

文章编号:1000-8055(2011)09-1941-06

波形隔板形状对通道流动和换热的影响

李 莉^{1,2}, 徐国强¹, 丁水汀¹, 邓宏武¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;

2. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

摘 要: 采用数值模拟的方法,对基于波形隔板结构涡轮叶片尾缘复合通道的换热和流阻特性进行研究. 设计了一种直隔板和三种不同折角的波形隔板结构,研究波形角度对通道中流动和换热的影响. 数值结果表明,波形隔板结构折角越小,对整个通道,换热越好,尤其是对于第 1 通道,换热增强最大可达 30%;同时折角越小,通道的流阻系数越大;从换热和流阻的综合效果来看,150°折角波形隔板结构和直隔板结构(180°折角)相当,120°折角和 90°折角波形隔板结构的综合换热效果比直隔板结构的略大.

关 键 词: 换热; 流阻; 折角; 数值模拟; 涡轮叶片

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Effect of the shape of divider wall on heat transfer and flow resistance characteristic of passage

LI Li^{1,2}, XU Guo-qiang¹, DING Shui-ting¹, DENG Hong-wu¹

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics, School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. School of Energy and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Numerical simulation was performed to obtain heat transfer and flow resistance characteristics in a channel with zigzag divider wall in the trailing edge passage of turbine blade. One traditional divider wall and three configurations of zigzag divider walls with different angles were applied to research the effect of angle on the heat transfer and flow resistance. The calculated results indicate that the heat transfer is improved with decrease of the angle of the zigzag shape. For the first passage, the highest improvement was nearly 30 percent. At the same time, the passage with small angle divider wall encountered bigger flow resistance. By comparison of integrated effect of heat transfer, the configurations with smaller angle divider walls have higher values than those with larger angle divider walls.

Key words: heat transfer; flow resistance; angle; numerical simulation; turbine blade

随着航空发动机性能需求的提高,对涡轮前燃气温度的要求越来越高. 通常在涡轮叶片尾缘,

采用扰流柱或强化肋的方式,提高尾缘区域的换热. 波形通道的设计作为新型的强化措施,目前正

收稿日期:2010-09-28; 修订日期:2011-04-14

作者简介:李莉(1980—),女,湖北荆门人,讲师,博士后,主要从事强化传热传质研究.

在各领域得到广泛的应用。

文献[1-10]中分别通过实验和计算研究了波形通道对流动与换热的影响,证明了波形通道可以增加流体扰动,从而增强换热.文献[11]中针对涡轮叶片尾缘结构,设计了沿程开孔的波形隔板结构,并通过实验研究,证明沿程开孔波形隔板结构对通道内换热有增强作用.文献[12]对不同孔径的沿程开孔波形隔板结构进行了数值模拟,并与相应的实验进行了对比.文献[11-12]中的波形隔板结构形式均为沿程开孔的,与传统顶端穿流直隔板结构相比,沿程开孔的波形隔板可能会从两个方面影响通道的换热:其一是隔板沿程开孔,使第1通道的流体对第2通道产生射流冲击;其二是由于波形隔板结构的变截面特性,使流体的速度、压力等参数,沿程不断改变.为了更好的揭示波形结构的变截面特性对换热的影响,而避开沿程开孔射流的复合影响,有必要对传统顶端穿流形式的波形隔板结构通道内的流动与换热进行研究,并与传统顶端穿流的直隔板结构对比。

为了进一步揭示顶端穿流波形隔板结构的主要波形特征参数影响流动和换热的规律,本文通过数值模拟的方法,研究波形形状对换热和流动的影响.对比了四种不同折角隔板结构通道的换热和流阻.本研究的结果,可为涡轮叶片尾缘结构的设计提供基础数据积累。

1 数值模拟方法

1.1 计算几何模型

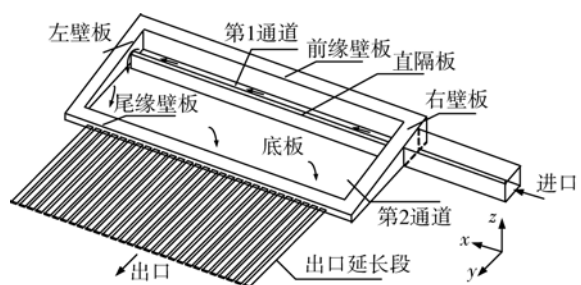
本文的研究对象为基于顶端穿流的直隔板和波形隔板结构的涡轮叶片尾缘内冷通道,如图1所示.气体从第1通道进口进入,经过隔板顶端穿流进入第2通道,然后从尾缘劈缝流出.对于直隔板结构,第1通道和第2通道中弦向截面不变化;对于波形隔板结构,弦向截面发生收敛和扩张交替变化。

