the local flow field and pressure loss coefficient is analyzed. The result shows that the pressure loss coefficient decreases gradually with the increases of the channel width  $a$  and the channel height  $b$ , and decreases and then increases slightly with the channel interval  $e$ . The change of bend width  $c$  causes the change of local flow field in bend and the pressure loss coefficient. The greater the flow velocity is, the smaller the pressure loss coefficient is. The greater the volume fraction of the cooling fluid is, the larger the pressure loss coefficient is.

**Key words** laser optics; high power laser; liquid cooled mirror; channel structure; pressure loss coefficient; computational fluid dynamics

**OCIS codes** 140.3320; 230.4040; 140.6810

## 1 引 言

高功率激光器广泛应用于国防军事、工业制造、航空航天等领域。其中,王小林等<sup>[1]</sup>阐述了高功率光纤激光相干合成方面的情况,李源等<sup>[2]</sup>描述了高功率激光器在国防军事方面的应用现状。激光束必

须通过导光镜才能到达预定目标。然而,在高功率激光束辐照下,导光镜受温度梯度大幅变化的影响发生热变形。为抑制热变形,内通道技术成为导光镜冷却主要方式<sup>[3-4]</sup>。而流体内通道流动的流阻特性对内通道技术至关重要,可为流道优化设计提供一定参考。

收稿日期: 2017-07-19; 收到修改稿日期: 2017-09-05

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-mails: menglingwu5414@163.com

导师简介: 邵帅(1978—),女,博士,研究员,主要从事光机结构的研究与设计等方面的研究。

E-mails: shaoshuaiciomp@163.com(通信联系人)

目前国内外众多学者对内通道流阻特性进行了研究<sup>[5-10]</sup>。这些研究具有两个共同的主要特点:一是这些研究均是基于层流状态,且雷诺数通常较低;二是关于沿程损失的研究较多,也较为成熟,但由于内通道的尺寸较小,不便测量,对于弯道流场的研究较少,尤其在湍流状态下。

研究流体必然会涉及到流动阻力和流动损失两个问题。流体黏性是流动阻力产生的原因,而湍流又是将这个问题复杂化。现有的许多理论并不成熟且无法得到实验验证,而计算流体力学(CFD)方法正是目前研究流场的主要方法。

本文采用 CFD 方法研究不同因素下流阻特性的变化,主要分析了通道尺寸、冷却液流速、冷却液浓度等因素对局部流场和压力损失系数的影响规律,这些规律为内通道的优化设计提供借鉴。

## 2 理论分析

本文研究的流动介质为水与乙二醇溶液,可以看作是\*\*不可压缩的牛顿流体,在管中作为湍流流动。

通道截面为矩形,所以通道的水力直径为

$$d_e = \frac{2ab}{a+b}, \quad (1)$$

式中  $d_e$  为水力直径,  $a$  为流道宽度,  $b$  为流道高度。

$$Re = \rho v d_e / \mu, \quad (2)$$

式中  $Re$  为雷诺数,  $\rho$  为冷却液密度,  $v$  为冷却液速度,  $\mu$  为冷却液动力黏度。

实际流体在定常流动、重力场、不可压缩的条件下,对于流线上的任意两点,满足伯努利方程式<sup>[11]</sup>

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{1}{g} \int_1^2 f ds, \quad (3)$$

式中  $z_1$ 、 $z_2$  分别为两点的位置,  $p_1$ 、 $p_2$  分别为两点的压强,  $v_1$ 、 $v_2$  分别为两点的液流流速,  $f$  为流体阻力,  $g$  为重力加速度,  $s$  为积分面积元。

流动损失主要有沿程损失和局部损失,在湍流状态下,局部损失为主要的流动损失。沿程损失由管壁上存在的摩擦力引起,通道中的压强沿流动方向逐渐下降<sup>[11]</sup>。沿程损失与下列因素有关:管路直径、管路长度、管壁粗糙度、流体平均速度、密度和动力黏度。

$$h_f = f \left( Re, \frac{\Delta}{d_e} \right) \frac{l}{d_e} \frac{v^2}{2g} = \eta \frac{l}{d_e} \frac{v^2}{2g}, \quad (4)$$

式中  $\eta = f(Re, \Delta/d_e)$ ,  $h_f$  为沿程水头损失,  $\Delta/d_e$  为管壁的相对粗糙度,  $l$  为管道长度,  $\eta$  为沿程阻力系数,仅依赖于雷诺数和管壁的相对粗糙度。

