

某型高温涡轮叶片冷却性能的实验研究

赵振, 高建民, 徐亮, 席雷, 李云龙

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了有效监测高温涡轮叶片的安全运行状态, 基于响应面模型对某型高温涡轮叶片进行了实验研究, 旨在探究关键工况参数对其冷却性能的影响, 以提供可靠的数据支持。采用中心复合表面设计对某型叶片的工况参数进行设计, 研究了主流入口温度、主流出口压力、主流进出口压比、冷气与主流温度比及流量比对某型叶片冷却效率分布、无量纲温度分布及温度非均匀度的影响规律, 并在此基础上构建了响应面模型, 探究了工况参数的耦合作用对某型叶片冷却性能的综合影响。实验结果表明: 拟合得到的响应面模型有较高的精度, 其均方根误差均小于 0.001, 决定系数均大于 0.99; 主流入口温度和出口压力对叶片冷却性能的影响均较小; 在实验工况范围内, 当主流进出口压比、冷气与主流温度比及流量比分别从 1.3~1.5、0.6~0.7、3~8 增大时, 叶片的平均冷却效率分别增大了 9.67%、9.39%、30.49%; 叶片的平均无量纲温度分别提高了 2.98%, 降低了 1.34%、3.78%; 叶片的温度非均匀度分别降低了 2.69%、28.79%, 提高了 50.27%。

关键词: 涡轮叶片; 冷却性能; 响应面模型; 耦合作用

中图分类号: TK172 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202401005 **文章编号:** 0253-987X(2024)01-0054-13

Experimental Study on Cooling Performance of a High Temperature Turbine Blade

ZHAO Zhen, GAO Jianmin, XU Liang, XI Lei, LI Yunlong

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To effectively monitor the operation safety status of high-temperature turbine blades, an experimental study was conducted, focusing on a high-temperature blade using the response surface model. The aim was to investigate the impact of key working condition parameters on its cooling performance, thereby providing reliable data support. The central composite design was applied to the experimental design of the working parameters of the blade. The influence of mainstream inlet temperature, mainstream outlet pressure, pressure ratio of mainstream inlet to outlet, temperature ratio of mainstream to cooling air and flow ratio on the cooling efficiency distribution, dimensionless temperature distribution and temperature non-uniformity of the blade was experimentally studied. Subsequently, a response surface model was constructed to comprehensively assess the combined effects of the working parameters on the blade's cooling performance. The results demonstrate the high accuracy of the obtained response surface model, with root

收稿日期: 2023-02-22。 作者简介: 赵振(1990—), 男, 博士生; 席雷(通信作者), 男, 助理教授。 基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目(2022JQ-545); 中国博士后科学基金资助项目(2021M702573); 国家重点研发计划资助项目(2021YFF0602301)。

网络出版时间: 2023-10-17

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20231016.1355.004>

mean square errors below 0.001 and coefficient of determination exceeding 0.99. The inlet temperature and outlet pressure of the mainstream of the mainstream were found to have minimal impact on the cooling performance of the blade. However, within the range of operating parameters, when the inlet/outlet pressure ratio of the mainstream, the temperature ratio of the cooling air to the mainstream, and the flow ratio increase from 1.3 to 1.5, 0.6 to 0.7, and 3 to 8, respectively. The average cooling efficiency of the blade is increased by 9.67%, 9.39% and 30.49%, respectively. The average dimensionless temperature of the blade is increased by 2.98%, decreased by 1.34% and 3.78%, respectively. The temperature non-uniformity of the blade is decreased by 2.69% and 28.79%, increased by 50.27%, respectively.

Keywords: turbine blade; cooling performance; response surface model; coupling effect; experimental study

高温涡轮叶片是重型燃气轮机工作环境最恶劣、结构最复杂的零件之一^[1]。由于国外的技术封锁和限制,我国的高温涡轮叶片冷却技术还较为落后,面临着基础数据缺失和亟需提高设计效率和精度等问题。近年来,以数据为驱动,基于响应面模型等近似模型获得系统性高温涡轮叶片冷却性能的基础数据以及对涡轮叶片的冷却结构进行优化成为了未来叶片冷却技术的重点和前沿。这对突破国外企业的行业垄断,对完成我国燃气轮机高温涡轮叶片的自主设计和发展尤为重要。

国内外学者针对叶片工况参数对叶片冷却性能的影响进行了大量的研究。钟博等的实验结果表明,叶片的综合冷却效率会随着流量比和主流进出口压比的增大而提高,主流与冷气温度比对叶片冷却性能的影响不大^[2]。王培泉等通过实验的方式研究了流量比、冷气与主流温度比、主流进口雷诺数和湍流度对叶片冷却性能的影响规律^[3]。邓丽君等的研究表明,流量比对叶片冷却性能有较大影响,而冷气与主流温度比和主流进出口压比对叶片的冷却性能影响不大^[4]。李广超等采用红外测温技术研究了流量比对叶片冷却性能的影响规律,实验结果表明流量比变化对叶片前缘和压力面冷却性能的影响均明显大于叶片的吸力面^[5]。马超等采用红外热像仪在高温的叶栅实验平台上分别研究了空气冷却和蒸汽冷却条件下冷气与主流流量比和温度比对叶片吸力面冷却效率分布和无量纲温度分布的影响规律^[6-7]。西北工业大学朱惠人教授的研究团队也对叶栅环境下叶片的冷却效率展开了一系列实验研究^[8-10]。Najjar等采用了3种冷却技术对叶栅环境下叶片的综合冷却性能进行了研究,结果表明闭环蒸汽冷却比空气冷却和开路蒸汽冷却具有更好的综合冷却性能^[11]。Nasir等通过实验研究了高马赫数

下不同湍流度和出口雷诺数对叶栅环境中涡轮叶片表面传热分布的影响,结果表明高湍流度增强了叶片压力侧和吸力侧的传热^[12]。Dees等实验研究了叶栅环境下工况参数和叶片的几何参数等对叶片冷却性能的影响规律^[13-15]。吕颂等探究了3种工况参数(冷气与主流流量比、冷气与主流温度比及主流雷诺数)对高温涡轮叶片冷却性能的影响,并提出一种新型的固定截距的多元线性回归分析方法^[16-17]。黄朝晖等采用流-热-固耦合的方法,对某型涡轮叶片的流动、传热以及应力分布等进行了数值研究,并对叶片进行了改型^[18]。

上述研究对叶片冷却性能的定义大多仅限于叶片的冷却效率,这已不能满足对叶片冷却性能的研究;传统的叶片经验公式的决定系数较低,对涡轮叶片冷却性能的分析还停留在单变量分析方法,工况参数间的交互作用对叶片冷却性能的影响规律还有待挖掘。响应面模型具有较高的拟合精度,可以用来分析工况参数之间的耦合作用^[19-22]。因此,本文针对我国的涡轮叶片冷却技术面临着基础数据缺乏这一问题,采用实验设计和响应面模型相结合的方法获得某型高温涡轮叶片冷却性能系统性的实验数据。首先,加入叶片的无量纲温度和温度非均匀度等对叶片的冷却性能进行综合评判。然后,针对实验成本昂贵、实验变量多等问题,提出对实验工况进行设计,对某型高温涡轮叶片进行实验研究,并采用响应面模型获得显性的经验公式和包含参数变量及响应的叶片冷却性能的数据表,科学并合理地用较少的实验次数达到实验要求。最后,借助获得的近似模型,一方面,可以探究工况参数及其耦合作用对某型叶片冷却性能的影响规律;另一方面,可以准确预测实验工况范围内某型叶片的冷却性能,确保其安全运行。研究结果可为未来新型高温涡轮叶片冷

却性能的研究提供参考和借鉴。

1 物理模型和实验方法

1.1 实验原理

高温涡轮叶片冷却性能实验的目的是探究不同工况参数下高温涡轮叶片表面的无量纲温度及冷却效率分布。燃气轮机主要由压气机、燃烧室和涡轮 3 个部件组成,其基本工作原理是:利用空气作为工作介质,通过燃烧将燃料的化学能转换成机械能,从而获得动力或推力的热动力装置。需提供与实际叶

片在燃气轮机涡轮内相似的环境,即叶栅环境和高温流场。因此,本文关于高温涡轮叶片的实验采用空气压缩机模拟压气机,空气加热器模拟燃烧室以及实验段模拟叶栅流道。根据上述实验目的和设计原理,高温涡轮叶片冷却性能的实验系统主要由主流气流、主流气流加热装置、整流段、叶栅实验段、冷气气流、冷气气流加热装置、数据采集系统、降温排气系统以及若干个动作阀门等部分组成^[23-24]。高温涡轮叶片冷却性能实验原理如图 1 所示。

