

蒸发器除霜喷嘴的高压射流特性分析与结构优化

邢鹏成¹,丁武学¹,楼晓华²,杨长春²

(1. 南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094;

2. 四方科技集团股份有限公司,江苏 南通 226371)

摘 要:针对制冷系统蒸发器除霜效率低的问题,设计了两种喷嘴:喷嘴1的射流收缩段为圆弧收缩,引流段和扩散段呈圆柱状;喷嘴2的射流收缩段为直线收缩,引流段和扩散段呈圆锥状。采用理论计算和数值仿真两种方法获得了入口气压在0.3 s内从0.6 MPa快速降至0.1 MPa时的喷嘴射流参数,理论计算与数值仿真结果相近。数值仿真表明,喷嘴2的能量损失高于喷嘴1;喷嘴2的气压波动幅度大于喷嘴1;喷嘴2的出口速度优于喷嘴1。据此设计了综合两种喷嘴特点的喷嘴3,并对喷嘴3的圆弧半径作优化设计,结果表明当该半径为11 mm时,喷嘴3的射流除霜能力优于喷嘴1和喷嘴2。

关键词:速冻设备制冷系统;蒸发器;流道;射流特性;结构优化

中图分类号:O358

文献标志码:A

文章编号:1671-5276(2020)03-0015-04

High-pressure Jet Characteristics Analysis and Structure Optimization of Evaporator Defrosting Nozzle

XING Pengcheng¹, DING Wuxue¹, LOU Xiaohua², YANG Changchun²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Square Technology Group Co., Ltd., Nantong 226371, China)

Abstract: Aiming at the problem of low defrost efficiency of evaporator, two kinds of nozzles are designed. The contraction section of nozzle 1 is circular arc, the drainage section and diffusion section are cylindrical. The contraction section of nozzle 2 is linear, the drainage and diffusion sections are conical. The nozzle jet parameters are obtained by theoretical calculation and numerical simulation when the inlet pressure drops rapidly from 0.6 MPa to 0.1 MPa in 0.3 seconds. The results obtained by the theoretical calculation are close to the numerical simulation results. The numerical simulation results show that the energy loss of nozzle 2 is more than that of nozzle 1. The fluctuation amplitude of air pressure of nozzle 2 is higher than that of nozzle 1. The average velocity of nozzle 2 is better than that of nozzle 1. On this basis, nozzle 3 with the characteristics of two nozzles is designed, and its circular radius is optimized. The optimization result show that the defrosting ability of nozzle 3 is better than nozzle 1 and nozzle 2 when the radius is 11 mm.

Keywords: chilling system of quick-freezing equipment; evaporator; runner; jet characteristics; structure optimization

0 引言

蒸发器广泛应用于制冷行业中,但在低温高湿环境下运行时,蒸发器壁面容易结霜。一方面霜层会增加蒸发器与空气的换热热阻,降低蒸发器换热效率,另一方面霜层会堵塞蒸发器的流通通道^[1]。为了解决上述问题,需要定期对蒸发器进行除霜。蒸发器射流除霜过程通常包括2个阶段:第1阶段霜层加热,帮助融化;第2阶段喷嘴喷出高压气体通过射流击破冰霜。

在蒸发器除霜系统中,喷嘴起到能量转化的作用,即将压缩气体的压力能转化为射流动能,形成高压气射流对外做功。喷嘴作为能量转换部件,广泛应用于纺织、煤炭

等多个领域中。陈巧兰等研究了不同孔径的喷气织机单圆孔辅助喷嘴的射流特性,优化了喷嘴结构参数,发现孔径最小的喷嘴能耗较低^[2]。蔡毅等分析了直线型喷嘴和流线型喷嘴速度场和压力场的分布规律,发现流线型喷嘴的水射流出口速度大,动压大,破煤效率高^[3]。胡俊等讨论了激光切割中喷嘴扩散段长度对流场参数的影响规律,发现扩散段存在一个最佳长度,压力能向动能转化效率最高^[4]。目前,有关除霜喷嘴方面的研究较少。

为了提高喷嘴的除霜效率,本文设计了两种流道结构不同的喷嘴,采用理论计算和数值仿真两种方法获得了入口气压在0.3 s内从0.6 MPa快速降至0.1 MPa时的喷嘴射流参数,并在此基础上,改进和优化喷嘴结构参数。

基金项目:国家自然科学基金(51705255);中国博士后科学基金(2017M621746)

