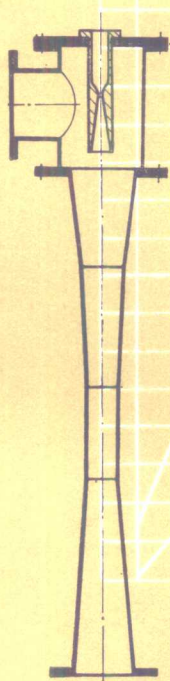


汉光机械厂水暖三结合小组 编



# 蒸汽喷射器计算

国防工业出版社

# 蒸汽喷射器计算

汉光机械厂水暖三结合小组 编

国防工业出版社

1974

## 内 容 简 介

蒸汽喷射器在机械制造、轻工、化工、纺织等工业的空调、制冷、真空等技术中有着广泛的应用。但是，蒸汽喷射器的设计计算较为繁杂。本书是在总结生产实践的基础上，参阅了国内外有关资料，编列了一套较为简化的计算公式，并依据这些公式编制了计算表，从而简化了蒸汽喷射器的设计计算，提高了计算的准确性。本书所提供的设计方法和设计资料较为简明、实用，易于为初次设计制造蒸汽喷射制冷机的工人、技术人员所掌握，亦可作设计其他设备中的蒸汽喷射器的参考资料。

## 蒸汽喷射器计算

汉光机械厂水暖三结合小组 编

\*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可登记证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

787 × 1092  $\frac{1}{32}$  印张 4  $\frac{1}{4}$  89 千字

1974年1月第一版 1974年1月第一次印刷 印数：00,001—12,500册

统一书号：15034·1333 定价：0.36元

# 目 录

概述 .....	5
一、工作蒸汽状态参数选择 .....	10
二、蒸汽喷射器的级数 .....	11
三、蒸汽喷射器的排出压力 .....	12
四、主喷射器计算 .....	13
(一) 工作蒸汽消耗量计算 .....	13
(二) 主喷射器的结构尺寸计算 .....	36
五、辅助蒸汽喷射器计算 .....	74
(一) 喷射器级数确定 .....	74
(二) 确定各级辅助喷射器的吸入、排出压力 .....	74
(三) 抽气量计算 .....	75
(四) 工作蒸汽消耗量计算 .....	81
(五) 辅助蒸汽喷射器结构尺寸计算 .....	83
六、蒸汽喷射器计算实例 .....	86
(一) 设计数据 .....	86
(二) 主喷射器计算 .....	87
(三) 辅助喷射器计算 .....	93
附录一 .....	103
附录二 .....	105
附录三 .....	109
附录四 .....	116
附录五 .....	120
附录六 .....	124
参考资料 .....	136



## 概 述

随着我国工业生产的飞跃发展，喷射器越来越广泛地被应用于许多工业生产过程中。通过工业生产实践证明，在某些情况下，利用喷射器来代替氨、氟利昂制冷压缩机、机械真空泵以及输送气体、液体的压缩机、泵类等，不论在操作、或技术经济对比上，都是比较方便适用、经济合理的。因此，喷射器的广泛应用，对我国社会主义建设，具有一定的现实意义和经济意义。

例如在机械制造、轻工、化工、纺织等工业生产中，采用蒸汽喷射制冷装置供应厂房空气调节或生产过程中工艺所需要的 $+5^{\circ}\text{C}$ 以上的低温水，在许多情况下较用氨、氟利昂制冷压缩机，都具有很多优越性。蒸汽喷射制冷装置，它是以无毒价廉的水为冷媒，结构简单，造价低廉，操作、使用、维护都比较简便；另外，蒸汽喷射制冷装置不需要易损备件，运转可靠，可以长期连续运转，使用寿命长。特别在某些工业生产中，往往产生大量的废热废汽，如能合理地考虑综合利用，采用这些废汽做为蒸汽喷射器的能源，这将具有更大的经济意义。

