

DOI: 10.7652/xjtuxb202001019

带肋板尾缘开缝叶片内的流动传热性能研究

王瑞琴, 晏鑫, 何坤

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对燃气透平带肋板的尾缘开缝叶片,采用 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)方程求解结合 SST $\gamma-Re_\theta$ 转换模型数值方法,研究了 3 种来流湍流度、3 种来流雷诺数和 3 种冷气质量流量比条件下叶片和尾缘开缝区域的流动传热性能,并与无肋板开缝叶片进行了对比,利用实验数据考核了数值方法的有效性。计算结果表明:随着来流湍流度的增大,带肋板的尾缘开缝叶片表面传热系数逐渐增大,开缝壁面的传热系数基本不变,能量损失系数和总压损失系数随之增加;在相同来流湍流度时,增加来流雷诺数可降低损失;增大冷气质量流量比对叶片表面的传热系数影响很小,但可显著提升开缝壁面的传热系数;与无肋板的开缝叶片相比,带肋板的尾缘开缝叶片表面的传热系数和压力系数更低,开缝壁面换热系数更高;当 Re 为 2.0×10^6 时,带肋板的开缝壁面平均换热系数比无肋板时的高 14.46%,来流雷诺数分别为 0.5×10^6 、 1.0×10^6 、 2.0×10^6 时,相比无肋板开缝叶片,带肋板尾缘开缝叶片的能量损失系数分别增加了 3.75%、5.91%、6.75%,总压损失系数分别降低了 3.4%、3.37%、2.06%。

关键词: 燃气透平;尾缘开缝;肋板;传热;损失

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)01-0150-12

Investigations of Flow and Heat Transfer Performance in a Blade with Trailing-Edge Cutback and Lands

WANG Ruiqin, YAN Xin, HE Kun

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) equations combined with transition model SST $\gamma-Re_\theta$ are adopted to investigate the flow and heat transfer performance in a gas turbine blade with trailing edge cutback and lands. At three inflow turbulence intensities, three mainstream Reynolds numbers and three coolant ejection rates, heat transfer coefficient distributions and aerodynamic loss in blade with trailing-edge cutback and lands are compared with those in trailing-edge cutback blade without lands. With the existing experimental data, the reliability of numerical methods is validated at a range of operation conditions. The results show that, as the inflow turbulence intensity increases, heat transfer coefficients on blade surface for the blade with lands are gradually increased. However, the heat transfer coefficients on trailing edge cutback are not sensitive to the variations of inflow turbulence intensity. The energy loss coefficient and total pressure loss coefficient in blade with lands are both increased with increase of inflow turbulence intensity. With the same inflow turbulence intensity, the aerodynamic loss in blade is reduced

收稿日期: 2019-07-07。 作者简介: 王瑞琴(1995—),女,硕士生;晏鑫(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2018JQ5109)。

网络出版时间: 2019-10-14 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20191014.1442.007.html>

with increasing the mainstream Reynolds number. For the blade with lands, increasing the ejection rate has little influence on the heat transfer coefficient distributions on blade surface, but it significantly increases the heat transfer coefficients on the trailing edge cutback. Compared with the blade without lands, heat transfer coefficients and pressure coefficients on blade surface are reduced, while the heat transfer coefficients on the cutback surface are increased in the blade with lands. Compared with the blade without lands, as the Reynolds number equals 0.5×10^6 , 1.0×10^6 and 2.0×10^6 , the energy loss coefficient in blade with lands is increased by 3.75%, 5.91% and 6.75%, respectively, whereas the total pressure loss coefficient in the blade with lands is decreased by 3.4%, 3.37%, and 2.06%, respectively.

Keywords: gas turbine; trailing edge cut-back; land; heat transfer; loss

符号表

I	湍流强度	U	流速	TE	尾缘	k	湍动能
ω	湍流耗散率	Gillslot	无肋板尾缘开缝叶片	C	叶片弦长		
S	叶片表面距离	Land	带肋板尾缘开缝叶片				

燃气透平进口温度逐年提升,已远超叶片材料熔点,尾缘区域承受着极高的热负荷和热应力。尾缘开缝冷却结构由于具有较好的冷却传热特性和气动特性,在现代燃气透平中得到了广泛应用,典型的透平叶片尾缘开缝结构^[1]如图 1 所示。

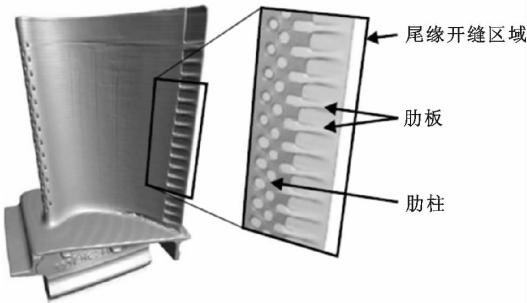


图 1 燃气透平叶片尾缘开缝结构

国内外已有许多关于叶片尾缘开缝结构流动和冷却传热性能的实验和数值研究。Schobeiri 等针对叶片尾缘中心槽缝冷却结构的气动性能开展了实验和理论研究,分析了冷气喷射速度比、冷气质量流量比、槽厚比等参数对叶片气流掺混损失及气动效率的影响^[2];Uzol 等实验研究了不同冷气质量流量比对尾缘开缝叶片气动损失的影响,发现当冷气质量流量比达到 5% 时气动损失显著降低^[3];Martini 等针对不同吹风比和不同冷气通道内部肋柱结构对尾缘开缝结构冷却传热性能的影响规律进行了实验和数值研究^[4-5];Barigozzi 等对尾缘开缝与两排压力面侧气膜孔组合结构的叶片尾缘区域的流场进行了实验研究^[6-9];曾军等通过实验和数值研究,发现尾缘劈缝冷气喷射可以改善近尾迹区域的流动从而

降低主流总压损失^[10];姚世传等利用 SAS 方法研究了速比对叶片尾迹气动和尾缘传热性能的影响规律,结果表明,不同射流速比条件下的掺混损失与尾迹区的湍流脉动能量和回流区长度有关^[11];高炎等分析了无肋板尾缘开缝结构对叶片表面流动传热性能的影响,发现尾缘开缝结构对叶片表面对流换热的影响区域主要在吸力面喉部下游^[12]。无肋板尾缘开缝结构强度较低,在尾缘区域高热负荷和热应力的作用下更容易产生机械疲劳,涡轮进口参数的不断提升使其安全运行寿命日益缩短。为了进一步增强尾缘开缝结构强度、减少开缝内部肋柱通道间冷气的不均匀性、提升尾缘区域的换热性能,肋板结构在实际尾缘开缝结构中得到了广泛的应用,许多学者也因此开展了相关的研究:Cakan 等对不同吹风比下由肋板分隔形成的简单楔形槽缝区域的对流换热性能进行了实验和数值研究^[13];Ames 等对无肋板尾缘开缝叶片和带肋板尾缘开缝叶片的流动和传热性能进行了实验研究,发现在相同实验条件下带肋板尾缘开缝叶片的总压损失略低于无肋板尾缘开缝叶片^[14-17];Horbach 等对不同唇厚、唇形、肋柱及肋板的尾缘开缝模型进行了实验研究,结果表明肋板结构可以提高冷却效率并减少高吹风比条件下的涡流脱落^[1,18];Gurram 等对采用方形肋板和锥形肋板的尾缘开缝结构进行了实验研究,结果表明肋板结构在一定程度上可以消除气流的横流效应从而改善冷却效果,与方形肋板相比,锥形肋板结构的整体冷却效果更好^[19]。

综上所述,肋板结构有加强尾缘强度、改善尾缘

区域冷却性能^[1,18-19]、降低主流总压损失^[17]等一系列优点,但是目前针对肋板结构的研究仍然以实验为主,且多集中于尾缘开缝模型,对肋板结构对流动传热特性的具体作用机理仍缺乏了解。开展带肋尾缘开缝叶片流动传热特性的研究,对了解尾缘开缝区域冷却热气掺混机理及尾缘开缝结构设计具有重要意义。在此基础上,本文针对燃气透平带肋板的尾缘开缝叶片,采用 RANS 方程求解结合 SST γ - Re_{θ} 转捩模型,利用实验数据考核了数值方法的有效性,在此基础上,研究了 3 种来流湍流度、3 种来流雷诺数和 3 种冷气质量流量比条件下叶片和尾缘开缝区域的流动传热性能,并与无肋板开缝叶片进行了对比,分析了肋板结构对叶片和尾缘开缝区域流动传热性能的影响。

