

文章编号: 1000-8055(2009)02-0241-06

逆流冷却罗茨鼓风机涡流与排气脉动的数值分析

刘正先¹, 徐莲环²

(1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072; 2. 山东电力设备厂, 济南 250022)

摘 要: 运用计算流体动力学方法对逆流冷却在削弱罗茨鼓风机排气过程中存在的排气脉动方面进行了数值模拟, 以动网格方法实现了计算域的变化并保证与转子旋转角度的匹配, 在预进气与基元容积的动、静交接区域采用了非一致网格界面。对涡流与脉动流动瞬态特性的分析证明, 逆流冷却可以避免排气口处的回流现象; 在一个运行周期内, 逆流冷却鼓风机的小脉动幅值仅为空冷鼓风机的 20% ~ 25%, 这种小幅值脉动在降低排气气动噪声方面起重要作用。

关 键 词: 逆流冷却; 罗茨鼓风机; 排气脉动; 动网格; 数值模拟

中图分类号: O351.2

文献标识码: A

Numerical simulation of vortex and discharge pulse in positive discharge blowers with countercurrent cooling

LIU Zheng-xian¹, XU Lian huan²

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Shandong Power Equipment Company, Jinan 250022, China)

Abstract: The vortex and discharge flow with fluctuation of involute type three-lobe positive discharge blowers with countercurrent cooling was numerically investigated by means of computational fluid dynamics (CFD). The dynamic mesh techniques were used to approach the rotating displacement of cell cubage and the alterability of computational area. The non-uniform mesh was applied to the rotor-stator coupled area. The characteristic of inner air flow was discussed. Based on the analysis of instantaneous characteristics of vortex and pulse flow, it's founded that countercurrent cooling could avoid the backflow eddy at the discharge outlet. At the same time, the pulse amplitude in countercurrent cooling is about 20% ~ 25% of that in air cooling in a working cycle. This pulse flow greatly weakened could play an important role in reducing aerodynamic noise in positive discharge blower.

Key words: countercurrent cooling; positive discharge blowers; discharge pulse; dynamic mesh; numerical simulation

在双转子回转式容积型气体压缩机械中, 罗茨鼓风机的应用非常广泛, 是矿山、冶炼、石油、化工、环保等行业的关键设备。常规的罗茨鼓风机(亦称空冷罗茨鼓风机)在工作过程中, 随着叶轮的旋转, 完成基元容积气体的周期性输送进而达到增压目的。当基元容积与排气口连通时, 存在排

气口外侧高压气体向基元容积回流的现象, 并引起剧烈的压力脉动, 产生脉动涡流^[1]。因此, 脉动性是常规罗茨鼓风机运行过程当中主要的流动现象, 正是这种排气气流脉动影响了罗茨鼓风机的性能。

逆流冷却罗茨鼓风机针对空冷罗茨鼓风机存

收稿日期: 2008-01-09; 修订日期: 2008-03-21

作者简介: 刘正先(1969-), 女, 汉族, 山西省夏县人, 工学博士, 教授, 从事流体机械内部湍流流动的数值与实验研究。

E-mail: zxliu@tju.edu.cn

在的流动问题,通过在机壳上开导气孔,预先从排气管道引入部分高压气体,即通过预进气,减缓排气口的回流冲击,达到抑制排气过程的脉动流动,同时降低鼓风机排气温度的目的,这种方法被称为逆流冷却^[2].

罗茨鼓风机自身的运转特点及结构使其难以通过实验方法对内部实际流动进行测量,以得到性能参数的变化规律,近年来随着 CFD 技术的进步^[3-4],采用计算流体动力学方法对叶轮机械内部实际流动进行数值模拟并分析其流动信息成为一种有效的研究手段.作者曾对常规罗茨鼓风机进行了数值仿真并与理论分析和半经验公式计算结果做了对比验证^[5],在此基础上,本文进一步对逆流冷却罗茨鼓风机进行非定常数值模拟,力求较客观地展示其内部的脉动流动过程以及排气脉动流量曲线,进而明确逆流冷却在降低排气脉动方面的作用.

