

低雷诺数条件对风扇/压气机效率的影响

夏欢,王英锋

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:为了探究压气机效率受雷诺数变化的影响,运用数值模拟对一台三级风扇进行 $1.88 \times 10^5 \sim 3.73 \times 10^6$ 雷诺数区间内的计算,并针对某七级压气机开展 $7.4 \times 10^4 \sim 3.64 \times 10^5$ 区间内的节流试验,拟合了效率与雷诺数的函数。研究给出了风扇/压气机在雷诺数降低后的效率、压比和流量损耗率,获得了效率随雷诺数变化的数值关系。所得结果与经验方法较为吻合,压气机效率与雷诺数之间满足形式上的幂次关系,关系式中的常数项与压气机型号及工作条件有关。

关键词: 压气机;雷诺数;数值模拟;性能试验;效率修正

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2023)03-0011-05

Effects of Reynolds Number on Efficiency of Fans/Compressors

XIA Huan, WANG Yingfeng

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to explore the effects of Reynolds number on efficiency of compressors, numerical simulationns were carried out to calculate a three-stage fan in the in the range of $1.88 \times 10^5 \sim 3.73 \times 10^6$ of Reynolds number, and throttling experiments were conducted on a seven-stage compressor in the range of $7.4 \times 10^4 \sim 3.64 \times 10^5$. The curve fitting of power function on Reynolds number and efficiency was performed according to the calculation and experimental results. The research results give the loss ratio of efficiency, pressure ratio and flow of the fans/compressor with the reduced Reynolds number, and obtains the numerical relationship between the efficiency and the Reynolds number. Consistent with the empirical correction scheme, the compressor efficiency and Reynolds number satisfy the power function in numerical relationship, and the constant term in the function expression is related to the compressor model and working conditions.

Keywords: compressor; Reynolds number; numerical simulation; performance experiments; efficiency correction

0 引言

随着飞机巡航高度的上升,由于大气密度下降,黏性系数增大,航空发动机压气机的进口雷诺数将会降低。当工作雷诺数低于临界雷诺数时,压气机转子吸力面转捩推迟,更容易在强逆压力梯度下发生分离,进而导致压气机的气动性能受到影响^[1],其中效率损耗的评估具有较为重要的研究意义。这是因为,效率反映了压气机的经济性,不仅决定了压气机在同一机械功下的增压比,还会影响发动机在非设计点下各部件的共同工作点。

在流动分析和实验研究的基础上,国内外研究人员通过经验或半经验的修正方法分析了雷诺数对压气机效率的影响。石建伟等^[2]研究发现随着雷诺数增加,叶片后缘的湍流越大,流动分离点向前缘移动,造成了效率的下降;王正鹤等^[3]研究发现雷诺数从 1.76×10^6 分别降低到 7.3×10^5 和 1.6×10^5 时,压气机转子 Rotor37 的峰值效率分别降低了 2.8% 和 6.8%;姚卡等^[4]对某型燃气轮机的离心压气机进行模化分析时发现,当进口雷诺数分别从 1.06×10^6 降低到 6.36×10^5 和 2.12×10^5 时,设计点等熵效率分别降低了 0.63% 和 2.81%;HEIDELBERG L J 等^[5]提出压气机雷

诺数和效率之间存在比值形式的数值关系,这一结论得到了 WEIGEL C 等^[6]、温泉等^[7]的共同佐证;WASELL A B^[8]在统计分析了多组叶栅实验和单级、多级压气机实验数据后,建立了压气机多变效率与弦长雷诺数之间的雷诺数修正模型;肖洪等^[9]、郭捷等^[10]验证了该模型可用于定量评估。目前,效率修正方面仍在沿用上述模型,但是均存在共同的问题:数据来自 20 世纪五六十年代的实验研究,普遍较为老旧,缺乏现代高负荷压气机的验证。

本文以某航空发动机所匹配的跨音风扇/压气机为对象,结合数值模拟和部件试验的结果,研究雷诺数对压气机效率的影响,讨论低雷诺数条件下压气机气动参数与效率的关联程度,旨在校对效率随雷诺数变化的修正模型,分析其在实际工程中的应用。

