

小弯管冲击冷却结构流场和温度场的场协同分析^{*}

赵鸿华^{1,2}, 宋双文¹, 王志凯¹, 姜世界¹

(1. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002;

2. 北京航空航天大学 航空发动机研究院, 北京 100191)

摘 要: 为研究回流燃烧室小弯管冲击冷却结构能量传递过程中对流换热的物理机制, 基于场协同理论, 对冲击孔径 d_i 、冲击孔流向间距 S 、冲击孔展向间距 P 耦合作用及冲击孔倾角 α_i 对小弯管冲击冷却结构换热特性的影响开展了场协同分析, 并对场协同分析结果进行了试验验证。研究表明: 协同角较小的区域主要分布在冲击腔内的流动滞止区、壁面射流区和滞止点, 换热效果较好; 随着 S/P 增大, 冲击腔内平均协同角先减小后增大, 在 S/P 为 0.8 时, 换热效果最佳; 随着 S/d_i 和 P/d_i 增大, 冲击腔内平均协同角增大, 换热效果减弱; 随着 α_i 增大, 冲击腔内平均协同角先增大后减小, 在冲击孔垂直壁面时换热效果最佳。

关键词: 回流燃烧室; 小弯管; 冲击冷却; 场协同理论; 换热特性

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2023) 04-2203055-07

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2203055

Field Synergy Between Flow Field and Temperature Field in Concave Wall Impingement Cooling Structure

ZHAO Hong-hua^{1,2}, SONG Shuang-wen¹, WANG Zhi-kai¹, JIANG Shi-jie¹

(1. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China;

2. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to study the physical mechanism of convective heat transfer in the process of energy transfer in the impingement cooling structure of concave wall in reverse flow combustor, based on the field synergy theory, the influences of the coupling effects of the impingement hole diameter d_i , the impingement hole flow spacing S , the impingement hole spanwise spacing P and the impingement hole inclination α_i on the heat transfer characteristics of the impingement cooling structure of concave wall were analyzed, and the results of the field synergy analysis were verified by experiments. The results show that the regions with small synergy angle are mainly distributed in the flow stagnation zone, wall jet zone and stagnation point in the impingement chamber, and the heat transfer effect is good. With the increase of S/P , the average synergy angle in the impingement chamber decreases first and then increases, and the heat transfer effect is the best when S/P is 0.8. With the increase of S/d_i and P/d_i , the average synergy angle in the impingement chamber increases, and the heat transfer effect weakens. With the increase of α_i , the average synergy angle increases first and then decreases, and the heat transfer effect is the best when the impingement hole is perpendicular to the wall.

Key words: Reverse flow combustor; Concave wall; Impingement cooling; Field synergy theory; Heat transfer characteristics

^{*} 收稿日期: 2022-03-16; 修订日期: 2022-09-26。

通讯作者: 赵鸿华, 博士生, 工程师, 研究领域为燃烧室设计。E-mail: 45052889@qq.com

引用格式: 赵鸿华, 宋双文, 王志凯, 等. 小弯管冲击冷却结构流场和温度场的场协同分析[J]. 推进技术, 2023, 44(4): 2203055. (ZHAO Hong-hua, SONG Shuang-wen, WANG Zhi-kai, et al. Field Synergy Between Flow Field and Temperature Field in Concave Wall Impingement Cooling Structure[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(4): 2203055.)

1 引言

与同等功率级直流燃烧室相比,回流燃烧室具有面容比大,需要冷却保护的火焰筒表面积大,高热负荷等特点。其常用的冷却结构小弯管型面曲率较大,若采用发散冷却结构则由于离心力的作用气膜无法均匀稳定地覆盖在小弯管热侧壁面上,导致壁面温度过高。小弯管结构一般采用双层壁的冲击冷却方式以满足工程需求,该方式具有较高的冷却效率,并且冷却后空气不与燃气掺混,可以二次利用冷却空气,使气流边界层变薄,并在小弯管外壁处产生强烈的扰动,是强化局部传热传质最有效的方法之一。