1 逆流冷却罗茨鼓风机的结构

逆流冷却罗茨鼓风机在结构上与空冷鼓风机的不同之处是增加了预进气装置,通过机壳开口从排气口引回一部分高温高压气体,经冷却之后,作为预进气导入基元容积内(图 1).

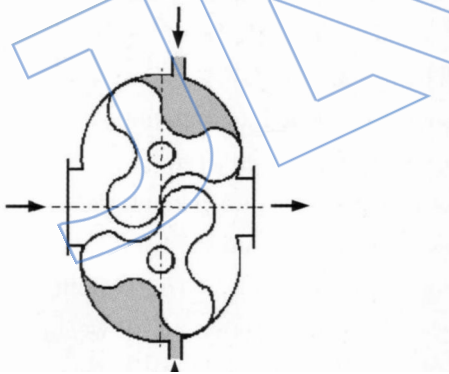


图 1 预进气原理示意图

Fig.1 Sketch map of the pre inflow

本文的研究对象为 L52W₆ 型罗茨鼓风机,型线如图 2 所示,AB 段为对滚圆弧,用以保证转子的齿顶密封并与腰部 EG 段实现啮合.BC 段为直线,CD 段为渐开线,DE 段为直线,EF 段为圆弧,EG 段为凸起的圆弧,该型线容积利用率为 0.53^[6].其主要结构参数为:叶轮长度为 355 mm,节圆半径 $a=100\text{ mm}$,转子半径 $R_m=150\text{ mm}$,两叶轮中心距 $o_1o_2=2a=200\text{ mm}$, R_1 为左叶轮从轴心到啮合点 N 的距离, R_2 为右叶轮从轴心到啮合点 N 的距离,P 为两节圆的切点,称为节点.设计

参数为:叶轮转速 $\omega=1493\text{ r/min}$,理论流量 $Q=26.14\text{ m}^3/\text{min}$.

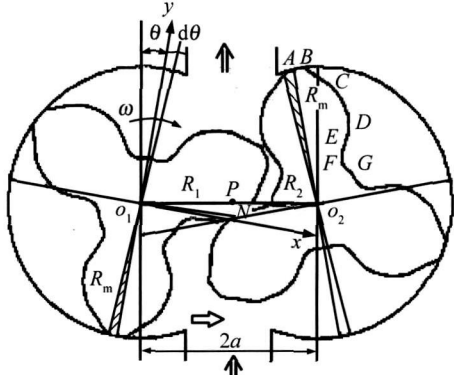


图 2 排气容积示意图

Fig.2 Sketch of exhaust cubage

2 数值模拟方法

2.1 计算区域建模及网格生成

罗茨鼓风机流场的三维模型如图 3(a) 所示,二维计算模型如图 3(b) 所示,共包括五部分:进气、旋转、左侧预进气、右侧预进气和排气部分.

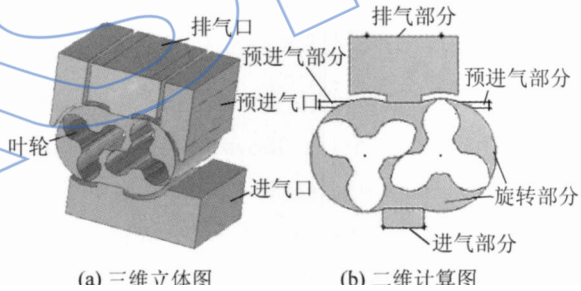


图 3 预进气鼓风机计算模型

Fig.3 Computation model of pre inflow blower

在生成计算域网格时,对旋转部分采用三角形网格,以保证不同时刻网格拉伸或合并变化后的网格质量;机壳进、排气部分采用四边形网格;左右预进气区域采用三角形网格,以便与旋转部分的动网格匹配.计算模型初始网格数为 205 824,最大扭曲率为 0.722 57.旋转部分的网格尺度与空冷鼓风机相同,空冷鼓风机的计算已证明采用该网格尺度的可行性和计算结果的正确性^[5].