蒸汽喷射制冷装置，是在以水蒸汽做为工质的基础上发展起来的。由于它是以水为制冷剂，所以其最低蒸发温度一般不低于 $+2^{\circ}\text{C}$ ，加之喷射器效率较低，冷却水的消耗量较大，这就限制了它的使用范围。近年来，随着喷射器、冷凝器设计结

构的改进,各项消耗指标的不断降低,特别是利用低凝固点的制冷工质(如氨、氟利昂等)工作的喷射器的出现,这就使喷射式制冷机可以制取更低的温度。例如用氨或氟利昂喷射器代替双级压缩式制冷系统中的低压级压缩机,可以获得较低的蒸发温度。又如在单级氨、水吸收式制冷机中,在蒸发器和吸收器之间,增设氨喷射器,用以降低蒸发压力,提高吸收器的吸收压力,从而可以在蒸发器内获得 $-68^{\circ}\text{C}$ 的蒸发温度。

此外,在化学工业中的真空蒸馏、真空脱臭、真空蒸发、真空结晶以及真空干燥等设备上,采用蒸汽喷射器抽取真空,代替了结构复杂、体积庞大的真空泵;在电力、食品工业中,用蒸汽喷射器提高低压废汽的压力,从而可以使低压乏汽,得到重复利用。因此随着工业生产的不断发展,喷射器设计结构的不断改进,喷射器将会得到更加广泛的应用。

由于喷射器用途不同,所用工质不同,其喷射器的结构形状及其计算方法亦不完全相同,为此,本书仅就蒸汽喷射制冷机中常用的蒸汽喷射器的结构形状和计算方法做一些介绍,对于其它用途的喷射器,这里不予讨论。

蒸汽喷射制冷机的流程,如图1所示。

蒸汽喷射制冷机主要是以水为制冷剂,水和其它制冷工质一样,在某一状态下,其压力越低,相应的沸点温度亦越低。蒸汽喷射制冷就是利用水的这一特性,通过主喷射器2使蒸发器1内造成一定的真空,需要冷却的水被送入蒸发器后,在此真空条件下,部分水即沸腾蒸发,吸收大量的蒸发潜热,从而使另一部分未被蒸发的水因失热而被冷却到与蒸发器内真空压力相对应的沸点温度。

在蒸汽喷射制冷机中,设有主喷射器和辅助喷射器两种。

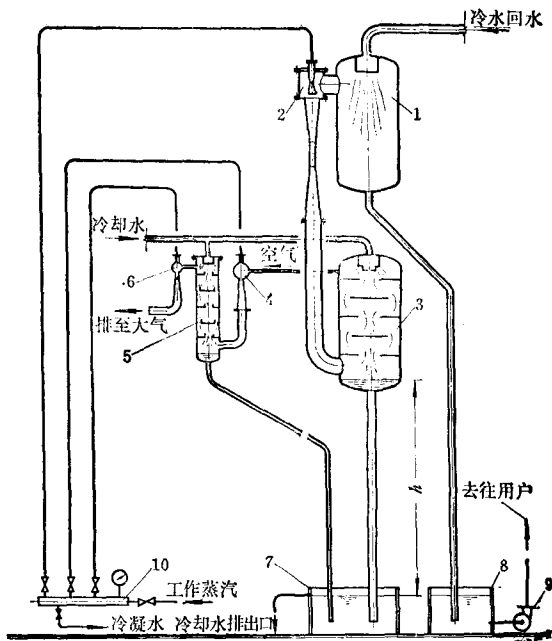


图 1 蒸汽喷射制冷机流程图

1—蒸发器；2—主喷射器；3—主冷凝器；4—第一辅助喷射器；5—  
辅助冷凝器；6—第二辅助喷射器；7—冷却水池；8—冷水池；9—冷  
水泵；10—工作蒸汽分汽缸。