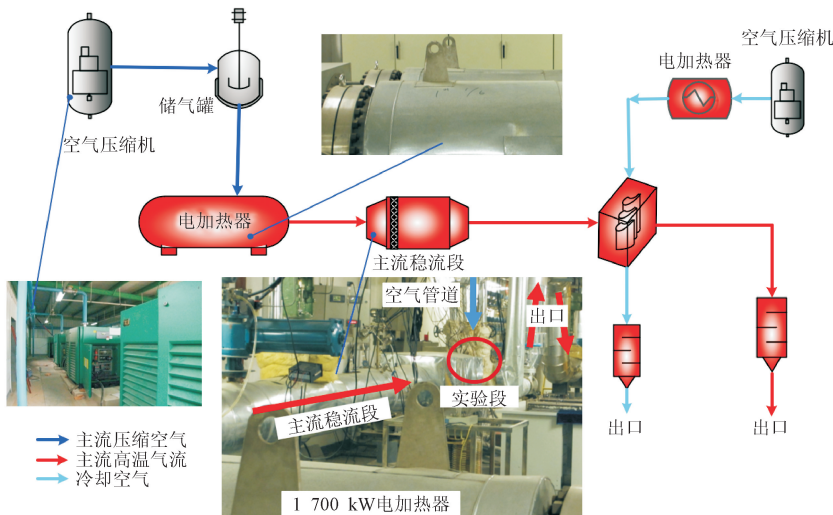


图 1 高温涡轮叶片冷却性能的实验原理

Fig. 1 Experimental schematic diagram of cooling performance of the high temperature turbine blade

1.2 实验对象

图 2 给出了某型叶片实验的实验段整体,由图 2 可知,主流气流跟冷气气流不混合,主流气流沿着红色箭头的方向流入并流出,冷气气流沿着蓝色箭头的方向进行流动。用保温棉对整个实验段进行了包裹,这样可以有效减小管道表面和实验段热量的散失,以保证实验的准确性。

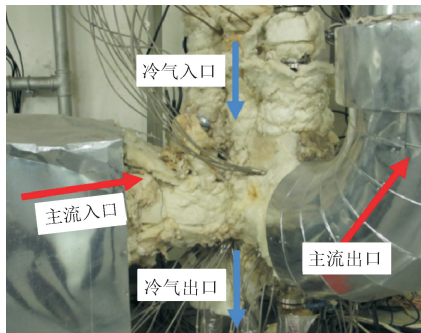


图 2 实验段 1 的整体

Fig. 2 Overall diagram of the test section

图 3 给出了某型叶片及其冷却结构,由图 3 可知,从叶片的前缘到尾缘方向,有序地分布了 5 个直通的冷却通道。某型叶片是以某 F 级燃气轮机第一级静叶的中截面拉伸而成的直叶片,材质为不锈钢 304(1Cr18Ni9Ti),热导率为 16.9 W/(m·K),耐温可达 1 023~1 073 K;叶片的弦长为 123 mm,高度为 83 mm;除了没有冷却结构的尾缘部分,叶片的壁面厚度为 6 mm,冷却通道之间的壁面厚度为

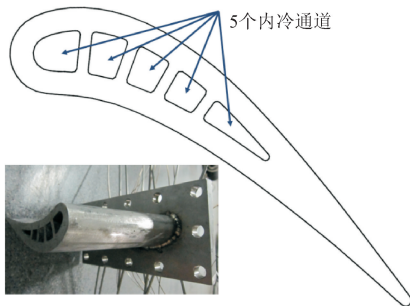


图 3 叶片及其冷却结构

Fig. 3 The blade and its cooling structure

3 mm;冷却通道的当量直径从前缘到尾缘依次为 0.010 9、0.009 9、0.009 3、0.008 7、0.006 9 m。此外,5 个内冷通道的冷气流量是根据每个通道当量直径的占比进行流量分配的。

图 4 给出了某型叶片的叶栅流道,由图 4(b)可知,真实的叶栅环境是由多个叶片组成的,为了研究方便,将其简化为红色虚线矩形所示的实验模型。为了保证流动的周期性,在实验叶片的两侧分别布置了一个实心叶片,实心叶片与实验叶片的区别是没有冷却结构。实心叶片的外侧分别扩展了半个流道,从而构成了一个具有三流道的周期性叶栅。此外,为了研究方便,实验叶片为直叶片,因此叶栅流道也为直流道。

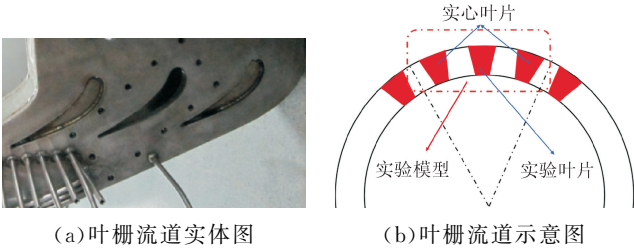
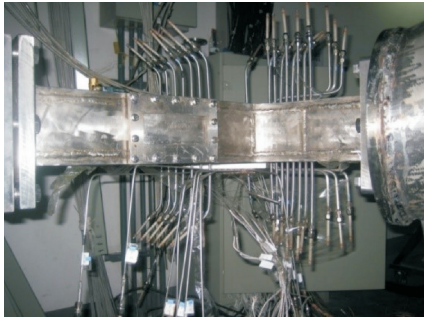
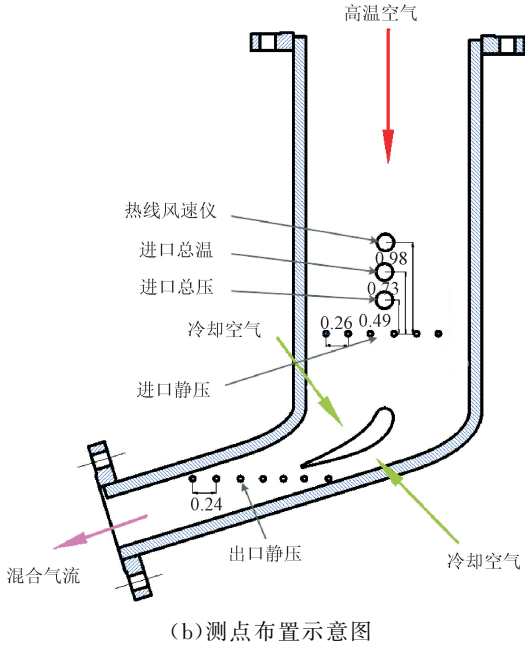


图 4 某型叶片的叶栅流道
Fig. 4 Cascade flow channel of the blade

图 5 给出了某型叶片实验段的测点布置图,由图 5(a)可知,在主流的入口分别布置了一个总温测点、一个总压测点和 12 个静压测点,其中,在通道的上侧和下侧分别均布了 6 个静压测点;在主流出口通道的上侧和下侧分别均布了 7 个静压测点。此外,在主流入口和冷气入口分别布置了一个流量计。图 5(b)给出了测点的具体位置,为了方便与其他文献的对比研究,将叶片的弦长作为除数对测点的位置进行了无量纲化处理,如主流入口静压测点和出口静压测点之间的间距分别为叶片弦长的 0.26 倍和 0.24 倍。此外,冷气侧的测点布置较为简单,所以并未给出示意图,冷气入口布置了 2 个总温测点和 6 个静压测点。



(a)测点布置实体图



(b)测点布置示意图
图 5 某型叶片实验段的测点布置
Fig. 5 Arrangement of measuring points in test section of the blade

为了确保实验数据的准确性,需要对实验的数据进行不确定度分析。表 1 给出了叶片实验的测量参数、仪器和仪器的量程和精度,表中给出的测量参数均为直接变量。通过直接变量的不确定度计算可得,间接变量叶片的冷却效率、无量纲温度和温度非均匀度的不确定度分别为 3.7%、5.4%和 6.3%。这表明本文有关叶片冷却性能实验的测量结果是可靠的。

表 1 叶片实验的测量参数和仪器及仪器的量程和精度

Table 1 Measurement parameters and instruments for the blade experiment			
测量参数	测量仪器	量程	精度
中截面温度	K 型热电偶	0~1 000 ℃	±1.5 ℃
总温	K 型热电偶	0~1 000 ℃	±1.5 ℃
总压	压力变送器	0~690 kPa	±0.075 %
进出口压力	压力变送器	±37.4 kPa	±0.075 %
中截面压力	压力变送器	±186.8 kPa	±0.075 %
冷气流量	涡街流量计	0~500 N·m ³ ·h ⁻¹	±2 %
主流流量	V 锥流量计	0~12 000	±2 %
		N·m ³ ·h ⁻¹	