本文设计了四种不同隔板的几何模型,包括一种传统直隔板结构(相当于波形折角为 180°)和三种波形隔板结构.这三种波形隔板结构中,两相邻波峰或波谷间距沿流向保持不变,折角分别为 90° 、 120° 和 150° ,见图2.为使不同几何模型中第1通道和第2通道的换热面积比基本一致,各结构中隔板的平均位置处于图中所示虚线处。

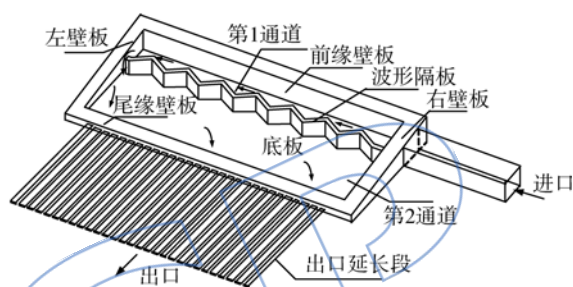
1.2 边界条件和物性条件

底板为固体加热面: $\partial T/\partial n = -(q/\lambda)$, 给定

热流密度;流体与固体接触面为流固耦合面: $u = v = w = 0$;其余壁面为绝热面: $\partial T/\partial n = 0$;进



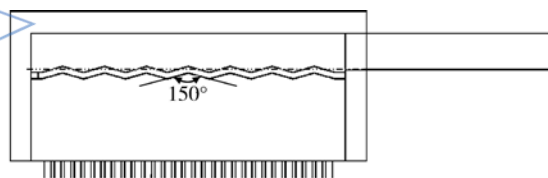
(a) 顶端穿流直隔板结构



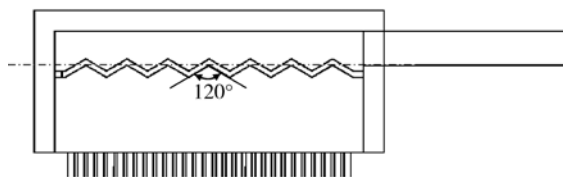
(b) 顶端穿流波形隔板结构

图1 计算几何模型示意图

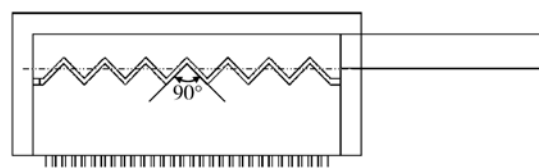
Fig. 1 Schematic graph of computational model



(a) 150° 折角波形隔板结构



(b) 120° 折角波形隔板结构



(c) 90° 折角波形隔板结构

图2 波形隔板在通道中的位置

Fig. 2 Location of zigzag divider walls in passage

口:给定质量流量;出口:设平均静压为大气压;出口延长段:设为有滑移。

计算域中的流体域采用理想气体,固体域包括隔板、底板和边框,其材料的选择与文献[12]实验中的具体材料相对应。

1.3 计算网格和湍流模型

本模拟采用计算软件 CFX 进行,网格划分采用六面体网格,分别进行了多种湍流模型计算和网格无关解的计算,得出结论认为,对此类几何模型,采用 $k-\omega$ 模型,解的收敛效果相对最好,且与实验结果最接近^[12],具体的对比分析可参见文献[12]。不同几何模型的网格数不同,图3为某结构的局部网格。

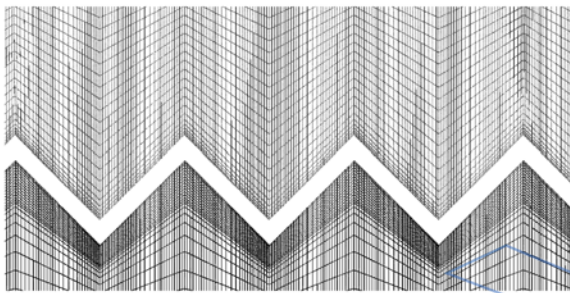


图3 局部网格示意图
Fig.3 Local grid structure

1.4 数据处理方法

评价换热的指标是无量纲参数 Nu , 计算公式为 $Nu = (h \cdot D) / \lambda$, 其中表面传热系数 $h = q / (T_w - T_0)$, q 为给定热流密度, D 为入口水力直径, T_0 为给定的入口气体温度, T_w 为通道底板壁面上的温度。当分别采用第1通道壁面平均温度、第2通道壁面平均温度,和两通道壁面平均温度进行计算时,平均换热分别用 Nu_1 , Nu_2 和 Nu_{av} 表示。

