

文章编号: 1671-6612 (2022) 02-324-04

# 喷液冷却对空调压缩机性能影响研究

蔡宁 赵洋 李志强 徐华保

(中家院(北京)检测认证有限公司 北京 102600)

**【摘要】** 喷液冷却是压缩机运行过程对其电机冷却的一种方式,为考察喷液冷却对转子型空调压缩机性能的影响,本次采用GB/T 5773-2016《容积式制冷剂压缩机性能试验方法》标准中规定的试验设备和方法对喷液冷却转子压缩机性能进行检测,调节不同的喷液量考察压缩机的制冷量、耗电量、COP以及排气温度等参数的变化。研究发现压缩机制冷量、耗电量、容积效率以及系统质量流量随喷液量的增加而增加;排气温度和壳体温度随喷液量的增加而线性降低,压缩机COP几乎不变。

**【关键词】** 转子压缩机; 喷液冷却; 性能; 检测; 排气温度

中图分类号 TB652 文献标识码 A

## Study on the Effect of Liquid Injection Cooling on the Performance of Air Conditioning Compressor

Cai Ning Zhao Yang Li Zhiqiang Xu Huabao

(CHEARI(Beijing) Certification & Testing Co., Ltd, Beijing, 102600)

**【Abstract】** Liquid injection cooling is a way of cooling the motor during the operation of the compressor. In order to investigate the impact of liquid injection cooling on the performance of rotor air conditioning compressor, the test equipment and methods specified in GB/T 5773-2016 《The method of performance test for positive displacement refrigerant compressors》 are used to test the performance of liquid injection cooled rotor compressor, Adjust different spray volume for inspecting the changes of parameters such as refrigerating capacity, power consumption, COP and exhaust temperature of the compressor. It is found that the cooling capacity, power consumption, volumetric efficiency and system mass flow of the compression mechanism increase with the increase of liquid injection; The exhaust temperature and shell temperature decrease linearly with the increase of liquid injection, and the compressor cop is almost unchanged.

**【Keywords】** Rotor compressor; Spray cooling; Performance; Testing; Discharge temperature

作者简介: 蔡宁(1975.1-),男,工学硕士,高级工程师, E-mail: cain@cheari.com

通讯作者: 赵洋(1988.3-),男,工学硕士,工程师, E-mail: zhy@cheari.com

收稿日期: 2021-08-10

## 0 引言

众所周知,排气温度过高是造成压缩机故障的主要因素之一,长期处于高排气温度下运行容易大幅缩减压缩机性能和寿命,另外还增大了系统运行的安全风险。当前降低压缩机排气温度的主要技术手段包括外部冷却和内部冷却两种,其中外部冷却指的是通过增设压缩机外部冷却循环,利用冷冻机油、水等介质带走压缩机本体的热量,从而实现降低排气温度的目的。外部冷却具备冷却速度快、降

温幅度大等优势,然而也会由于增设辅助设备造成压缩机体积过大、制造成本增加等弊端<sup>[1-3]</sup>。另一方面,内部冷却则是通过直接向压缩机工作腔喷入比焓较低制冷剂实现降低排气温度的目的,其具体方法包括吸气喷液、中间喷液、气体喷射和两相喷射等等。内部冷却的优势在于无需改变压缩机的基础结构或增设其他装置,与外部冷却相比,其制造成本相对较低,通过合理的设计也能达到较高的冷却效率<sup>[1]</sup>。

当前,国内外学者对于压缩机的喷液冷却技术已有一定研究成果,张谦等针对螺杆压缩机采用中间喷液冷却后的排气温度、效率和转速进行理论计算和试验研究,结果显示中间喷液在使压缩机排气温度降低的同时,达到清洁工艺气体的作用<sup>[4]</sup>;陈培生等对螺杆压缩机的吸气喷液和中间喷液进行理论分析和试验对比并通过电控阀调节喷液量的大小,得出了吸气喷液的效果优于中间喷液,二者均能达到降低排气温度的目的,同时可以起到降低压缩机功率的作用<sup>[5]</sup>;殷翔等针对涡旋压缩机的吸气喷液系统搭建试验台,研究了吸气喷液对压缩机以及制冷系统的影响,结果显示系统COP随着喷液量的增加先有微小提升后降低<sup>[6]</sup>;Minghong Yang等对R32涡旋压缩机使用两相喷射和液体喷射后的系统进行了性能对比试验研究,研究表明使用两相喷射更有助于提高系统COP,其COP试验结果比使用液体喷射高约11.8%<sup>[7]</sup>。大量查阅现有文献发现当前对于喷液冷却技术的研究大多都是基于螺杆压缩机和涡旋压缩机,另外,试验方向均偏向于对整机或整体制冷系统而非压缩机本身。本次研究抓住这一盲点,针对转子压缩机使用中间喷液冷却后的本机性能进行试验探讨,这对转子压缩机技术的进一步开发有着指导意义。