主喷射器在蒸汽喷射制冷循环中，起着压缩机的作用。从蒸发器 1 内蒸发的冷媒蒸汽，经主喷射器 2 的压缩升压提高到冷凝压力后，排入主冷凝器 3 中冷凝。从而在蒸发器内达到制冷效果。

辅助喷射器的作用就是要连续不断地从制冷装置中排除空气，以维持各设备内所要求的真空度。另外，制冷装置的启动抽真空，也是由辅助喷射器来完成的。如果辅助喷射器的



工作不能达到预期的效果，各设备内的真空度就不能保证，从而整个制冷工作循环就要受到破坏。因此，主喷射器和辅助喷射器都是蒸汽喷射制冷机中的主要装置。蒸汽喷射器设计的好与坏，将直接影响全套制冷设备的制冷效果及经济消耗指标。所以正确的计算、选择喷射器是非常重要的。

蒸汽喷射器的构造如图 2 所示，是由喷嘴、吸入室和扩压器（混合段、喉管、扩压段）三大部分组成的。

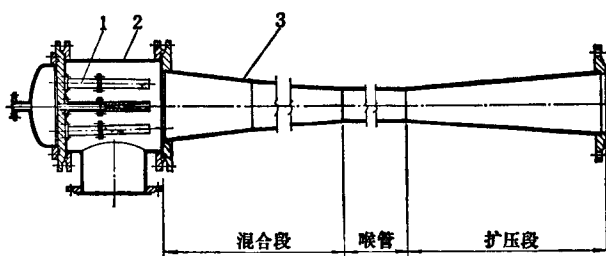


图 2 主喷射器构造简图

1—喷嘴；2—吸入室；3—扩压器。

喷射器计算内容主要包括：工作蒸汽消耗量计算，喷嘴及喷射器器体各部结构尺寸计算。

喷射器的结构虽然比较简单，但在设计过程中，如若采用理论公式计算，却很复杂，特别是在计算过程中，要采用的参数、系数很多，如果采用不当，就达不到预期的效果。因此，在工程设计中，一般都是采用半理论、半经验的简化公式计算。实践证明，采用这些简化公式或线解图进行蒸汽喷射器计算，既迅速、简便，又比较准确、可靠。为了进一步减少烦琐的数学运算过程，减少计算工作量，我们将蒸汽喷射制冷设计中常遇到的有关蒸汽喷射器的计算数据，编成

计算表，附于所选用的计算公式之后，从而可以缩短喷射器的设计工作时间，同时，也提高了计算的准确性。

目前，蒸汽喷射器的计算方法很多，采用不同公式计算结果也不完全一致。为此，除了书中推荐的计算公式外，我们又从国内外一些参考资料中，选录了部分有关喷射器的计算公式，也编成计算表，列于附录中，以供设计计算时对照参考。

**“一个正确的认识，往往需要经过由物质到精神，由精神到物质，即由实践到认识，由认识到实践这样多次的反复，才能够完成。”**近年来，蒸汽喷射器的设计方法及其结构形状，虽有些改进，但是还远远满足不了生产发展的需要。在喷射器的设计计算中还有许多问题需要进一步研究解决。如低压蒸汽喷射器的设计使用问题、喷射器结构形状的进一步改进、进一步提高喷射效率问题等等，这些在国内外一些资料中虽有一些论述，但也各说不一，因此，还有待在今后的生产实践中进一步研究验证，进一步充实提高。

## 一、工作蒸汽状态参数选择

工作蒸汽压力是设计喷射器的首要因素。在一定的压力范围内，工作蒸汽压力愈高，单位制冷量工作蒸汽的消耗量也就愈少，但当工作蒸汽压力增高到  $24 \text{ 公斤/厘米}^2$  时，在节约蒸汽方面就不太有效了。

一般对于抽气量较小的主喷射器，工作蒸汽压力不宜过高，以免喷嘴喉部直径太小，容易堵塞。当喷嘴直径小于 6 毫米时，一般要在工作蒸汽入口处装设蒸汽过滤器，防止污物堵塞喷嘴。