图 6 给出了某型叶片的测点布置图,在叶片的中截面均匀间隔地布置了 12 个温度测点和 14 个压力测点,通过热电偶引线将温度信号从叶片中部引出到叶片的上侧位置,然后连接到相应的温度采集

点。表 2 给出了温度测点和压力测点在叶片中截面的具体位置,其中, $S/S_{\max} = 0$ 表示叶片的前缘滞止点, $S/S_{\max} = 1$ 和 $S/S_{\max} = -1$ 均表示叶片的尾缘, $S/S_{\max} < 0$ 表示测点处于叶片的压力面,而 $S/S_{\max} > 0$ 表示测点处于叶片的吸力面。

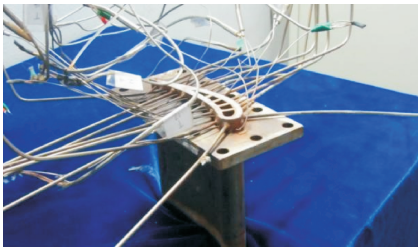


图 6 叶片表面的测点布置

Fig. 6 Arrangement of measuring points on the blade surface

表 2 叶片中截面温度和压力测点的分布

Table 2 Distribution of temperature and pressure measuring points in the middle section of the blade

温度测点	$S \cdot S_{\max}^{-1}$	压力测点	$S \cdot S_{\max}^{-1}$
T_1	-0.924	p_1	-0.861
T_2	-0.681	p_2	-0.742
T_3	-0.553	p_3	-0.613
T_4	-0.314	p_4	-0.496
T_5	-0.192	p_5	-0.371
T_6	-0.056	p_6	0.023
T_7	0.361	p_7	0.223
T_8	0.453	p_8	0.314
T_9	0.552	p_9	0.412
T_{10}	0.653	p_{10}	0.496
T_{11}	0.759	p_{11}	0.592
T_{12}	0.858	p_{12}	0.736
		p_{13}	0.815
		p_{14}	0.921

1.3 实验数据的处理

实验过程中,沿着叶片的中截面分布了 N 个温度测点,从而获得叶片在不同工况下的冷却效率分布和无量纲温度分布等,叶片的冷却效率公式如下

$$\epsilon = \frac{T_{gi} - T_w}{T_{gi} - T_{ci}} \tag{1}$$

式中: T_{gi} 为主流的入口温度/K; T_w 为叶片中截面的温度/K; T_{ci} 为冷气的入口温度/K。

叶片的平均冷却效率公式如下

$$\epsilon_{ave} = \sum_{i=1}^N \epsilon_i / N \tag{2}$$

叶片表面的无量纲温度公式如下

$$\eta = T_w / T_{gi} \tag{3}$$

叶片的平均温度公式如下

$$T_{wave} = \sum_{i=1}^N T_{wi} / N \tag{4}$$

当叶片的温度为平均温度时,叶片的平均无量纲温度公式如下

$$\eta_{ave} = T_{wave} / T_{gi} \tag{5}$$

衡量叶片冷却温度梯度的参数为温度非均匀度,温度非均匀度越高表示叶片表面的温度分布越不均匀,公式^[25]如下

$$\zeta = \sqrt{\sum_{i=1}^N (T_{wi} - T_{wave})^2 / N} / T_{wave} \tag{6}$$

1.4 叶片冷却性能的响应面模型

响应面模型(RSM)可通过对局部设计点进行实验,得到全局范围内设计变量与响应之间的显式函数关系^[26]。系统的响应与设计变量之间满足如下关系

$$Y = f(X) + \omega = X\beta + \omega \tag{7}$$

式中: Y 为响应; X 为设计变量; $f(X)$ 为目标的近似函数; β 为拟合系数; ω 为预测误差。

近似函数 $f(x)$ 选取常用的具有较高准确性的二阶多项式响应面模型,公式如下

$$f(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j \tag{8}$$

式中:系数 $\beta = [\beta_0, \dots, \beta_k, \beta_{11}, \dots, \beta_{kk}, \beta_{12}, \dots, \beta_{(k-1)k}]^T$; x_i 和 x_j 是设计变量; k 为设计变量的个数。

为了评价获得的响应面模型对实验数据的拟合精度,选取均方根误差(R_{MSE})和决定系数(R^2)对响应面模型进行评价。 R_{MSE} 越接近于 0,响应面模型的误差越小; R^2 越接近于 1,响应面模型的精度越高。表达式如下

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (y_i - \tilde{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y})^2} \tag{9}$$

$$R_{MSE} = \frac{1}{ky} \sqrt{\sum_{i=1}^k (y_i - \tilde{y}_i)^2} \tag{10}$$

式中: y_i 为第 i 组变量的实验结果; $\bar{y}$ 为全部变量实验结果的平均值; $\tilde{y}_i$ 为第 i 组变量的响应面计算值。

响应面模型的拟合精度还取决于设计样本点的选取,因此需要对设计变量进行实验设计。本文的设计变量为某型叶片实验的工况参数,工况参数的变化范围见表 3, M_r 为冷气流量与主流流量的比值乘以 100。

表 3 工况参数的变化范围

Table 3 Variation range of working parameters

工况参数	变化范围
主流入口温度 T_{gi}/K	680~710
主流出口压力 p_{go}/kPa	120~160
冷气与主流温度比 T_r	0.6~0.7
主流进出口压比 p_r	1.3~1.5
M_r	3~8

中心复合表面设计 (CCF) 是中心复合设计 (CCD) 中的一种,能够拟合完全二次模型,可通过较少的实验工况得到较高精度的响应面模型,因此,本文选取 CCF 进行实验设计。表 4 给出了中心复合表面设计,主要包括序号、设计变量 T_{gi} 、 p_{go} 、 T_r 、 p_r 和 M_r 及响应 ϵ_{ave} 、 ζ 和 η_{ave} 。CCF 设计点包括 32 个角点、10 个轴点和 1 个中心点,所以共有 43 个样本点。

表 4 中心复合表面设计

Table 4 Central composite face-centered design

序号	T_{gi}/K	p_{go}/kPa	T_r	p_r	M_r	ϵ_{ave}	ζ	η_{ave}
1	710	160	0.70	1.3	3.0	0.308	0.027	0.908
2	695	140	0.65	1.5	5.5	0.390	0.041	0.863
3	710	120	0.60	1.5	3.0	0.319	0.037	0.872
4	680	120	0.60	1.3	8.0	0.391	0.057	0.844
5	710	160	0.60	1.5	3.0	0.310	0.036	0.876
6	680	120	0.70	1.5	8.0	0.454	0.039	0.864
7	680	120	0.70	1.3	8.0	0.419	0.040	0.874
8	695	140	0.65	1.4	5.5	0.375	0.041	0.869
9	710	160	0.60	1.5	8.0	0.402	0.055	0.839
10	710	120	0.60	1.3	8.0	0.391	0.057	0.844
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
34	695	140	0.70	1.4	5.5	0.394	0.035	0.882
35	710	120	0.60	1.5	8.0	0.417	0.056	0.833
36	680	120	0.70	1.5	3.0	0.362	0.027	0.892
37	710	120	0.70	1.5	8.0	0.454	0.039	0.864
38	695	140	0.65	1.3	5.5	0.357	0.042	0.875
39	680	160	0.70	1.5	3.0	0.353	0.027	0.894
40	680	160	0.60	1.3	8.0	0.376	0.057	0.849
41	680	160	0.60	1.5	8.0	0.402	0.055	0.839
42	680	120	0.60	1.5	3.0	0.320	0.037	0.872
43	680	160	0.70	1.5	8.0	0.439	0.038	0.868

