



# 真空制冷

Process Engineering  
**GEA Jet Pumps GmbH**

世界领先技术 · 独特解决方案

# 目录

# 简介

<b>简介</b>	<b>2</b>
压缩制冷装置与蒸汽喷射制冷装置的对比	2
<b>蒸汽喷射制冷装置—结构及其工作原理</b>	<b>3</b>
闪蒸制冷装置的优点	3
用喷射泵实现蒸汽压缩	4
闪蒸制冷	4
<b>蒸汽喷射制冷装置的类型</b>	<b>5</b>
紧凑设计的蒸汽喷射制冷装置	5
塔式设计的蒸汽喷射制冷装置	6
桥式设计的蒸汽喷射制冷装置	7
标准化的蒸汽喷射制冷装置—尺寸	8
<b>安装与控制</b>	<b>10</b>
可能的组合方式	10
两种安装方式	11
喷射制冷装置的控制	12
<b>热回收装置</b>	<b>14</b>
<b>喷射制冷装置的设计准则</b>	<b>15</b>

制冷是一种昂贵的工艺过程。能耗的不断增加要求有新的工艺对传统工艺（机械压缩）进行替代。因而，更环保、更温和、更经济的闪蒸制冷工艺装置正越来越多地为人们所采用。

GEA Jet Pumps在闪蒸制冷装置的设计和制造方面具有超过50年的经验。

## GEA Jet Pumps的此类装置已应用于：

---

水  
硝酸溶液/磷酸溶液  
石膏水悬浮液  
石灰乳  
氢氧化钡溶液  
各种废水  
果汁  
牛奶  
胶

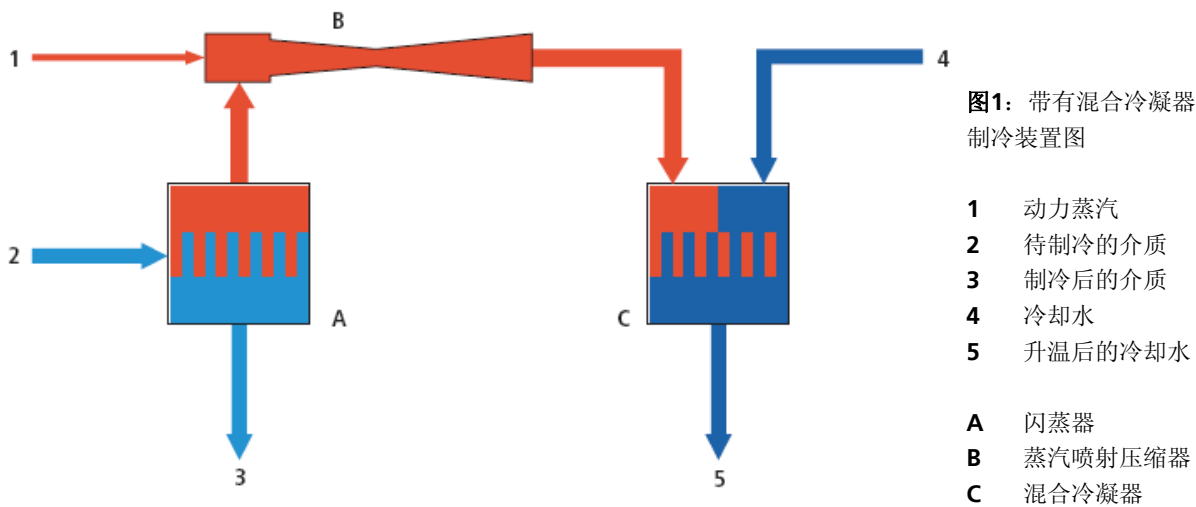
---

蒸汽喷射制冷装置的能力约在10至20000千瓦之间。例如，水可以被冷却到约5℃。

## 压缩制冷装置与蒸汽喷射制冷装置的对比

制冷装置的类型	压缩制冷装置	蒸汽喷射制冷装置
<b>制冷</b>		
工艺	蒸发	蒸发
热传递	间接	直接或间接
设备	蒸发器	闪蒸器
<b>蒸汽压缩</b>		
工艺	机械的	流体动力
设备	螺杆式、涡轮式或活塞式压缩机	喷射泵（蒸汽压缩器）
<b>压缩机的动力</b>		
	电能（电机）	热能（动力蒸汽）
<b>热能的排放</b>		
工艺	冷凝	冷凝
热传递	间接	直接或间接
设备	液化器	冷凝器