## 1 试验系统及工况要求

### 1.1 试验系统搭建

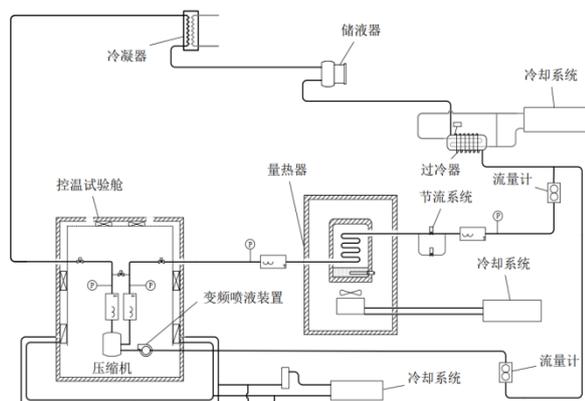


图 1 试验系统原理

Fig.1 Principle of test system

本次研究主要针对转子压缩机本身性能进行试验研究,因此选择标准GB/T 5773-2016《容积式制冷剂压缩机性能试验方法》作为试验依据,按照标准选择第二制冷剂热量法及制冷剂流量对转

子压缩机的制冷量、输入功率(耗电量)、COP、质量流量、壳体温度以及排气温度等参数进行测量。试验系统的原理如图1所示。

按标准要求,在图1试验系统中各点布置温度传感器、压力传感器以及质量流量传感器,通过各点制冷剂的温度、压力值查表可以获得系统各点制冷剂的比容和比焓值,即可根据公式(1)使用流量法对制冷量进行计算<sup>[8]</sup>。

$$\Phi_{0a} = q_{mf} \frac{v_{ga}}{v_{g1}} (h_{g1} - h_{f1}) \quad (1)$$

式中,  $\Phi_{0a}$  为压缩机实测制冷量, W;  $q_{mf}$  为质量流量, kg/s;  $v_{ga}$  为基本试验工况下, 进入压缩机的制冷剂蒸气实测比容,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $v_{g1}$  为基本试验工况下, 进入压缩机的制冷剂蒸气理论比容,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $h_{g1}$  为基本试验工况下, 进入压缩机的制冷剂理论比焓,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $h_{f1}$  为基本试验工况下, 蒸发器膨胀前制冷剂理论比焓,  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。

另外,上述试验台可从压缩机端以及第二制冷剂热量器端直接获取输入的电功率,从而可直接得到压缩机的耗电量以及第二制冷剂热量法所测量的制冷量结果,按照以上试验原理搭建的试验舱实物如图2所示。



图 2 试验装置

Fig.2 Test device

### 1.2 试验工况

本次为压缩机基础性能研究,因此选择工况为GB/T 5773-2016《容积式制冷剂压缩机性能试验

方法》中规定的标准工况，以逐步调节中间喷液量的方式测试中间喷液对压缩机性能的影响，具体试验组别如表 1 所示。

表 1 试验工况设计

Table 1 Test condition design

组号	制冷剂	工况	喷液量
1	R404A	蒸发温度：-23.3℃；	7.0L/h
2		冷凝温度：54.4℃；	6.5L/h
3		吸气温度：32.2℃；	6.0 L/h
.....		房间温度：32.2℃；	.....
13		转速：3000r/min；	1.0L/h
14		自然冷却	无喷液

按表 1 所示布置试验，中间喷液量从 7.0L/h 逐步降低至 1.0L/h，最终采用无喷液进行试验，试验过程中对压缩机各项参数进行记录，值得注意的是，本次所选用的试验压缩机为标称使用中间喷液冷却的机型，因此再逐步减小喷液量对性能参数进行监测的同时，也对过程中可能发生的安全风险（如过热、短路或断电）进行目击，另外本次各组试验均锁定压缩机转速在 3000r/min，冷却方式均为自然冷却。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 制冷量、耗电量及 COP