2 实验结果分析

2.1 叶片冷却性能响应面模型的构建

本文采用 Minitab 软件并基于 CCF 拟合得到了二阶多项式响应面模型,中心复合表面设计见表

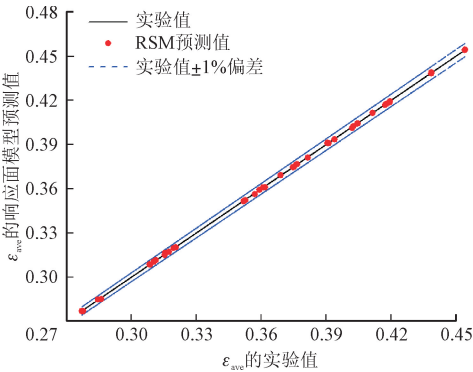
4。表 5 给出了不同响应面模型的系数的响应。

表 5 不同响应面模型的系数的响应

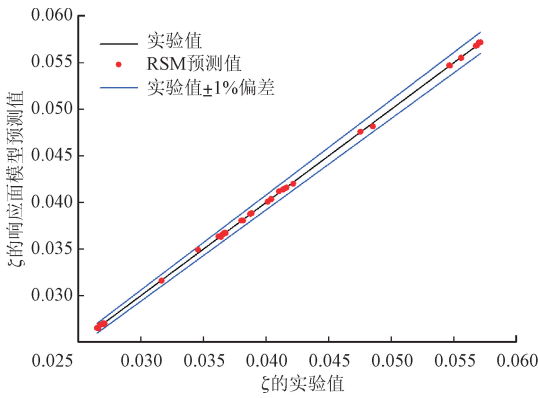
Table 5 Coefficients of the response surface model

系数	$\epsilon_{ave}/10^{-3}$	$\zeta/10^{-3}$	$\eta_{ave}/10^{-3}$
β_0	285	-8	999
β_1	-0.48	0.216	0.188
⋮	⋮	⋮	⋮
β_5	61.7	18.7	-34.1
β_{11}	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮
β_{55}	-1.82	-0.304	0.636
β_{12}	0	0	0
β_{13}	0.106	0.018	-0.043
⋮	⋮	⋮	⋮
β_{35}	-7.78	-14	22
β_{45}	-8.93	-2.08	3.07

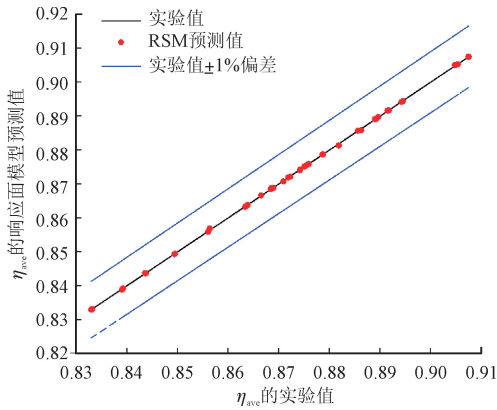
图 7 给出了某型叶片实验设计样本点实验值和 RSM 预测值的对比。图 7(a)~7(c)分别是响应为叶片的平均冷却效率 ϵ_{ave} 、温度非均匀度 ζ 和平均无量纲温度 η_{ave} 时两者值的对比。由图 7 可知,叶片的平均冷却效率 ϵ_{ave} 和平均无量纲温度 η_{ave} 的 RSM 预测值均分布在实验值 $\pm 1\%$ 以内,温度非均匀度 ζ 的 RSM 预测值分布在实验值 $\pm 2\%$ 以内,这说明拟合得到的响应面模型可以很好地预测实验数据。经过计算可得响应面模型的均方根误差 R_{MSE} 和决定系数 R^2 ,计算结果见表 6。由表 6 可知,当响应分别为叶片的平均冷却效率 ϵ_{ave} 、温度非均匀度 ζ 和平均无量纲温度 η_{ave} 时,响应面模型的均方根误差 R_{MSE} 分别为 0.000 53、0.000 15 和 0.000 23,均小于 0.001;响应面模型的决定系数 R^2 分别为 0.999 9、0.999 9 和 0.999 9,均大于 0.99。这说明拟合得到的响应面模型有较小的误差和较高的精度。



(a) 平均冷却效率



(b)温度非均匀度



(c)平均无量纲温度

图 7 叶片实验值和响应面模型预测值的对比

Fig. 7 Comparison between experimental value and RSM prediction

表 6 响应面模型的拟合精度

Table 6 Fitting accuracy of the response surface model

评价指标	R_{MSE}	R^2
ϵ_{ave}	0.000 53	0.999 9
ζ	0.000 15	0.999 9
η_{ave}	0.000 23	0.999 9

2.2 工况参数对叶片表面压力分布的影响

图 8 给出了不同工况参数对叶片中截面无量纲压力分布的影响规律,图中 q_{gi} 为主流的入口压力, $S/S_{max} < 0$ 表示叶片的压力面, $S/S_{max} > 0$ 表示叶片的吸力面。总体而言,不同工况下叶片中截面的压力分布基本相似,具体表现在无量纲压比在叶片压力面的前半部分即 $-0.78 < S/S_{max} < -0.41$ 时保持稳定增大,而在叶片压力面接近前缘的位置,其值接近 1,这表示叶片中截面的压力接近主流的进口压力,气流加速变慢。无量纲压比在叶片吸力面前半部分即 $0 < S/S_{max} < 0.48$ 时迅速下降,并在 $S/S_{max} = 0.48$ 的位置达到最小值,这表示气流的速度在叶片的吸力面上极速增大,并在相对轴向弦长为 0.48 时达到最大。当 $S/S_{max} > 0.48$ 时,气流发生了

转捩,即压力梯度反向,静压开始增加,主流速度开始降低,一直持续到尾缘出口。由图 8 还可知,叶片中截面的压力分布随着主流进出口压比的增大而降低,这是由于主流进出口压比的增大会增大气流的流速,从而降低叶片中截面的无量纲压比。其余工况参数对叶片的压力分布基本没有影响,这是由于冷却气流与主流不发生掺混,因而对主流流动基本没有影响。

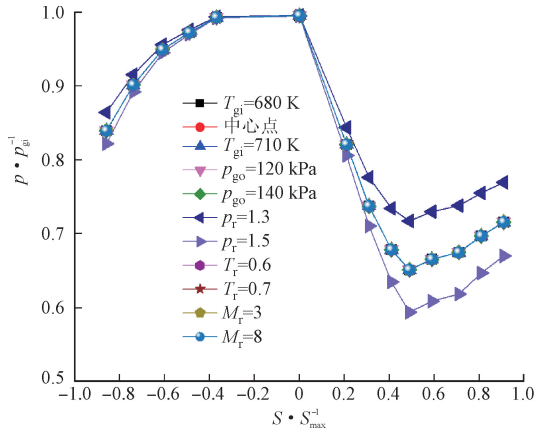


图 8 工况参数对叶片压力分布的影响

Fig. 8 Effect of working parameters on blade pressure distribution

2.3 主流入口温度对叶片冷却性能的影响

图 9 给出了主流入口温度对某型叶片表面冷却效率分布和无量纲温度分布的影响,图 9 中横坐标为相对轴向弦长 S/S_{max} ,当 $S/S_{max} < 0$ 代表叶片压力面,而 $S/S_{max} > 0$ 代表叶片吸力面;研究单工况参数的影响时,其余工况参数均处于中值,如研究 T_{gi} 的影响时, p_{g0} 为 140 kPa, T_r 为 0.65, p_r 为 1.4, M_r 为 5.5,下同。由图 9 可知,在不同主流入口温度下,叶片表面的冷却效率分布和无量纲温度分布均不发生变化,这说明主流入口温度对叶片表面的冷却性能几乎没有影响。这可能是因为主流气流与冷气不混合,仅当主流入口温度发生变化时,叶片表面的传热性能不会受到影响。叶片表面的温度会与入口温度成等比例变化,根据式(1)和式(3)的计算结果可得知,叶片的无量纲参数冷却效率和无量纲温度在主流入口温度变化下都不会有太大的变化。其中,冷却效率分布呈现出“M”形状,这说明叶片中弦区的冷却效率较好,在叶片前缘和尾缘的冷却效率较差。相应地,叶片表面的无量纲温度呈现出“W”形状,这表示叶片在前缘和尾缘的无量纲温度较高,在中弦区的无量纲温度较低。由图 9 还可知,叶片压力面的冷却效率略高于叶片的吸力面,当 $S/S_{max} = -0.31$ 时,叶片的冷却效率达到了最大的

0.54;相应地,叶片压力面的无量纲温度略低于叶片的吸力面,当 $S/S_{\max} = -0.31$ 时,叶片的无量纲温度达到了最低的 0.81。经过计算可知,当主流入口温度从 680 K 增大到 710 K 时,叶片的平均冷却效率降低了 0.13%,平均无量纲温度增大了 0.02%,温度非均匀度从 0.041 5 降低到了 0.041 4,降低了 0.07%。这说明主流入口温度的变化对叶片的冷却性能几乎没有影响。