针对小弯管国内外目前开展了相关研究。文献[1]研究发现,与平板相比,凹形小弯管外壁会形成“Taylor Gortler”涡,使得流动更加剧烈,小弯管外壁换热增强。文献[2-3]用油流法显示了多个冲击孔交互下的壁面流谱,由于冲击射流是典型的高剪切流动,其流场具有不稳定性。文献[4]通过实验研究了 30° 、 60° 和 90° 三种射流孔倾角,结果表明非垂直射流减少了传热,但倾向于产生更均匀的传热分布。关于射流孔的尺寸,绝大多数阵列冲击射流研究的孔径大小保持均匀一致。关于孔间距离,文献[5]通过实验研究了顺排阵列射流孔的展向和流向距离对局部换热分布的影响。研究表明射流孔的流向间距和展向间距越大,局部换热系数越大,但会导致整体换热不均匀。文献[6]比较了高密度和低密度射流孔排布两种情况下的冲击射流冷却效果。研究发现当射流孔总面积一致时,射流孔排布越疏孔径越大,局部努赛尔数越大。

已有文献对于小弯管冲击冷却特性的研究工作主要集中在流场、努赛尔数的研究上,但无法反映小弯管冲击冷却结构强化传热的本质原因。文献[7-8]从流场和温度场相互配合的角度重新审视对流换热物理机制,在此基础上提出了换热强化的场协同原则。文献[9-11]全面地概述了场协同原理:速度与温度梯度之间的协同角越优,对流换热效果越好。文献[12]采用数值模拟验证了场协同原理能统一解释三种对流换热结构,说明场协同原理是一种最基本的对流换热的物理机制。文献[13]研究了对流传热的守恒、协同和耗散三大特性,揭示了它们的内在联系及其在能量和动量传输中的作用机制。文献[14]采用数值计算的方法对绝热条件下贴壁气膜冷却流场的速度场与温度场和壁面温比的分布进行了

分析,研究发现速度场与温度场的协同性能够对气膜冷却的影响规律进行说明。

文献[15]基于湍流基础模型以及 $k-\varepsilon$ 模型,构建了流动传热的能量和动量协同方程,表征了流动传热流场中热流与质量流之间的协同性以及对流换热机理,将对流换热的场协同原理由层流流动拓展到湍流流动。文献[16]针对层流和湍流强化传热,研究了流体质点矢量的协同程度,表征了强化传热多场协同特征和对流换热机理之间的相互作用,基于协同角 $\alpha, \beta, \varphi, \gamma, \theta$,建立了层流和湍流对流换热特性的统一评价标准。文献[17-18]基于多场协同理论和场协同原理对先进旋涡燃烧室中的速度场、温度场、压力场及其场协同角分布进行了数值计算,通过协同角云图更加直观地反映速度场与温度场的协同性,并对其流动和传热性能进行了综合评价。

综合分析国内外文献,目前关于回流燃烧室小弯管冲击冷却结构的场协同分析尚为空白。本文基于场协同理论,对小弯管冲击冷却结构流场及温度场进行协同分析,获得协同角随小弯管冲击冷却结构参数的变化规律,并对场协同分析结果进行了试验验证。

2 试验装置及试验系统

2.1 试验装置

回流燃烧室的结构示意图见图1,一般由燃烧室外机匣、燃烧室内机匣、火焰筒内外环、大小弯管等主要零件组成。从压气机轴向扩压器出来的空气,第一次转弯是空气沿燃烧室外机匣、燃烧室内机匣绕火焰筒头部转 180° 流动,第二次转弯是空气从火焰筒头部涡流器、内外环上各排孔进入火焰筒内燃烧,燃烧后的高温燃气经过掺混后在大小弯管内转 180° 流入涡轮部件。其优点是在尺寸和结构形式上可与离心压气机配合良好,可以缩短发动机的轴系,对压气机出口流场不敏感,燃烧室出口燃气温度分布相对均匀。其缺点是需冷却的火焰筒表面积相对较大,火焰筒通道高度小,存在转弯附加损失问题。且小弯管作为回流燃烧室的重要承温组件,由于型面曲率大,常规冷却气在离心力的作用下很难覆盖在小弯管表面,导致小弯管壁面温度过高,容易出现变形、烧蚀、裂纹、皱曲、局部掉块等故障。为了有效降低小弯管燃气侧壁温及温度梯度、提高其耐久性,设计了试验装置对小弯管冲击冷却结构开展系统性研究。