1 效率修正经验模型

HEIDELBERGLJ、WEIGELC、温泉等发现压气机的效率和雷诺数满足以下经验关系式:

$$\frac{1-\eta}{1-\eta_{\text{ref}}} = \left(\frac{Re_{1,\text{ref}}}{Re_1} \right)^N \quad (1)$$

基金项目: 国家科技重大专项(2017-II-0004-0017)

第一作者简介: 夏欢(1997—),女,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为叶轮机气体动力学。

式中: η 为等熵效率(通常取峰值效率点);由于多级压气机的第一级转子受雷诺数的影响最为显著,故 Re_1 取第一级转子叶片中径处的弦长和气流相对速度作为特征长度和特征速度;下标ref表示参照组,一般取设计点;指数 N 在文献[5-7]中分别取0.2、0.1和0.36。

WASELL效率修正模型给出的效率与雷诺数之间关系式如下:

$$1-\eta_p = K \cdot Re_1^{-m} \quad (2)$$

式中: η_p 为多变效率;系数 K 值通过试验或者部件特性计算所得的工作点确定;指数 $m=p \cdot q$,其中 p 和 q 分别由如图1所示的关系曲线 $p=f(\text{MEAN}(V/\sqrt{T}))$ 和 $q=f(\bar{L})$ 来确定。

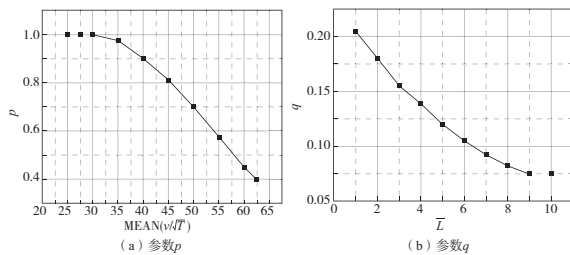


图1 效率修正模型相关参数的取值

图1中的横坐标参数 \bar{L} 和 $\text{MEAN}(V/\sqrt{T})$ 采用下式计算:

$$\bar{L} = \frac{L \cdot Z}{0.5(h_1 + h_2)(Z - 0.5)}$$

$$\text{MEAN}(V/\sqrt{T}) = \frac{n}{n_d} \sqrt{\frac{C_{am}^2 + [0.5C_z(1 + c_p \cdot \Delta T \cdot Z/C_z^2)]}{T_{i1} + 0.5\Delta T}} \quad (3)$$

式中: n 为工作点压气机转速, r/min; n_d 为设计转速, r/min; ΔT 为风扇/压气机温升, K; T_{i1} 为压气机进口总温, K; Z 为风扇/压气机级数; C_z 为中间级转子中径处的叶片轮缘速度, m/s; C_{am} 为第一级进口和最后一级转子进口轴向速度的平均值, m/s; L 为压气机第一级转子进口到末级转子出口之间的轴向长度, m; h_1 、 h_2 分别为第一级和最后一级转子的进口环形高度, m。

2 研究对象和数值方法

本文选用某型号三级跨音速风扇作为研究对象,由6

个叶排组成,不带进、出口导向器,各级转子叶尖间隙均设置为1 mm。本研究只考虑轴向均匀进气情况,认为风扇内部流场呈现轴对称分布,叶栅各通道流动状况相似,为了提升计算效率,采用单通道数值模拟。

网格划分类型为结构网格,进出口流域与叶片通道采用H型拓扑结构,叶片附面层附近采用O型拓扑结构加密,利用多重网格法加速收敛。经计算核实,固壁上的 $Y+$ 值均小于1,图2是B2B面的二维网格。

