

涡轮增压器密封性能研究

冀春俊 李佳娜

(大连理工大学能源与动力学院, 辽宁大连 116023)

(联系电话: 0411-84706561 E-mail: lijiana1982@163.com)

摘 要: 本文利用 STAR-CD 建立涡轮增压器密封结构的数值计算平台, 采用 SMPLE 算法和高 Reynolds $k-\varepsilon$ 湍流模型, 对某型号涡轮增压器的密封内部流场进行了数值模拟与分析, 比较不同密封结构对泄漏量的影响。本文的研究工作为密封设计提供了依据。

关键词: 涡轮增压器, 密封, 数值模拟, 泄漏量

1 引言

在涡轮增压器中, 密封结构对于机器的性能和安全有着重要的影响。其中, 浮环式密封式经常采用的一种密封方式。但是由于其结构的复杂性, 目前对它的研究非常有限。在结构设计中, 没有可靠的数据作为设计依据。从已经公开的文献资料来看, 目前对涡轮增压器密封的研究, 基本上限于在总体试验基础上, 进行密封泄漏量的计算。本文利用 STAR-CD 建立密封结构的数值计算平台, 依靠先进的数值实验手段对流体在密封中的流动形式做出尽量准确的描述和正确分析, 并计算了不同径向间隙、侧向间隙、开口间隙对单环及双环密封泄漏量的影响, 可以为实验提供参考, 为设计提供依据, 以提高涡轮增压器的整机性能。

2 物理模型

图 1 是周向取 10 度, 压气机端和涡轮端单环密封流场的示意图, 此时对应的侧间隙为 0.08mm, 径向间隙为 0.36mm, 开口间隙为 0.08mm。压气机叶轮与压气机背盘的间隙为 0.54~0.85, 生成模型时取此间隙为两个极限间隙的平均值: $(0.54+0.85)/2 = 0.695\text{mm}$; 同理, 涡轮端密封中, 涡轮转轴与隔热罩的间隙取极限间隙的平均值: $(0.71+1.07)/2 = 0.89\text{mm}$ 。

3 计算方法, 网格及边界条件

本文采用商用计算流体力学(CFD)软件 STAR-CD 对流场进行详细的计算分析, 其基本思路是在计算域内划分计算网格, 在网格上离散流动的控制方程, 在给定一定的边界条件和数值参数下, 以一定的算法求解流动方程, 得到流场内的详细气动参数分布^[2]。

3.1 计算网格的生成

网格生成是数值模拟复杂流动现象的关键问题之一。网格生成的类型、质量直接影响到计算的精度, 甚至影响数值计算的收敛性。本算例中流场的间隙非常小, 如果采用四面体网格会极大的影响计算精度。因此采用正交性比较好的六面体网格, 用 ICEM-CFD 软件中的

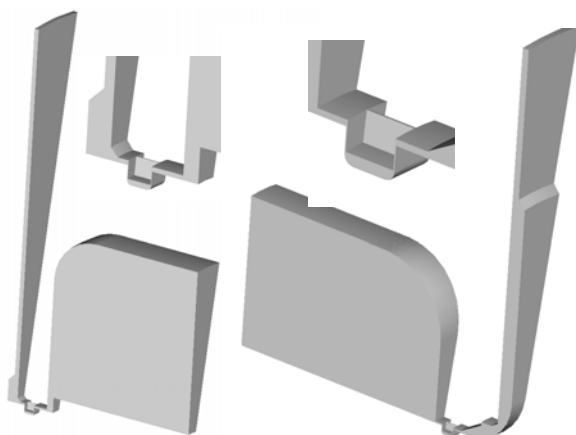


图 1 压气机端和涡轮端密封带有开口间的流场几何模型及密封处放大效果

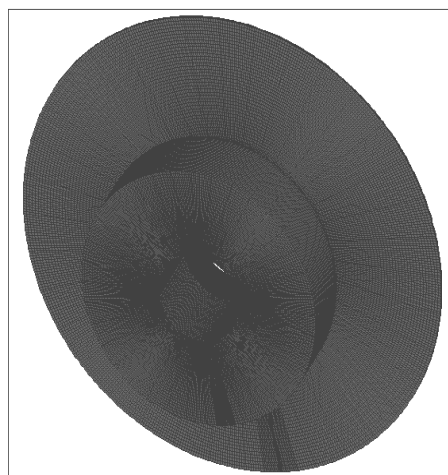


图 2 压气机端密封网格

HEXA 模块生成计算网格。将生成的 10 度密封流场网格进行复制并旋转，删去多余的开口间隙流场，便生成了整个密封的网格。整个计算模型所用的网格总数约 210 万，检查生成网格的质量，均达到了计算的要求，可以保证计算的精度。计算网格如图 2 所示。