由于局部阻力情况较为复杂,一个局部阻力不仅影响后一个局部阻力,亦影响它后面一个适当长度上的沿程阻力。根据实际情况,将管道上的所有沿程损失与局部损失进行求和,则总水头损失为

$$h_f = \left( \eta \frac{l}{d_e} + \sum \zeta \right) \frac{v^2}{2g}, \quad (5)$$

式中  $\zeta$  为局部损失系数。

由于湍流中局部阻力的影响更大,将沿程损失折合成适当的局部损失,可得

$$\zeta_e = \eta l / d_e, \quad (6)$$

式中  $\zeta_e$  为沿程阻力的当量局部损失系数。于是

$$h_f = (\zeta_e + \sum \zeta) \frac{v^2}{2g} = \xi \frac{v^2}{2g}, \quad (7)$$

式中  $\xi = \zeta_e + \sum \zeta$ , 为管路的总损失系数。

根据伯努利方程式可知,水头损失即管路两端压强水头之差,即

$$h_f = \Delta P / \rho g, \quad (8)$$

联立(7)式和(8)式可得,总损失系数为

$$\xi = \frac{2\Delta P}{\rho v^2}, \quad (9)$$

式中  $\Delta P$  为弯道处的压力损失。

## 3 流道模型

### 3.1 几何模型

基于某光电装备导光镜进行分析,其几何模型如图 1 所示,流道间距为  $e$ ,流道在  $z$  方向上的高度为  $b$ ,流道长度  $l$  为 190 mm。由于通道的对称性,可只对其中一个流道进行分析。

### 3.2 有限元模型

基于 FLUENT 15.0 软件对内通道内流体流阻特性进行数值模拟,在此基础上,对各因素对直角内通道内流阻的影响规律进行研究。相应设置及边界条件为:压力速度耦合选用 SIMPLE 算法,湍流模型选择标准  $k-\epsilon$  两方程模式。连续性收敛准则为  $10^{-8}$ ,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向速度分量收敛准则为  $10^{-8}$ ,能量收敛准则为  $10^{-8}$ ,湍流耗散收敛准则为  $10^{-8}$ 。入口边界条件为速度入口条件,出口边界条件为出流边界条件。

在对内通道流动过程进行模拟时,进行以下假设:1)流体为牛顿流体;2)流动过程为等温稳态过程;3)流体为不可压缩流体,流动状态为湍流流动;4)流体在壁面附近为无滑移流动。

在上述假设条件下,流体控制方程<sup>[9]</sup>如下。

1)质量守恒方程,即连续性方程

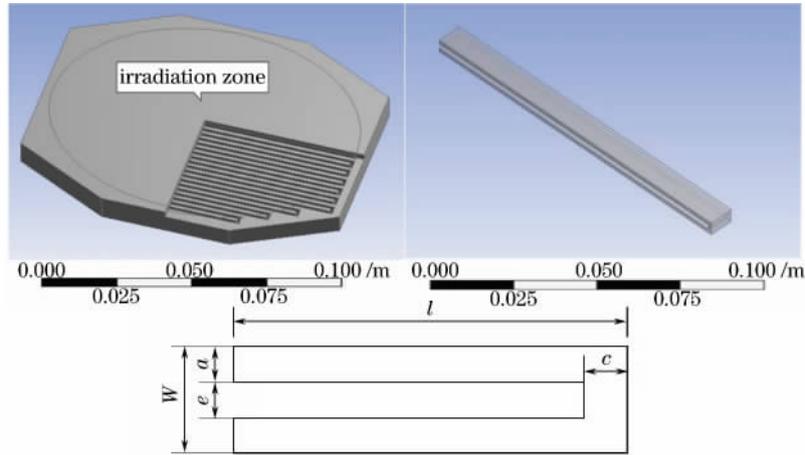


图 1 内通道几何模型。(a)导光镜模型；(b)内通道模型；(c)内通道几何参数  
 Fig. 1 Inner channel geometry model. (a) Light guide model;  
 (b) inner channel model; (c) inner channel geometry parameter

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (10)$$

式中  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$  分别为流体速度在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的分量。

2) 动量守恒方程, 即 Navier-Stokes (N-S) 方程

$$\rho_{\text{fluid}}(\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}) = -\nabla P + \mu_{\text{fluid}} \nabla^2 \mathbf{v}, \quad (11)$$

式中  $\rho_{\text{fluid}}$  为流体密度,  $\mu_{\text{fluid}}$  为流体动力黏度,  $\nabla P$  为压力差。