主喷射器采用的最低蒸汽压力，可以低至  $0.3 \text{ 公斤/厘米}^2$  (表压)<sup>(1)</sup>，这样就提供了低压蒸汽利用的可能性，但工作蒸汽压力低于  $0.25 \text{ 公斤/厘米}^2$  (表压) 时，主喷射器的操作不易稳定。辅助喷射器所用工作蒸汽压力的下限，大约为  $3.5 \text{ 公斤/厘米}^2$  (表压)。不过在同一蒸发温度的情况下，工作蒸汽压力愈低，单位制冷量所消耗的工作蒸汽量也就愈多。

表 1 给出了在各种不同工作蒸汽压力情况下，单位制冷量所消耗的工作蒸汽量的对比倍率。

例如，低温水温度为  $4.45^\circ\text{C}$ ，当喷射器工作蒸汽压力为  $0.703 \text{ 公斤/厘米}^2$  (表压) 时，其工作蒸汽消耗量要比压力为  $7.03 \text{ 公斤/厘米}^2$  (表压) 时多一倍，同时冷却水的消耗量也相应增加。因此，在一般情况下，蒸汽压力过低，亦是够经济的。工作蒸汽的经济压力范围约为  $7\sim 14 \text{ 公斤/厘米}^2$  (表压)。

表 1 不同压力下蒸汽消耗量对比倍率

工作蒸汽压力 公斤/厘米 <sup>2</sup> (表压)	冷 冻 水 蒸 发 温 度 (°C)			
	4.45	7.22	10.0	12.8
0.141	2.50	2.15	1.78	1.60
0.703	2.00	1.65	1.50	1.35
1.406	1.65	1.50	1.35	1.30
2.109	1.50	1.40	1.30	1.25
2.812	1.35	1.30	1.25	1.20
3.516	1.25	1.25	1.20	1.15
4.219	1.20	1.20	1.15	1.10
5.625	1.10	1.10	1.05	1.05
7.031	1.00	1.00	1.00	1.00

湿蒸汽最好不采用，因为它的有效热能少，而且增加了喷射器的腐蚀和阻塞的可能性，使其工作不稳定。因此，当工作蒸汽干度低于 0.95 时，需在工作蒸汽的管道上安装水滴分离器或电加热器。采用过热度很高的过热蒸汽，因其蒸汽性能很不稳定，也是没有益处的。所以，蒸汽喷射器的工作蒸汽最好采用干饱和蒸汽或略加过热的过热蒸汽。

## 二、蒸汽喷射器的级数

蒸汽喷射器的排出压力  $P_p$  和吸入压力  $P_s$  的比值  $\beta$  称为压缩比，即

$$\beta = \frac{P_p}{P_s}$$

蒸汽喷射器的经济压缩比范围大约为 1~6, 最大压缩比约为 8 左右。因此, 当喷射器的吸入压力较低时, 就需要多级喷射器串联, 才能使最后一级喷射器的排出压力稍高于一个大气压力。喷射器的级数根据其最低吸入压力可参照表 2 选取。

表 2 蒸汽喷射器级数选择表

级数	单级	二级	三级	四级	五级	六级
吸入压力范围 (毫米水银柱)	最低90, 一般采用100	20~100	5~30	0.8~5	0.07~1.0	0.005~0.1

例: 蒸汽喷射制冷机, 当蒸发温度  $t_x = 5^\circ\text{C}$  时, 喷射器的吸入压力  $P_x = 6.54$  毫米水银柱, 由表 2 查出, 需要三级串联, 即主喷射器和第一、第二辅助喷射器串联使用。