# 蒸汽喷射制冷装置—结构 及其工作原理



## 闪蒸制冷装置的优点

- 结构简单，坚固耐用
- 性能可靠，使用安全
- 没有活动部件，因而很少有磨损
- 极少的维护
- 可以直接或间接冷却；间接冷却时，冷却介质通常是水，易于操作

- 很低的制冷介质滞留体积
- 负荷可以频繁而快速地改变
- 仅需要很少的电能
- 废热和闪蒸汽用作动力介质
- 季节性操作和/或间歇操作时非常高效
- 通过使用动力蒸汽节能控制可以进一步提高性能系数\*值

\* 性能系数 = 制冷能力除以动力

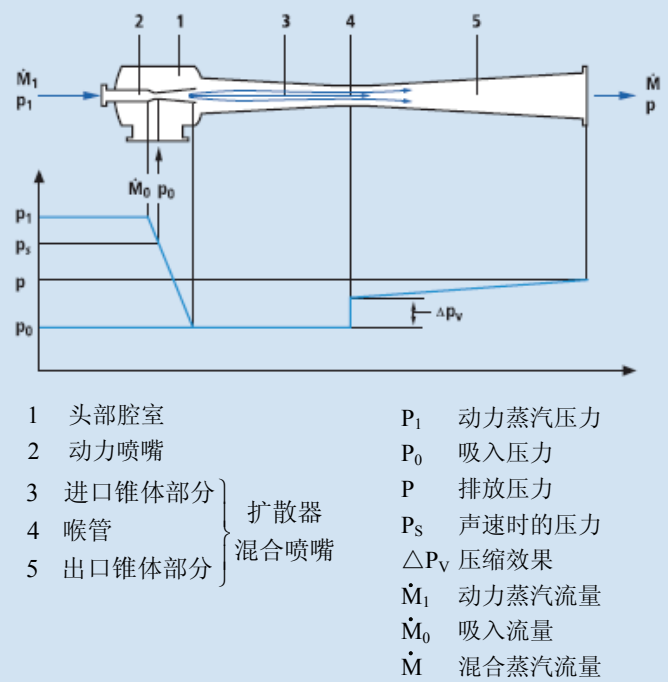
## 闪蒸制冷装置的分类

## 采用喷射泵蒸汽压缩

喷射泵是由流体驱动的压缩器，没有活动部件；来自吸入口介质（即待冷却的介质）闪蒸出的二次蒸汽，通过吸入口进入到喷射泵头。

动力介质（通常是蒸汽）通过动力喷嘴后膨胀，压力能就转变为动能。此能量流体撞击并传送吸入口介质（即待冷却的介质），使其进入到混合喷嘴的进口锥体部分。在通过混合喷嘴的喉口后进入扩散器，混合蒸汽流的动能逐渐转变回势能，即介质被压缩到较高的排放压力（图2）。

图2：喷射泵的结构和压力变化



## 闪蒸制冷

对于每种流体，蒸发压力对应于特定的蒸发温度。当一种液体的压力低于它的蒸发压力，它将会开始沸腾。水在0~100℃温度范围内的这种相互关系表示在图3上。在闪蒸制冷装置中，只有一小部分待制冷的介质被蒸发（蒸汽流量[kg/s]）。此过程所需的热能是来源于剩余流体：温度降至沸点温度对应于已经达到的较低压力。