2.2 计算方法及边界条件

气体在流动过程中满足湍流 N-S 运动方程组,对运动方程中的湍流脉动项(雷诺应力)采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型进行模化,对连续方程、动量方程以及能量方程的求解采用 PISO 算法,以适应瞬态问题的模拟;方程的离散格式均采用二阶精

度的迎风差分^[7].

进口边界条件: 压力入口, 给定入口边界上的总压、总温、流动方向等参数值.

预进气口边界条件: 压力入口, 设定为排气压力值, 温度为冷却后的气体温度.

出口边界条件: 压力出口, 给定排气静压值和排气温度.

固壁边界条件: 速度和温度均采用壁面函数方法.

流动介质: 可压缩理想空气.

分别对属于亚临界和超临界^[6]的两个运行工况下的流动进行了计算.

亚临界工况参数: 升压 39 100 Pa, 进气口压强为 101820 Pa, 进口温度为 24 ℃, 排气温度为 56.5 ℃, 经冷却后的出口温度, 即预进气进口温度为 26 ℃.

超临界参数: 升压 157 000 Pa, 进口处压强 101850 Pa, 进口温度 24.4 ℃, 排气温度为 111.1 ℃, 预进气进口温度为 49 ℃.

非定常条件: 时间步长 $\Delta t = CFL \cdot \Delta x / \lambda_{max}$ 其中 CFL 为库朗数; Δx 为网格间距; λ_{max} 为速度尺度.

2.3 动网格的实现

由于罗茨型鼓风机排气容积呈周期性收缩变化, 故采用弹性光滑模型和局部网格重生成方法来实现动网格以适应计算域变化的需要.

弹簧光滑模型用于节点发生位移后, 从节点位移出发, 采用虎克定律, 计算新的网格节点位置. 在该模型中须设置弹簧弹性系数、边界点松弛因子、收敛判据以及迭代次数等参数.

局部网格重生成模型用于确定时间步长改变后哪些网格被重新划分. 在进行下一个时间步迭代之前, 检查网格的尺寸以及扭曲率, 并生成新的网格. 动网格的变化必须与区域内的固体运动描述相匹配, 本文通过自定义函数(UDF)来定义固体相对于重心的线速度和角速度, 并将 UDF 与动网格的移动相耦合, 实现动网格与转子旋转角度的一致性.

图 4(a)~(e) 给出了不同时刻预进气口附近部分旋转区域动网格随时间的变化图. 可以观察到, 第 100 时间步长(图 4(b)) 与初始位置(图 4(a)) 相比, 距转子稍远区域的网格由于转子的运动而被拉伸, 靠近转子的网格由于拉伸超过了一定的限度而被重新分割, 尺度比其它区域网格更小些. 图 4(c) 显示, 靠近左预进气口的网格还没