评价流动阻力的指标是阻力系数 C_f , 计算公式为 $C_f = (p_{in}^* - p_{out}^*) / (\rho u^2 / 2)$, p_{in}^* , p_{out}^* 分别为进口和出口总压, u 为入口速度。

评价综合换热效果采用指标 $Nu_{av} / C_f^{1/3}$ 。

2 计算结果与分析

为方便分析,以传统直隔板结构第1通道和第2通道的弦向截面积(即 yz 截面)为基准,算出三种波形隔板结构的弦向截面积比的变化范围,列于表1。从表中数值可看出,波形折角越小,面积比变化范围越大,而同一隔板结构下,第2通

道面积比变化范围比第1通道的小。

表1 弦向截面面积比变化范围

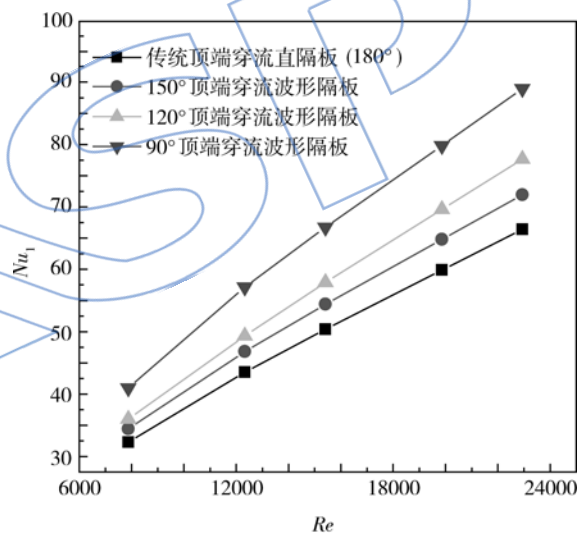
Table 1 Range of area ratio of yz section

结构	直隔板 (180°)	波形隔板		
		150°	120°	90°
第1通道	1.0	0.90~1.08	0.80~1.17	0.70~1.30
第2通道	1.0	0.97~1.03	0.93~1.07	0.90~1.10