第一作者简介:邢鹏成(1994—),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为速冻设备关键部件结构设计与优化。

1 研究对象

除霜喷嘴由引流段 l_1 、收缩段 l_2 和扩散段 l_3 组成。两种喷嘴结构参数如图 1 所示。1) 喷嘴收缩段为凹型圆弧收缩,引流段和扩散段呈圆柱状,计作喷嘴 1;2) 喷嘴收缩段为直线收缩,引流段和扩散段呈圆锥状,计作喷嘴 2。两种喷嘴长度为 32 mm,入口直径 D 为 20 mm,喷嘴 1 出口直径 d 为 8 mm,喷嘴 2 出口直径 d 为 10 mm。图中虚线区域为喷嘴收缩段与扩散段过渡区域。

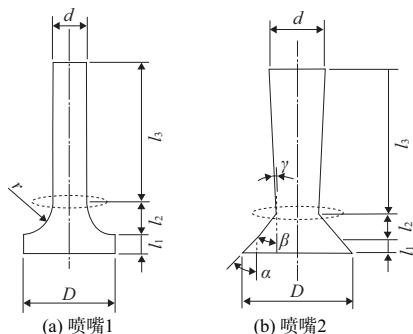


图 1 喷嘴结构参数

喷嘴入口连接储气罐,出口正对蒸发器结霜层,用 0.2 s 喷射完储气罐中 0.4 m^3 的 0.6 MPa 压缩空气,对蒸发器射流除霜。压强在 0.2 s 后降至 0.2 MPa ,在 0.3 s 后降至 0.1 MPa 。根据上述除霜方案,选取 6 组入口气压,分别为 0.6 MPa 、 0.5 MPa 、 0.4 MPa 、 0.3 MPa 、 0.2 MPa 、 0.1 MPa ,研究喷嘴入口气压在 0.3 s 内从 0.6 MPa 快速降至 0.1 MPa 时的射流参数。

2 理论计算与数值仿真

2.1 理论计算

喷嘴入口和出口满足伯努利方程^[5]:

$$p_1 + \frac{a_1 u_1^2}{2} \rho = p_2 + \frac{a_2 u_2^2}{2} \rho + \Delta p \quad (1)$$

式中: p_1 为喷嘴入口气压; p_2 为喷嘴出口气压; ρ 为工作介质的密度; a 为动能修正系数,本文喷嘴内流动为湍流,故取 $a_1 = a_2 = 1$; u_1 和 u_2 分别为喷嘴的入口平均速度和出口平均速度; Δp 为压力损失^[6]。

根据文献[7]研究表明:压力损失以流道收缩处产生局部分离脱流为主,满足下式:

$$\Delta p = \xi \frac{\rho u_2^2}{2} \quad (2)$$

式中 ξ 为流阻系数。

根据文献[8]研究表明: ξ 取值与喷嘴出入口面积之比有关。喷嘴 1: $A_2/A_1 = 0.14$, 取 $\xi = 0.42$; 喷嘴 2: $A_2/A_1 = 0.25$, 取 $\xi = 0.38$ 。

喷嘴实际出口速度与理想出口速度满足^[9]:

$$u_3 = \mu u_2 \quad (3)$$

$$\mu = \left(1 + \frac{1}{\xi}\right)^{1/2} \quad (4)$$

式中: u_3 为喷嘴实际出口速度; μ 为流速系数。

2.2 数值仿真

两种喷嘴的边界参数设置一致,出入口设置为压力边界条件,参考气压设置为 0.1 MPa ,入口压力边界条件设置为喷嘴的入口气压,出口压力边界条件设置为大气压;固体壁面设置为无滑移边界条件,代入 0.001 mm 的壁面效应;射流速度方向垂直于入口边界。两种喷嘴流场计算模型如图 2 所示。

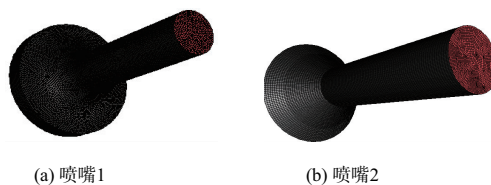


图 2 喷嘴流场计算模型

代入喷嘴入口边界条件分别为 0.6 MPa 、 0.5 MPa 、 0.4 MPa 、 0.3 MPa 、 0.2 MPa 和 0.1 MPa 的理想气体,采用 Simple 算法、SST $k-\omega$ 模型、可压缩流,基于密度计算流体的平流和湍流特性。检查迭代收敛条件等各项参数和模型设置无误后开始求解,得到不同入口气压下喷嘴 1 和喷嘴 2 的流场计算结果。