3) 能量守恒方程

$$\rho_{\text{fluid}} c_p (\mathbf{v} \cdot \nabla T) = \kappa_{\text{fluid}} \nabla^2 T, \quad (12)$$

式中  $c_p$  为流体等压比热容,  $\kappa_{\text{fluid}}$  为流体导热率。

## 4 结果分析

### 4.1 通道尺寸对流阻的影响

#### 4.1.1 流道宽度 $a$ 对流阻的影响

选用流道模型几何参数为  $b = 14$ ,  $c = 2$ ,  $e = 2$ ,  $v = 1$  m/s, 冷却液为水。选取  $a$  分别为 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 mm, 求解损失系数, 分析流道宽度  $a$  对流阻的影响。

由图 2 可以看出, 压力损失系数随流道宽度  $a$  的增大逐渐减小, 这是由于当  $a$  增大时, 水力直径增大, 雷诺数亦随之增大, 损失系数减小。

由图 3 可以看出, 靠近壁面的流体速度较小, 甚至接近于零。这是由于管中出现湍流时, 并非全管中都是同样的湍流, 在靠近管壁处有一层黏性底层。由于管壁的摩擦以及分子附着力的作用, 管壁上有流体黏附, 此处流体运动速度为零; 且由于黏性影响较大, 湍流现象受限, 靠近管壁的一定范围内大都是以层流为主。另外, 最高速度出现在水流弯道处以及之后的下游区。  $a$  越大, 速度最高值越大, 且  $a =$

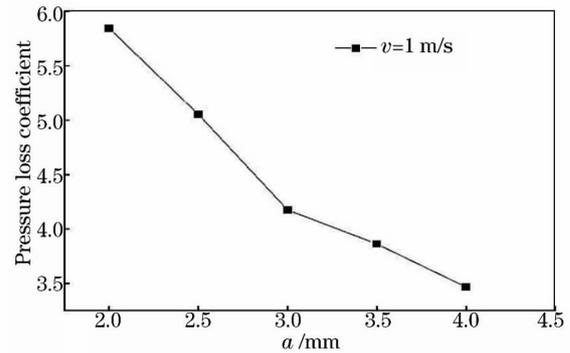


图 2 损失系数随流道宽度  $a$  的变化

Fig. 2 Pressure loss coefficients varies with channel width  $a$

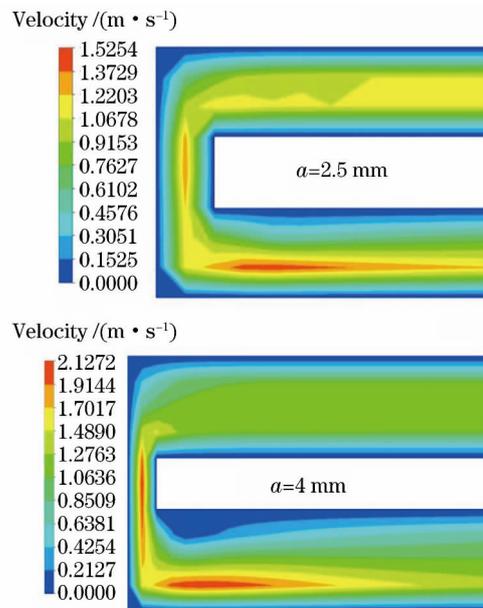


图 3 不同流道宽度  $a$  下弯道速度云图

Fig. 3 Velocity contours of bend under different channel widths  $a$

4 mm 时,下游拐角处出现旋涡。由伯努利方程可知,速度越高,压力越小,压力差越大,压力损失系数越高。与图 2 所示的模拟结果一致。

#### 4.1.2 流道高度 $b$ 对流阻的影响

选用流道模型几何参数为  $a = 2 \text{ mm}$ ,  $c = 2 \text{ mm}$ ,  $e = 2 \text{ mm}$ ,  $v = 1 \text{ m/s}$ , 冷却液为水。选取  $b$  分别为 10, 11, 12, 13, 14 mm, 求解损失系数, 分析流道高度  $b$  对流阻的影响。

由图 4 可以看出, 压力损失系数随流道高度  $b$  的增大而逐渐减小, 但减小幅度较小。而由图 5 亦可看出, 两者速度值相差不大, 压力损失系数亦十分相近, 与图 4 所得结论一致。这主要是由于湍流状态下, 摩擦力引起的流道损失较小, 所以当  $b$  增大 (引起表面积增大) 时, 摩擦力带来的损失增大并未对损失系数产生影响。