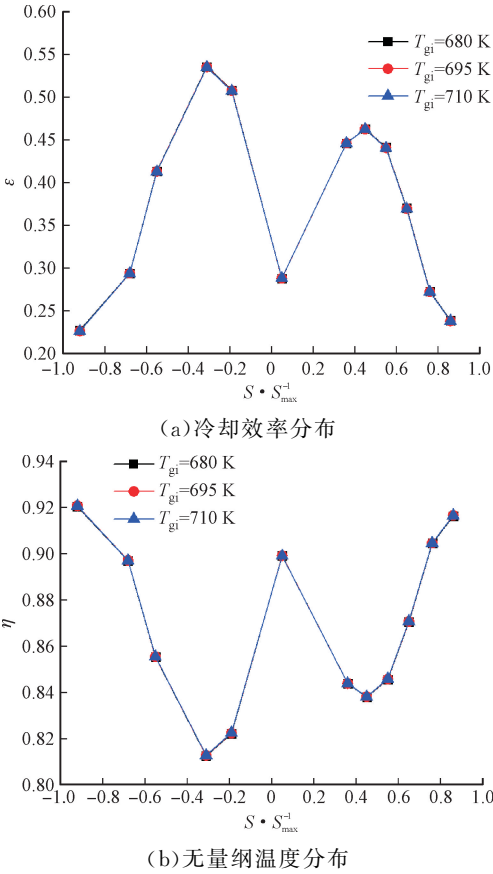


图 9 主流入口温度对叶片冷却性能的影响
Fig. 9 Effect of mainstream inlet temperature on blade cooling performance

2.4 主流出口压力对叶片冷却性能的影响

图 10 给出了不同主流出口压力下某型叶片表面的冷却效率分布和无量纲温度分布。由图 10 可知,当主流出口压力 p_{go} 增大时,叶片从前缘到尾缘的冷却效率均有所下降,无量纲温度均呈上升趋势。这说明在其他工况参数不变的情况下,主流出口压力的增大会降低叶片的冷却效率和增大叶片的无量纲温度。这可能是由于当主流出口压力增大时,叶片表面的无量纲压比保持不变,但叶片表面的当地压力分布整体随主流出口压力的增大而增大。叶片表面当地压力的增加会导致温度升高,因为气体被压缩时温度也增加。另外,叶片表面的局部压力

增加会使气体流动速度增加,从而将动能转化为热能,进一步提高温度。进而,叶片表面的冷却效率会随着当地温度的增加而减小,无量纲温度随着当地温度的增大而增大。经过计算可知,当主流出口压力 p_{go} 从 120 kPa 增大到 160 kPa 时,叶片的平均冷却效率降低了 3.29%,叶片的平均无量纲温度增大了 0.51%。此外,由图 10 还可知,主流出口压力的变化对叶片吸力面中弦区冷却效率和无量纲温度的影响相较于其他区域更大。此外,主流出口压力的增大会降低叶片的温度非均匀度,当主流出口压力 p_{go} 从 120 kPa 增大到 160 kPa 时,叶片的温度非均匀度从 0.041 6 降低到了 0.041 3,降低了 0.72%。

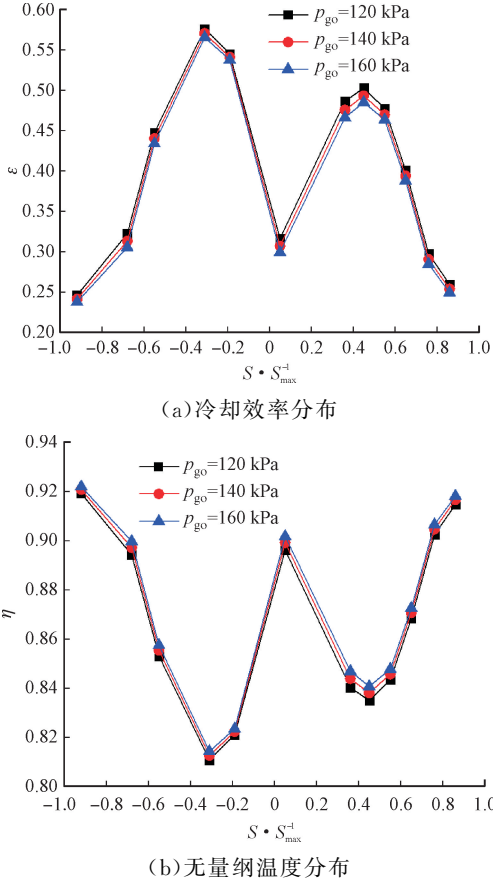
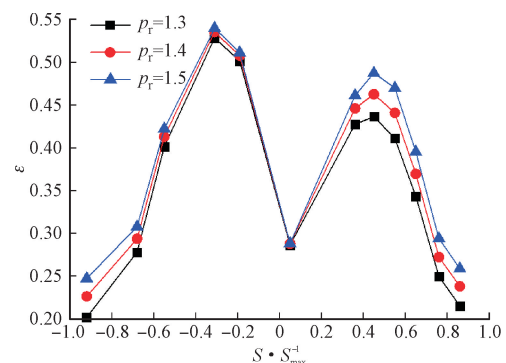


图 10 主流出口压力对叶片冷却性能的影响
Fig. 10 Effect of mainstream outlet pressure on blade cooling performance

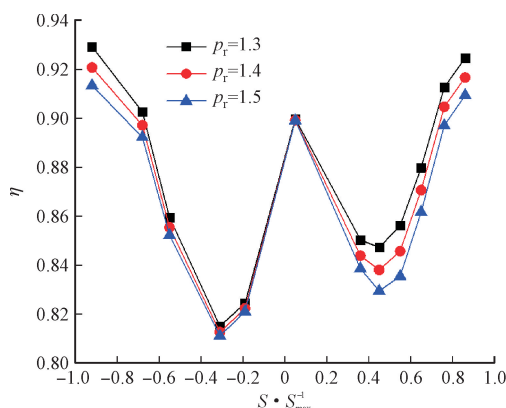
2.5 进出口压比对叶片冷却性能的影响

图 11 给出了不同主流进出口压比 p_r 时某型叶片表面的冷却效率分布和无量纲温度分布。由图 11 可知,当 p_r 增大时,叶片表面的冷却效率均有所上升,无量纲温度均有下降趋势。这说明在其他工况参数不变的情况下, p_r 的增大会增大叶片的冷却效率和降低叶片的无量纲温度。这可能是由于主流进出口压比的增大会降低叶片表面的无量纲压比,

较低的无量纲压比会降低气体流动速度,减少动能转化为热能的程度,从而减小叶片表面的温度升高。此外,无量纲压比较小也使局部压力均匀分布,避免了局部无量纲压比过大导致温度集中的问题,这会降低叶片的无量纲温度和温度非均匀度。经过计算可知,当主流进出口压比 p_r 从 1.3 增大到 1.5 时,叶片的平均冷却效率增大了 9.39%,平均无量纲温度降低了 1.34%。此外,由图 11 还可知, p_r 的增大对叶片压力面冷却效率和无量纲温度的影响随着叶片的前缘到尾缘逐渐增大。当 $S/S_{\max} = -0.19$ 和 $S/S_{\max} = -0.92$ 时,叶片表面的冷却效率分别增大了 1.95% 和 22.42%,无量纲温度分别降低了 0.42% 和 1.71%。 p_r 对叶片吸力面冷却效率和无量纲温度的影响相差不大,当 p_r 增大时,叶片表面的冷却效率增大了 15% 左右,无量纲温度降低了 2% 左右。此外,主流进出口压比 p_r 的增大使叶片的温度非均匀度降低,当主流进出口压比 p_r 从 1.3 增大到 1.5 时,叶片的温度非均匀度从 0.042 2 下降到 0.041 1,降低了 2.69%。