蒸汽流将热能从被冷却介质传送到冷凝器内，从而将热能传送给另外的系统（耗热设备、再冷却系统等）。

图3：饱和曲线（水）： $t_s = f(p_s)$

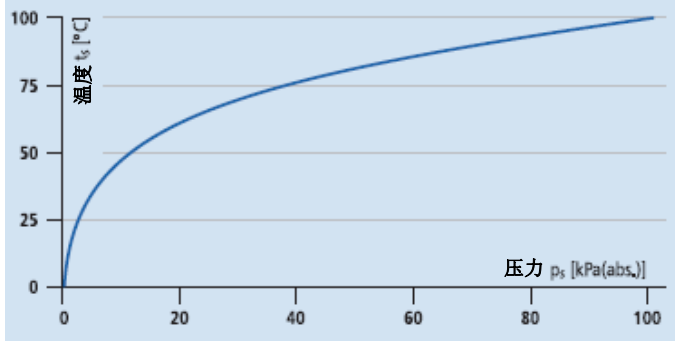
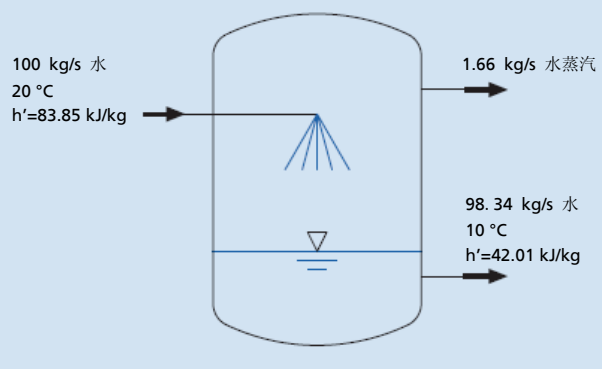