1 计算模型和数值方法

尾缘开缝结构、计算模型和相关尺寸来自文献^[14-17]的实验叶片,分别如图 2、图 3 和表 1 所示。

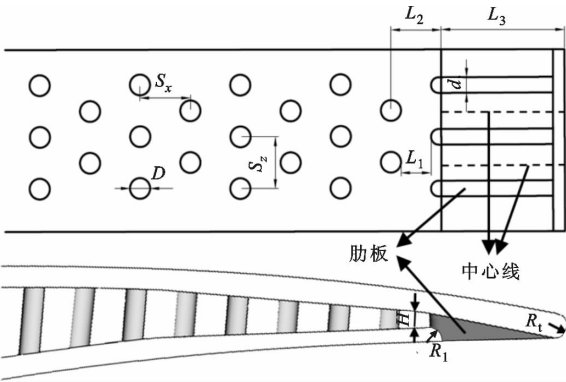
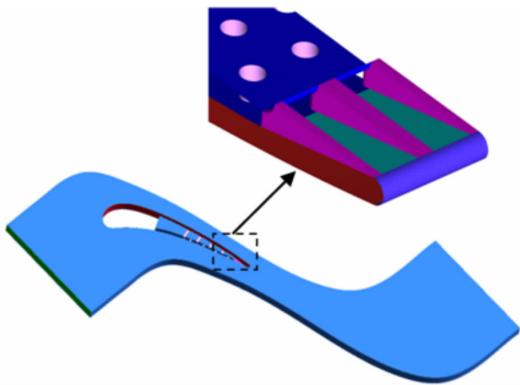
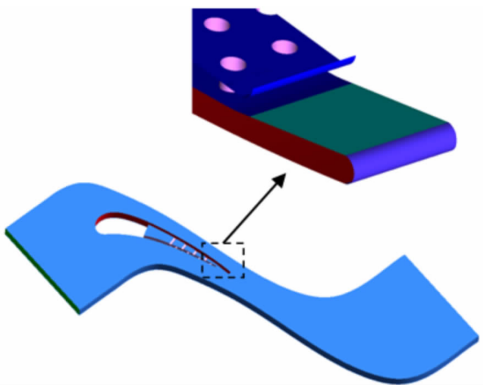


图 2 尾缘开缝结构

验证数值方法的实验数据来自于文献^[20],计算所得的叶片表面传热系数取计算模型 50% 叶高截面处的数值结果,两种尾缘开缝叶片的各位置示意图如图 4 所示。



(a)带肋板尾缘开缝叶片

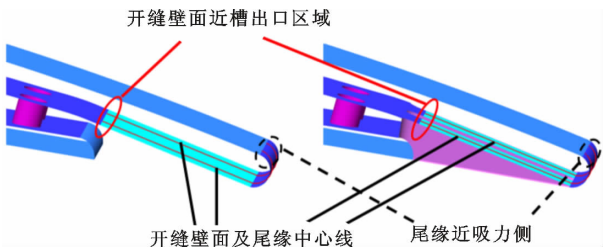


(b)无肋板尾缘开缝叶片

图 3 数值计算模型

表 1 尾缘开缝结构的主要尺寸 mm

H	R_1	R_t	D	L_1
5.59	5.59	4.9	8.38	12.57
S_x	S_y	L_2	d	L_3
20.95	20.95	20.95	6.35	51.5



(a)无肋板尾缘开缝叶片 (b)带肋板尾缘开缝叶片

图 4 两种尾缘开缝叶片的各位置示意图

图 5 给出了部分边界条件设定的示意图。唇部、冷气通道的上下壁面及其中的八排肋柱设定为绝热边界,开缝壁面和叶片表面给定恒定热流量。主流和冷气进口总温均为 302 K,冷气进口湍流强度为 5%。不同来流湍流度和来流雷诺数下对应着不同的主流入口速度、湍流强度、湍动能、湍流耗散率及壁面热流量,具体数值见表 2。来流雷诺数与冷气质量流量的对应关系见表 3。流道两侧及上下为周期性边界,出口静压为 98 863 Pa。

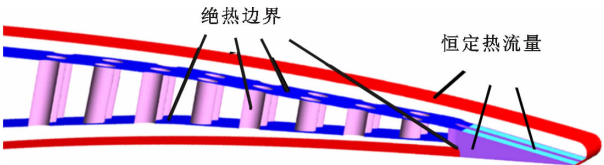


图 5 部分边界条件设定的示意图

带肋板尾缘开缝叶片的数值计算网格如图 6 所示,它是 ANSYS ICEM-CFD 生成的结构化网格。

表 2 本文计算条件对应边界条件数值

湍流 水平	$Re/10^6$	$I/\%$	$U/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$k/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2})$	ω/s^{-1}	$q/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$
	0.5	0.69	4.96	0.001 73	0.01	226.80
LT	1.0	0.76	10.43	0.009 31	0.01	289.20
	2.0	0.60	18.71	0.018 80	7.66	407.03
	0.5	8.21	4.77	0.374 60	205.21	304.75
Grid	1.0	8.61	10.19	1.916 00	457.35	460.10
	2.0	8.84	19.27	7.135 00	833.80	743.30
	0.5	13.13	5.24	0.985 00	141.88	258.35
AC	1.0	14.02	9.32	3.910 00	323.80	440.17
	2.0	13.39	18.39	12.740 00	502.60	799.40

表 3 来流雷诺数与冷气质量流量的对应关系

$Re/10^6$	$m_c/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$		
	半流量 ($R_f=1.243\%$)	全流量 ($R_f=2.486\%$)	双倍流量 ($R_f=4.972\%$)
0.5	0.001 114	0.002 227	0.004 454
1.0	0.002 227	0.004 454	0.008 908
2.0	0.004 454	0.008 908	0.017 816

近壁面第一层网格距离为 0.001 mm,保证 $y^+<1$ 。壁面附近均采用 O 型网格,为了更好地捕捉尾缘开缝区域的流动传热性能,叶片及肋板表面的 O 型网格为一体化生成。

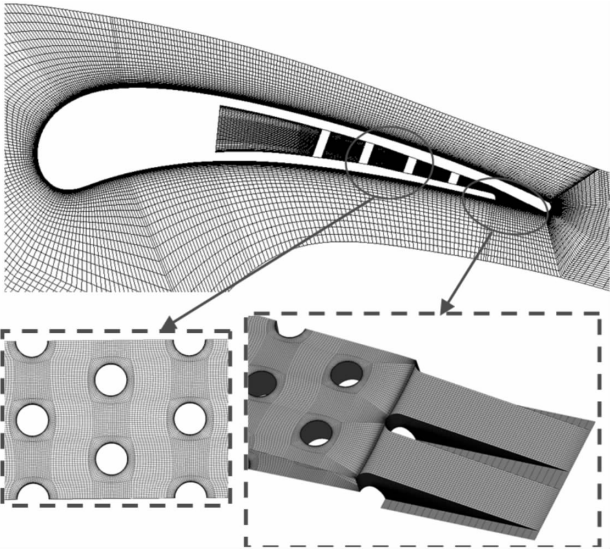


图 6 数值计算网格(带肋板尾缘开缝叶片)

本文中主流雷诺数为

$$Re = \rho U C_{ax} / \mu$$

(1)

式中: ρ 、 U 分别表示主流进口密度和速度; C_{ax} 为叶

片轴向弦长; μ 为动力黏性系数。

压力系数为

$$C_p = [P_s(x) - P_s(0)] / (P_{t1} - P_{s2})$$

(2)