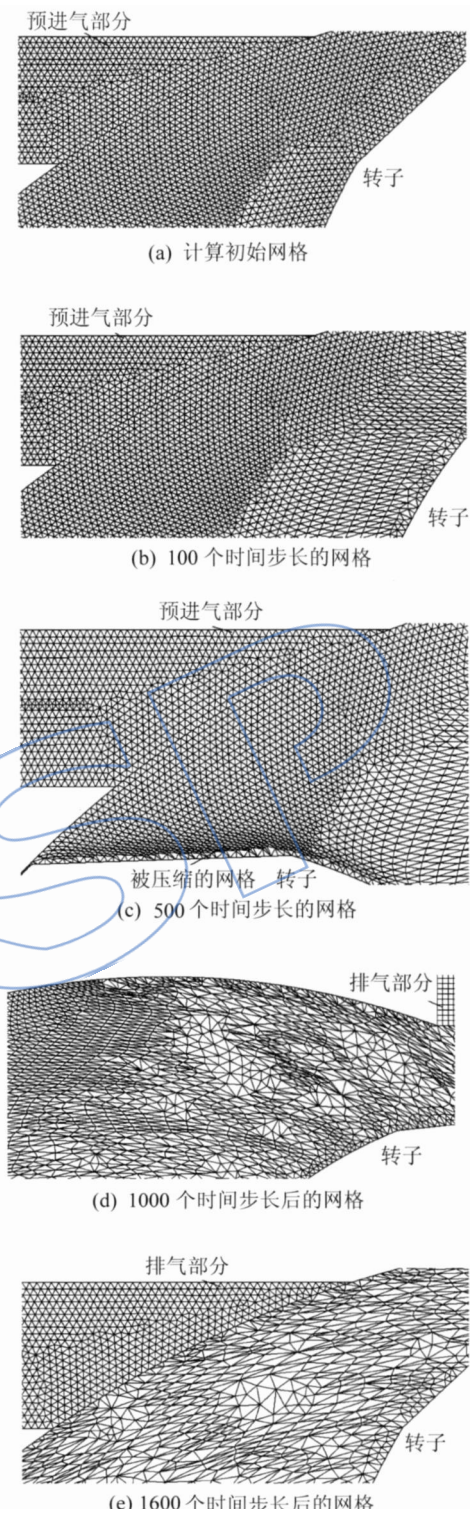


图 4 计算动网格瞬态图

Fig.4 Variations of dynamic mesh with time

发生明显变化, 最接近转子的部分网格随着旋转被压缩, 而后被合并, 新生成的网格比邻进网格略大. 图 4(d) 可以清楚地分辨出拉伸与重新生成的网格, 机壳侧的部分网格在被拉伸, 靠近转子的网格已经进行了重新生成, 生成后的网格扭曲率更大. 1600 个时间步(图 4(e)) 以后, 旋转部分的所

有网格都发生了变化,被拉伸或被合并,与初始网格相比,变化很大.这时转子旋转 120° ,两个脉动周期.

3 亚临界与超临界工况结果分析

3.1 排气流量脉动曲线

图 5 和图 6 分别为亚临界和超临界工况下,排气口处排气流量的周期脉动曲线.可以看出,两种工况下排气过程呈现明显而良好的周期特征,在一个脉动周期内,排气流量存在数个脉动峰值,说明加入预进气后,排气过程呈现着明显的流动小脉动运动,随着升压的不同,小脉动幅值和发生时刻各不相同,超临界工况下的最大与最小排气流量的差比亚临界工况下要大.