图4：100 kg/s 温度20℃的水被冷却至10℃，蒸发了1.66 kg/s水，出口处水量98.34kg/s

罐内必须维持1.23kPa(绝压)的压力。蒸发焓为2478 kJ/kg，故冷却能力为2478 kJ/kg × 1.66 kg/s = 4113 kW



# 蒸汽喷射制冷装置 — 类型

基本上，有三种不同类型的蒸汽喷射制冷装置：

- 紧凑设计，用于生产能力较小的情况；
- 塔式设计，用于中等生产能力和大生产能力的情况，占地面积很小；
- 桥式设计，用于高生产能力。

## 紧凑设计的蒸汽喷射制冷装置比

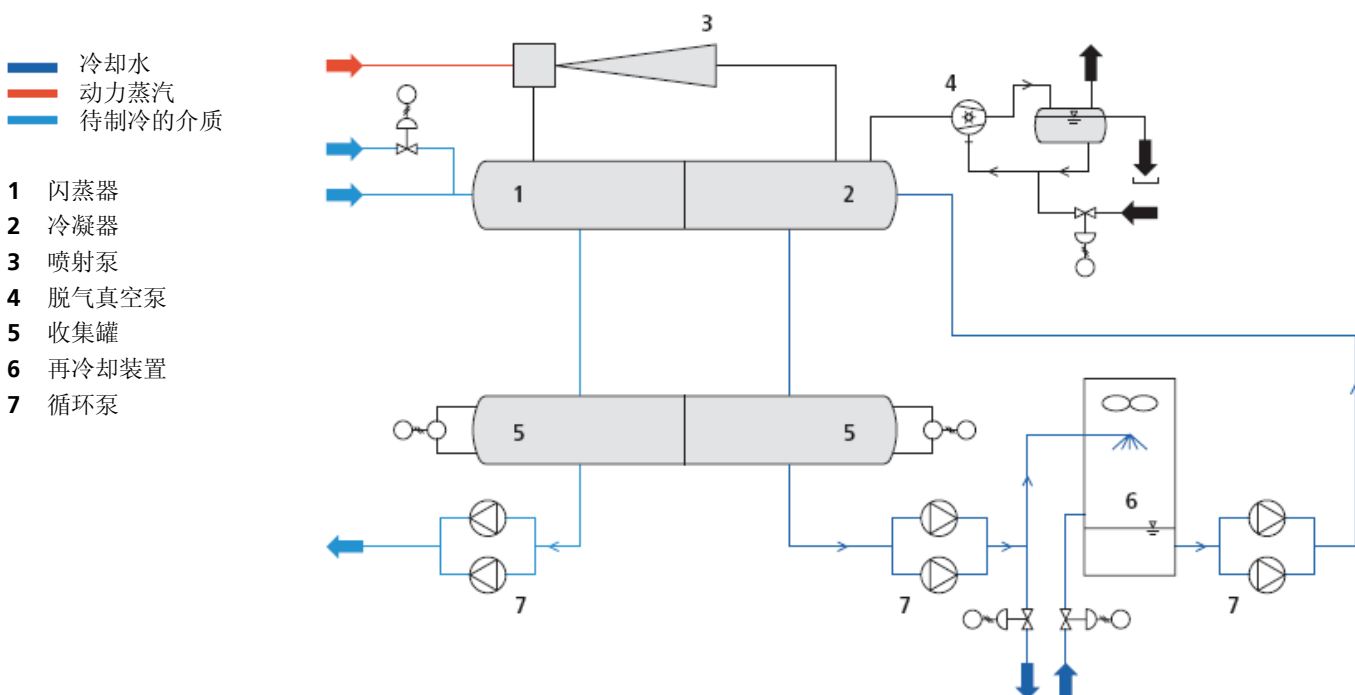
此类装置是由水平设计的设备组成：一个闪蒸器（1）和一个冷凝器（2），安装为一体，共同组成一个水平的容器。喷射泵（3）的安装平行于此容器。安装一台小的液环真空泵（4）作为脱气单元。冷凝热被冷却水带走，例如：通过冷却塔（6）。装置由操作控制系统来控制。

此类设计需要相对非常小的占地面积，而且高度也不是很高。



图5：紧凑设计的2级蒸汽喷射制冷装置，可将44m<sup>3</sup>/hr水从30℃冷却至10℃

图6



## 塔式设计的蒸汽喷射制冷装置

此类装置是垂直结构：闪蒸制冷室（1）和冷凝器室（2），前者安装于后者的顶部。每一级闪蒸器和冷凝器室之间可以通过管道或者可用于蒸汽压缩的喷射泵（3）来相互连接。在许多情况下，为了冷却水的再次冷却，配备一个冷却塔（6）。总之，蒸汽喷射真空泵是用作脱气单元。装置由操作控制系统进行控制。