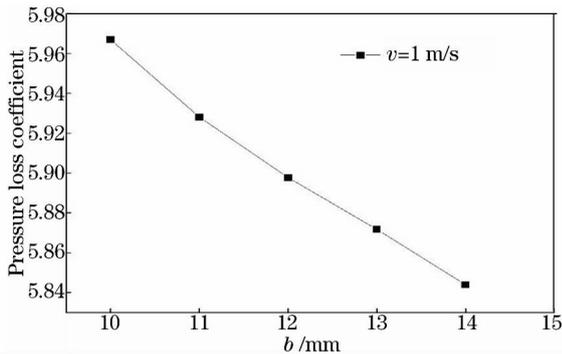


图 4 损失系数随流道高度  $b$  的变化

Fig. 4 Pressure loss coefficient varies with channel height  $b$

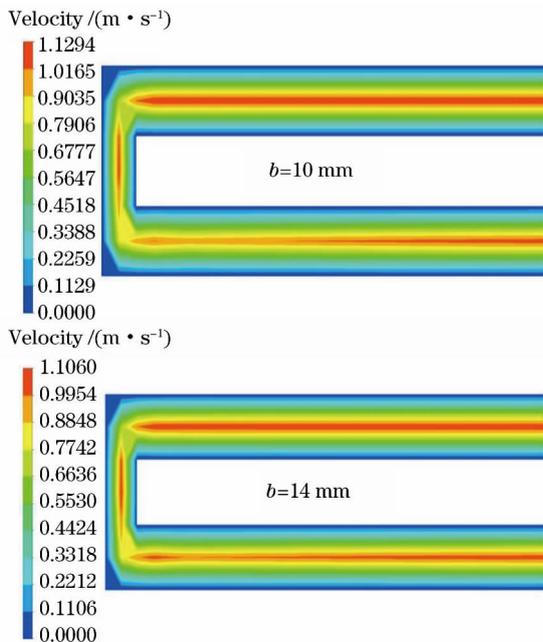


图 5 不同流道高度  $b$  下弯道速度云图

Fig. 5 Velocity contours of bend under different channel heights  $b$

#### 4.1.3 流道间距 $e$ 对流阻的影响

选用流道模型几何参数为  $a = 2 \text{ mm}$ ,  $b = 14 \text{ mm}$ ,  $c = 2 \text{ mm}$ ,  $v = 1 \text{ m/s}$ , 冷却液为水。选取  $e$  分别为 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 mm, 求解损失系数, 分析流道间距  $e$  对流阻的影响。

由图 6 可以看出, 压力损失系数随流道间距  $e$  先下降后上升, 在  $e = 3 \text{ mm}$  时取得最小值。下降时速度较快, 而上升时速度较慢。

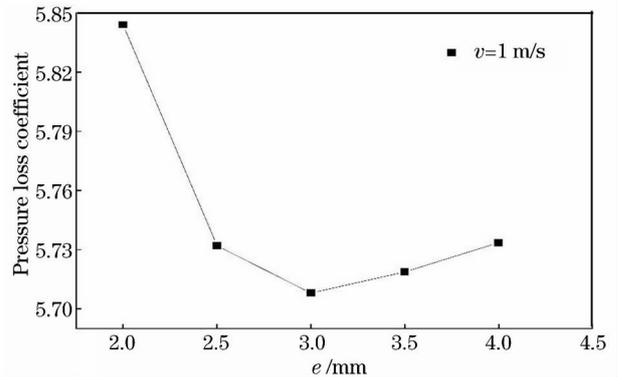


图 6 损失系数随流道间距  $e$  的变化

Fig. 6 Pressure loss coefficient varies with channel interval  $e$

由图 7 可以看出, 流体基本沿流道中心流动。流场变化和趋势与图 6 相一致, 两者速度和压力损失系数相差不大, 这表明流道间距  $e$  对弯道流场和压力损失系数影响有限。