3 射流特性分析

为研究两种喷嘴的射流特性,分别从湍动能、静压和出口速度 3 个方面分析喷嘴流场计算结果。

3.1 湍动能

图 3 为入口气压 0.6 MPa 时,喷嘴 1 和喷嘴 2 的湍动能云图(单位: m^2/s^2)。可以看出:湍动能在引流段和收缩段趋于稳定,扩散段增幅上升,靠近出口位置处有最大值。喷嘴 1 的最大湍动能为 $2570 \text{ m}^2/\text{s}^2$,喷嘴 2 的最大湍动能为 $5430 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

根据文献[10]研究表明:湍动能越大,湍流强度越高,能量损失越高。入口气压为 0.6 MPa 时,喷嘴 2 的湍动能大于喷嘴 1,能量损失高于喷嘴 1。

不同入口气压下两种喷嘴的最大湍动能对比如表 1 所示。因其余入口气压下,湍动能分布规律相类似,故不再重复讨论。

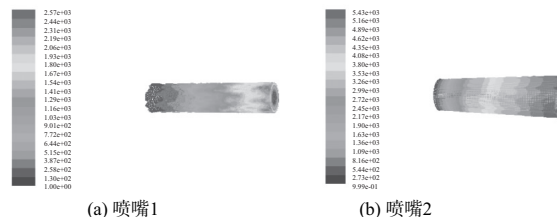


图 3 湍动能云图

表 1 最大湍动能结果对比

入口气压/ MPa	喷嘴 1 最大湍动能/ (m^2/s^2)	喷嘴 2 最大湍动能/ (m^2/s^2)
0.6	2 570.5	5 434.9
0.5	3 242.1	6 344.3
0.4	3 183.9	6 486.7
0.3	2 695.1	5 737.2
0.2	2 116.3	4 969.8
0.1	1.0	1.0

3.2 静压

图 4 所示为入口气压 0.6 MPa 时,喷嘴 1 和喷嘴 2 的静压云图(单位:Pa)。可以看出:喷嘴 1 的静压沿轴向逐渐衰减;在过渡区域,喷嘴 2 的静压出现大幅度波动。

定义喷嘴气压波动幅度 f , 满足:

$$f = \frac{p_{\max} - p_{\min}}{p_{\max} + p_{\min}} \quad (5)$$

式中: $p_{\max}$ 为喷嘴过渡区域最高气压; $p_{\min}$ 为喷嘴过渡区域最低气压; $p_{\max}$ 为喷嘴最高气压; $p_{\min}$ 为喷嘴最低气压。

入口气压为 0.6 MPa 时,喷嘴 1 的气压波动幅度 $f_1 = 0.20$,喷嘴 2 的气压波动幅度 $f_2 = 0.75$ 。喷嘴 2 的气压波动幅度较大,容易引起振动和噪声等问题。

不同入口气压下两种喷嘴的气压波动幅度对比如表 2 所示。因其余入口气压下,静压分布规律相类似,故不再重复讨论。

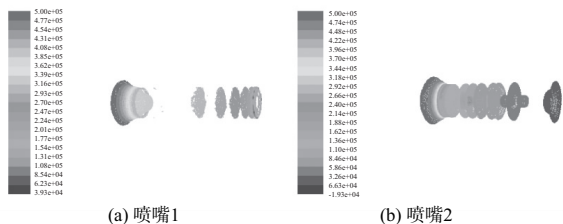


图 4 静压云图

表 2 气压波动幅度结果对比

入口气压/MPa	喷嘴 1	喷嘴 2
0.6	0.20	0.75
0.5	0.20	0.70
0.4	0.20	0.71
0.3	0.15	0.65
0.2	0.20	0.79
0.1	—	—

3.3 速度

图 5 为入口气压 0.6 MPa 时,喷嘴 1 和喷嘴 2 的速度云图(单位:m/s)。可以看出:喷嘴速度沿轴向逐渐增加,沿径向逐渐衰减,在出口处取最大值。通过数值仿真计算