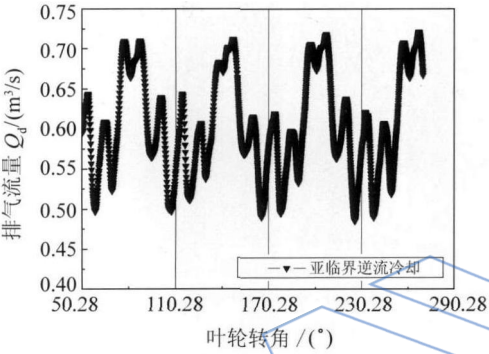


图 5 亚临界排气脉动曲线

Fig. 5 Subcritical discharge pulse curve

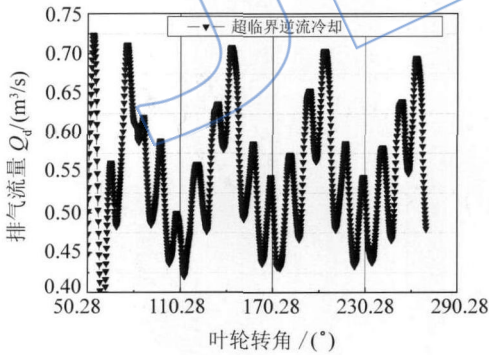


图 6 超临界排气脉动曲线

Fig. 6 Supercritical discharge pulse curve

图 7 给出了两种升压下,逆流冷却鼓风机与空冷鼓风机排气流量脉动曲线的比较.可以看出,与空冷鼓风机相比,逆流冷却鼓风机在一个脉动周期存在的数个小脉动幅值远小于空冷鼓风机的两个大脉动幅值,仅为空冷鼓风机的 20%,排气脉动被大幅度降低对削弱排气脉动噪声有很大益处.另外一个现象是逆流冷却鼓风机的排气流量

均大于零,不像空冷鼓风机有负的流量值,说明逆流冷却鼓风机避免了在排气口处出现的回流流动.

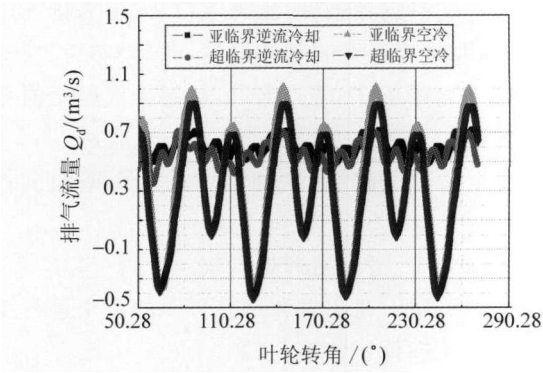


图 7 数值模拟排气流量脉动曲线

Fig. 7 Discharge pulse curve of numerical simulation

以下将从不同运行时刻流动参数的分布情况来分析逆流冷却鼓风机脉动流动过程.

3.2 预进气口与基元容积相通时的流动分析

图 8 为转角 11.25° 时,预进气与基元容积连通时两个工况下的速度矢量图,预进气部分与基元容积连通后,高压气体迅速流入基元容积,并在基元容积内形成涡流,随着转角增大,涡中心向下移动,涡影响的范围也进一步扩大.与亚临界相比,超临界工况的涡尺度更大,在超临界工况下气体混合速度更快.

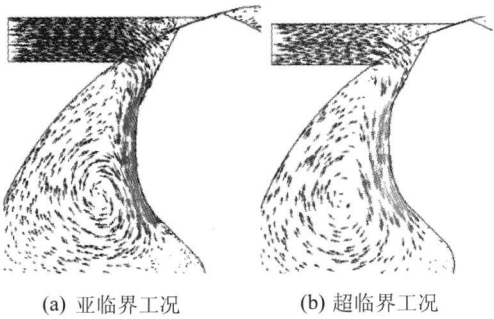


图 8 转角 11.25° 左预进气与基元容积的速度矢量图

Fig. 8 Velocity vectors of pre inflow and element volume at 11.25°

当转角大于 22.5° 即预进气口与基元容积完全连通后(图 9),涡的大小和位置基本不再变化,亚临界时稳定的涡靠近转子一侧,超临界时则处于基元容积的中间位置.从压强分布图(图 10)看,反而是亚临界的基元容积内均达到了排气压力,而超临界的基元容积由于强涡流影响,导致部分区域压强未达到排气压力.