(a) 冷却效率分布



(b) 无量纲温度分布

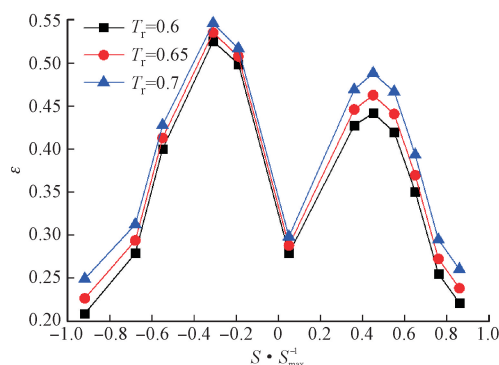
图 11 进出口压比对某型叶片冷却性能的影响

Fig. 11 Effect of pressure ratio on blade cooling performance

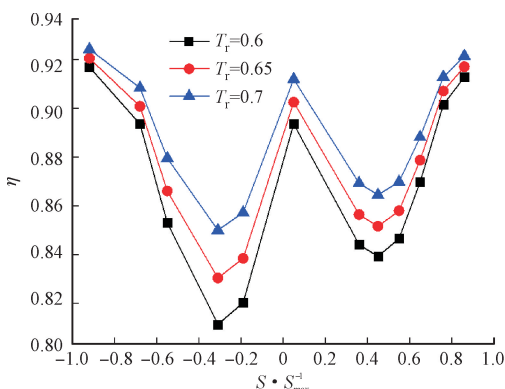
2.6 温度比对叶片冷却性能的影响

图 12 给出了不同冷气与主流温度比 T_r 时某型

叶片表面的冷却效率分布和无量纲温度分布。由图 12 可知,当冷气与主流温度比 T_r 增大时,叶片表面的冷却效率有所上升,无量纲温度也有上升的趋势。这可能是由于当冷气与主流温度比增大时,冷却气体的温度相对较高。较高的冷气温度可以降低叶片的热负荷,从而减少叶片温度的升高,并提高传热强度,进而增加叶片表面的冷却效率。同时,叶片表面的温度也会随着冷气温度的升高而增大,导致叶片的无量纲温度升高。经过计算可知,当冷气与主流温度比 T_r 从 0.6 增大到 0.7 时,叶片的平均冷却效率增大了 9.67%,叶片的平均无量纲温度提高了 2.98%。此外,由图 12 还可知, T_r 的增大对叶片尾缘和吸力面中弦区冷却效率的影响较叶片的前缘和压力面中弦区更大,当 $S/S_{\max} = -0.92$ 和 $S/S_{\max} = 0.86$ 时,叶片的冷却效率分别增大了 19.35% 和 17.66%; T_r 的增大对叶片压力面中弦区无量纲温度的影响较其他区域更大,当 $S/S_{\max} = -0.31$ 和 $S/S_{\max} = 0.55$ 时,叶片的无量纲温度分别降低了 5.87% 和 5.55%。此外,冷气与主流温度比 T_r 的增大使叶片的温度非均匀度降低,当冷气与主流温度比 T_r 从 0.6 增大到 0.7 时,叶片的温度非均匀度从 0.048 5 下降到 0.034 5,降低了 28.79%。



(a) 冷却效率分布



(b) 无量纲温度分布

图 12 温度比对叶片冷却性能的影响

Fig. 12 Effect of temperature ratio on blade cooling performance

2.7 流量比对叶片冷却性能的影响

图 13 给出了不同 M_r 时某型叶片表面的冷却效率分布和无量纲温度分布。由图 13 可知,当 M_r 增大时,叶片表面的冷却效率均有所上升,无量纲温度均有下降趋势。这说明在其他工况参数不变的情况下, M_r 的增大会增大叶片的冷却效率和降低叶片的无量纲温度。这可能是由于当冷气与主流流量比增大时,冷气流量会相应地增大。冷气流量的增大可以带走更多热量,因而会提高叶片的冷却效率,降低无量纲温度。但这同时会导致

叶片的温度分布更加不均匀,在叶片不同位置出现温度差异,从而增大了叶片的温度非均匀度。经过计算可知,当 M_r 从 3 增大到 8 时,叶片的平均冷却效率增大了 30.49%,平均无量纲温度降低了 3.78%。此外,由图 13 还可知, M_r 的增大对叶片尾缘冷却效率和无量纲温度的影响相较于叶片的前缘和中弦区相对较小,当 $S/S_{\max}=0.05$ 时,叶片的冷却效率增幅最大,达到了 44.52%;当 $S/S_{\max}=-0.19$ 时,叶片的无量纲温度的降低幅度最大,达到了 6.41%。

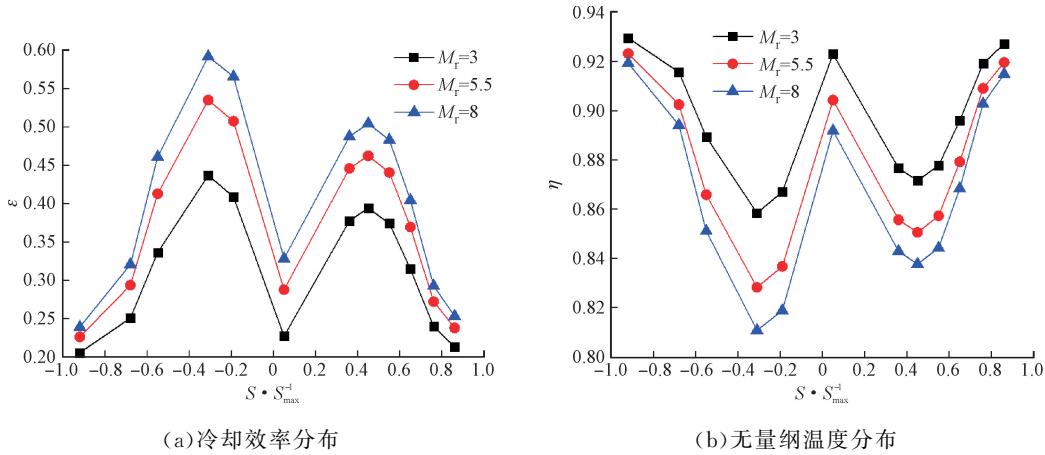


图 13 流量比对某型叶片冷却性能的影响

Fig. 13 Effect of flow ratio on blade cooling performance

此外, M_r 的增大使叶片的温度非均匀度增大,当 M_r 从 3 增大到 8 时,叶片的温度非均匀度从 0.031 6 提高到 0.047 5,提高了 50.27%。

3 工况参数耦合作用对叶片冷却性能的综合影响

3.1 工况参数耦合作用对叶片平均冷却效率的影响

图 14 给出了某型叶片平均冷却效率的等值线图,揭示了工况参数的共同作用对叶片平均冷却效率的影响,由 2.3 节可知,主流入口温度对叶片的冷却性能几乎没有影响。因此,图 14(a)~14(f)依次给出了 $p_{go}-T_r$ 、 $p_{go}-p_r$ 、 $p_{go}-M_r$ 、 T_r-p_r 、 T_r-M_r 和 p_r-M_r 的共同作用对叶片平均冷却效率 ϵ_{ave} 的影响。由图 14(a) 和图 14(b) 可知,当 p_{go} 一定时,增大冷气与主流温度比 T_r 和主流进出口压比 p_r 均会使叶片的 ϵ_{ave} 增大,而当 T_r 和 p_r 一定时,增大主流出口压力 p_{go} ,叶片的平均冷却效率 ϵ_{ave} 均会减小;从图 14(c) 可以看出,当 M_r 一定时,增大 p_{go} 叶片的平均

冷却效率 ϵ_{ave} 会略微的降低,而当 p_{go} 一定时,叶片的平均冷却效率 ϵ_{ave} 会随着 M_r 的增大而增大。由图 14(d) 和图 14(e) 可知,当 T_r 一定时,增大 p_r 和 M_r 叶片的平均冷却效率 ϵ_{ave} 均会增大;而当 p_r 和 M_r 保持不变时,增大 T_r 使叶片的平均冷却效率 ϵ_{ave} 明显增大。由图 14(f) 可知,不同 p_r 时 M_r 的增大和不同 M_r 时 p_r 的增大均能提高叶片的 ϵ_{ave} 。

3.2 工况参数耦合作用对叶片平均无量纲温度的影响

图 15 给出了某型叶片平均无量纲温度的等值线图。图 15(a)~图 15(f)依次给出了 p_{go} 、 T_r 、 p_r 、 M_r 等 4 个参数的相互共同作用对叶片平均无量纲温度 η_{ave} 的影响。由图 15(a) 可知,当 p_{go} 一定时,增大 T_r 使叶片的平均无量纲温度 η_{ave} 增大,而当 T_r 一定时,增大 p_{go} ,叶片的平均无量纲温度 η_{ave} 有小幅度的增大;由图 15(b) 和图 15(c) 可知,当 p_{go} 一定时,增大 p_r 和 M_r 均会减小叶片的平均无量纲温度 η_{ave} ;当 p_r 和 M_r 一定时,增大 p_{go} 使得叶片的平均无量纲

温度 η_{ave} 呈现出增大的趋势。由图 15(d) 和图 15(e) 可知, 当 T_r 一定时, 增大 p_r 和 M_r 会降低叶片的平均无量纲温度 η_{ave} ; 而当 p_r 和 M_r 保持不变时, 增大 T_r 使