式中: $P_s(x)$ 为当地压力; $P_s(0)$ 为叶片前缘滞止点压力; P_{t1} 为主流进口总压; P_{s2} 为主流出口静压。

传热系数为

$$h = q / (T_w - T_{hg})$$

(3)

式中: q 为壁面热流量; T_w 为壁面温度; T_{hg} 为主流进口温度。

冷气质量流量比为

$$R_f = m_c / m_{hg}$$

(4)

式中: m_c 和 m_{hg} 分别为冷气与主流的质量流量。

主流总压损失系数用来表示主流流动整体的气动损失,定义为

$$\varphi = (P_{t1} - P_{t2}) / (P_{t1} - P_{s2})$$

(5)

式中: P_{t2} 为主流出口总压。

能量损失系数用来衡量主流与冷气掺混过程中的能量损失,定义为

$$\zeta = 1 - \{ [1 - (P_{s2}/P_{t2})^{1-1/\gamma}] (m_{hg} T_{hg} + m_c T_c) \} / \{ m_{hg} T_{hg} [1 - (P_{s2}/P_{t1})^{1-1/\gamma}] + m_c T_c [1 - (P_{s2}/P_{t3})^{1-1/\gamma}] \}$$

(6)

式中: T_c 为冷气进口温度; P_{t3} 为冷气进口总压; γ 为比热容比。

2 计算结果分析

2.1 网格无关性验证

本文采用 3 套网格数分别为 3.17×10^6 (网格 A)、 6.23×10^6 (网格 B) 和 12.5×10^6 (网格 C) 的不同疏密程度的网格,对雷诺数为 0.5×10^6 、航空发动机湍流条件下带肋板尾缘开缝叶片的传热性能进行了计算。3 套网格下所得到的叶片表面传热系数分布如图 7 所示,开缝壁面及尾缘中心线的传热系数分布如图 8 所示。由图 8 可知,网格 B 和网格 C 数值计算结果基本一致,与实验结果也较为吻合,因此本文最终选取网格 B 进行计算。

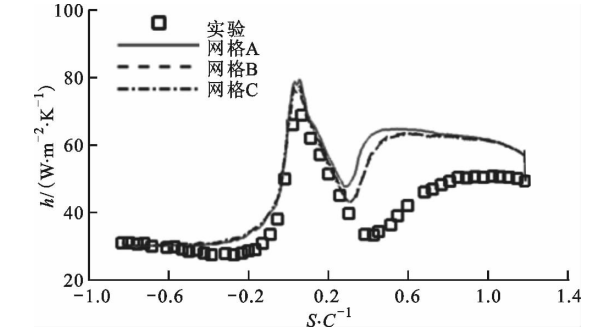


图 7 不同网格数叶片表面传热系数分布

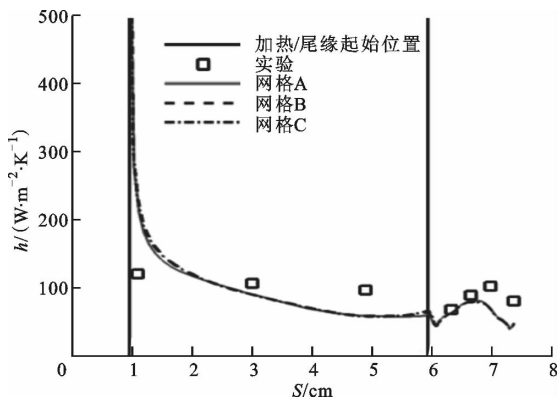


图8 不同网格数开缝壁面及尾缘中心线
传热系数分布

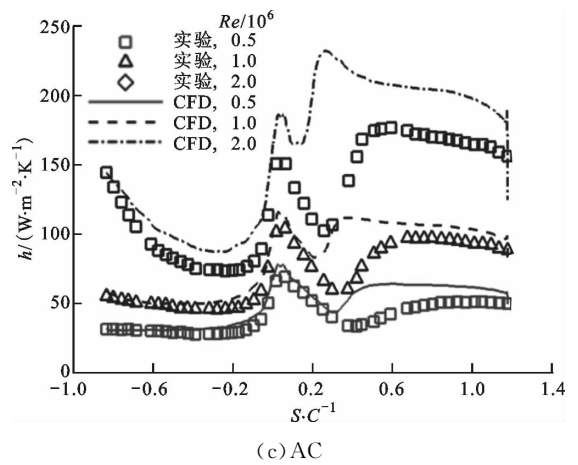


图9 3种来流湍流度下叶片表面传热系数

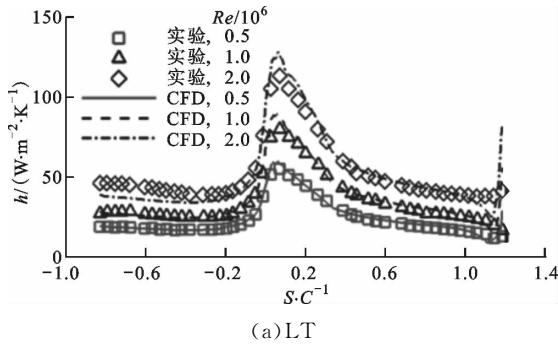
2.2 数值方法验证

图9给出了3种来流湍流度、3种来流雷诺数条件下的带肋板尾缘开缝叶片表面传热系数分布。由图9可知,随着来流湍流度的增大,叶片表面传热系数显著升高。当来流湍流度增大到 Grid(8.21%~8.84%)及以上时,叶片表面开始形成转捩。当雷诺数达到 2.0×10^6 时,叶片吸力侧下游传热系数开始超过叶片前缘。随着来流雷诺数的增大,转捩点位置逐渐向叶片前缘移动。这些规律均与实验结果一致,验证了本文数值方法的有效性。图9中在有转捩流动的工况(Grid、AC)下吸力面的数值结果与实验结果仍有较大偏差,这是因为 RANS 方程的数

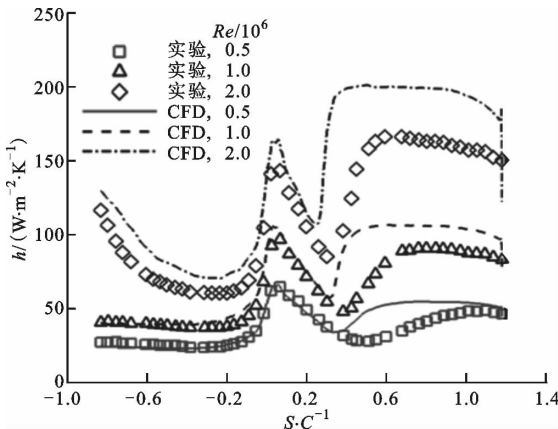
值精度有限,可能需要采用 LES、DES、SAS 等更高精度的数值模型进行求解。

2.3 不同来流湍流度下流动传热性能

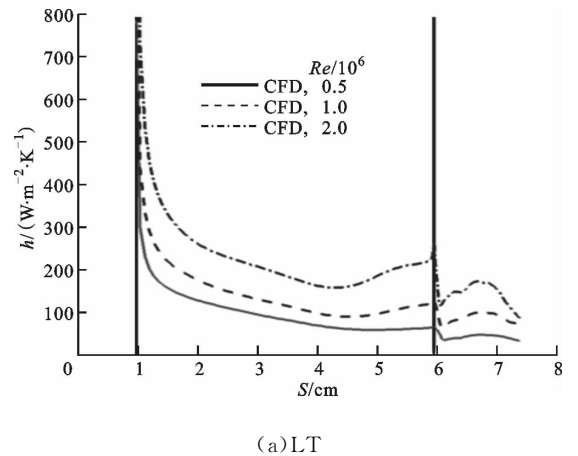
图10给出了3种来流湍流度、3种主流雷诺数条件下的带肋板尾缘开缝叶片的开缝壁面及尾缘中心线上的传热系数分布。在3种来流湍流度下,开缝壁面及尾缘中心线上传热系数分布规律基本一致。随着来流湍流度的增大,开缝壁面传热系数基本不变,尾缘部分换热逐渐增强。当来流湍流度增