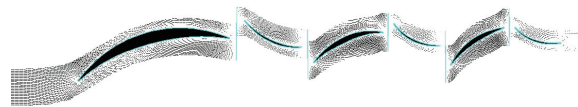


图2 三级风扇数值计算的B2B网格

计算采用NUMECA中的FINE/Turbo求解器来实现,计算类型为定常求解,流动工质选择为空气,求解流动方程为三维可压雷诺平均守恒型 $N-S$ 方程。空间离散格式为中心差分格式,湍流模型采用了适用于低雷诺数工况的LOW $k-e$ 模型,并设置了AGS转捩模型,利用弧长雷诺数模型确定转捩区长度,间歇因子 γ 的取值方式如式(4)所示,式中 η 为无量纲转捩长度, Re_θ 、 $Re_{\theta s}$ 和 $Re_{\theta E}$ 分别为弧长雷诺数、临界雷诺数和转捩终点雷诺数。

$$\gamma = \begin{cases} 0 & (Re_\theta < Re_{\theta s}) \\ 1 - e^{-5\eta^3} & (Re_{\theta s} < Re_\theta < Re_{\theta E}) \\ 1.0 & (Re_{\theta E} < Re_\theta) \end{cases} \quad (4)$$

进口边界条件给定总温总压,气流角设置为轴向进气,出口边界条件给定为静压,固体壁面采用绝热条件。下文中3.1和3.2的计算均通过调整进口总压、总温及转速率来模拟压气机的不同工作环境,体现雷诺数的变化。

3 计算结果及分析

3.1 雷诺数对压气机性能的影响

在高、低两组雷诺数条件下,通过对比特性线可以分析雷诺数对压气机性能的影响。高雷诺数组为地面标准大气状态,低雷诺数工况为15 km, 0.7Ma飞行状态。两种计算工况所对应的雷诺数如表1所示,降低了约一个量级。

表1 三级风扇数值计算的雷诺数范围

项目	高雷诺数组(0 km)					低雷诺数组(15 km)				
	101 325 Pa, 288.15 K					12 000 Pa, 250 K				
相对转速 n'	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6
$Re_1 (\times 10^5)$	37.35	37.08	32.74	29.08	25.01	4.84	4.67	4.16	3.69	3.18

注:相对转速 $n' = n/n_d$ 。

如图3所示,对比高低雷诺数下压气机气动性能参数发现:相同转速下压气机的喘点压比降低了4.04%~10.98%, $n'=0.8$ 时下降得最快, $n'=1.0$ 时下降得最慢;峰值效率降低了0.11%~1.74%,峰值效率点的流量降低了

1.28%~4.55%, $n'=0.8$ 时下降得最快。由此可知,在低雷诺数工作条件下,压气机在整个工作范围内性能均有一定程度的损耗,其中总压比的衰减和稳定裕度的下降较为明显,等熵效率也有显著下降;当压气机相对转速低于0.8

时,低雷诺数下的性能恶化程度要大于高转速下的性能恶化程度。

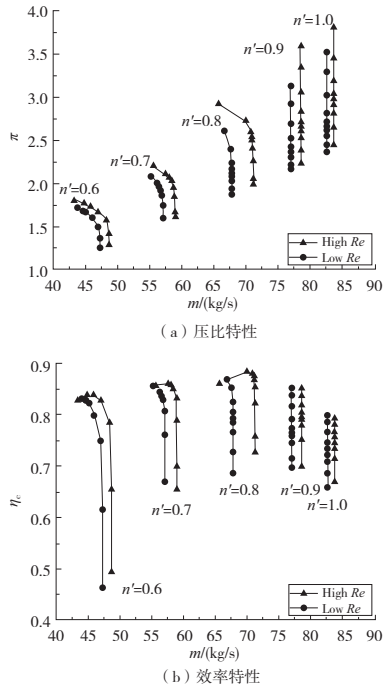


图3 三级风扇在高低雷诺数下的特性曲线

3.2 效率修正的幂函数关系验证

雷诺数对压气机效率的影响不可忽略,为了准确评估效率随雷诺数的损耗关系,应建立具体的数值关系式。由于多个文献均给出了弦长雷诺数与效率之间满足幂函数关系的结论,不妨针对上述三级风扇先验证这一幂率关系的可靠性。