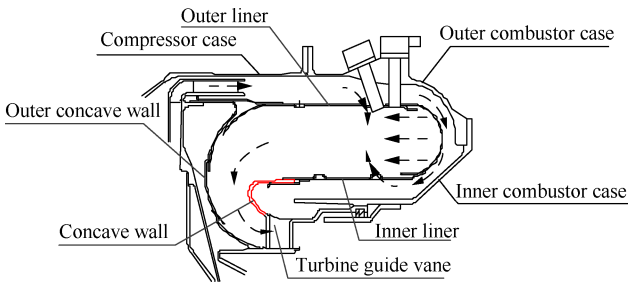


Fig. 1 Structure of reverse flow combustor

小弯管冲击冷却试验段如图 2 所示,由主流通道、次流通道、小弯管内外壁、红外观察窗等组成。主流通道为渐缩通道,根据真实回流燃烧室火焰筒真实流道简化得到,以确保主流完整地覆盖在小弯管外壁面,红外观察窗测量区域为两处矩形区域,可同时观测整个小弯管外壁流道面温度场。本文综合分析国内外文献选取影响小弯管冲击冷却结构换热特性的关键参数包括:冲击孔径 d_i 、冲击孔流向间距 S 、冲击孔展向间距 P 和冲击孔倾角 α_1 ,见图 3。共设计了 17 种不同结构共 4 种组合方案的试验件,在保证单位面积冷气量相同的条件下,计算方法见式(1),通过改变 S/P 、 S/d_i 、 P/d_i 和 α_1 ,研究不同结构参数耦合作用、主要结构参数对于换热特性的影响规律,试验方案见表 1。小弯管内壁厚为 0.7mm,小弯管外壁厚为 1.2mm,冲击高度为 3.76mm。试验段及试验件的加工材料为 06Cr18Ni9 不锈钢,冲击孔采用电火花方式进行加工,加工精度为 $\pm 0.04\text{mm}$ 。

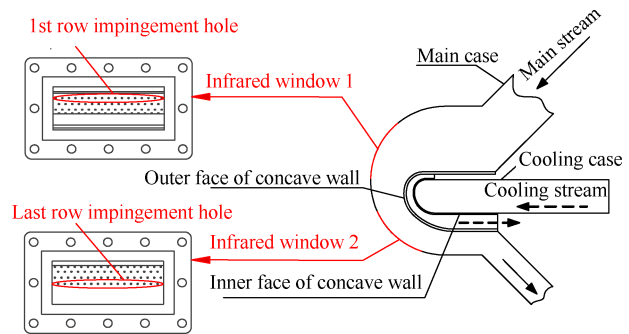


Fig. 2 Schematic of test section

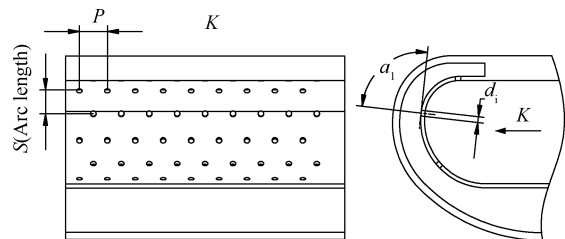


Fig. 3 Impingement cooling structure parameter of concave wall (K is right side view)

$$G_c = \frac{\pi d_i^2}{4} C_d \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot \rho} \quad (1)$$

Table 1 Structural parameters cases of test plates

No.	d_i/mm	S/mm	P/mm	$\alpha_1/(\text{^\circ})$	Case
1	1	5	5	90	Baseline
2	1	3.18	7.86	90	$S/P=0.4$
3	1	4.48	5.58	90	$S/P=0.8$
4	1	5.48	4.56	90	$S/P=1.2$
5	1	6.32	3.96	90	$S/P=1.6$
6	1.25	5	7.71	90	$S/d_i=4.0$
7	0.83	5	3.52	90	$S/d_i=6.0$
8	0.71	5	2.62	90	$S/d_i=7.0$
9	0.63	5	2	90	$S/d_i=8.0$
10	1.25	7.71	5	90	$P/d_i=4.0$
11	0.83	3.52	5	90	$P/d_i=6.0$
12	0.71	2.62	5	90	$P/d_i=7.0$
13	0.63	2	5	90	$P/d_i=8.0$
14	1	5	5	60	α_1
15	1	5	5	75	α_1
16	1	5	5	105	α_1
17	1	5	5	120	α_1