### 三、蒸汽喷射器的排出压力

多级蒸汽喷射器最后一级的排出压力应高于一个大气压力。其它各级喷射器的排出压力, 通常按每一级喷射器的压缩比大致相等的原则采取。在三级串联的蒸汽喷射制冷机中, 第一级主喷射器的排气压力, 系根据主冷凝器的冷凝温度确定。第一辅助喷射器的排出压力  $P_p^1$  可按下式计算:

$$P_p^1 = \sqrt{P_x^1 P_p^1} \text{ 公斤/厘米}^2,$$

式中  $P_x^1$ ——第一辅助喷射器的吸入压力, 可取为与主冷凝器的冷凝压力相等, 公斤/厘米<sup>2</sup>;

$P_p^1$ ——第二辅助喷射器的排出压力, 选取稍高于一个大气压力, 公斤/厘米<sup>2</sup>。

## 四、主喷射器计算

### (一) 工作蒸汽消耗量计算

第一种算法：喷射系数法

#### 1. 喷射系数计算

引射流体与被引射流体的重量比值称为喷射系数。对主喷射器而言，

$$\mu = \frac{G_x}{G}$$

式中  $\mu$  —— 喷射系数；

$G_x$  —— 被抽出的冷蒸汽量，公斤/小时；

$G$  —— 工作蒸汽消耗量，公斤/小时。

喷射系数  $\mu$  通常按下式计算：

$$\mu = 0.765 \sqrt{\frac{i'' - (i'_z + r_z X_1)}{(i'_1 + r_1 X_1) - (i'_z + 0.9 r_z)}} - 1,$$

或写成：

$$\mu = 0.765 \sqrt{\frac{\Delta I_1}{\Delta I_2}} - 1,$$

式中  $i''$  —— 工作蒸汽的焓，千卡/公斤；

$i'_z$  —— 蒸发压力下水的焓，千卡/公斤；

$r_z$  —— 蒸发压力下饱和蒸汽的潜热，千卡/公斤；

$X_1$ ——工作蒸汽通喷嘴等熵膨胀后的干度；

$i'_1$ ——冷凝压力下水的焓，千卡/公斤；

$r_1$ ——冷凝压力下饱和蒸汽潜热，千卡/公斤；

$X_1$ ——通过扩压器压缩后混合蒸汽干度；

$\Delta I_1$ ——工作蒸汽的绝热膨胀焓差，千卡/公斤；

$\Delta I_2$ ——混合蒸汽的绝热压缩焓差，千卡/公斤。

工作蒸汽通过喷嘴等熵膨胀后的干度  $X_1$  可按如下方法确定：

由于工作蒸汽通过喷嘴出口是一个等熵膨胀过程，所以，工作蒸汽在喷嘴出口前后的熵相等，即  $S'' = S''_2$ 。

工作蒸汽在喷嘴出口处的其它各状态参数，均与吸入室的状态参数相等，即

$$T_2 = T_x,$$

$$S'_2 = S'_x,$$

$$r_2 = r_x,$$

式中  $S''$ ——干饱和蒸汽的熵，千卡/公斤 $^{\circ}$ K；

$S'$ ——沸腾水的熵，千卡/公斤 $^{\circ}$ K；

$T$ ——绝对温度， $^{\circ}$ K；

$r$ ——蒸发潜热，千卡/公斤。

由于

$$S''_2 = S'_2 + \frac{r_2}{T_2} X_1,$$

所以

$$X_1 = \frac{S''_2 - S'_2}{r_2/T_2} = \frac{S'' - S'_x}{r_x/T_x},$$

吸入室的状态参数，根据吸入室的冷蒸汽温度确定。冷蒸汽由蒸发器进入吸入室，允许压降为 0.5 毫米水银柱，约相当于温差  $1^{\circ}\text{C}$ 。故吸入室的温度在设计中一般取低于蒸发温度  $1^{\circ}\text{C}$ 。