通过改变进口边界条件和工作转速,可以得到较为广泛的雷诺数区间。如表2所示,设置了压气机在0~20 km 7组高度和 $n'=1.0, 0.9$ 两种相对转速下的14组工况,对应的弦长雷诺数 Re_1 范围为 $1.88 \times 10^5 \sim 3.73 \times 10^6$ 。针对每个工况下近失速点的 Re_1 与对应的 $(1-\eta_p)$ 进行函数拟合,图4为不同雷诺数下的拟合结果。

表2 效率修正计算的雷诺数范围

参数	工作高度/km						
	0	5	10	12	15	17	20
进口总压/Pa	101 325 54 000	26 435	19 330	12 000	8 787	5 475	
进口总温/K	288	270	260	250	250	250	
$Re_1(\times 10^5), n'=1.0$	37.35	21.32	10.67	7.82	4.84	3.48	2.08
$Re_1(\times 10^5), n'=0.9$	37.08	19.85	9.61	7.37	4.67	3.45	1.88

统计分析中常用确定系数 $R-S_{\text{square}}$ 、误差平方和 S_{SE} 和方均根 R_{MSE} 为标准来评价拟合结果的优劣。 $R-S_{\text{square}}$ 越接近1, S_{SE} 和 R_{MSE} 越接近0,则代表拟合效果较好。根据表3可知,两种转速下效率拟合曲线的确定系数均大于0.9,误差平方和均小于 2×10^{-4} ,方均根小于 6×10^{-3} ,拟合程度较高,也就是说, Re_1 和 $(1-\eta_p)$ 之间确实可以高匹配地建立幂函数关系。

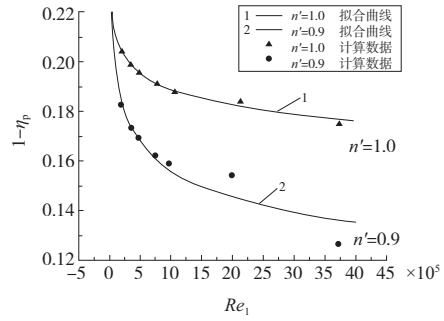


图4 Re_1 和 $(1-\eta_p)$ 的幂函数拟合曲线

表3 效率幂函数曲线拟合的准确率评估

n'	$R-S_{\text{square}}$	S_{SE}	R_{MSE}
1.0	0.986 1	7.917×10^{-6}	1.258×10^{-3}
0.9	0.905 7	1.792×10^{-5}	5.986×10^{-3}

接下来讨论效率修正幂律关系中的常数项取值问题。由于拟合所得幂函数与 WASELL 效率修正模型中所建立的式(2)在形式上完全一致,因此可结合 WASELL 理论(图1)中 K 和 m 的取值方法来进行分析。

如表4所示,拟合所得的系数 K 值围绕0.2上下波动,波动幅度为6%,考虑到误差,基本认为这是一个不随压气机工作状态变化的常数。WASELL 方法中 $K = (1-\eta_{p,de}) \times Re_{de}^m$,下标 de 为设计点,而设计点的雷诺数和效率只与压气机设计参数有关, K 值为常数,与拟合结果具有一致性。

表4 三级风扇效率拟合的幂函数表达式

n'	幂函数表达式	K	$-m$
1.0	$1-\eta_p = 0.211 8 Re_1^{-0.050 12}$	0.211 8	-0.050 12
0.9	$1-\eta_p = 0.197 8 Re_1^{-0.102 70}$	0.197 8	-0.102 70

指数 $-m$ 呈现出了明显的转速相关性,在 $n'=1.0$ 时取-0.05,在 $n'=0.9$ 时取-0.1,说明动力学参数的变化会影响其取值大小。结合式(3)进行分析:当相对转速从 $n'=1.0$ 降低到 $n'=0.9$ 时,转速比 n/n_d 从1.0减小到0.9,各级转子进口轴向速度与叶片轮缘速度也随之下降,即参数 C_z 和 C_{am} 减小,温升 ΔT 降低,进口总温 T_{t1} 、级数 Z 和定压比热 c_p 均不变, $MEAN(V/\sqrt{T})$ 的值将会降低。根据图1,参数 p 的取值与 $MEAN(V/\sqrt{T})$ 呈负相关趋势,所以 p 的取值会随转速降低而增大,又有 $m = p \cdot q$,故指数 $-m$ 会随转速降低而减小,这一变化趋势与拟合结果相符合。