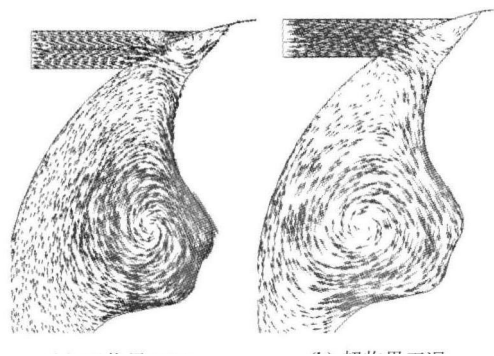
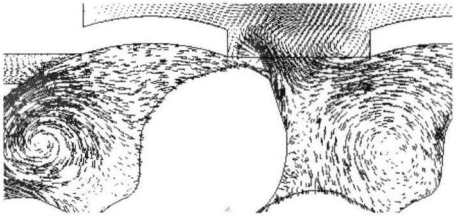
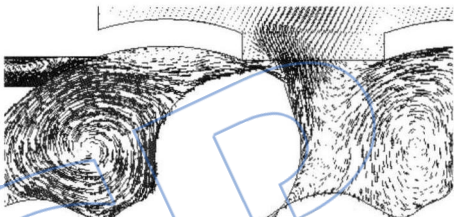


图 9 转角为 22.5°时的速度矢量图

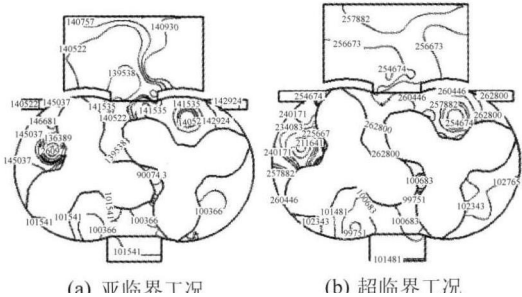
现类似空冷鼓风机的向基元容积的回流流动现象, 排气口气流表现为整体向上即排气外侧流动而不是向左侧的基元容积内流动. 基元容积内的大涡是预进气形成而不是回流冲击引起, 此时超临界工况的涡强度和尺度均明显大于亚临界, 但它们对排气口的气流还没有形成影响.



(a) 亚临界工况



(b) 超临界工况



(a) 亚临界工况

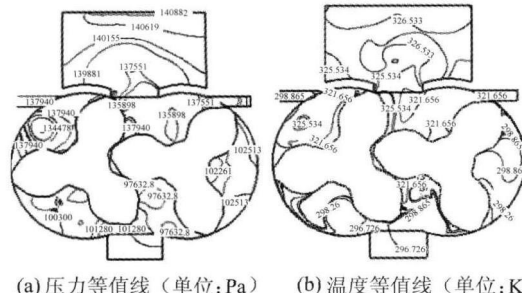
(b) 超临界工况

图 10 转角为 22.5°时的压强等值线分布图(单位: Pa)

Fig. 10 Contour maps of the pressure distribution for angle 22.5° (Unit: Pa)

3.3 基元容积与排气口连通时的流动分析

图 11(a), (b) 分别为亚临界工况下, 转角 50.25°基元容积与排气口连通瞬间的压力和温度等值线图. 从两图可以看出, 逆流冷却的预进气使封闭的基元容积在与排气口连通之前, 内部压力已达到或接近排气压力, 而不像空冷鼓风机在排气初始时排气腔与基元容积间存在极大的压差^[5]. 由此可以推断预进气的无压差分布极大地减缓甚至避免了排气口外侧高压气体的回流.



(a) 压力等值线 (单位: Pa)

(b) 温度等值线 (单位: K)

图 11 压力与温度等值线分布图

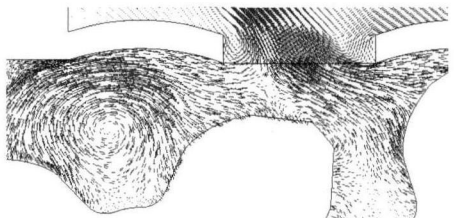
Fig. 11 Contour of the pressure and temperature