得到喷嘴 1 的出口质量平均速度为 343.9 m/s,喷嘴 2 的出口质量平均速度为 477.1 m/s。

入口气压为 0.6 MPa 时,喷嘴 2 的出口质量平均速度优于喷嘴 1。喷嘴 2 的流道结构较喷嘴 1 更能达到扩张提速的目的。

不同入口气压下喷嘴 1、喷嘴 2 出口速度的理论计算和数值仿真结果对比如表 3 所示。可以看出:理论出口速度随 p_1 的衰减逐渐降低。对于喷嘴 1:当 $p_1 > 0.3$ MPa 时,出口质量平均速度将趋于固定值;而 $p_1 < 0.3$ MPa 时,出口质量平均速度随 p_1 衰减而急剧降低。对于喷嘴 2:当 $p_1 > 0.5$ MPa 时,出口质量平均速度趋于固定值;而 $p_1 < 0.5$ MPa 时,出口质量平均速度随 p_1 衰减而急剧降低。理论出口速度和出口质量平均速度数值接近。

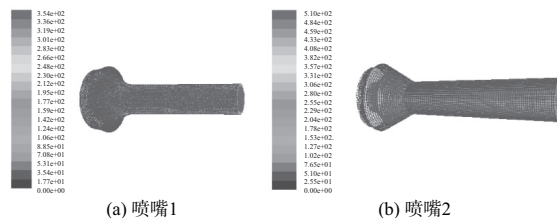


图 5 速度云图

表 3 两种喷嘴出口速度的理论计算和数值仿真结果对比

入口气压/ MPa	理论出口速度/(m/s)		质量平均速度/(m/s)	
	喷嘴 1	喷嘴 2	喷嘴 1	喷嘴 2
0.6	559.5	578.9	343.9	477.1
0.5	500.4	517.8	338.1	462.7
0.4	422.4	448.4	336.9	419.3
0.3	288.9	366.1	334.6	370.2
0.2	250.2	258.9	285.2	262.8
0.1	0.0	0.0	0.0	0.7

图 6 为喷嘴 1 和喷嘴 2 的出口质量平均速度随时间变化曲线。可以看出:

- 1) $0 \leq t < 0.17$ s 时,喷嘴 2 的出口速度优于喷嘴 1;
- 2) $t = 0.17$ s 时,两种喷嘴的出口速度相等;
- 3) $0.17 \text{ s} < t \leq 0.3$ s 时,两种喷嘴的出口速度相近。

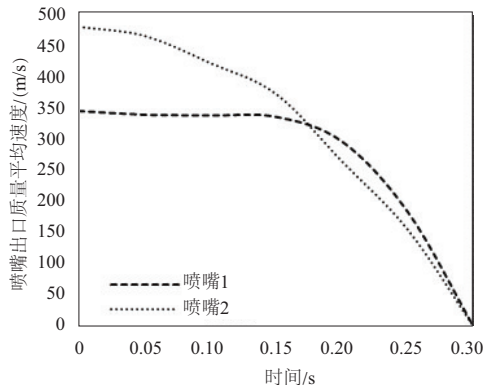


图 6 出口质量平均速度随时间变化曲线

4 喷嘴结构参数优化

综合喷嘴 1 和喷嘴 2 的结构特征和射流特性,改进喷嘴结构参数。喷嘴引流段通过样条曲线拟合而成,收缩段为凹型圆弧收缩,扩散段呈圆锥状,计作喷嘴 3,其结构参数为: $D=20\text{ mm}$, $d=10\text{ mm}$, $l_1=2.81\text{ mm}$, $l_2=7.44\text{ mm}$, $l_3=21.75\text{ mm}$ 。

为了降低喷射过程中能量损失和气压波动幅度,同时保证出口质量平均速度不会受到影响,对喷嘴 3 的结构参数进行优化。

4.1 参数优化方案

以喷嘴 3 为研究对象, r 为设计变量,取 5 组数据 $r=8\text{ mm}$ 、 $r=9\text{ mm}$ 、 $r=10\text{ mm}$ 、 $r=11\text{ mm}$ 、 $r=12\text{ mm}$,湍动能、气压波动幅度和出口质量平均速度为优化目标设计优化方案。研究喷嘴 3 入口气压在 0.3 s 内从 0.6 MPa 快速降至 0.1 MPa 时的射流参数。按照 2.2 节中流场计算方法计算流体的平流和湍流特性,得到不同入口气压下喷嘴 3 的流场计算结果。