由上述分析可以认为,雷诺数与效率满足幂函数关系的修正模型,同一台压气机中的系数 K 围绕在一个固定值上下波动;当压气机进口条件发生变化时,同一折合转速下效率修正模型中的指数 $-m$ 基本保持不变;不同折合转速下的指数 $-m$ 的取值则存在明显差异。对于本文研究的三级风扇而言,在雷诺数处于 $1.88 \times 10^5 \sim 3.73 \times 10^6$ 的范围时遵循幂率关系,关系式中对应的系数 K 在0.2上下波动;指数 $-m$ 在设计转速下取值-0.05,在0.9转速下取值-0.1。

4 七级高压压气机试验结果分析

针对某七级高压压气机开展雷诺数影响的试验研究,通过节流的方式改变压气机进口雷诺数。试验设置了 $n'=1.0, 0.95, 0.9$ 三组转速和三组节流比。表 5 给出了各试验工况下峰值效率的弦长雷诺数,其中方案一为低雷诺数组,方案三为高雷诺数组,方案二介于两者之间,雷诺数范围为 $7.4 \times 10^4 \sim 3.64 \times 10^5$ 。

表 5 七级压气机节流实验的雷诺数范围

项目	方案一			方案二			方案三		
相对转速	1.00	0.95	0.90	1.00	0.95	0.90	1.00	0.95	0.90
节流比	0.12	0.20	0.20	0.20	0.30	0.32	0.56	0.64	0.80
$Re_1 (\times 10^5)$	0.74	1.09	0.88	1.26	1.63	1.46	3.54	3.48	3.64

在不同的节流比下,七级压气机的特性线如图 5 所示(数据已无量纲化)。以 $n'=0.90$ 为例,当雷诺数从 3.64×10^5 分别降为 1.46×10^5 和 8.80×10^4 时,峰值效率降低了 1.66% 和 3.68%,峰值效率对应点的流量降低了 0.04% 和 1.21%,压比则分别降低了 2.93% 和 7.44%。随着雷诺数下降,压气机效率和压比显著降低,流量有减小趋势,雷诺数效应对气动性能的影响不可忽略。

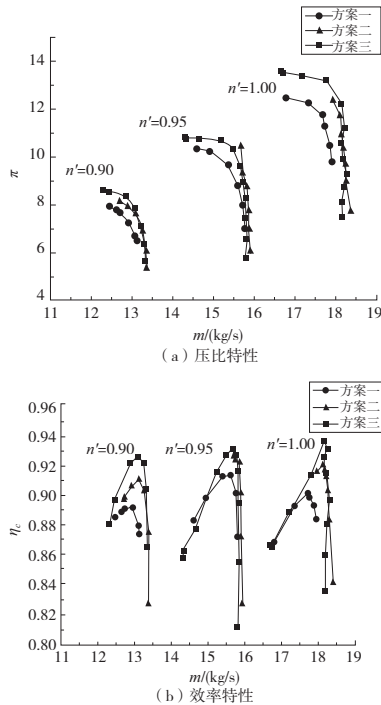


图 5 七级压气机节流实验所得特性曲线

表 7 多变效率 η_p 随指数 $-m$ 离散变化而变化的偏差

项目	Re_1								
	1×10^6			5×10^5			1×10^5		
$-m$	-0.125	-0.090	-0.130	-0.125	-0.090	-0.130	-0.125	-0.090	-0.130
η_p	0.975 1	0.959 6	0.976 8	0.972 9	0.957 0	0.974 6	0.966 8	0.950 3	0.968 7
偏差率/%	0	1.59	1.70	0	1.63	1.77	0	1.70	1.92

取图 5 中各特性线的峰值效率点,采用与 3.2 节中相同的方法,对各点进行 Re_1 和 $(1-\eta_p)$ 的幂函数曲线拟合所得结果如图 6 所示。拟合曲线的 $R-S_{\text{square}}$ 均 > 0.9 , S_{SE} 和 R_{MSE} 均小于 10^{-2} ,拟合准确度较高,认为弦长雷诺数与多变效率之间满足幂函数关系 $1-\eta_p = K \cdot Re_1^{-m}$ 。