2.2 试验系统

试验系统如图 4 所示,主要由主管路系统、气源系统、电加温系统、测试系统、操作系统和试验段等组成。主流由空气压缩机供气,经过储气罐后由质量流量计测量其流量,随后通过电加温器将气流加热至试验要求温度。同时,次流由室内小型空气压缩机供气,其流量由质量流量计进行测量。

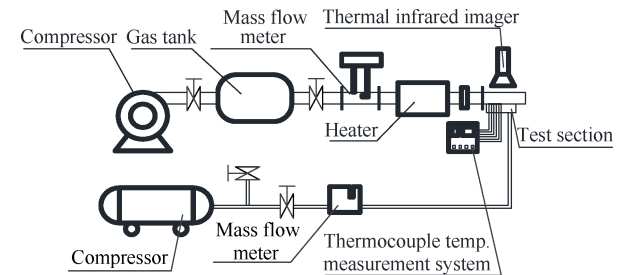


Fig. 4 Schematic of experiment system

试验时,主流和次流温度由单点热电偶测量,小弯管外壁面温度通过红外热像仪进行测温,红外观察窗上设有氟化钡光学玻璃,氟化钡玻璃具有较好的光学透过性,折射率和色散随温度变化小,可以较好地透射小弯管外壁面温度发射出的红外光线。为保证壁温测量精度,将热电偶沿流向均匀分布在小弯管外壁热侧壁面,共计 6 个测量点,对红外热像仪测量

的壁温进行实时校准。次流通道压力通过总压探针测量,流量计测量数据和热电偶信号由VXI数采系统完成采集和处理。试验过程中,次流温度为室温,基本稳定在23℃左右,主流温度采用电加热器进行调节,保持为(200±1)℃。根据工程实际,主流进口质量流量控制在(100±1)g/s,次流进口压力通过压力调节阀保持为(5000±50)Pa。

2.3 红外热像仪校验试验

红外热像仪的型号为ThermoVision A40M(如图5所示),沿小弯管外壁中心线,红外校验试验时沿流向距离第1排冲击孔冲击点0mm,5mm,10mm,15mm,20mm,25mm位置分别布置了6个热电偶,用于对红外热像仪进行校验。红外热像仪的校验过程如下:①封闭红外热像仪校验试验的冲击孔板上的冲击孔;②将次流通道阀门关闭;③分别将主流温度升高至50℃,70℃,90℃,110℃,130℃,150℃,170℃,200℃,并在每个主流温度下同时用热电偶及红外热像仪测量小弯管外壁热侧壁面温度并记录温度数据;④将热电偶的测量结果与红外热像仪的测量结果进行对比,采用最小二乘法拟合得到两者关系式,从而得出以热电偶结果校正红外热像仪测量结果的修正公式。在主流温度相同的条件下对各个位置热电偶所测壁温值和红外热像仪校正后的壁温进行比较,比较结果如图6所示。



Fig. 5 ThermoVision A40M

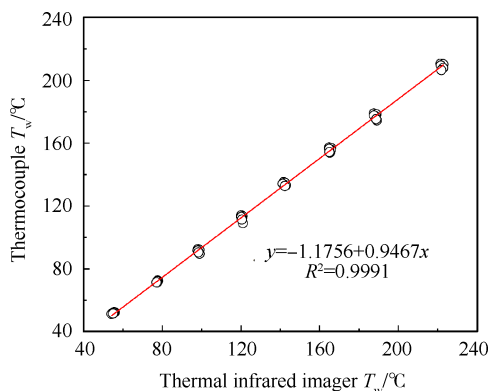


Fig. 6 Temperature calibration of thermal infrared imager

3 场协同分析与试验验证

3.1 场协同理论

关于对流换热问题,由于流场是一个矢量场,且流体的温度具有非均匀性,也存在一个温度场,因此对流换热域中包含两个矢量场,即速度场 $u(x, y, z)$ 和温度梯度场 $\nabla T(x, y, z)$,或3个标量场,即速度绝对值 $|u|(x, y, z)$,温度梯度绝对值 $|\nabla T|(x, y, z)$ 及速度矢量与温度梯度夹角的余弦场 $\cos\beta(x, y, z)$,要使对流换热系数增大应尽量减小 u 与 ∇T 之间的夹角,即减小协同角^[8]。文献[19-20]指出,在非层流流动和三维传热中,场协同理论依然可行,协同角的表达式为

$$\beta = \arccos \frac{\mathbf{u} \cdot \nabla T}{|\mathbf{u}| |\nabla T|} = \arccos \frac{u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2}} \quad (2)$$