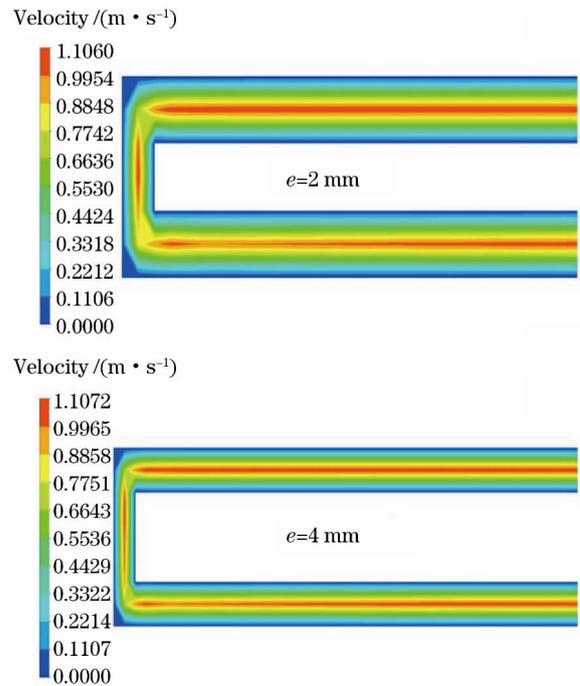


图 7 不同流道间距  $e$  下弯道速度云图

Fig. 7 Velocity contours of bend under different channel intervals  $e$

## 4.2 弯道宽度 $c$ 对流阻的影响

### 4.2.1 $c/a > 1$ 时, 弯道宽度 $c$ 对流阻的影响

选用流道模型几何参数为  $a = 2 \text{ mm}$ ,  $b = 14 \text{ mm}$ ,  $e = 2 \text{ mm}$ ,  $v = 1 \text{ m/s}$ , 冷却液为水。选取  $c$  分别为 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 mm, 求解损失系数, 分析弯道宽度  $c$  对流阻的影响。

由图 8 可以看出, 压力损失系数随弯道宽度  $c$  增大而减小且幅度较大, 这是由于弯道宽度增大时, 弯道处的流动较为缓和, 速度分离和旋涡减小, 弯道损失降低。

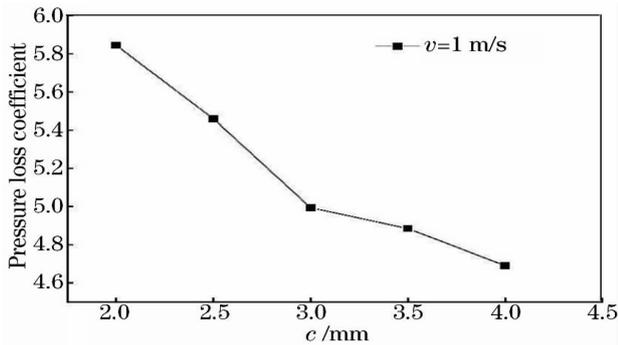


图 8 损失系数随弯道宽度  $c$  的变化

Fig. 8 Pressure loss coefficient varies with bend width  $c$

由图 9 可以看出, 弯道处并未产生明显旋涡。  $c$  为 2.5 mm 时, 流体从上游进入弯道时, 速度降低较快, 而  $c$  为 4 mm 时水流流速逐渐变小, 流动较为缓和, 这与图 8 中的趋势一致。

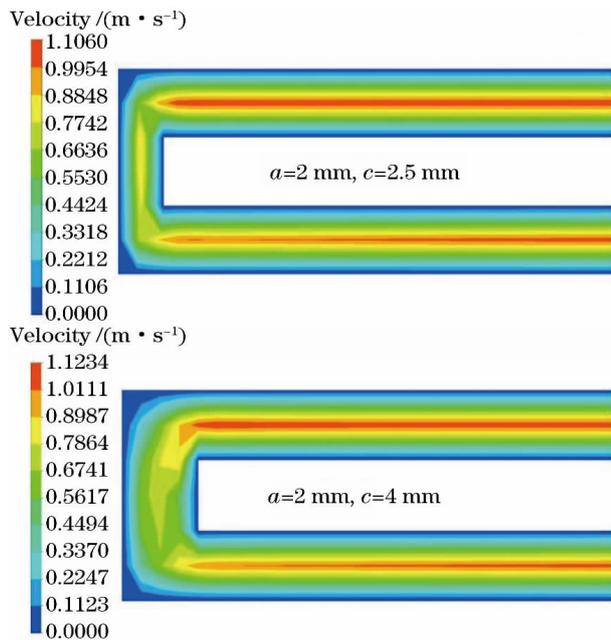


图 9 不同弯道宽度  $c$  下弯道速度云图

Fig. 9 Velocity contours of bend under different bend widths  $c$

### 4.2.2 $c/a < 1$ 时, 弯道宽度 $c$ 对流阻的影响

选用流道模型几何参数为  $a = 4 \text{ mm}$ ,  $b = 14 \text{ mm}$ ,  $e = 2 \text{ mm}$ ,  $v = 1 \text{ m/s}$ , 冷却液为水。选取  $c$  分别为 1, 2, 3, 4 mm, 求解损失系数, 分析弯道宽度  $c$  对流阻的影响。