叶片的平均无量纲温度 η_{ave} 有一定的增大。由图 15(f) 可知, 当 p_r 一定时, 增大 M_r 会使叶片的 η_{ave} 减小; 而当 M_r 一定时, 增大 p_r 使叶片的 η_{ave} 呈现降低的趋势。

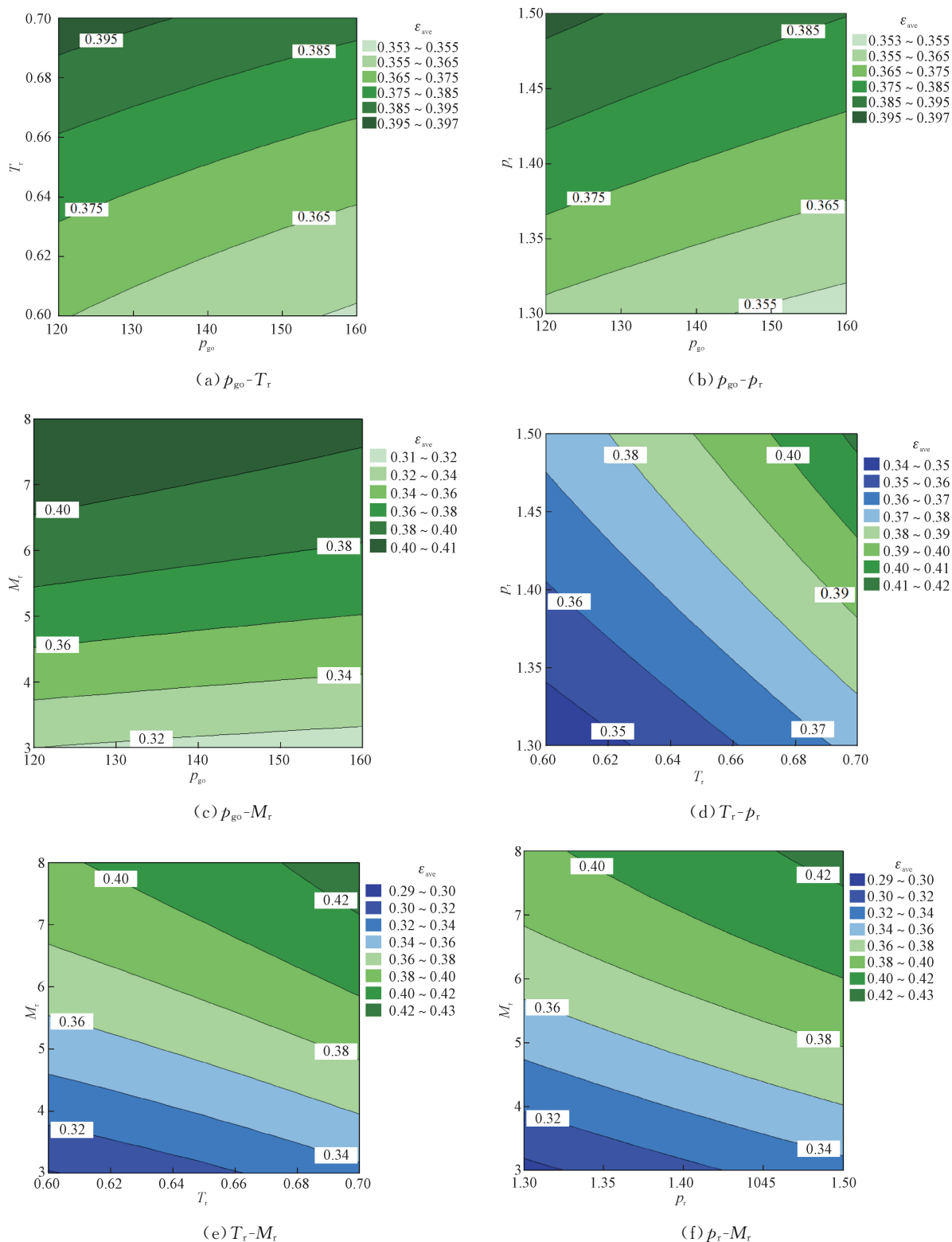


图 14 叶片平均冷却效率的等值线

Fig. 14 Contour map of average cooling efficiency of the blade

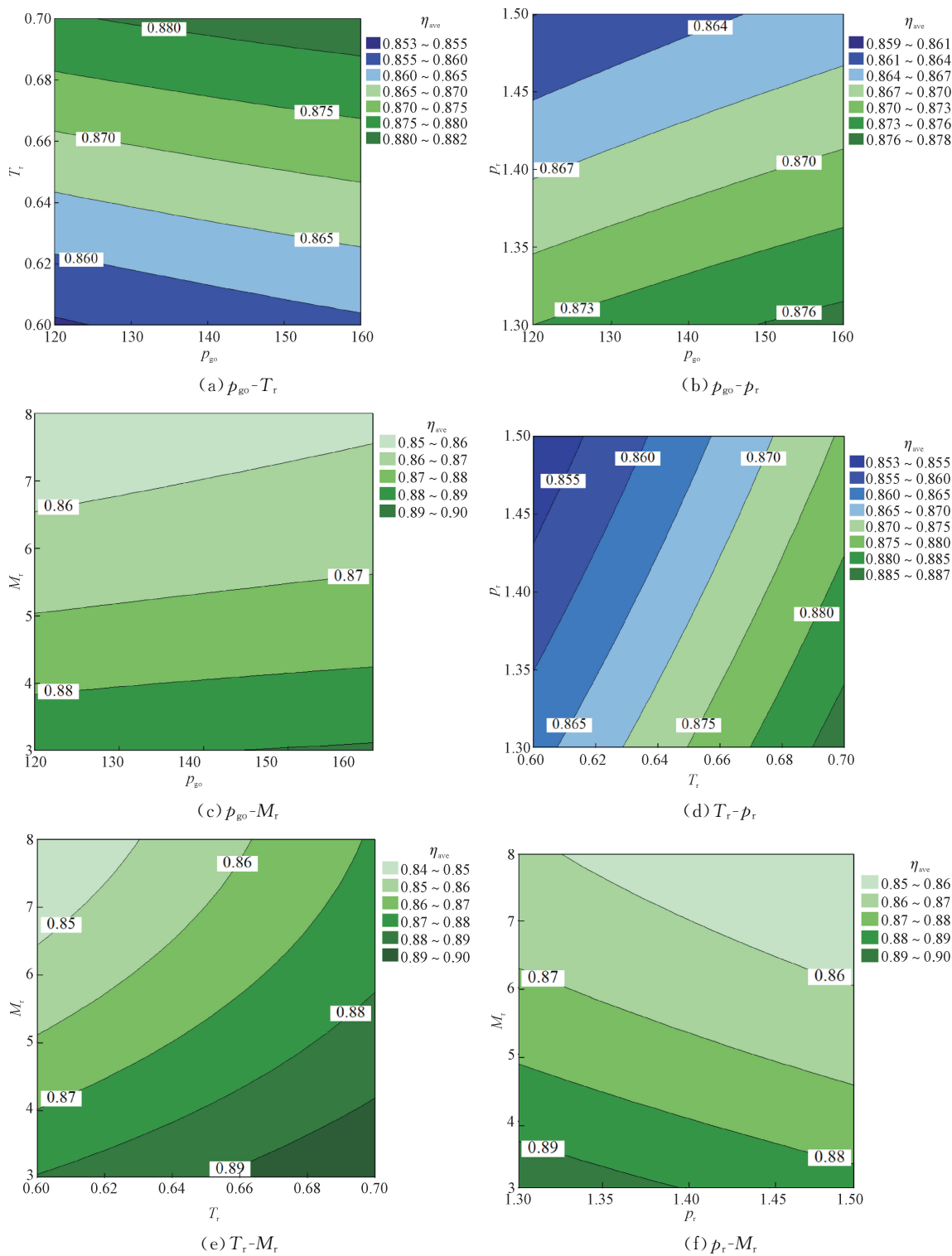


图 15 叶片平均无量纲温度的等值线

Fig. 15 Contour map of average dimensionless temperature of the blade

4 结 论

采用实验设计与响应面模型相结合的方式对某型高温涡轮叶片进行了实验研究,探究了工况参数及其耦合作用对叶片冷却性能的影响规律,并得到

了有关叶片冷却性能的系统性的基础数据表,得出的主要结论如下。

(1)采用 CCF 得到的二阶响应面模型有较高的精度,当响应分别为 ϵ_{ave} 、 ζ 和 η_{ave} 时,响应面模型的 R_{MSE} 为 0.000 53、0.000 15 和 0.000 23, R^2 均大于 0.99。