式中得到的 β 为弧度制,对应角度制为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

为更好地量化比较,变换为角度制。结合文献[21]得到改进后的式(3),其中 β 取值为 $0^\circ \sim 90^\circ$,协同角 β 值越接近 90° ,场协同效果越不理想。

$$\beta = \arccos \frac{\mathbf{u} \cdot \nabla T}{|\mathbf{u}| |\nabla T|} = \frac{180}{\pi} \arccos \left| \frac{u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2}} \right| \quad (3)$$

3.2 场协同与试验结果分析

采用无量纲化冷却效率反映不同方案对换热效果的影响规律,即引入表1中某一组各方案综合冷却效率 η 与该组方案中最大综合冷却效率 $\eta_{\max}$ 之比,记为 $\eta/\eta_{\max}$ 。为了更清楚直观地解释小弯管冲击腔内场协同角 β 的分布状况,本文采用文献[22]中的数值模拟方法,由于不同方案计算域周期长度不同,整个计算域网格数量为190万~540万。CFD数值计算边界条件为:次流进口为压力进口,热流进口为速度进口;出口选用压力出口,常压101325Pa;两端侧面采用平移周期性边界条件;小弯管外壁面为耦合壁面、无滑移边界,其他壁面绝热。采用分离隐式求解器进行稳态三维流-热耦合计算,选用Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型和增强型壁面函数;压力-速度耦合项采用

SIMPLEC 算法;对流项差分格式选用二阶迎风格式;解的收敛标准为:各项残差小于 10^{-5} ,小弯管外壁面平均温度相对变化量小于 10^{-6} 。

在次流进口压力为 5kPa 时,选取小弯管冲击腔内冲击孔中心截面的协同角 β 分布图(如图 7 所示),对基准方案进行分析,其中图 7(a)为基准方案冲击腔内冲击孔中心截面流线分布,图 7(b)为等温线分布,图 7(c)为速度矢量与温度梯度的协同角 β 。由图可见,协同角 β 较小的区域主要分布在冲击孔流动滞止区、壁面射流区和滞止点(见图 8)。表明三个区域的流场与温度场协同程度较好,同时也表明回流区具有较好的场协同性,有利于强化传热,主要原因在于流线与等温线之间存在夹角。除上述三个区域外,冲击腔内的协同角 β 相对较大,这是由于除上述三个区域的大部分流线与等温线平行,速度矢量与温度梯度的夹角接近 90° 。

图 7(c)还显示弯管内的场协同角分布整体上较小,即弯管结构内换热效果好,表明回流燃烧室弯管结构具有良好的对流换热性能。

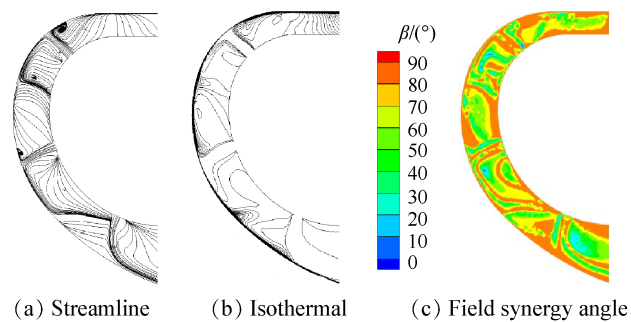


Fig. 7 Streamline, isothermal and field synergy angle in the impingement hole center section

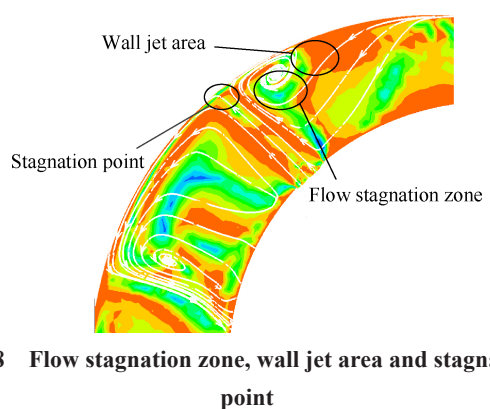


Fig. 8 Flow stagnation zone, wall jet area and stagnation point

3.2.1 不同 S/P 的影响分析

图 9 为冲击腔内平均协同角 β 值和无量纲化冷却效率 $\eta/\eta_{\max}$ 随 S/P 的变化规律。由图可知,随着 S/P 增大,协同角 β 先减小后增大, $\eta/\eta_{\max}$ 先增大后减小。