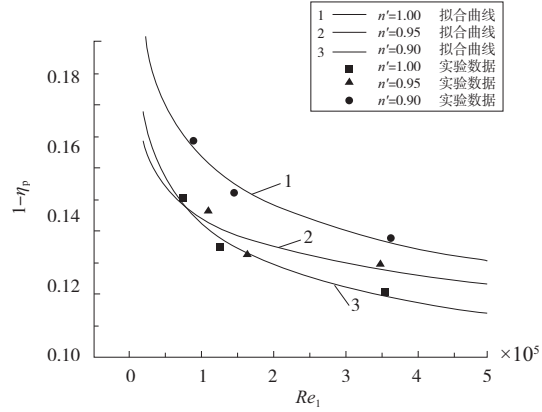


图 6 七级压气机的效率拟合曲线

七级压气机的拟合曲线关系式如表 6 所示。系数 K 值在 0.14 周围波动,0.95 和 1.00 转速下的幅度在 2% 左右,0.90 转速下波动幅值为 6.7%。这可能是由于偏离设计转速较大引起了试验过程中的非雷诺数影响,因此还是认为七级压气机的 K 值为常数 0.14,与三级风扇结论一致;指数 $-m$ 的取值则离散在 -0.1 周围,随转速变化而产生差异。

表 6 七级压气机效率拟合的幂函数表达式

n'	幂函数表达式	K	$-m$
1.00	$1-\eta_p = 0.137 6 Re_1^{-0.127 10}$	0.137 6	-0.127 10
0.95	$1-\eta_p = 0.139 1 Re_1^{-0.089 65}$	0.139 1	-0.089 65
0.90	$1-\eta_p = 0.146 6 Re_1^{-0.130 70}$	0.146 6	-0.130 70

为了更直观地分析指数 $-m$ 的离散性对效率取值的影响,分别取雷诺数 Re_1 为 $1 \times 10^6, 5 \times 10^5$ 和 1×10^5 ,取 $K=0.14$,取指数 $-m$ 分别为 $-0.090, -0.125$ 和 -0.130 ,代入幂函数关系式(2)进行计算,结果如表 7 所示。计算结果表明:在同一雷诺数下,指数 $-m$ 在表 7 所示的离散范围变化时,多变效率 η_p 随之产生的偏差量 $\leq 2\%$ 。因此,可以认为研究所用的七级压气机可以采用 $K=0.14, m=0.1$ 作为效率幂次修正方程的常数项取值。

5 结语

本文采用数值计算、统计分析与试验校对的方法,研究了雷诺数效应对压气机性能影响,针对效率修正模型开展了验证工作,可以得到以下结论。

1) 雷诺数降低对压气机效率的影响不可忽略,峰值效率及对应的压比、流量都有不同程度的下降。

2) 压气机的多变效率与弦长雷诺数之间满足幂函数关系式,可以此作为效率修正的基本模型。

3) 效率幂率关系中的系数 K 是一个具体的与压气机型号有关的常数,由设计点参数决定;三级风扇的指数 $-m$ 呈现出了转速相关性,会受到气动参数改变的影响,而七级压气机的指数 $-m$ 则离散在 -0.1 周围,这说明 $-m$ 的取值本身较为复杂,应综合考虑各方面因素。

参考文献:

- [1] 赵胜丰,卢新根,朱俊强. 雷诺数对跨声速压气机转子内部流动失稳触发机理的影响[J]. 推进技术,2013,34(1):25-30.
- [2] 石建伟,常方圆,宋文武,等. 低雷诺数下 NACA64-418 翼型的流动分离研究[J]. 热能动力工程,2020,35(2):254-264.