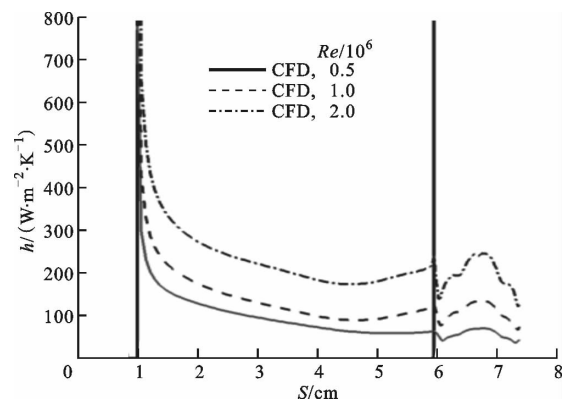
(a)LT



(b)Grid



(a)LT



(b)Grid

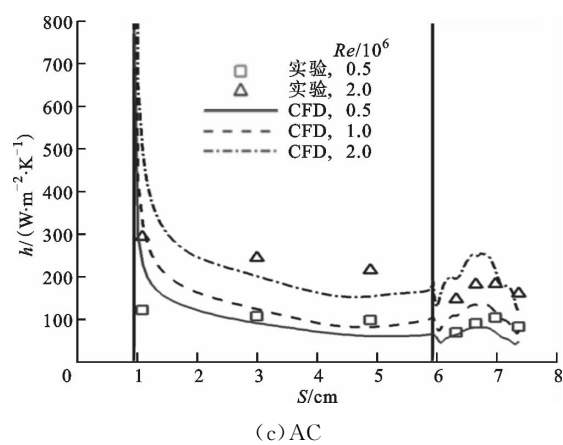


图 10 3 种来流湍流度下开缝壁面及尾缘中心线传热系数

大到 Grid(8.21%~8.84%)时,尾缘传热系数最高点开始超过开缝壁面传热系数最低点。

图 11 和图 12 分别给出了带肋板尾缘开缝叶片的能量损失系数和总压损失系数随来流湍流度的变化。由图 11、12 可以看出,随着来流湍流度的增加,能量损失系数和总压损失系数均随之增加。随着来流雷诺数的增大,能量损失系数和总压损失系数减小。在本文研究中马赫数小于 0.3 的工况下,主流流动的总压损失主要考虑型面损失和尾迹损失两部分。在 LT 工况下,叶片表面未形成转捩,叶片表面边界层为层流边界层,雷诺数的增加在引起型面损

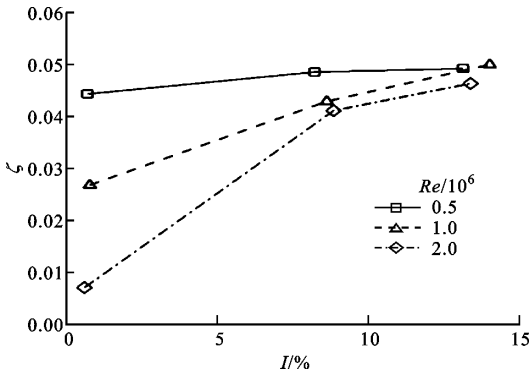


图 11 能量损失系数随来流湍流度的变化

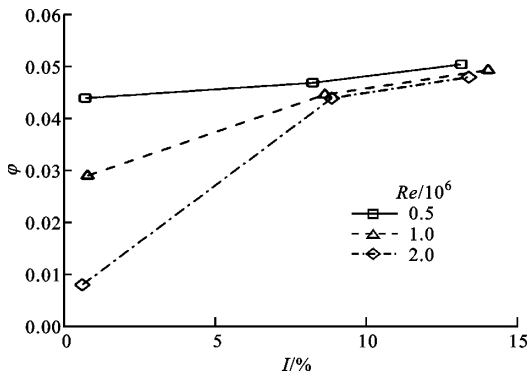
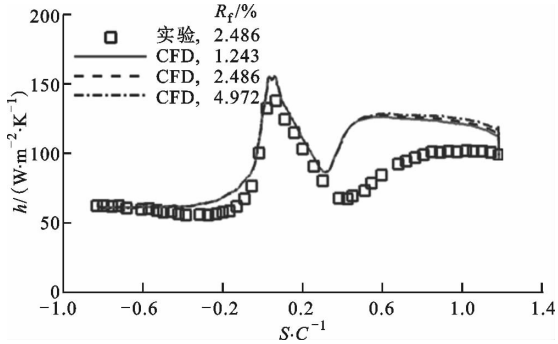


图 12 总压损失系数随来流湍流度的变化

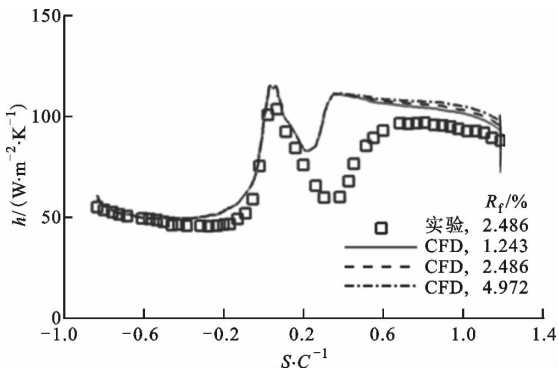
失小幅增加的同时极大地减小了尾迹损失,因此总压损失系数随雷诺数的增大而大幅降低。在 Grid 和 AC 工况下,转捩点后的叶片表面边界层为湍流边界层,随着雷诺数的增大,型面损失迅速增大,尾迹损失迅速降低,但尾迹损失的减小值仍大于型面损失的增加值,因此与 LT 工况相比,总压损失系数随雷诺数的增大只有很小幅度的下降。

2.4 不同 Re 和 R_f 条件下流动传热性能

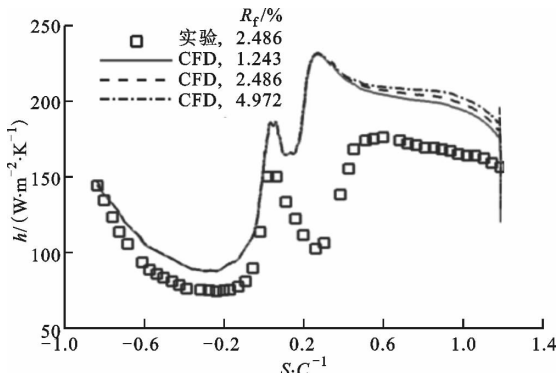
AC 工况下 3 种来流雷诺数以及半流量(Half Flow)、全流量(Full Flow)、双倍流量(Double Flow)3 种冷气质量流量比条件下的带肋板尾缘开缝叶片表面传热系数如图 13 所示,开缝壁面及尾缘