按第 1 章所述的试验设备、工况进行压缩机的行性能试验，对制冷量和耗电量（压缩机消耗功率）进行采集，其结果如图 3 所示。

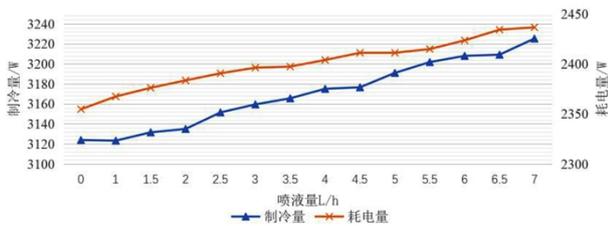


图 3 制冷量与耗电量

Fig.3 Cooling capacity and power consumption

图 3 所示为 14 组试验结果，其中可以看出当中间喷液量不断增大的时候，转子压缩机的无论是制冷量还是耗电量都是处于不断增加的趋势，由于每组试验喷液量的变化仅为 0.5L/h，因此从总体看压缩机的制冷量和耗电量变化不大，对比最小喷液量（无喷液）和最大喷液量（7.0L/h）发现当系统

处于最大喷液量时，压缩机的制冷量和耗电量分别比最小喷液量大 3.14% 和 3.35%，由此可以看出中间喷液对转子压缩机本身的制冷能力起到了一定的积极效果，然而带来的不利影响则是引起压缩机消耗功率的增加，进一步对比不同喷液量下的压缩机本体 COP，其结果如表 2 所示。

表 2 COP 对比

Table 2 COP comparison

组号	喷液量	COP
1	7.0L/h	1.32
2	6.5L/h	1.32
3	6.0L/h	1.32
4	5.5L/h	1.32
5	5.0L/h	1.32
6	4.5L/h	1.32
7	4.0L/h	1.32
8	3.5L/h	1.32
9	3.0L/h	1.32
10	2.5L/h	1.32
11	2.0L/h	1.32
12	1.5L/h	1.32
13	1.0L/h	1.32
14	无喷液	1.33

表 2 所示为根据不同喷液量下的压缩机制冷量和耗电量计算所得 COP 情况，不难发现在按照标准 GB/T 5773-2016 《容积式制冷剂压缩机性能试验方法》中的方法对转子压缩机本体进行性能检测的条件下，喷液量的大小对压机本身的 COP 几乎没有影响。对比以往的研究发现，使用喷液冷却技术的活塞压缩机通常在不同蒸发温度下呈现出 COP 下降的趋势，其降幅大多处于 3.04%~6.37% 之间，而涡旋压缩机则呈现出围绕 COP 基准值上下小幅浮动<sup>[6,9]</sup>，在这一方面转子压缩机呈现出的 COP 变化趋势与既往涡旋压缩机的研究成果类似，由于结构与运行机理的不同，使用喷液冷却的方式降低排气温度对于转子压缩机的 COP 影响将比活塞和-涡旋压缩机更小。另一方面，针对制冷系统的而言，通常喷液冷却大多对整体系统的运行效率是有利的<sup>[10,11]</sup>，由此可以推断：依靠合理的控制，喷液冷却技术将在系统的换热端或整体运行端等方面发挥更大优势作用。

## 2.2 排气温度及壳体温度

喷液冷却旨在降低压缩机的排气温度和运行温度以保证压缩机的安全运行, 因此按第 1 章的试验设备、工况进行压缩机的性能试验, 对排气温度和壳体温度进行采集, 其结果如图 4 所示。