- [3] 王正鹤,赵辉,卫萌,等. 雷诺数对跨声速压气机失速分离特性的影响[J]. 工程热物理学报,2019,40(9):1988-1996.
- [4] 姚卡,徐昂,史磊,等. 基于雷诺数的离心压气机模化研究[J]. 汽轮机技术,2019,61(4):275-279.
- [5] HEIDELBERG L J, BALL C L. Effect of Reynolds number on overall performance of a 3.7-inch-diameter six-stage axial-flow compressor[R]. Florida, USA: NTRS, 1972.
- [6] WEIGEL C, BALL C L. Reynolds number effect on overall performance of a 10.8-centimeter (4.25-inch) sweptback bladed centrifugal compressor[R]. Florida, USA: NTRS, 1972.
- [7] 温泉,梁德旺,李逢春,等. 雷诺数效应对小流量多级轴流压气机的性能影响[J]. 航空动力学报,2004,19(1):81-88.
- [8] WASSSELL A B. Reynolds number effects in axial compressors[J]. Journal of Engineering for Power, 1968, 90(2):149-156.
- [9] 肖洪,吴虎,廉筱纯. 雷诺数对涡扇发动机性能及稳定性影响[J]. 航空动力学报,2005,20(3):394-398.
- [10] 郭捷,王咏梅,杜辉,等. 低雷诺数条件对涡扇发动机风扇/压气机性能和稳定性影响的试验研究[J]. 航空发动机,2004,30(4):4-6.

收稿日期:2021-11-16

(上接第6页)

电极直径下 TBC 孔形与金属孔形两者的匹配情况,通过观测小孔的加工表面及入口尺寸,分析对加工结果的影响,具体结论如下:

1) 从管电极直径对加工结果影响的试验结果中发现,随着管电极尺寸的增大,最大堆积物厚度随之增大,而且堆积物生成区域从孔前缘处发展为整个孔口附近;

2) 针对本文试验参数下,不宜选用较小尺寸(0.20 mm)的管电极进行加工,会严重影响两孔形间的匹配程度;随着管电极直径增加可以提高孔形匹配性,但管电极直径过大也容易出现裂纹、剥落等缺陷。推荐使用直径为 0.30 mm 的管电极,加工结果拥有较好的孔形匹配度和较少的表面缺陷。

参考文献:

- [1] 王博,刘洋,王福德,等. 航空发动机及燃气轮机涡轮叶片热障涂层技术研究及应用[J]. 航空发动机,2021,47(增刊1):25-31.
- [2] 周绪强,王红顺,王艳. 浅谈燃气涡轮发动机热障涂层技术发展[J]. 内燃机与配件,2019(24):22-23.
- [3] MOHRI N, FUKUZAWA Y, TANI T, et al. Assisting electrode method for machining insulating ceramics[J]. CIRP Annals, 1996, 45(1):201-204.
- [4] VOISEY K T, CLYNE T W. Laser drilling of cooling holes through plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 176(3):296-306.

- [5] SEZER H K, LI L. Mechanisms of acute angle laser drilling induced thermal barrier coating delamination[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009, 131(5):051014.
- [6] KAMALU J, BYRD P, PITMAN A. Variable angle laser drilling of thermal barrier coated nimonic[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 122(2/3):355-362.
- [7] EBRAHIMZADE V, UCHTMANN H, SINGHEISER L, et al. Microstructure and cyclic oxidation behavior of APS TBC systems drilled with various laser methods[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 378:125018.
- [8] WANG R J, DONG X, WANG K D, et al. Two-step approach to improving the quality of laser micro-hole drilling on thermal barrier coated nickel base alloys[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 121:406-415.
- [9] MARIMUTHU S, SMITH B, KIELY A, et al. Delamination-free millisecond laser drilling of thermal barrier coated aerospace alloys[J]. Journal of Laser Applications, 2019, 31(4):042001.
- [10] KUCUKTURK G, COGUN C. A new method for machining of electrically nonconductive workpieces using electric discharge machining technique[J]. Machining Science and Technology, 2010, 14(2):189-207.
- [11] 赵凯. 热障涂层金属构件的磨料水射流与电火花组合制孔基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2019.
- [12] 谢天海. EB-PVD 涂层零件的磨料冲蚀与电火花组合加工试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.

收稿日期:2021-12-13