图 10 的变化规律与图 8 基本一致,  $a = 1 \text{ mm}$  时最大, 其他值时正常。由图 11 可以看出,  $c = 1 \text{ mm}$  时, 弯道处流体流动不平稳, 旋涡较大, 且流速变化较大, 达到 2.8497 m/s, 压力损失系数较高。  $c = 4 \text{ mm}$  时, 流体流动较为缓和, 旋涡变小, 流速降低, 压力损失系数亦大大降低。由此可知,  $c/a < 1$  时,  $c$  对流体流场和压力损失系数影响较大, 在设计流道时, 应尽量避免  $c$  过小。

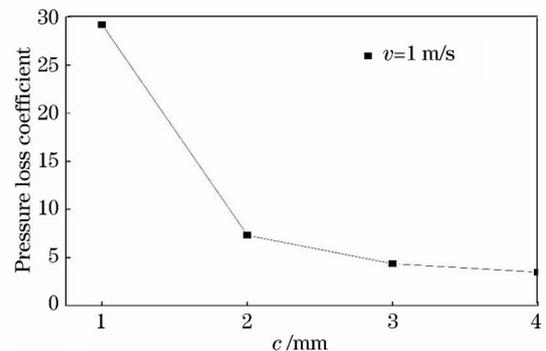


图 10 损失系数随弯道宽度  $c$  的变化

Fig. 10 Pressure loss coefficient varies with bend width  $c$

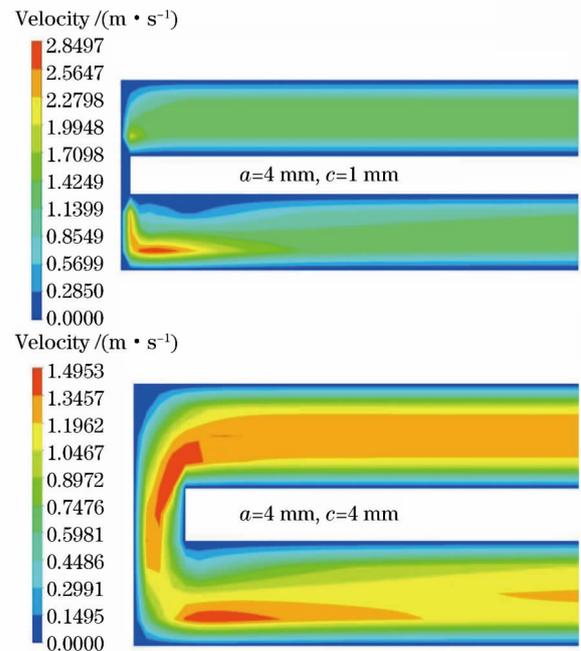


图 11 不同弯道宽度  $c$  下弯道速度云图

Fig. 11 Velocity contours of bend under different bend width  $c$

综合图 8~11 可以看出,  $c/a$  越大, 流体流动越缓和, 压力损失系数越小。

#### 4.3 水流流速(雷诺数)对流阻的影响

本小节选用流道模型几何参数为  $a = 2 \text{ mm}$ ,  $b = 14 \text{ mm}$ ,  $d_c = 3.5 \text{ mm}$ ,  $e = 2$ ,  $v = 1 \text{ m/s}$ , 冷却液为水。液流流速  $v$  的取值范围为  $1 \sim 10 \text{ m/s}$ , 此时流速  $v$  与雷诺数  $Re$  变化一致, 求解损失系数, 分析液流流速  $v$  对流阻的影响。

由图 12 可以看出, 压力损失系数随液流流速  $v$  的增大而减小, 但流道实际压降却是增大的。这是由于水流流速增大时, 雷诺数增大, 弯道内角出现的旋涡和分离减小, 损失随即减小。由图 13 可以看出, 不同流速下的速度云图趋势大致相同。