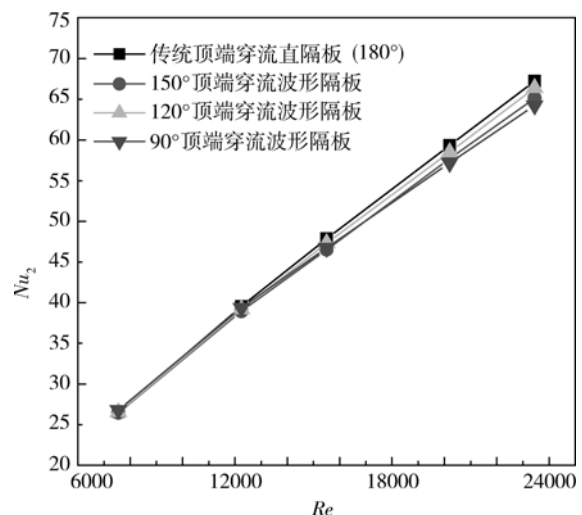
2.1 平均换热对比

图4(a)~(c)分别为四种不同折角的隔板结构在第1通道壁面、第2通道壁面以及整体通道壁面的平均换热对比。

从图4(a)中可以看出,对第1通道,隔板结构的波形折角越小,换热效果越好。这是因为折角



(a) 第1通道壁面平均换热



(b) 第2通道壁面平均换热

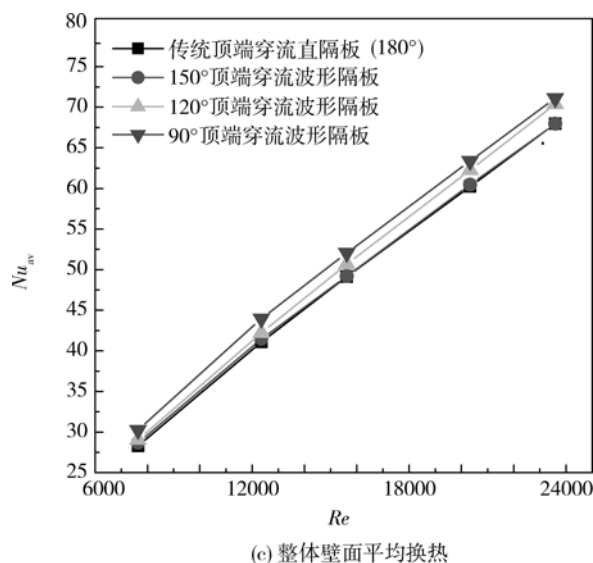


图4 四种结构平均换热对比

Fig. 4 Computational results of average heat transfer

越小,截面面积变化幅度越大,流体的速度和压力变化越大,更加增强了流体的扰动,使换热增强.从图4(b)中可以看出,对于第2通道,各不同折角顶端穿流波形结构的换热与传统直隔板结构的换热差不多,此时波形隔板构成的变截面结构对换热几乎没有增强的作用.这个可以理解为第2通道的底面换热面积比较大,波形隔板折角引起的截面变化(由表1可知截面变化小)与该通道的换热面积相比影响较小,所以对换热的影响在该通道中不是很明显.从图4(c)看出,对于整体通道来说,由于第2通道所占的换热面积比例大,使得整体通道的换热拉平了第1通道中换热快速增

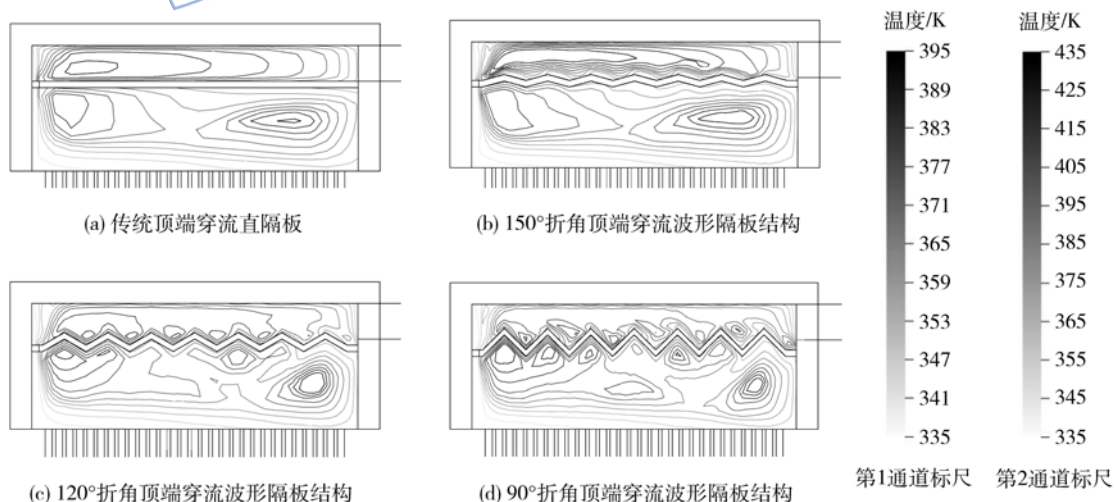
长的趋势,并不像第1通道增长的那么明显,但仍然保持着随波形角度的减小,换热逐渐增大的趋势.

2.2 局部换热对比

图5是通道壁面的局部温度分布等值线图.根据 Nu 的计算公式可知,在热流密度和入口气体温度一定的情况下,壁面局部温度越高,换热越差.从图上的等温曲线可以直观的看出通道壁面的换热区别.虽然各结构中壁面上最高温度有所不同,为方便直观比较,各不同结构采用相同数值的标尺.同一结构中两通道的温度范围差别较大,若两通道采用一个标尺,则对第1通道的分辨率不够,所以将两通道分开对比,分别采用不同的标尺.