4.2 优化结果与讨论

表 4 和图 7 为入口气压 0.6 MPa 时,喷嘴 3 的优化计算结果。从表 4 可以看出:当 $r=11\text{ mm}$ 时,喷嘴 3 的能量损失最低,气压波动幅度最小,出口质量平均速度较高。从图 7 可以看出:当 $r=11\text{ mm}$ 时,喷嘴 3 的能量损失低于喷嘴 1 和喷嘴 2;气压波动幅小于喷嘴 1 和喷嘴 2;出口质量平均速度优于喷嘴 1 和喷嘴 2。其余入口气压下,喷嘴 3 的优化计算结果与此相类似,故不再重复讨论。

综上所述,当 $r=11\text{ mm}$ 时,喷嘴 3 的射流除霜能力优于喷嘴 1 和喷嘴 2,除霜效率较高。

表 4 喷嘴 3 的数值仿真结果

r/mm	最大湍动能/ (m^2/s^2)	气压波动 幅度	出口质量平均 速度/(m/s)
8	4 960.92	0.15	476.87
9	5 793.74	0.15	469.35
10	6 368.08	0.20	477.55
11	1 648.25	0.10	486.52
12	6 458.38	0.20	496.01

5 结语

通过对蒸发器除霜喷嘴进行高压射流特性分析和结

构优化,得到如下结论:1) 在 0.3 s 的喷射过程中,喷嘴 2 的湍动能高于喷嘴 1,能量损失较高;喷嘴 2 的气压波动幅度大于喷嘴 1,易引起振动和噪声等问题;喷嘴 2 的出口质量速度优于喷嘴 1。2) 当 $r=11\text{ mm}$ 时,喷嘴 3 的射流除霜能力比喷嘴 1 和喷嘴 2 好,除霜效率较高。3) 本文关于除霜喷嘴的高压射流特性分析及结构参数优化可为除霜喷嘴的实际设计提供理论依据。

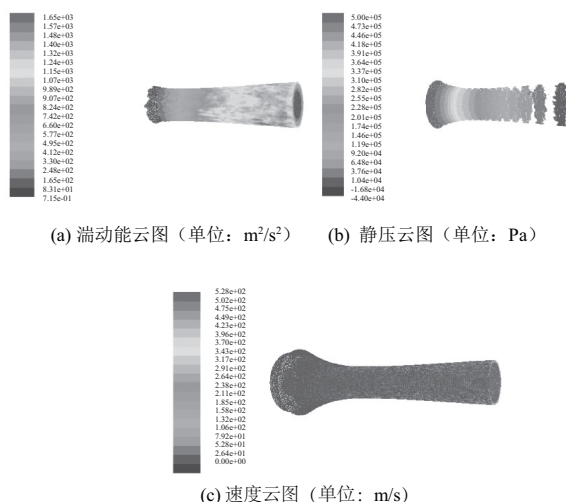


图 7 $r=11\text{ mm}$ 时喷嘴 3 流场计算结果

参考文献:

- [1] 汪峰,梁彩华,吴春晓,等. 疏水性铝翅片表面的结霜/融霜特性[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(4):1368-1373.
- [2] 陈巧兰,王鸿博,高卫东,等. 喷气织机单圆孔辅助喷嘴结构优化[J]. 纺织学报,2016,37(1):142-146.
- [3] 蔡毅,苏国兵. 高压水射流喷嘴设计及其有限元分析[J]. 机械设计与研究,2017(6):163-167.
- [4] 胡俊,郭绍刚,邱明勇,等. 激光切割中的超声速喷嘴辅助气体流场分析与结构改进[J]. 机械工程学报,2009,45(6):251-255.
- [5] 杨友胜,张建平,聂松林. 水射流喷嘴能量损失研究[J]. 机械工程学报,2013,49(2):139-145.
- [6] 李烈. 高压水射流掘进机截割头设计[J]. 机械设计与制造,2017(4):77-80.
- [7] 李海军,何远航,段卓平,等. 超高压水射流形成过程中的压力损失研究[J]. 高压物理学报,2004,18(2):44-48.
- [8] 盛敬超. 液压流体力学[M]. 北京:机械工业出版社,1980:137-139.
- [9] 陈凤官,蔡耀光,刘新福,等. 射流喷嘴流量系数及射流功率转换效率的分析[J]. 矿山机械,2010(23):20-22.
- [10] 王玉岭,闫清东,李晋,等. 基于 CFD 的液力变矩器内部流场分布特征研究[J]. 液压与气动,2015(7):36-40.

收稿日期:2019-03-04