3.2 湍流模型、介质属性及边界条件

本算例采用 SIMPISO 算法和高 Reynolds $k-\epsilon$ 湍流模型。在近壁区域则用壁面函数来处理。压气机端密封工作介质为空气。在计算时取工质为可压缩流体，密度是压力和温度的函数 $\rho=f(T,P)$ 。压气机端空气的分子密度为 28.96kg/kmol ，定压比热 C_p 取为 1003.62J/kgK ；涡轮端燃气的分子密度为 50.509kg/kmol ，定压比热 C_p 取为 1147J/kgK 。

边界条件：进口：Stagnation 边界条件，给定进口总压 P_{tot} ，进口总温 T_{tot} ，来流方向垂直于进口截面。出口：Pressure 边界条件，给定出口的压力 P ，出口静温 T 。

密封的内壁为转速 60000 转/分的壁面边界。其余边界设定为壁面边界条件(WALL 边界)。

4 计算结果及分析

4.1 气流在压气机端的流动结果分析

4.1.1 压气机端单环密封中的气流流动分析

气流在单环密封中的流动情况见图 3。气流径向流入，在第一个转弯处改为轴向。由于

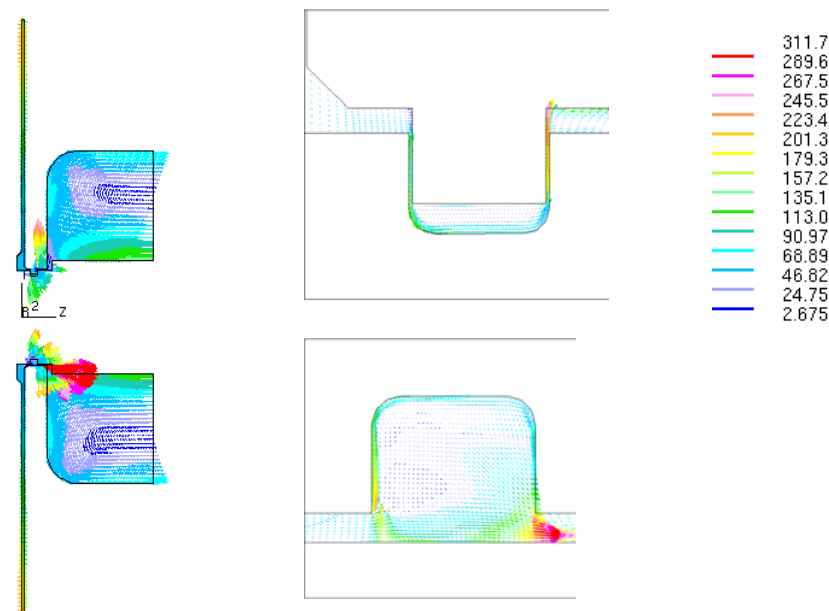


图 3 压气机端工况 1 带有开口间隙截面的速度分布及两个间隙处中截面速度分布

转子的转速很大，在气体的粘性作用下，气流的周向速度很大，直到气流流出密封时气流仍有旋转流动的特点；这种周向运动对于减小泄漏起着重要的作用，因为周向运动必然产生离心力，从而减小压差作用下的泄漏趋势。气流流过密封通道的侧间隙时，由于流通面积的减小速度有非常明显的提高。在径向间隙中，由于流道有急剧的扩张，气流分离形成漩涡，漩涡形成一个很大的低轴向速度区域从而堵塞流道，将主气流压缩到很小的范围。接着又经过一个很窄的侧间隙，速度再次提高，经过两次速度方向的改变流出密封。还有非常少量的气流流经密封环的开口间隙。由于开口间隙很小，而主流周向旋转速度很强，它对主流流动的影响范围很小。但需要指出的是，气流流出开口间隙处由于气流直冲过间隙，压差没有经过耗散，形成局部的高速区域，在这个区域马赫数已经接近甚至大于 1。

4.1.2 压气机端双环密封中的气流流动情况

气流在双密封环中的流动情况与单环中的流动基本类似。图 4 (a) 是垂直开口间隙中

截面的截面的速度分布。其流动与单环密封非开口处的流动情况完全一致。但是当气流流过开口间隙时，双环密封中的流动好于单环。气流流过第一个开口间隙时，气流在这里的流动相当于在一个死区内流动，耗散了部分能量，以后的流动过程中这个区域没有形成高速区。流经第二个开口间隙的气流在此之前能量耗散不大，流出密封处速度较高，但与单环密封比较，速度已经有了明显的减小。