此类设计需要相对较小的占地面积，但需要较高的高度。

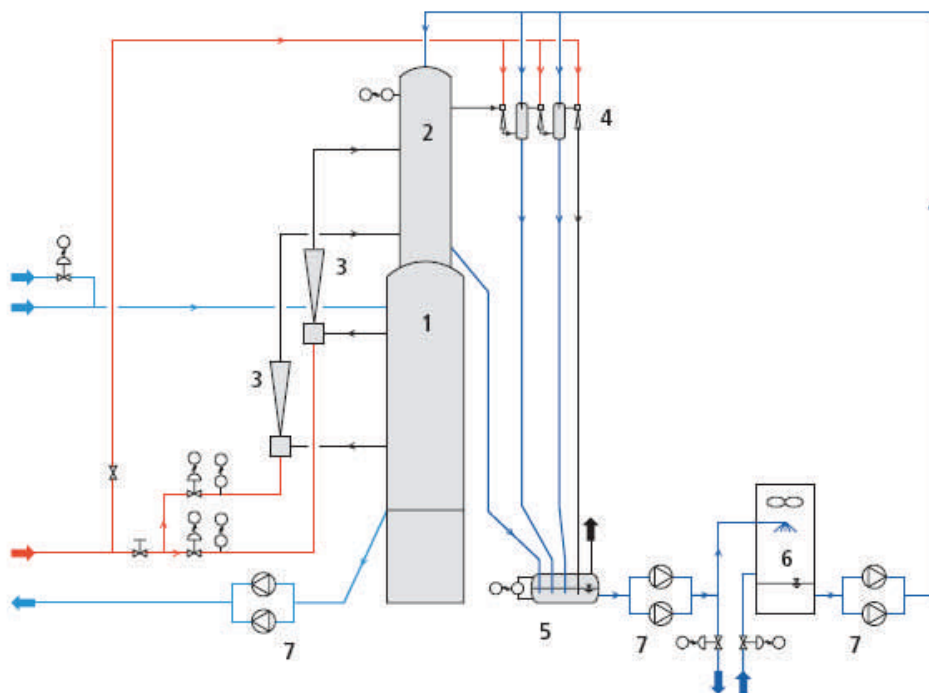


图7：塔式设计的2级蒸汽喷射制冷装置，可将200m<sup>3</sup>/hr水从10℃冷却至5℃。冷却能力：1163 kW

图8

— 冷却水  
— 动力蒸汽  
— 待制冷的介质

- 1 闪蒸器
- 2 冷凝器
- 3 喷射泵
- 4 脱气真空泵
- 5 收集罐
- 6 再冷却装置
- 7 循环泵



### 桥式设计的蒸汽喷射制冷装置

此类装置是由垂直或水平布置的闪蒸制冷室（1）水平安装的喷射泵（3）以及垂直设计的冷凝器室（2）组成。每一级闪蒸器和冷凝器室之间可以通过管道或者可用于蒸汽压缩的喷射泵（3）来相互连接。在许多情况下，为了冷却水的再次冷却，配备一个冷却塔（6）。还包括一台蒸汽喷射真空泵，用于脱气。装置由操作控制系统进行控制。