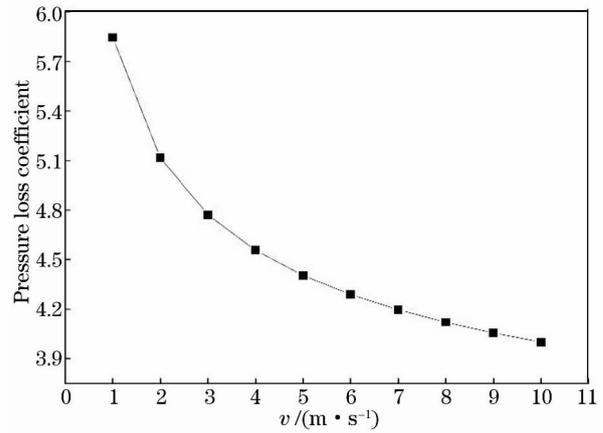


图 12 损失系数随液流流速  $v$  的变化

Fig. 12 Pressure loss coefficient varies with flow velocities  $v$

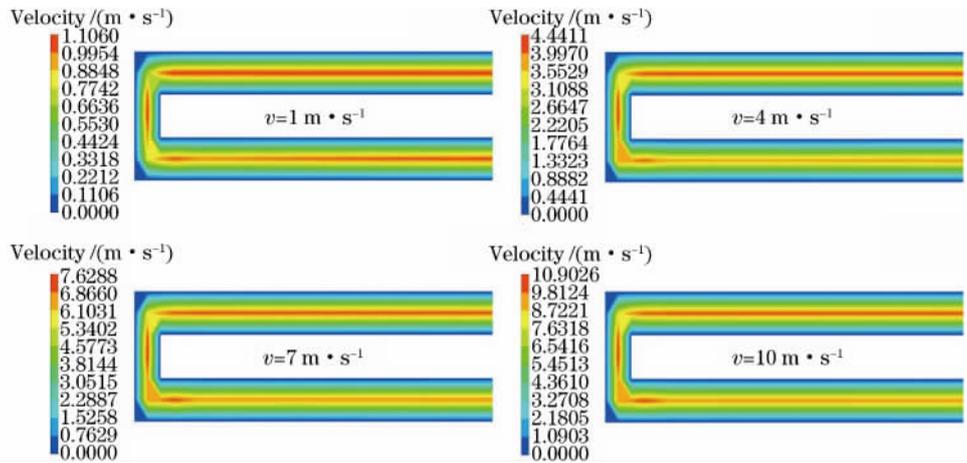


图 13 不同液流流速  $v$  下弯道速度云图

Fig. 13 Velocity contours of bend under different flow velocities  $v$

#### 4.4 冷却液浓度对流阻的影响

水由于冰点为  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  而不能适应严寒环境。为此, 选择冰点低于  $-25 \text{ }^\circ\text{C}$  的乙二醇水溶液为冷却液, 具体物性

参数如表 1 所示。选用流道模型几何参数为  $a = 2 \text{ mm}$ ,  $b = 14 \text{ mm}$ ,  $c = 2 \text{ mm}$ ,  $e = 2 \text{ mm}$ , 冷却液为水。在流速  $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时进行模拟, 分析冷却液浓度对流阻的影响。

表 1 铜和乙二醇水溶液的物性参数

Table1 Physical properties of copper and glycol aqueous solution

| Material                | Volume fraction / % | Density / (kg · m <sup>-3</sup> ) | Specific heat / (kJ · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ) | Heat conductivity / (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ) | Viscosity / (10 <sup>3</sup> kg · m <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------|---------------------|-----------------------------------|--|--|---|
| Copper                  |                     | 8933.00                           | 0.380  | 391  |   |
|                         | 0                   | 1000.00                           | 4.182  | 0.600  | 1.003   |
|                         | 40                  | 1059.68                           | 3.468  | 0.415  | 2.960   |
| Glycol aqueous solution | 45                  | 1066.52                           | 3.375  | 0.398  | 3.450   |
|                         | 50                  | 1073.35                           | 3.281  | 0.380  | 3.940   |
|                         | 55                  | 1079.81                           | 3.183  | 0.365  | 4.660   |
|                         | 60                  | 1086.27                           | 3.084  | 0.349  | 5.380   |

由图 14 可以看出, 压力损失系数随冷却液浓度的增大而增大。这主要取决于冷却液的物理性质, 由于密度变化不大, 主要是黏度引起损失系数变化。当浓度增大时, 流体黏度增大, 流体流动时造成的压力损失便随之增加。由图 15 可以看出, 两者云图趋