从图5可以看出,四种结构的温度场有相似的规律.对于第1通道,在离隔板较远处,靠近前缘壁板的区域,由于边缘效应的影响,温度较中间区域低;在中间区域,从入口端开始沿程温度逐渐升高.对于第2通道,在左侧顶端穿流处,由于射流的作用,流体速度大,温度低;流体到达尾缘处后,一部分流体从尾缘板劈缝流出;另一部分由于尾缘壁板的阻碍,发生折转,沿尾缘从左壁板向右壁板方向流动;到达右壁板后,再次发生折转向隔板方向流动;到达隔板后,沿隔板从右壁板向左壁板方向流动,过程中不断有流体从尾缘板劈缝流出.壁面上存在两个局部高温区,分别位于隔板穿流附近和右壁板附近.

从图5(b)中可以看出,对于第1通道,在波形隔板附近,温度较低,这是隔板的形状使流体方

图5 $Re=12327$ 时四种结构局部温度对比Fig. 5 Computational results of local temperature ($Re=12327$)

向不断改变,加强了流体扰动,从而增强换热;在离隔板较远处,靠近前缘壁板区域,由于边缘效应的影响,温度也较中间区域低;在中间区域,从入口端开始沿程温度逐渐升高.从图5(c)和(d)中可以看出,在隔板折角处存在局部高温区,这是因为,在这些局部区域,通道截面积大,流体速度小,使换热弱化.通过对比这四种结构的温度分布,可以看出,对第1通道,随着折角的减小,整体温度明显降低,尤其是靠近隔板的地方.在传统直隔板结构中,大部分区域的温度在380 K以上,而在隔板设计成波形后,该通道的温度逐渐减低,在90°折角结构中,除了折角处有部分区域温度高于380 K以外,其余区域基本在370 K左右;对第2通道,折角越小,局部高温区越分散,但高温区域面积仍较大,波形隔板的变截面作用在该通道中体现不明显.

2.3 流阻对比

图6为这四种结构的流阻系数随雷诺数的变化关系对比.

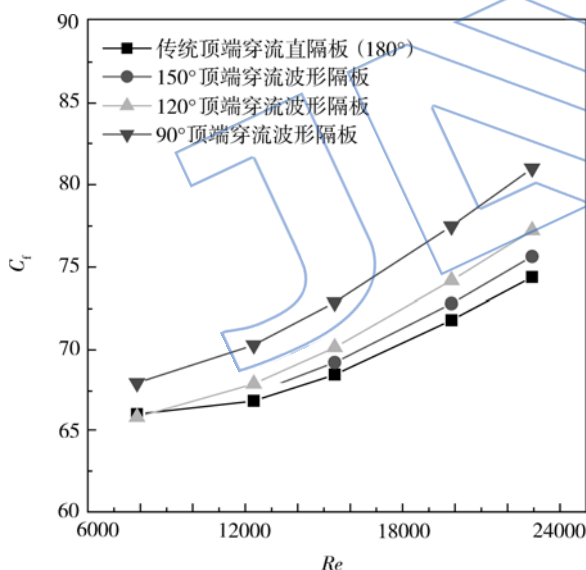


图6 四种结构流阻系数对比

Fig. 6 Computational results of friction factor

从图6可看出,波形隔板与直隔板相比,流阻系数增大.随着波形角度的减小,流阻系数逐渐增大.这是因为,波形隔板使通道的截面不断发生改变(截面变化比范围见表1),在弦向截面面积增大的地方,流体速度减小,压力增大;在弦向截面面积减小的地方,流体速度增大,压力减小,通道中流体速度和压力不断交替增大或减小,使流阻系数增大.波形折角越小,流道截面变化越大,通道内

的阻力系数就越大.

2.4 综合换热效果对比

从流阻和换热的分别对比可看出,随着波形角度的不断减小,换热逐渐增强,但流阻系数也相应地逐渐增大.这说明,波形结构在一定程度上虽然增强了换热,但是以更大的流动损失为代价的.波形结构的折角并不是越小越好,在设计时应综合考虑换热和流阻性能,以综合换热效果来评价.

图7为这四种结构综合换热效果随雷诺数的变化关系对比.