表明当 S/P 从 0.4 增大到 0.8 时,速度矢量与温度梯度的场协同性逐渐变好,换热效果增强。随着 S/P 进一步增大,受上游气流的影响,流向方向冲击壁面带来的扰动涡减少,近壁面的流场方向更趋于贴壁流,与温度场变化方向的角度趋向于垂直,且流向方向的射流气体与小弯管外壁面换热不均匀,因此冲击腔内近壁面沿流向出现协同角 β 较大的区域,影响了整体换热效果,导致冷却效率降低。

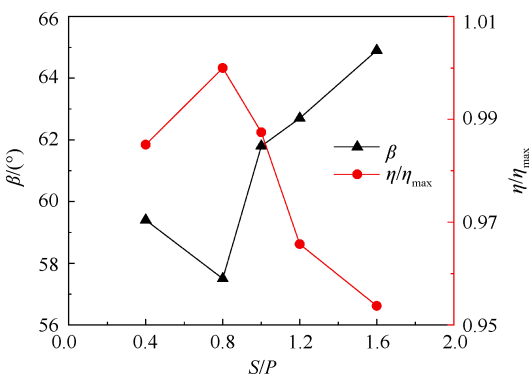


Fig. 9 Variation of synergy angle and $\eta/\eta_{\max}$ with S/P

3.2.2 不同 S/d_i 的影响分析

图 10 为冲击腔内平均协同角 β 值和无量纲化冷却效率 $\eta/\eta_{\max}$ 随 S/d_i 的变化规律。由图可知,随着 S/d_i 增大,协同角 β 逐渐增大, $\eta/\eta_{\max}$ 逐渐减小。表明随着 S/d_i 的增大,速度矢量与温度梯度的场协同性逐渐变差,换热效果减弱。这是因为在单位面积冷气量相同的条件下,随着 S/d_i 增大, P 和 d_i 将同时减小,单个冲击孔流量减小,无法冲击壁面形成充分发展的扰动涡,且射流气体被上游堆积的横向气流影响,下游近壁面的流场方向更趋于贴壁流,与温度场变化方向的角度趋向于垂直,无法与下游小弯管外壁面进行换热,使得冲击腔内近壁面沿流向后半段出现协同角 β 较大的区域,影响了整体换热效果。

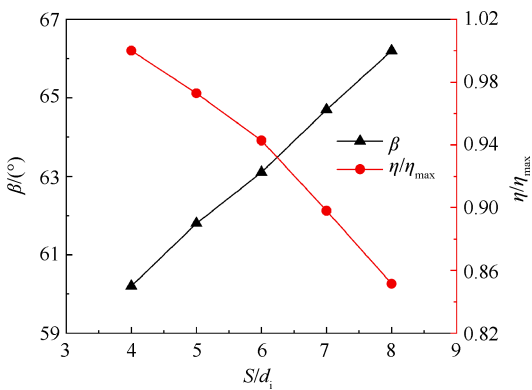


Fig. 10 Variation of synergy angle and $\eta/\eta_{\max}$ with S/d_i

3.2.3 不同 P/d_i 的影响分析

图 11 为冲击腔内平均协同角 β 值和无量纲化冷却效率 $\eta/\eta_{\max}$ 随 P/d_i 的变化规律,由图可知,随着 P/d_i 增大,协同角 β 逐渐增大, $\eta/\eta_{\max}$ 逐渐减小。表明随着 P/d_i 的增大,速度矢量与温度梯度的场协同性逐渐变差,换热效果减弱。这是因为在单位面积冷气量相同的条件下,随着 P/d_i 增大, S 和 d_i 将同时减小,单个冲击孔流量减小,冲击腔内沿流向方向换热更加均匀,但由于上游横向气流的影响,射流气体被上游堆积的横向气流影响,导致下游近壁面的流场方向更趋于贴壁流,与温度场变化方向的夹角趋向于垂直,无法与下游小弯管外壁面进行充分换热,使得冲击腔内近壁面沿流向后半段出现协同角 β 较大的区域,影响了整体换热效果。