此类设计装置的高度相对较低，但需要较大的占地面积。

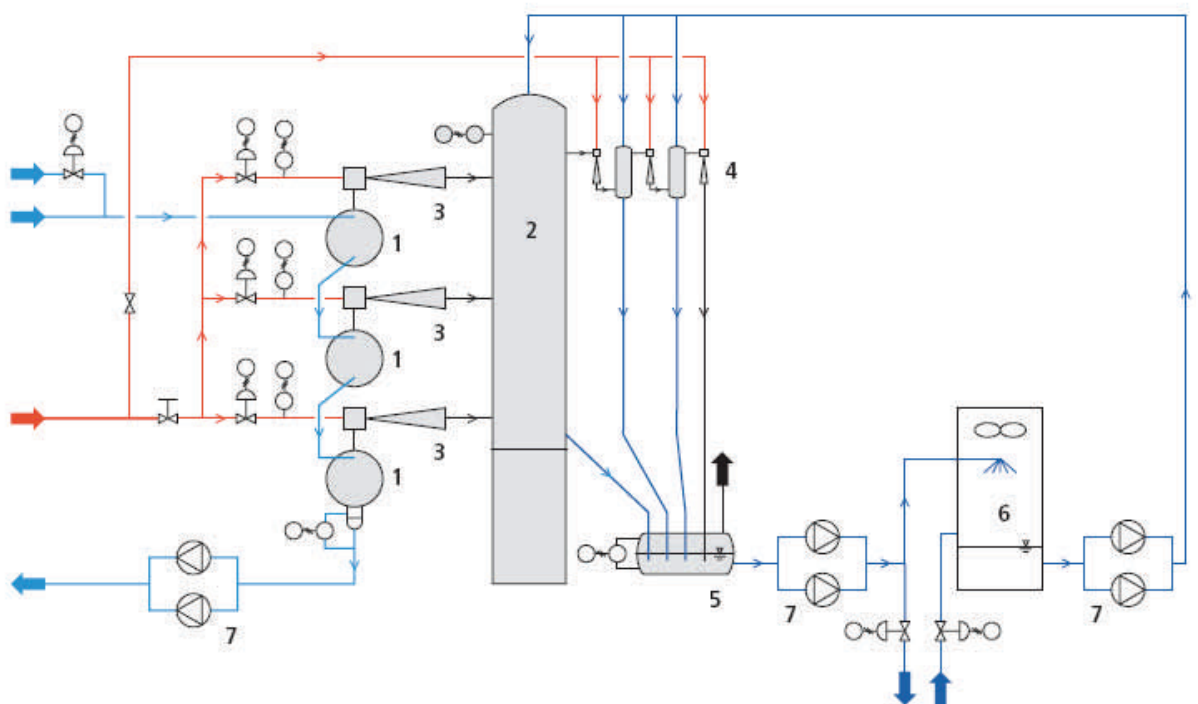


图9：桥式设计的3级蒸汽喷射制冷装置，可将194m<sup>3</sup>/hr水从28℃冷却至15℃。冷却能力：2900 kW

图10

- 1 闪蒸器
- 2 冷凝器
- 3 喷射泵
- 4 脱气真空泵
- 5 收集罐
- 6 再冷却装置
- 7 循环泵

— 冷却水  
 — 动力蒸汽  
 — 待制冷的介质



## 标准化的蒸汽喷射制冷装置—尺寸

GEA Jet Pumps提供标准化的装置。

优点：

- 简单设计
- 低投资费用
- 较短的交货时间。

针对特定应用的八种标准尺寸装置可供选择（见下表）。也可按要求量身定制。下表给出的尺寸请参照右侧/下页的图片（图11，图12和图13）。

净制冷能力	kW	20	100	300	600	1000	3000	7500	15000
<b>待制冷的介质（水）</b>									
进口温度	°C	12	12	12	12	12	12	12	12
出口温度	°C	6	6	6	6	6	6	6	6
体积流量	m <sup>3</sup> /h	2.9	14.5	43.5	87	145	435	1086	2172
管口尺寸：进口/出口	DN	25/40	50/80	80/150	150/200	150/250	250/400	400/700	600/1000
<b>冷却水</b>									
进口温度	°C	30	30	30	30	30	30	30	30
出口温度	°C	40	40	40	40	40	40	40	40
体积流量	m <sup>3</sup> /h	8	37	95	190	305	855	2140	4275
管口尺寸：进口/出口	DN	40/50	80/100	150/200	200/250	250/350	400/600	600/1000	900/1400
<b>动力蒸汽（0.4MPa（绝压））</b>									
夏天（100%负载）	kg/h	95	440	1100	2150	3450	9450	23500	47000
春天/夏天 <sup>1)</sup> 60%	kg/h	约60	约260	约660	约1300	约2070	约5700	约14000	约28000
冬天 <sup>1)</sup> 20%	kg/h	约20	约90	约200	约430	约700	约1900	约4700	约9400
补充水需求量（例如12°C）	m <sup>3</sup> /h	0.03	0.14	0.44	0.87	1.45	4.36	10.90	21.81
级数		1	1	2	2	2	3	3	3
设计类型		紧凑	紧凑	塔式	塔式	塔式	桥式	桥式	桥式
安装		非大气压	非大气压	非大气压 <sup>2)</sup>	非大气压 <sup>2)</sup>	非大气压	大气压	大气压	大气压
<b>电功率</b>									
液环泵真空泵	kW	0.7	0.7	（无）	（无）	（无）	（无）	（无）	（无）
冷却水泵1 <sup>3)</sup> （100%）	kW	0.5	2.5	10	18	36	110	270	620
冷却水泵2 <sup>3)</sup> （100%）	kW	0.5	2.0	8	15	25	80	200	450
被冷却介质泵 <sup>3)</sup> （100%）	kW	0.5	1.0	3	6	12	50	120	280
冷却塔风机（100%）	kW	0.5	2.0	6	11	18	52	128	256
共计	kW	2.7	8.2	27	50	91	292	718	1606
<b>尺寸（蒸汽喷射冷却装置）</b>									
长	m	2.5	3.5	2.0	2.5	3	15	20	22
宽	m	1.0	1.5	2.0	2.5	3	5	7	13
高	m	2.5	3.0	12.0	14.0	17	13 <sup>4)</sup>	20 <sup>4)</sup>	30 <sup>4)</sup>
<b>重量<sup>5)</sup></b>									
空	t	1.3	2.2	8	13	20	25	75	150
操作	t	1.5	3.0	10	16	25	32	100	200
充满水	t	2.0	4.0	14	28	40	70	240	550