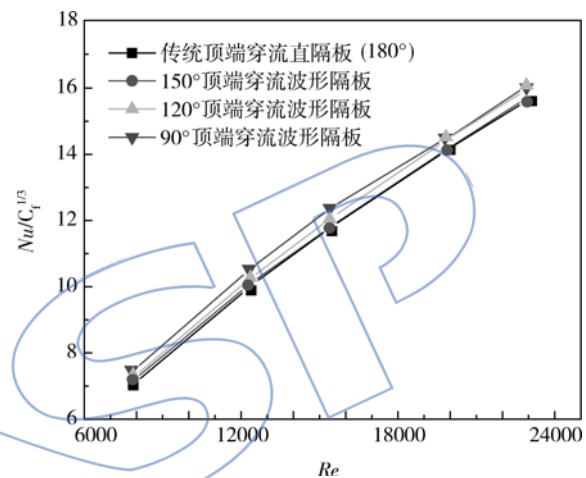


图7 四种结构综合换热效果对比

Fig. 7 Computational results of integrated effect of heat transfer

从综合换热效果对比可看出,150°波形隔板结构和直隔板结构(180°)相当,而120°和90°折角波形隔板结构的综合换热效果略大一些,这说明,120°和90°折角波形隔板结构与传统的直隔板结构相比,换热的增加大于结构带来的流阻损失,起到了一定的增强作用.

3 结论

1) 波形隔板结构折角越小,对整个通道的换热越好.尤其是对于第1通道,折角越小,增强换热效果越显著.这主要是因为,波形隔板结构引起弦向截面面积不断变化,折角越小,变化越大;而对于第2通道,弦向截面面积的改变较小,所以各结构的换热相当.

2) 波形隔板结构使流阻系数增大,波形隔板的折角越小,流阻系数越大.

3) 从换热和流阻的综合效果来看,150°波形隔板结构和直隔板(180°)结构相当,而120°和90°

波形隔板结构换热增强的效果大于结构带来的流阻损失。

参考文献:

- [1] Fabbri G. Heat transfer optimization in corrugated wall channels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43(23): 4299-4310.
- [2] Rush T A, Newell T A, Jacobi A M. An experimental study of flow and heat transfer in sinusoidal wavy passages [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, 42(9): 1541-1553.
- [3] Islamoglu Y, Parmaksizoglu C. Numerical investigation of convective heat transfer and pressure drop in a corrugated heat exchanger channel[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(1): 141-147.
- [4] Nishimura T, Oka N, Yoshinaka Y, et al. Influence of imposed oscillatory frequency on mass transfer enhancement of grooved channels for pulsatile flow[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43(13): 2365-2374.
- [5] Guzmán A M, Cárdenas M J, Urzúa F A, et al. Heat transfer enhancement by flow bifurcations in asymmetric wavy wall channels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(15-16): 3778-3789.
- [6] Chang S W, Lees A W, Chou T C. Heat transfer and pressure drop in furrowed channels with transverse and skewed sinusoidal wavy walls[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(19-20): 4592-4603.
- [7] Ko T H, Cheng C S. Numerical investigation on developing laminar forced convection and entropy generation in a wavy channel[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2007, 34(8): 924-933.
- [8] Naphon P, Kornkumjayrit K. Numerical analysis on the fluid flow and heat transfer in the channel with V-shaped wavy lower plate [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2008, 35(7): 839-843.
- [9] 阴继翔, 郭瑞, 吕萍, 等. 波纹通道形状对流动与换热影响的数值研究[J]. *太原理工大学学报*, 2010, 41(4): 428-432. YIN Jixiang, GUO Rui, LÜ Ping, et al. Numerical investigation of the effect of different wavy channels on flow and heat transfer[J]. *Journal of Tai Yuan University of Technology*, 2010, 41(4): 428-432. (in Chinese)
- [10] 李海朋, 刘钊, 丰镇平. 两种波纹板通道内的流动及换热比较[J]. *工程热物理学报*, 2008, 29(10): 1755-1758. LI Haipeng, LIU Zhao, FENG Zhenping. Comparison study of flow and heat transfer characteristics in two kinds of wavy channels[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(10): 1755-1758. (in Chinese)
- [11] 丁水汀, 刘丽艳, 李莉, 等. 涡轮叶片尾缘复合通道中隔板结构对换热特性的影响[J]. *航空动力学报*, 2006, 21(3): 523-527. DING Shuiting, LIU Liyan, LI Li, et al. The effect of different clapboards structure in turbine blade trailing edge complex passages on heat transfer characteristics[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2006, 21(3): 523-527. (in Chinese)
- [12] 李莉, 徐国强, 丁水汀, 等. 波形隔板穿流孔孔径对通道流动和换热的影响[J]. *北京航空航天大学学报*, 2010, 36(6): 690-693. LI Li, XU Guoqiang, DING Shuiting, et al. Effect of orifices diameter on heat transfer and flow resistance characteristic of passage [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36(6): 690-693. (in Chinese)