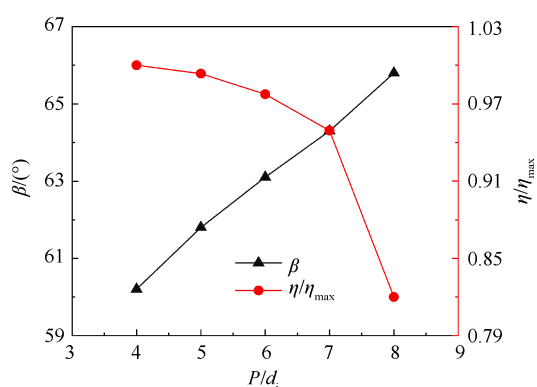


Fig. 11 Variation of synergy angle and $\eta/\eta_{\max}$ with P/d_i

3.2.4 不同 α_1 的影响分析

图 12 为冲击腔内平均协同角 β 值和无量纲化冷却效率 $\eta/\eta_{\max}$ 随 α_1 的变化规律,由图可知,随着 α_1 增大, $\eta/\eta_{\max}$ 先增大后减小,协同角 β 先减小后增大,在 $\alpha_1=90^\circ$ 时达到最大值,表明此时速度矢量与温度梯度的场协同性最佳,换热效果最好。这是因为随着 α_1 逐渐增大到 90° ,冲击孔射流角度逐渐趋于垂直,冲击壁面形成更充分的扰动涡,冲击点附近近壁面的流场方向更趋于扰动流,与温度场变化方向的角度沿程不断变化,冲击腔内近壁面协同角 β 较小的区域面积明显增大,增强了换热效果。当 $\alpha_1>90^\circ$ 时,随着 α_1 增大,冲击孔射流方向与冲击腔内气流流动方向趋于相同,近壁面的流场方向更趋于贴壁流,与温度场变化方向的角度更趋于垂直,因此近壁面协同角 β 较大的区域面积增大,导致整体换热效果变差。

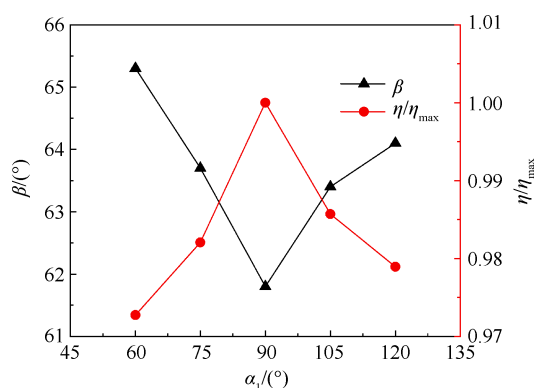


Fig. 12 Variation of synergy angle and $\eta/\eta_{\max}$ with α_1

4 结 论

本文基于场协同理论,采用数值模拟与试验相结合的方法对回流燃烧室小弯管冲击冷却结构流场与温度场的协同性进行了研究,得到结论如下:

(1)小弯管冲击冷却结构的冲击孔流动滞止区、壁面射流区和滞止点协同角 β 较小,速度场与温度场的协同性较优。

(2)随着 S/P 增大, $\eta/\eta_{\max}$ 先增大后减小,冲击腔内平均协同角 β 值先减小后增大,在 $S/P=0.8$ 时换热效果最佳。

(3)随着 S/d_i , P/d_i 增大,冲击腔内平均协同角 β 值增大,速度场与温度场的协同性变差,整体换热效果减弱, $\eta/\eta_{\max}$ 减小。

(4)随着 α_1 增大,冲击腔内平均协同角 β 先减小后增大, $\eta/\eta_{\max}$ 先增大后减小,在 $\alpha_1=90^\circ$ 时速度场与温度场的协同性最佳,换热效果最优。