(a) $Re=0.5 \times 10^6$



(b) $Re=1.0 \times 10^6$



(c) $Re=2.0 \times 10^6$

图 13 R_f 对叶片表面传热系数的影响

中心线上的传热系数分布如图 14 所示。

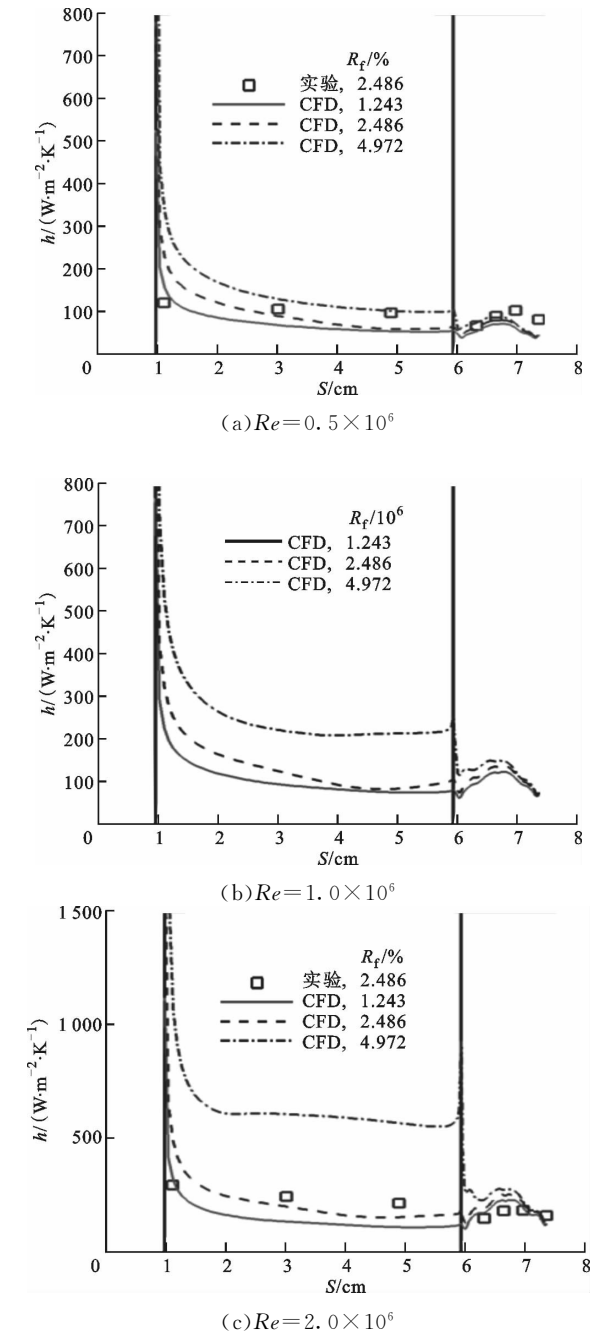


图 14 R_f 对开缝壁面及尾缘中心线传热系数的影响

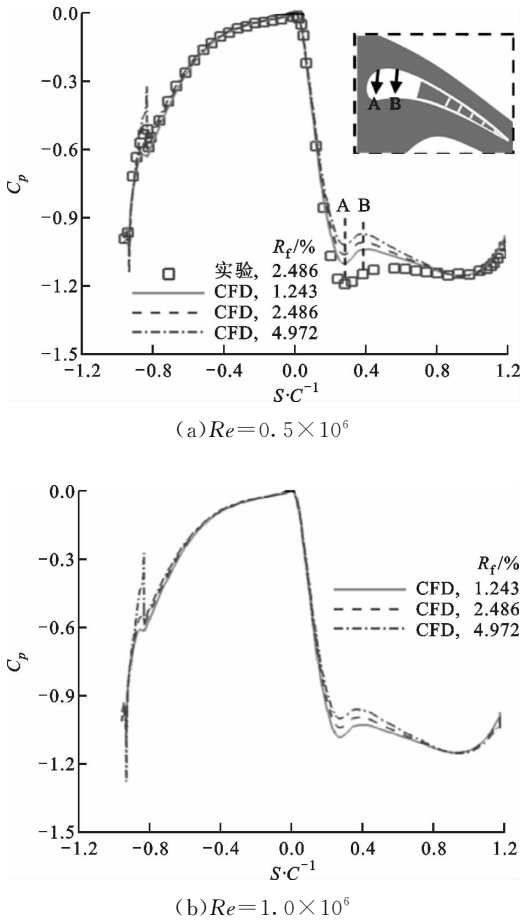
从图 13 中可以看出,3 种来流雷诺数下,随着冷气质量流量比的增大,叶片吸力侧转捩点之后传热系数均略有增加,而叶片压力侧和吸力侧转捩点上游传热系数基本不变。对于叶片表面传热系数,冷气质量流量比只影响吸力面转捩点下游区域。从图 14 可以看出,3 种来流雷诺数下,随着冷气质量流量比的增大,开缝壁面及尾缘中心线上的传热系数均随之增加。当雷诺数超过 1.0×10^6 后,随着冷气质量流量比的增加,传热系数的增加尤为显著。

表 4 给出了 AC 工况下 3 种来流雷诺数、3 种冷气质量流量比条件下带肋板尾缘开缝叶片的开缝壁面平均传热系数。在雷诺数为 2.0×10^6 的条件下,当冷气质量流量比从 2.486% 增加到 4.972% 时,开缝壁面换热系数增加幅度达到 229.16%。由表 4 可以看出,在冷气质量流量相同的工况(对照表 3,如雷诺数为 0.5×10^6 时的全流量与雷诺数为 1.0×10^6 时的半流量)下,开缝壁面平均传热系数相差很小。与雷诺数为 1.0×10^6 时相比,雷诺数为 2.0×10^6 条件下全流量到双倍流量开缝壁面平均传热系数的显著提升主要是高冷气质量流量 ($m_c = 0.017\ 816\ \text{kg/s}$) 作用的结果,与雷诺数的增大基本无关。

表 4 不同冷气流量开缝壁面平均传热系数

$Re/10^6$	平均传热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)		
	半流量	全流量	双倍流量
0.5	62.028	92.318	142.518
1.0	98.271	151.315	273.237
2.0	167.568	265.353	873.444

AC 工况下 3 种来流雷诺数、3 种冷气质量流量比条件下带肋板尾缘开缝叶片表面压力系数分布如



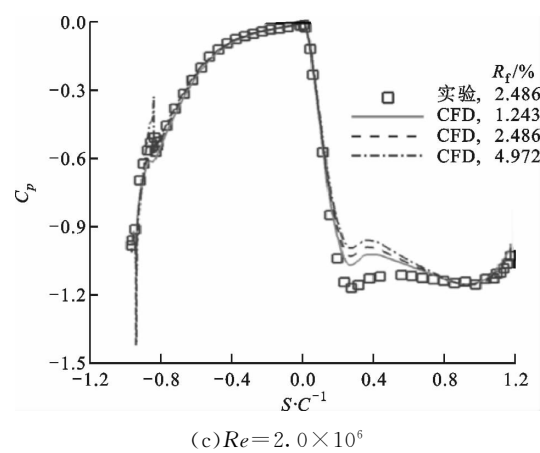
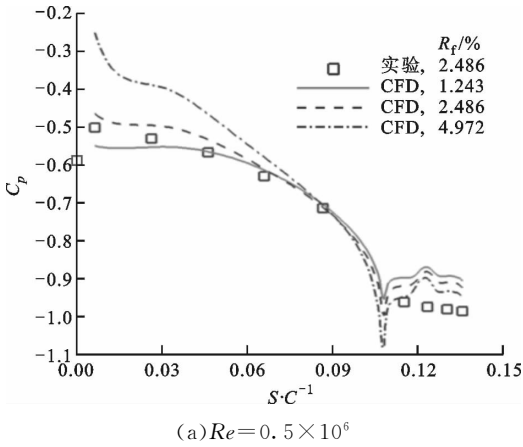


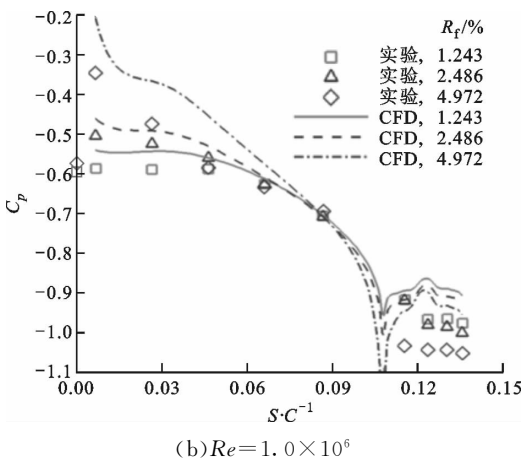
图 15 R_f 对叶片表面压力系数的影响

图 15 所示,开缝壁面及尾缘中心线上的压力系数分布如图 16 所示。3 种来流雷诺数下,随着冷气质量流量比的增大,叶片喉部附近压力系数均随之增加,开缝壁面中心线近槽缝出口前 82% 位置(S/C 小于 0.087)的压力系数均随之增加。开缝壁面下游和尾缘中心线上的压力系数均有一定幅度的下降。