通过扩压器压缩后混合蒸汽干度  $X_1$ ，由于

$$S'_1 + S''_1 X_1 = S'_z + 0.9 S''_z,$$

所以

$$X_1 = \frac{(S'_z + 0.9 S''_z) - S'_1}{S''_1},$$

式中  $S'_z$ ——蒸发压力下沸腾水的熵，千卡/公斤 $^{\circ}\text{K}$ ；

$S''_z$ ——蒸发压力下干饱和蒸汽的熵，千卡/公斤 $^{\circ}\text{K}$ ；

$S'_1$ ——冷凝压力下沸腾水的熵，千卡/公斤 $^{\circ}\text{K}$ ；

$S''_1$ ——冷凝压力下干饱和蒸汽的熵，千卡/公斤 $^{\circ}\text{K}$ 。

按照上列各式所求得的各种常用制冷工况下的喷射系数  $\mu$  值，列于表 3 中。

利用以上简单的经验公式来计算复杂的喷射过程，往往会产生一些误差。但根据某些实测资料证明，采用这些公式计算喷射系数还是比较接近实际情况的，可能产生的最大误差，一般不超过 15%。为了保证喷射器的抽气能力，在计算工作蒸汽消耗量时，应考虑采取一定的安全系数  $a$ ，一般  $a = 1.05 \sim 1.15$ 。



表 3 喷射系数

工作蒸汽绝对压力  $P = 5$  公斤/厘米<sup>2</sup>

冷凝温度 $t_1(^{\circ}\text{C})$	蒸发温度 $t_2(^{\circ}\text{C})$						
	2	3	4	5	6	7	8
25	0.6799	0.7099	0.7429	0.7776	0.8148	0.8567	0.9012
26	0.6467	0.6746	0.7051	0.7372	0.7713	0.8098	0.8504
27	0.6137	0.6396	0.6678	0.6974	0.7287	0.7639	0.8009
28	0.5840	0.6082	0.6344	0.6619	0.6909	0.7234	0.7574
29	0.5547	0.5772	0.6016	0.6270	0.6538	0.6837	0.7149
30	0.5285	0.5496	0.5724	0.5961	0.6211	0.6488	0.6777
31	0.5022	0.5220	0.5432	0.5654	0.5885	0.6142	0.6409
32	0.4784	0.4970	0.5169	0.5377	0.5593	0.5832	0.6080
33	0.4561	0.4736	0.4923	0.5118	0.5321	0.5544	0.5776
34	0.4333	0.4497	0.4672	0.4855	0.5044	0.5252	0.5467
35	0.4133	0.4288	0.4454	0.4626	0.4804	0.4999	0.5201
36	0.3940	0.4087	0.4243	0.4406	0.4573	0.4756	0.4946
37	0.3744	0.3883	0.4031	0.4183	0.4340	0.4512	0.4690
38	0.3566	0.3698	0.3837	0.3981	0.4130	0.4292	0.4458
39	0.3397	0.3522	0.3654	0.3791	0.3931	0.4084	0.4241
40	0.3234	0.3353	0.3478	0.3608	0.3740	0.3885	0.4033
41	0.3078	0.3191	0.3310	0.3433	0.3558	0.3695	0.3835
42	0.2926	0.3033	0.3146	0.3263	0.3382	0.3511	0.3643
43	0.2781	0.2884	0.2991	0.3102	0.3215	0.3337	0.3463
44	0.2631	0.2728	0.2830	0.2935	0.3042	0.3158	0.3276
45	0.2498	0.2591	0.2688	0.2788	0.2890	0.3000	0.3112
46	0.2360	0.2448	0.2540	0.2636	0.2732	0.2836	0.2942
47	0.2235	0.2320	0.2407	0.2498	0.2590	0.2688	0.2790
48	0.2115	0.2195	0.2279	0.2366	0.2453	0.2547	0.2643
49	0.1990	0.2067	0.2147	0.2229	0.2312	0.2401	0.2493
50	0.1876	0.1949	0.2025	0.2104	0.2183	0.2268	0.2355