参考文献

- [1] Kotulla M, Wagner G. The Transient Liquid Crystal Technique: Influence of Surface Curvature and Finite Wall Thickness[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2004, 127(1): 175-182.
- [2] Rajesh Kumar Panda, Prasad B V S S. Computational and Experimental Study of Conjugate Heat Transfer from a Flat Plate with an Impinging Jet[C]. *Glasgow: Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air*, 2010.
- [3] Rajesh Kumar Panda, Prasad B V S S. Flow Visualization and Conjugate Heat Transfer Study from Shower Head Impinging Jets [C]. *Vancouver: Proceedings of ASME Turbo Expo 2011: Power for Land, Sea, and Air*, 2011.
- [4] El-Gabry L A, Kaminski D A. Experimental Investigation of Local Heat Transfer Distribution on Smooth and

- Roughened Surfaces under an Array of Angled Impinging Jets[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2005, 127(3).
- [5] Katti V, Prabhu S V. Influence of Spanwise Pitch on Local Heat Transfer Distribution for In-Line Arrays of Circular Jets with Spent Air Flow in Two Opposite Directions[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2008, 33(1): 84-95.
- [6] Bailey J C, Bunker R S. Local Heat Transfer and Flow Distributions for Impinging Jet Arrays of Dense and Sparse Extent [C]. *Amsterdam: Proceedings of ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air*, 2002.
- [7] 过增元, 魏 封, 程新广. 换热器强化的场协同原则[J]. *科学通报*, 2003, 48(22): 2324-2327.
- [8] 过增元. 对流换热的物理机制及控制[J]. *科学通报*, 2001, 45(19): 2118-2122.
- [9] Guo Z Y, Wang S. Novel Concept and Approaches of Heat Transfer Enhancement [C]. *New York: Proceedings of Symposium on Energy Engineering in the 21st Century*, 2000.
- [10] Guo Z Y, Tao W Q, Shah R K. The Field Synergy (Coordination) Principle and Its Applications in Enhancing Single Phase Convective Heat Transfer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(9): 1797-1807.
- [11] Tao W Q, Guo Z Y, Wang B X. Field Synergy Principle for Enhancing Convective Heat Transfer—Its Extension and Numerical Verifications[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(18): 3849-3856.
- [12] 何雅玲, 陶文铨. 强化单相对流换热的基本机制[J]. *机械工程学报*, 2009(3): 27-38.
- [13] 刘 伟, 肖 辉. 基于增强场协同与减少耗散的对流传热强化理论研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2021, 51(10): 1166-1177.
- [14] 胡娅萍, 吉洪湖. 平壁气膜冷却流场与温度场的协同分析[J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(1): 94-96.
- [15] 刘 伟, 刘志春, 黄素逸. 湍流换热的场物理量协同与传热强化分析[J]. *科学通报*, 2010, 55(3): 281-288.
- [16] 刘 伟, 刘志春, 马 雷. 多场协同原理在管内对流强化传热性能评价中的应用[J]. *科学通报*, 2012, 57(10): 867-874.
- [17] 曾卓雄, 王志凯, 田佳莹, 等. 先进旋涡燃烧室多场协同分析[J]. *推进技术*, 2015, 36(12): 1859-1867. (ZENG Zhuo-xiong, WANG Zhi-kai, TIAN Jia-ying, et al. Numerical Analysis of Multi-Field Synergy in Advanced Vortex Combustor [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(12): 1859-1867.)
- [18] 王志凯, 曾卓雄, 徐义华. 先进旋涡燃烧室速度场与温度场协同数值研究[J]. *推进技术*, 2015, 36(6): 876-883. (WANG Zhi-kai, ZENG Zhuo-xiong, XU Yi-hua. Numerical Analysis of Field Synergy Between Velocity Field and Temperature Field in Advanced Vortex Combustor [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(6): 876-883.)
- [19] 黄德斌, 邓先和, 朱冬生, 等. 气流横向冲刷管束湍流换热的场协同分析[J]. *化学工程*, 2006, 34(7): 13-16.
- [20] 鄂加强, 张双利, 傅学正, 等. 醇基燃料燃烧器的性能和场协同分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(8): 66-71.
- [21] 冷学礼, 张冠敏, 田茂诚, 等. 场协同原理在对流换热中的应用方法[J]. *热能动力工程*, 2009, 24(3): 352-354.
- [22] 赵鸿华, 宋双文, 王志凯. 基于NSGA-II算法的小弯管冲击冷却多目标优化[J/OL]. *航空动力学报*, 2021, DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.20210688.

(编辑:朱立影)