图 17 和图 18 分别给出了带肋板尾缘开缝叶片的能量损失系数和总压损失系数与冷气质量流量比



(a) $Re=0.5 \times 10^6$



(b) $Re=1.0 \times 10^6$

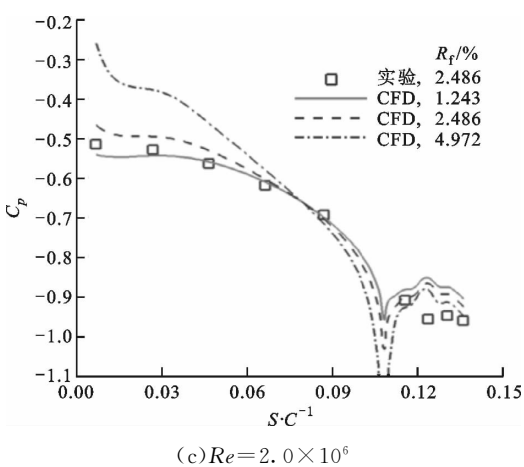


图 16 R_f 对开缝壁面及尾缘中心线压力系数的影响

的关系。雷诺数为 1.0×10^6 的条件下,距叶片尾缘 1/4 轴向弦长处二次流分布如图 19 所示,尾缘开缝区域的速度分布云图如图 20 所示。

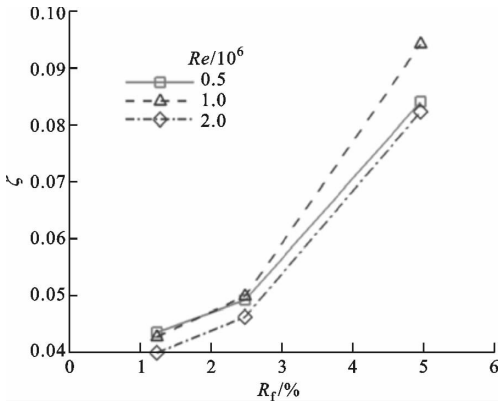


图 17 能量损失系数随冷气质量流量比的变化

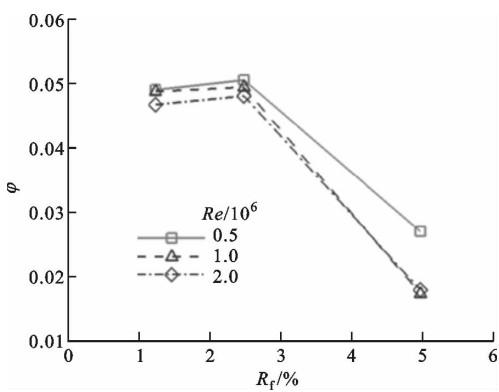


图 18 总压损失系数随冷气质量流量比的变化

从图 17 可以看出,3 种来流雷诺数下,随着冷气质量流量比的增大,能量损失系数逐渐增大。冷气质量流量比从 2.486% 增加到 4.972% 时,能量损失系数从 5.01% 增加到 9.47%,增加了 89%。这是因为随着冷气质量流量比的增大,二次流的强度逐渐增强。在半流量(见图 19a)和全流量(见图

19b)条件下,二次流之间相互影响不明显,在靠近流道两侧位置处,二次流沿叶高方向分布基本一致,尾迹影响区域较小。当冷气质量流量比增加到4.972%时,相邻二次流相互影响程度显著增强,在靠近流道一侧位置处,二次流强度沿叶高方向不再一致(图19c中椭圆指示部分),尾迹影响区域显著扩大,剧烈的二次流极大地增加了双倍流量条件下的能量损失。

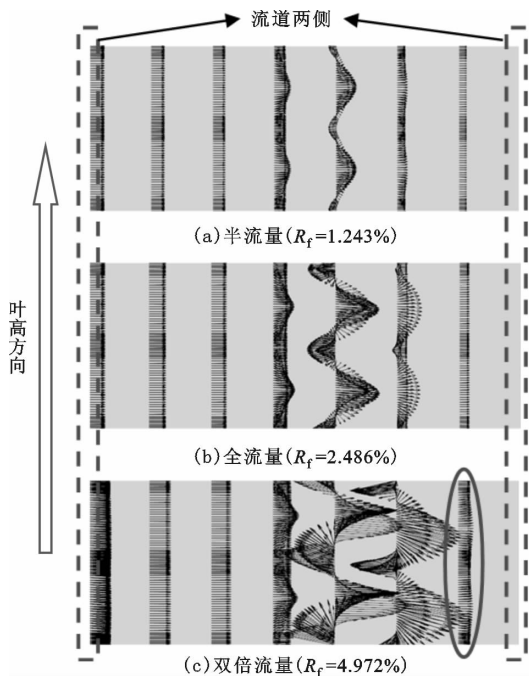


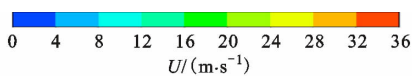
图19 3种冷气质量流量比下二次流分布

3种来流雷诺数下,随着冷气质量流量比的增大,总压损失系数先略微上升然后大幅下降,下降幅度达到65%。这是因为当冷气质量流量比较小时,主流与冷气之间存在较大的速度差(图20a、图20b),冷热气掺混使主流产生较大的流动损失,当冷气质量流量比增加到4.972%时,槽缝出口处冷气流速高于主流流速(图20c),从而总压损失大幅下降。

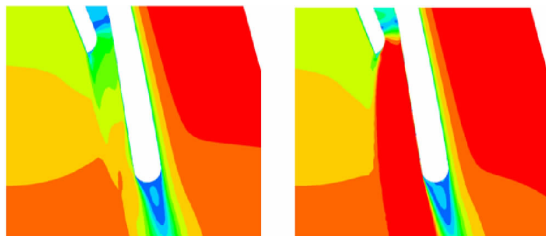
由上述分析可知,当主流雷诺数一定时,冷气质量流量比越大,开缝壁面换热越强,但能量损失也随之增大。当冷气质量流量比从2.486%增加到4.972%时,尽管总压损失大幅下降,但能量损失增加了近一倍。当冷气质量流量比为2.486%左右时,换热和损失可以达到较好的平衡。因此,推荐工程实际中冷气质量流量比为2.4%~2.6%为宜。

2.5 有无肋板时流动传热性能对比

AC工况3种来流雷诺数全冷气质量流量条件下带肋板尾缘开缝叶片与无肋板尾缘开缝叶片的叶



(a)半流量($R_f=1.243\%$)



(b)全流量($R_f=2.486\%$) (c)双倍流量($R_f=4.972\%$)

图20 3种冷气质量流量比下尾缘开缝区域速度分布

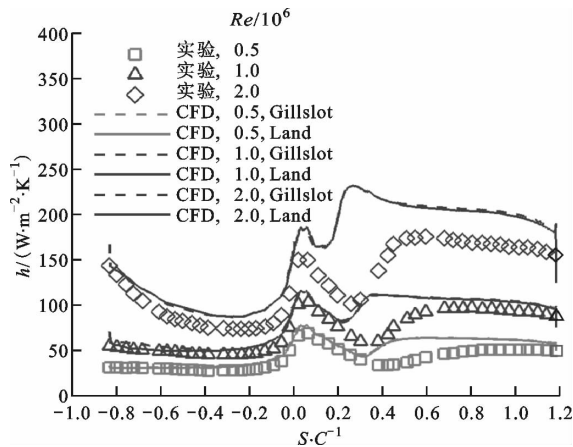


图21 肋板结构对叶片表面传热系数的影响

片表面传热系数如图21所示。肋板结构对叶片表面传热系数的影响不大,这是因为肋板位于槽缝出口后方,对叶片表面换热系数影响很小。整体来看,3种雷诺数条件下带肋板尾缘开缝叶片表面传热系数均略低于无肋板尾缘开缝叶片。

图22给出了AC工况来流雷诺数为 0.5×10^6 时全冷气质量流量条件下两种开缝叶片的开缝壁面及尾缘中心线上传热系数分布。雷诺数为 0.5×10^6 条件下两种开缝叶片的开缝壁面传热系数分布如图23所示。在尾缘开缝壁面靠近槽缝出口和近吸力侧尾缘部分,带肋板时中心线上的传热系数要高于无肋板开缝时中心线上的传热系数。在近压力侧尾缘部分,带肋板时中心线上的传热系数要低于无肋板时中心线上的传热系数。这与实验结果所示