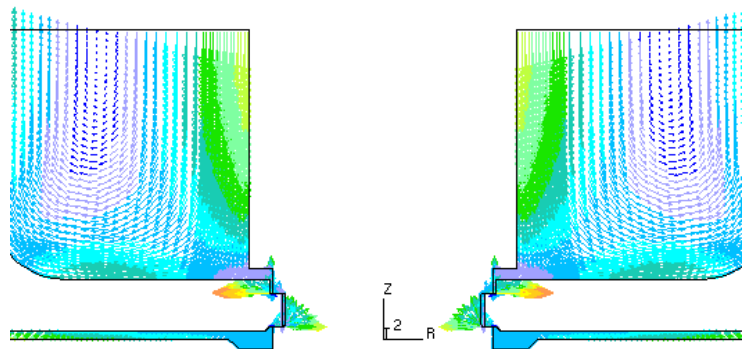


图 4 (a) 压气机端工况 1 垂直开口间隙面的速度分布及两个间隙处中截面速度场

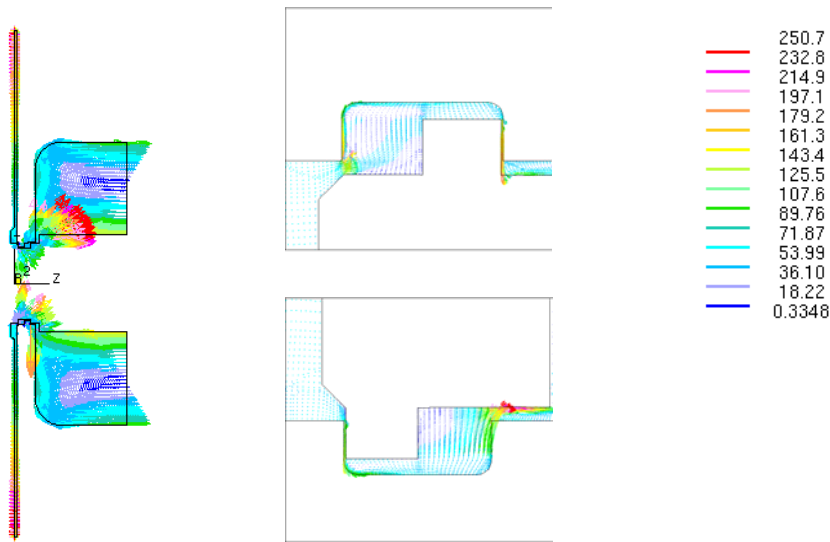


图 4 (b) 压气机端工况 1 带有开口间隙截面的速度分布及两个间隙处中截面速度场

4.1.3 不同间隙的压气机端漏气量计算结果

表 1 列出了在不同的侧间隙，径向间隙和开口间隙下，单环与双环密封泄漏量的数值计算值。

表 1 压气机单环与双环密封泄漏量的数值计算比较

	侧间隙	径向间隙	开口间隙	单环密封泄漏量 (kg/s)	双环密封泄漏量 (kg/s)
工况 1	0.08	0.36	0.08	7.7806E-04	5.6653E-04
工况 2	0.14	0.45	0.14	8.8293E-04	1.0595E-03
工况 3	0.2	0.55	0.2	1.3404E-03	1.4953E-03

在对压气机端进行数值计算时,对双环密封工况1轴转速为0的情况也进行了数值模拟。计算结果见表2。

表2 压气机端双环密封工况1轴转速为0时的泄漏量

进口总压(bar)	背压(bar)	泄漏量(kg/s)
1.06	0.9	1.27E-04
1.7	0.9	4.57E-04
2.5	0.9	8.84E-04
2.4255	1	6.85E-04

以上结果可以说明轴的转动使密封内部气流产生了周向速度,从而阻止气流的泄漏。

4.2 不同间隙的涡轮端密封漏气量计算

与压气机端密封计算方法类似,再对涡轮端的密封进行数值计算,研究其密封性能,分析不同结构密封泄漏量的变化。

4.2.1 不同间隙的涡轮端密封漏气量计算结果

总的来说,气流在涡轮端密封处的流动与在压气机端的流动基本相同。由于工质类型的不同和压比的差异,马赫数要比相同工况下的压气机端低。表3列出了在不同的侧间隙、径向间隙和开口间隙下,单环与双环密封泄漏量的数值计算值。