(2)主流入口温度和主流出口压力对叶片冷却性能的影响均不大,当主流出口压力从 120 kPa 增大到 160 kPa 时,叶片的平均冷却效率降低了 3.29%,叶片的平均无量纲温度增大了 0.51%。

(3)当主流进出口压比、冷气与主流温度比及流量比分别从 1.3~1.5、0.6~0.7、3~8 变化时,叶片的平均冷却效率分别增大了 9.67%、9.39%、30.49%;叶片的平均无量纲温度分别提高了 2.98%,降低了 1.34%、3.78%;叶片的温度非均匀度分别降低了 2.69%、28.79%,提高了 50.27%。

参考文献:

- [1] 李苏辉,张归华,吴玉新. 面向未来燃气轮机的先进燃烧技术综述 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(12): 1423-1437.
LI Suhui, ZHANG Guihua, WU Yuxin. Advanced combustion technologies for future gas turbines [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2021, 61(12): 1423-1437.
- [2] 钟博,郭昊雁,魏景涛,等. 涡轮叶片综合冷却效率实验研究 [J]. 推进技术, 2021, 42(2): 335-343.
ZHONG Bo, GUO Haoyan, WEI Jingtao, et al. Experimental investigation on integrated cooling efficiency of turbine blade [J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(2): 335-343.
- [3] 王培泉,郭昊雁,李杰,等. 涡轮导向叶片综合冷却效率实验研究 [J]. 推进技术, 2019, 40(7): 1568-1576.
WANG Peixiao, GUO Haoyan, LI Jie, et al. Experimental investigation on overall cooling effectiveness of turbine guide vane [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(7): 1568-1576.
- [4] 邓丽君,宣文韬,钟博,等. 涡轮叶片表面温度场及综合冷却效果试验研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(3): 442-448.
DENG Lijun, XUAN Wentao, ZHONG Bo, et al. Experimental research on surface temperature field and comprehensive cooling effect of turbine blade [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(3): 442-448.
- [5] 李广超,莫唯书,张魏,等. 涡轮导向叶片综合冷却特性实验研究 [J]. 推进技术, 2018, 39(12): 2772-2778.
LI Guangchao, MO Weishu, ZHANG Wei, et al. Experimental investigation on integrated cooling performance of nozzle guide vane [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(12): 2772-2778.
- [6] 马超,黄名海,葛冰,等. 蒸汽/空气两种介质在涡轮叶片中冷却性能对比的试验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1650-1657, 1778.
MA Chao, HUANG Minghai, GE Bing, et al. Comparative experiment of cooling performance in a turbine blade cooled by steam and air flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1650-1657, 1778.
- [7] 马超,黄名海,葛冰,等. 高温风洞中空冷涡轮叶片冷却特性的实验研究 [J]. 推进技术, 2016, 37(3): 496-503.
MA Chao, HUANG Minghai, GE Bing, et al. Experimental investigation of cooling performance of air-cooled turbine blade in a high-temperature wind tunnel [J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(3): 496-503.
- [8] 李继宸,朱惠人,陈大为,等. 尾迹影响下有复合角扇形孔涡轮叶片表面的气膜冷却效率实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(9): 167-175.
LI Jichen, ZHU Hui ren, CHEN Dawei, et al. Experimental study on film cooling effectiveness of the turbine blade with compound-angled fan-shaped holes under wake influence [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(9): 167-175.
- [9] 周志翔,刘存良,张宗卫,等. 主流湍流度对涡轮导向叶片气膜冷却特性影响的实验 [J]. 航空动力学报, 2014, 29(6): 1279-1286.
ZHOU Zhixiang, LIU Cunliang, ZHANG Zongwei, et al. Experiment on effects of mainstream turbulence intensity on film cooling characteristics of turbine vane [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(6): 1279-1286.
- [10] 付仲议,朱惠人,姜茹,等. 涡轮导叶 W 型孔全气膜冷却效率实验研究 [J]. 推进技术, 2021, 42(9): 2028-2037.
FU Zhongyi, ZHU Hui ren, JIANG Ru, et al. Experimental study of full coverage film cooling effectiveness of turbine guide vane with w-shaped holes [J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(9): 2028-2037.
- [11] NAJJAR Y S H, ALGHAMDI A S, AL-BEIRUTTY M H. Comparative performance of combined gas turbine systems under three different blade cooling schemes [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(13): 1919-1934.
- [12] NASIR S, CARULLO J S, NG W F, et al. Effects of large scale high freestream turbulence and exit Reynolds number on turbine vane heat transfer in a transonic cascade [J]. Journal of Turbomachinery, 2009, 131(2): 021021.
- [13] DEES J E, BOGARD D G, LEDEZMA G A, et al.

- Overall and adiabatic effectiveness values on a scaled up, simulated gas turbine vane [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2013, 135(5): 051017.
- [14] DEES J E, BOGARD D G, LEDEZMA G A, et al. Momentum and thermal boundary layer development on an internally cooled turbine vane [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(6): 061004.
- [15] DEES J E, BOGARD D G, LEDEZMA G A, et al. Experimental measurements and computational predictions for an internally cooled simulated turbine vane [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(6): 061003.
- [16] 吕颂, 郑旭东, 曹智顺, 等. 一种基于固定截距多元线性回归的涡轮叶片冷却效果经验公式推导方法 [J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(21): 8579-8589.
- LÜ Song, ZHENG Xudong, CAO Zhishun, et al. An empirical formula derivation method of turbine blade cooling effectiveness based on fixed intercept multiple linear regression [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(21): 8579-8589.
- [17] 吕颂, 吴法勇, 王洪斌, 等. 涡轮叶片冷却效果影响因素交互效应分析与试验研究 [J]. *推进技术*, 2022, 43(5): 273-284.
- LÜ Song, WU Fayong, WANG Hongbin, et al. Analysis and experimental research on interaction effect of influencing factors of turbine blade cooling effectiveness [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(5): 273-284.
- [18] 黄朝晖, 袁奇, 张弘斌, 等. 某型火箭发动机涡轮转子流热固耦合强度及疲劳寿命分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(8): 73-84.
- HUANG Chaohui, YUAN Qi, ZHANG Hongbin, et al. Analysis of fluid-thermal-solid coupling strength and fatigue life of a certain rocket engine turbine rotor [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(8): 73-84.
- [19] 庞伟帆, 傅戈雁, 王明雨, 等. 基于响应面法和遗传神经网络模型的高沉积率激光熔覆参数优化 [J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 146-156.
- PANG Yifan, FU Geyan, WANG Mingyu, et al. Parameter optimization of high deposition rate laser cladding based on the response surface method and genetic neural network model [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 146-156.
- [20] 王加浩, 刘小民, 田晨晔, 等. 多翼离心风机双圆弧叶片的参数优化设计及气动性能分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(3): 94-104.
- WANG Jiahao, LIU Xiaomin, TIAN Chenye, et al. Parametric optimization design of double-circular arc blade used in multi-blade centrifugal fan and its aerodynamic analysis [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(3): 94-104.
- [21] SHI Xiaojun, LI Shan, MU Yingjie, et al. Geometry parameters optimization for a microchannel heat sink with secondary flow channel [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2019, 104: 89-100.
- [22] 王斯民, 简冠平, 肖娟, 等. 缠绕管式换热器结构参数多目标优化数值模拟研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(5): 9-15.
- WANG Simin, JIAN Guanping, XIAO Juan, et al. Multi-objective optimization on the structural parameters of spiral wound heat exchanger [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(5): 9-15.
- [23] 王维. 燃气轮机透平导叶双工质冷却性能及热应力协同研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2014.
- [24] 席雷. 燃气轮机涡轮叶片带肋及桁架通道的冷却性能及结构优化研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2020.
- [25] JIANG Guangwen, GAO Jianmin, SHI Xiaojun, et al. Reprint of: flow and heat transfer characteristics of the mist/steam two-phase flow cooling the rectangular channel with column-row-ribs [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 161: 120236.
- [26] 赵振, 高建民, 徐亮, 等. 圆台扰流换热器结构参数优化的数值模拟研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(12): 35-46.
- ZHAO Zhen, GAO Jianmin, XU Liang, et al. Numerical simulation on structural parameter optimization of heat exchanger with frustum of a cone [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(12): 35-46.

(编辑 武红江)