规律一致。在开缝壁面下游,数值结果与实验结果呈现相反规律,这一方面是由于带肋板模型的实验数据点只有一个,且实验中传热系数的不确定度为 10%,另一方面是由于数值结果与实验结果本身存在一定偏差。

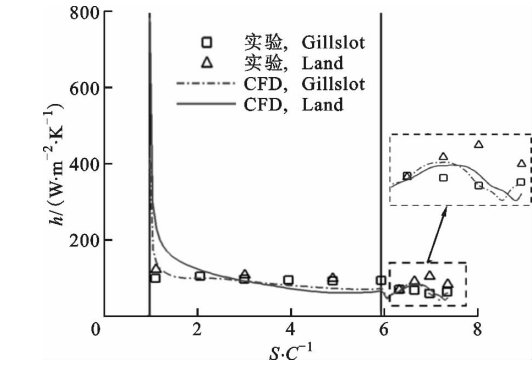


图 22 肋板结构对开缝壁面及尾缘中心线传热系数的影响

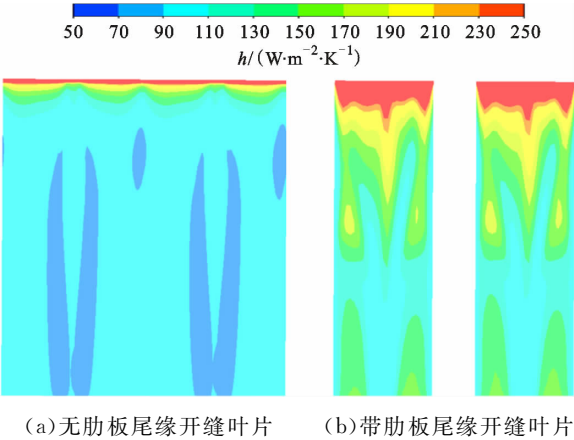


图 23 开缝壁面传热系数分布

表 5 给出了 AC 工况 3 种来流雷诺数全冷气质量流量条件下两种开缝叶片开缝壁面平均传热系数数值。3 种来流雷诺数下,带肋板尾缘开缝叶片的开缝壁面平均传热系数均高于无肋板尾缘开缝叶片的开缝壁面平均传热系数。雷诺数越大,带肋板尾缘开缝叶片的开缝壁面处换热优势越明显。当 $Re=2.0\times10^6$ 时,有肋板时的开缝壁面平均换热系数要比无肋板时高出 14.46%。

表 5 两种开缝叶片开缝壁面平均传热系数

$Re/10^6$	平均传热系数/($W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$)	
	Gillslot	Land
0.5	88.479	92.318
1.0	135.529	151.315
2.0	231.835	265.353

图 24 给出了 AC 工况来流雷诺数为 2.0×10^6 时全冷气质量流量条件下两种开缝叶片的叶片表面压力系数分布。图 25 给出了 AC 工况 3 种来流雷诺数全冷气质量流量条件下两种开缝叶片的开缝壁面及尾缘中心线上压力系数分布。

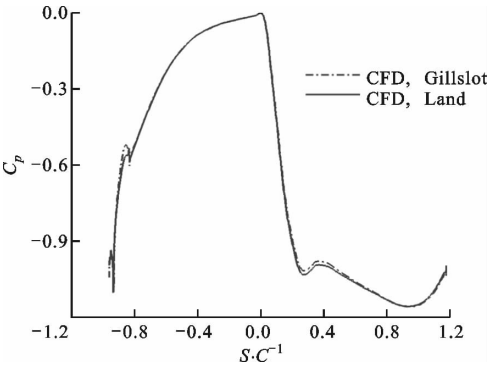
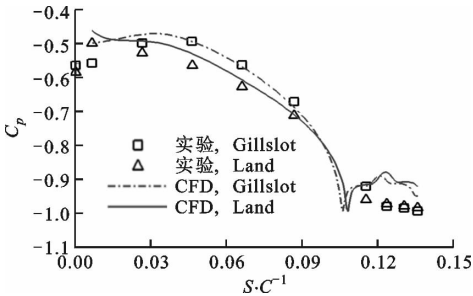


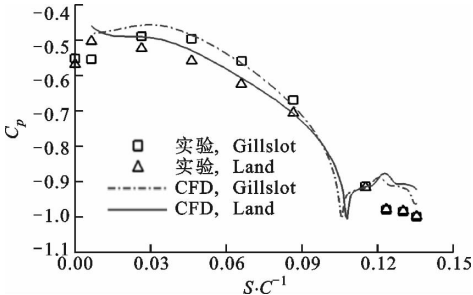
图 24 肋板结构对叶片表面压力系数的影响

从图 24 可以看出,带肋板尾缘开缝叶片表面压力系数在叶片喉部附近略低于无肋板尾缘开缝叶片。整体来看(图 25),3 种雷诺数条件下,带肋板尾缘叶片的开缝壁面压力系数均低于无肋板尾缘开缝叶片,在尾缘近吸力面侧则高于无肋板尾缘开缝叶片。无肋板尾缘开缝壁面上的压力系数沿流向先上升后下降,对于带肋板尾缘开缝叶片,开缝壁面的压力系数沿流向逐渐下降。两种模型的数值结果与实验规律一致。

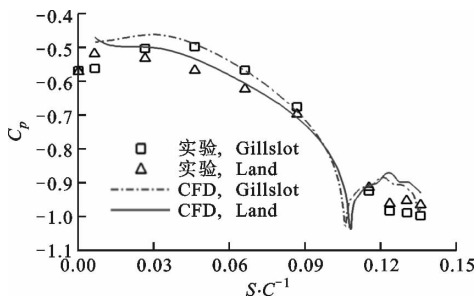
图 26 给出了雷诺数为 1.0×10^6 条件下两种尾缘开缝叶片尾缘开缝区域的流场结构图。从图中可



(a) $Re=0.5\times10^6$



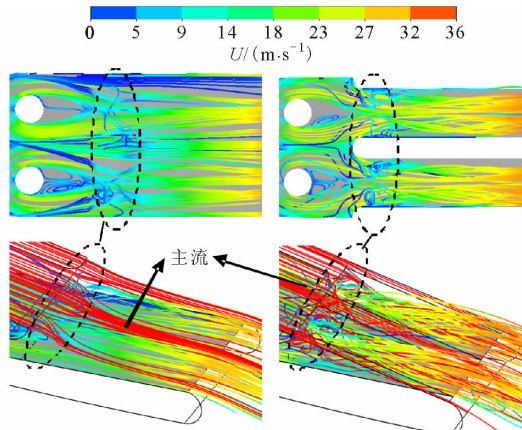
(b) $Re=1.0\times10^6$



(c) $Re=2.0 \times 10^6$

图 25 肋板结构对开缝壁面及尾缘中心线上压力系数的影响

以看出,对于无肋板尾缘开缝叶片,槽缝出口的通流面积较大,冷气从槽缝出口流出后流速较低,与主流掺混(椭圆指示部分)后速度继续下降,开缝壁面上的压力系数随之上升,之后随着流动的逐渐发展,冷气与主流掺混逐渐均匀,受主流流动发展的影响,开缝壁面上的压力系数逐渐下降。



(a) 无肋板尾缘开缝叶片 (b) 带肋板尾缘开缝叶片

图 26 尾缘开缝区域流场结构

对于带肋板尾缘开缝叶片,冷气在流出槽缝出口后速度较大,与主流迅速掺混(椭圆指示部分,验证了图 23b 中较大面积高传热区的由来),因此开缝壁面的压力系数沿流向逐渐下降。从图 26 还可以看出,在槽缝后方区域,带肋板尾缘开缝叶片的流场更加均匀,这是因为肋板具有一定的整流作用。更加均匀的流场从整体上提高了带肋板尾缘开缝叶片的开缝壁面传热系数。