表3 涡轮单环与双环密封泄漏量的数值计算比较

	侧间隙	径向间隙	开口间隙	单环密封泄漏量(kg/s)	双环密封泄漏量(kg/s)
工况1	0.08	0.36	0.08	7.3405E-04	6.3893E-04
工况2	0.14	0.45	0.14	1.0443E-03	9.4242E-04
工况3	0.2	0.55	0.2	1.3864E-03	1.3098E-03

5 压气机端和涡轮端密封环不同间隙对漏气量的影响规律

图5给出了单双环密封在不同工况下的泄漏量。为了更深入的研究侧间隙,径向间隙及开口间隙对泄漏量的影响,对不同的间隙大小进行数值计算。由于泄漏量与三种间隙都有一定的关系,故每次计算都是取两种间隙为定值,改变另一种间隙的大小,计算结果见表4。

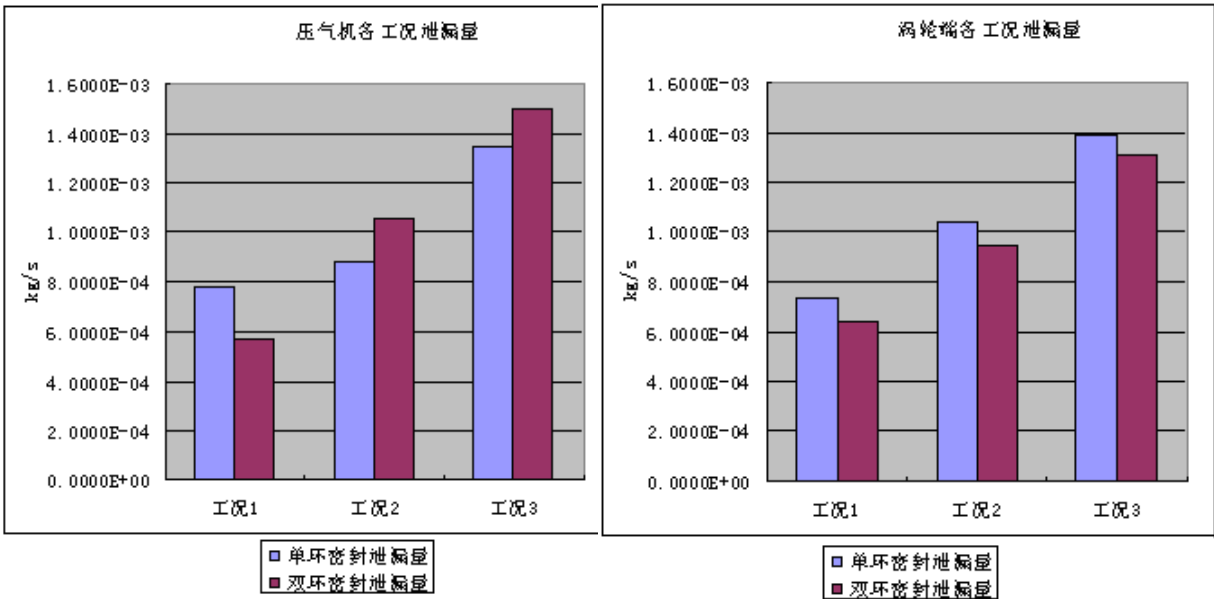


图5 单双环密封泄漏量比较

表 4 不同间隙下泄漏量的比较

	侧间隙	径向间隙	开口间隙	双环密封泄漏量(kg/s)
压气机	0	0.36	0.08	1.10E-05
	0.01			3.39E-04
	0.02			3.61E-04
	0.03			4.79E-04
	0.04			5.67E-04
	0.04	0.36	0.08	5.67E-04
		0.45		5.87E-04
		0.55		6.13E-04
	0.04	0.36	0.08	5.67E-04
			0.14	5.76E-04
			0.2	5.68E-04

	侧间隙	径向间隙	开口间隙	双环密封泄漏量(kg/s)
涡轮	0	0.36	0.08	4.47E-06
	0.01			1.92E-04
	0.02			4.44E-04
	0.03			6.31E-04
	0.04			6.39E-04

从计算结果可以看出，无论是压气机还是涡轮端，其泄漏量随着侧间隙的增大而增大。在压气机端，泄漏量亦随径向间隙的增大而增大，但增大的幅度没有改变侧间隙明显。开口间隙的变化几乎对泄漏量不产生任何影响。

参考文献：

- [1] ANSYS ICEM-CFD Meshing Tutorial manual, ANSYS Company, 2003
- [2] 江宏俊，流体力学，高等教育出版社，1985
- [3] STAR-CD Methodology, CD-Adapco Company, 1999
- [4] STAR-CD User Guide, CD-Adapco Company, 1999