势大致相同, 但冷却液质量分数为 60% 的速度较 40% 的略大。

## 5 结 论

采用 CFD 方法研究了湍流状态下内通道直角

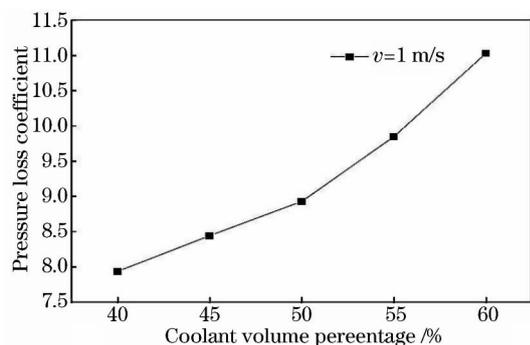


图 14 损失系数随冷却液浓度的变化

Fig. 14 Pressure loss coefficient varies with coolant volume fraction

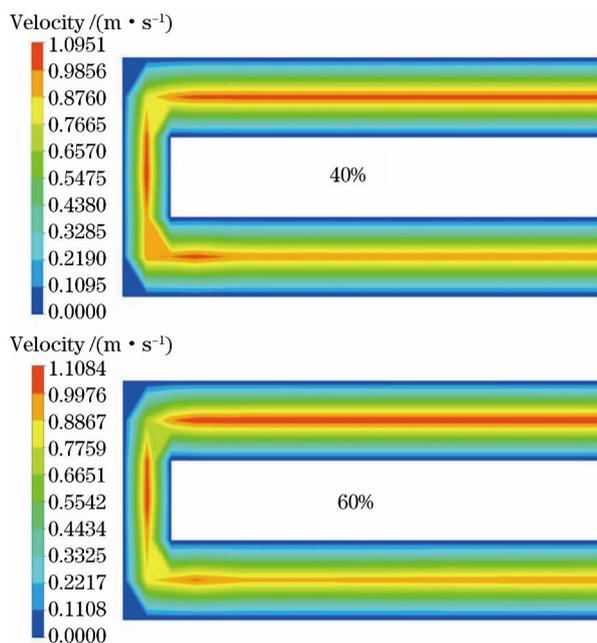


图 15 不同冷却液浓度下弯道速度云图

Fig. 15 Velocity contours of bend under different coolant volume fractions

弯道流阻特性,主要分析通道尺寸、冷却液流速、冷却液浓度等因素对局部流场和压力损失系数的影响规律。结果表明,流道宽度  $a$ 、流道高度  $b$ 、弯道宽度  $c$ 、流道间距  $e$  等通道结构因素均会影响压力损失系数;压力损失系数随液流流速的增大而减小;冷却液性质,尤其是黏度,也会影响弯道流场和压力损失系数。这些规律对于内通道的设计优化具有一定参考价值。

### 参 考 文 献

[1] Wang X L, Zhou P, Su R T, *et al.* Present situation, trend and challenge of coherent combination of high power fiber lasers[J]. Chinese

Journal of 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 Y, Chen Z P, Wang P H. Present situation and development trend of high energy laser weapon[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] 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): 598-607.
- [4] Cao H, Chen G. Optimization design of microchannel heat sink geometry for high power laser mirror[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(13): 1644-1651.
- [5] Cao J K, Ding S D, Du F R. Micro channel splash, right angle bend gas sudden contraction flow characteristics[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(7): 885-889.
- 曹娇坤,丁水汀,杜发荣.微通道直角突缩弯道气体流阻特性[J].北京航空航天大学学报,2013,39(7): 885-889.
- [6] Zhou Y L, Chang H. The influence of the wall properties on the flow characteristics of serpentine micro-channels[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(1): 27-32.
- 周云龙,常赫.壁面性质对蛇形微通道流动特性的影响[J].原子能科学技术,2017,51(1): 27-32.
- [7] Hrnjak P, Tu X. Single phase pressure drop in microchannels[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007, 28(1): 2-14.
- [8] Hetsroni G, Mosyak A, Pogrebnnyak E, *et al.* Fluid flow in micro-channels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(10): 1982-1998.
- [9] Wu H Y, Cheng P. Friction factors in smooth trapezoidal silicon microchannels with different aspect ratios[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(14): 2519-2525.
- [10] Judy J, Maynes D, Webb B W. Characterization of frictional pressure drop for liquid flows through microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(17): 3477-3489.
- [11] Zhang Y Y. Fluid mechanics[M]. 2<sup>nd</sup> ed. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- 张也影.流体力学[M].2版.北京:高等教育出版社,1999.