图 27 和图 28 分别给出了 AC 工况 3 种雷诺数条件下两种开缝叶片的能量损失系数和总压损失系数,图 29 给出了两种开缝叶片的尾缘开缝区域速度分布云图。对于同一结构,不同雷诺数下的实际冷气质量流量比有些许差别,因此不同雷诺数条件下损失系数的差别是雷诺数和冷气质量流量共同影响

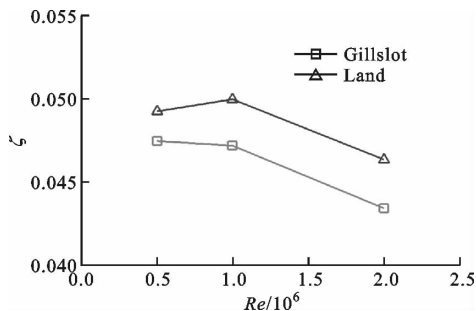


图 27 肋板结构对能量损失系数的影响

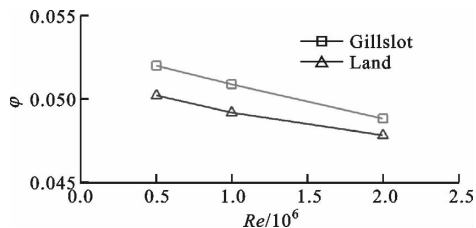
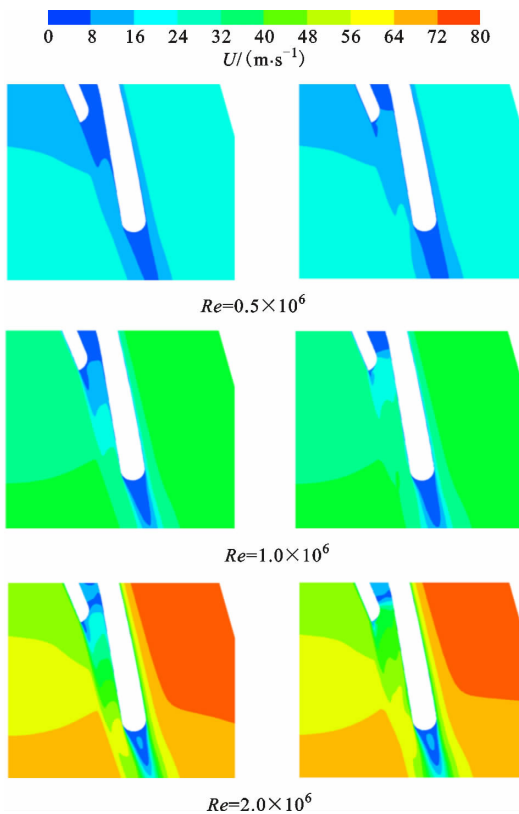


图 28 肋板结构对总压损失系数的影响



(a) 无肋板尾缘开缝叶片 (b) 带肋板尾缘开缝叶片

图 29 尾缘开缝区域速度分布

的结果。与无肋板尾缘开缝叶片相比,雷诺数为 0.5×10^6 、 1.0×10^6 、 2.0×10^6 时,带肋板尾缘开缝叶片的能量损失系数分别增加了 3.75%、5.91%、6.75%,总压损失系数分别降低了 3.4%、3.37%、2.06%。

由图 29 可以看出,相同雷诺数下,带肋板尾缘

开缝叶片和无肋板尾缘开缝叶片主流速度相当,但肋板的存在使得槽缝出口处通流面积突然减小,引起槽缝后方冷气速度骤增,因此主流与冷气掺混过程中的能量损失更高。主流与冷气之间较小的速度差使得带肋板尾缘开缝叶片的总压损失相对更低。

3 结 论

本工作采用 RANS 方程求解结合 SST γRe_θ 转捩模型,针对带肋板的尾缘开缝叶片,研究了 3 种来流湍流度(0.60%~0.76%、8.21%~8.84%、13.13%~14.02%)、3 种来流雷诺数(0.5×10^6 、 1.0×10^6 、 2.0×10^6)和 3 种冷气质量流量比(1.243%、2.486%、4.972%)条件下叶片和尾缘开缝区域的流动传热性能,并与无肋板开缝叶片进行了对比,主要结论如下。

(1)随着来流湍流度的增大,带肋板尾缘开缝叶片的开缝壁面传热系数基本不变,叶片表面传热系数逐渐增大,能量损失系数和总压损失系数也随之增加。在相同来流湍流度时,增大来流雷诺数可以降低损失。

(2)在雷诺数为 2.0×10^6 的条件下,冷气质量流量比从 2.486% 增加到 4.972% 时,开缝壁面换热系数增加幅度达到 229.16%。

(3)与无肋板的开缝叶片相比,带肋板的尾缘开缝叶片表面的传热系数和压力系数更低,开缝壁面换热系数更高。当 Re 为 2.0×10^6 时,带肋板的开缝壁面平均换热系数要比无肋板时高 14.46%。

(4)来流雷诺数分别为 0.5×10^6 、 1.0×10^6 、 2.0×10^6 时,相对于无肋板开缝叶片,带肋板尾缘开缝叶片的能量损失系数分别增加了 3.75%、5.91%、6.75%,总压损失系数分别降低了 3.4%、3.37%、2.06%。

(5)工程实际中冷气质量流量比为 2.4%~2.6% 时,尾缘开缝叶片在保证传热性能的同时具有相对较低的流动损失。在尾缘开缝结构中布置肋板结构可以进一步强化该区域的换热性能并减小主流的总压损失。

参考文献:

- [1] HORBACH T T, SCHULZ A A, BAUER H J. Trailing edge film cooling of gas turbine airfoils-external cooling performance of various internal pin fin configurations [J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(4): 041006.
- [2] SCHOBELIRI T, PAPPU K. Optimization of trailing

edge ejection mixing losses: a theoretical and experimental study [J]. Journal of Fluids Engineering, 1999, 121(1): 118-125.

- [3] UZOL O, CAMCI C. Aerodynamic loss characteristics of a turbine blade with trailing edge coolant ejection: part 2 External aerodynamics, total pressure losses, and predictions [J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(2): 249-257.
- [4] MARTINI P, SCHULZ A, BAUER H J, et al. Film cooling effectiveness and heat transfer on the trailing edge cut-back of gas turbine airfoils with various internal cooling designs [J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128(1): 196-205.
- [5] MARTINI P, SCHULZ A, BAUER H J, et al. Detached eddy simulation of film cooling performance on the trailing edge cut-back of gas turbine airfoils [J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128(2): 292-299.
- [6] BARIGOZZI G, PERDICHIZZI A, RAVELLI S. Pressure side and cutback trailing edge film cooling in a linear nozzle vane cascade at different Mach numbers [J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 134(5): 051037.
- [7] BARIGOZZI G, ARMELLINI A, MUCIGNAT C, et al. Experimental investigation of the effects of blowing conditions and Mach number on the unsteady behavior of coolant ejection through a trailing edge cutback [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2012, 37: 37-50.
- [8] BARIGOZZI G, RAVELLI S, ARMELLINI A, et al. Effects of injection conditions and Mach number on unsteadiness arising within coolant jets over a pressure side vane surface [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 67: 1220-1230.
- [9] ABDEH H, BARIGOZZI G. A parametric investigation of vane pressure side cutback film cooling by dual luminophor PSP [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2018, 69: 106-116.
- [10] 曾军, 乔渭阳, 孙大伟, 等. 带尾缘劈缝冷气喷射的涡轮叶栅性能实验及计算 [J]. 推进技术, 2008, 29(6): 710-715.
- [11] ZENG Jun, QIAO Weiyang, SUN Dawei, et al. Numerical simulation and experiment for turbine cascade with trailing edge coolant injection [J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(6): 710-715.
- [11] 姚世传, 施臻臻, 刘正, 等. 叶片尾缘冷气喷射气动与传热性能分析 [J]. 热能动力工程, 2018, 33(5): 47-54.

(下转第 183 页)