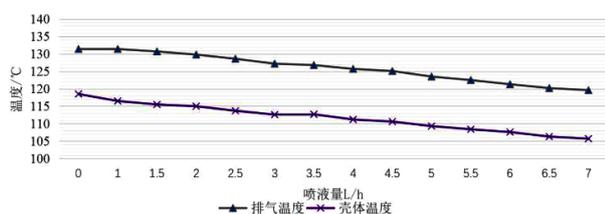


图 4 排气温度与壳体温度

Fig.4 Discharge temperature and surface temperature

从图 4 中可以明显看出, 随着中间喷液量的不断增加, 转子压缩机的排气温度和壳体温度都有比较明显下降, 对比无喷液和最大喷液量的情况发现, 压缩机排气温度从 131.4℃ 降低至 119.6℃, 降幅比例达到 8.98%; 壳体温度从 118.5℃ 降低至 105.7℃, 降幅比例达到 10.8%。由此可见, 对于转子压缩机而言使用喷液冷却技术同样能达到活塞、涡旋以及螺杆压缩机的冷却效果, 这对于提高转子压缩机的安全性和稳定性有着显著积极作用。第二方面, 从图 4 曲线还可以看出, 从压缩机标定喷液量 (7.0L/h) 到无喷液的过程中, 其排气温度和壳体温度变化几乎为线性, 该结论也对压缩机的喷液量设计和排气温度控制有着一定指导意义。

## 2.3 质量流量及容积效率

针对 2.1 节制冷量和耗电量的检测结果进行深层次的原因剖析, 发现造成制冷量和耗电量差异的原因主要在于中间喷液冷却对于质量流量和压缩机的容积效率的影响, 根据第 1 章的试验设备和方法对质量流量和容积效率进行检测, 其结果如图 5 所示。

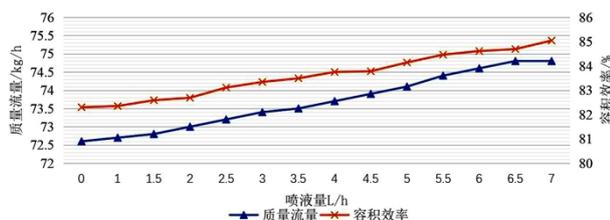


图 5 质量流量与容积效率

Fig.5 Mass flow and volumetric efficiency

从图 5 中可以看出, 随着中间喷液量的不断增大, 转子压缩机所提供的制冷剂质量流量和压缩机本身的容积效率均呈现线性增加的趋势, 同样对比无喷液和最大喷液量的数据特征可知, 制冷剂质量流量从 72.6kg/h 增加到 74.8kg/h, 增幅为 3.03%; 容积效率从 82.30% 增加到 85.04%, 增幅达到 3.22%。结合公式 (1) 可知由于工况稳定下制冷剂比容和比焓在温度小幅波动时变化不大, 从而可以获知压缩机本身的制冷量与质量流量呈正比关系, 从 2.1 节的数据得知压缩机制冷量的增幅为 3.14%, 结合制冷剂质量流量的检测结果可以得出的结论是: 喷液系统首先促进了转子压缩机所提供的制冷剂质量流量的增加, 进而引起了压缩机本体的制冷量增加。另一方面, 当处于最大喷液量 7L/h, 结合 R404A 的制冷剂在相应温度下的密度可以计算得此时喷液质量流量约为 3.38kg/h, 而参考此时压缩机提供的质量流量仅增加 2.2kg/h, 因此可以推断, 喷液量对于压缩机质量流量的提升有着直接影响, 同时喷液量并不完全与质量流量的提升相等, 前者数值略大。第三方面, 对转子压缩机进行喷液冷却也会直接引起压缩机容积效率增大。

## 3 结论

本次根据 GB/T 5773-2016 《容积式制冷剂压缩机性能试验方法》对空调用转子压缩机进行不同中间喷液量下的性能试验研究, 得出以下结论:

(1) 转子压缩机中间喷液量从无喷液增加到 7.0L/h 的过程中, 制冷量从 3123.9W 增加到 3225.3W, 增幅达到 3.14%; 耗电量从 2354.7W 增加到 2436.5W, 增幅达到 3.35%, 但在此期间压缩机的 COP 基本维持不变。

(2) 转子压缩机中间喷液量从无喷液增加到 7.0L/h 的过程中, 压缩机的排气温度和壳体温度分别降幅达 8.98% 和 10.8%, 且过程中与喷液量的变化基本成线性关系。

(3) 中间喷液可以直接促进压缩机所提供的系统质量流量和自身容积效率的提升, 从无喷液到最大喷液量的过程中系统质量流量和压机容积效率分别提升 3.03% 和 3.22%, 这也是导致制冷量提升的直接原因。

(下转第 331 页)