当转角大于 50.25°后, 基元容积与排气口连通, 图 12 为连通后即转角为 58.5°时排气口附近气流的速度矢量图. 可以看到在排气口处没有出

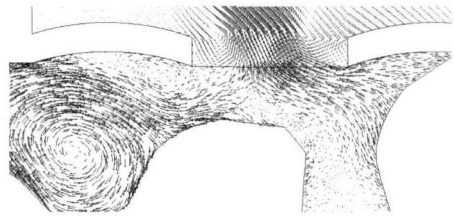
图 12 转角为 58.5°时速度矢量图

Fig. 12 Velocity vectors diagrams for angle 58.5°

随着转子的进一步转动, 基元容积和排气口充分连通, 从图 13 的速度矢量图看, 旋转部分与排气部分的流动状况很好. 除了基元容积内仍然有涡存在之外, 在超临界工况的旋转部分出口存在较明显的小涡, 可见超临界工况下由于涡旋流



(a) 亚临界工况



(b) 超临界工况

图 13 基元容积和排气口充分连通后的速度矢量图

Fig. 13 Velocity vectors of volume element and the discharge outlets

更加强烈而在具有收敛形状的出口处容易产生诱发涡。

图 14 为基元容积和排气口充分连通后流场静压力和温度等值线图。在该转角位置,基元容积内的压强由于转子的旋转作用,反而大于排气压力,温度也是稍大于排气温度。

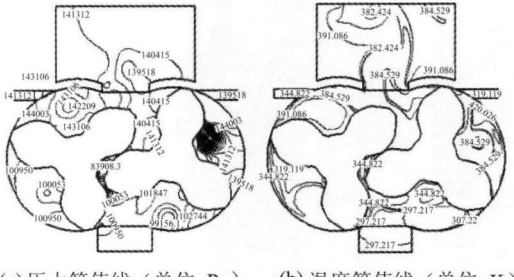


图 14 亚临界工况压强与温度等值线分布图
Fig. 14 Contour of the pressure and temperature for subcritical

4 结 论

通过对带逆流冷却罗茨鼓风机排气过程气流脉动以及涡流流动的数值模拟,并对排气流量曲线、不同时刻基元容积内速度、压力和温度的分布特点进行较详细的分析,发现:由于采用预进气装置,在逆流冷却罗茨鼓风机的排气过程中存在明显的涡流运动,亚临界和超临界工况下,不同转角时刻涡形成的位置、强度略有不同,与空冷罗茨鼓风机相比,逆流冷却的预进气引起的涡流增加了排气气流的脉动频率:在一个运行周期内,存在

4~ 5 个脉动,但其脉动强度显著降低,幅值仅为空冷的 20% ~ 25%,同时消除了排气口处的回流涡旋冲击,说明逆流冷却罗茨鼓风机可以实现降低排气脉动,从而降低气体脉动冲击噪声的作用。

参考文献

[1] 苏春模. 罗茨鼓风机及其使用[M]. 长沙: 中南工业出版社, 1999.

[2] 田国光. 逆流冷却技术在罗茨鼓风机中的应用[J]. 风机技术, 2000, (2): 12- 14.

TIAN Guoguang. Application of countercurrent cooling technique on roots blower[J]. Compressor Blower and Fan Technology, 2000, (2): 12- 14. (in Chinese)

[3] Blekhan D. A theoretical and experimental study of high-temperature compressive gas heating[D]. Buffalo: State University of New York , 2002.

[4] 刘正先. 不同工况对离心叶轮内部流场特性影响的实验研究[J]. 流体机械, 2004, 32(10): 1- 4.

LIU Zhengxian. Experimental investigation of the character of flow field in centrifugal impeller at different flow rate[J]. Fluid Machinery, 2004, 32(10): 1- 4. (in Chinese)

[5] 刘正先, 徐莲环, 赵学录. 罗茨鼓风机内部气流脉动的非定常数值分析[J]. 航空动力学报, 2007, 22(3): 400- 405.

LIU Zhengxian, XU Lianhuan, ZHAO Xuelu. Unsteady numerical simulation and analysis of the flow fluctuation in the roots blower[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(3): 400- 405. (in Chinese)

[6] 徐莲环. 罗茨鼓风机内部脉动流动的数值分析[D]. 天津: 天津大学, 2007.

[7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.