1) 中欧

2) 加上冷却介质排放的储液槽

3) 基准为  $\pm 0.0\text{m}$

4) 加上气压高度（11m）

5) 不包括平台、泵、冷却塔和管道

图11：塔式设计

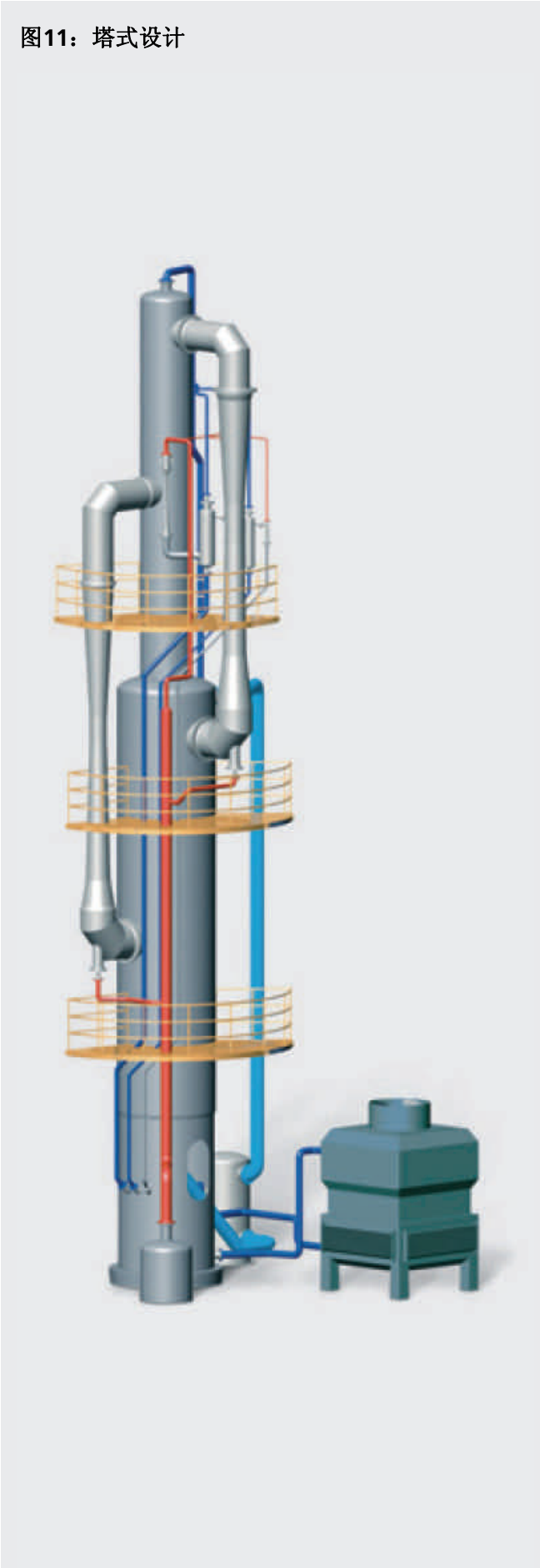


图12：桥式设计

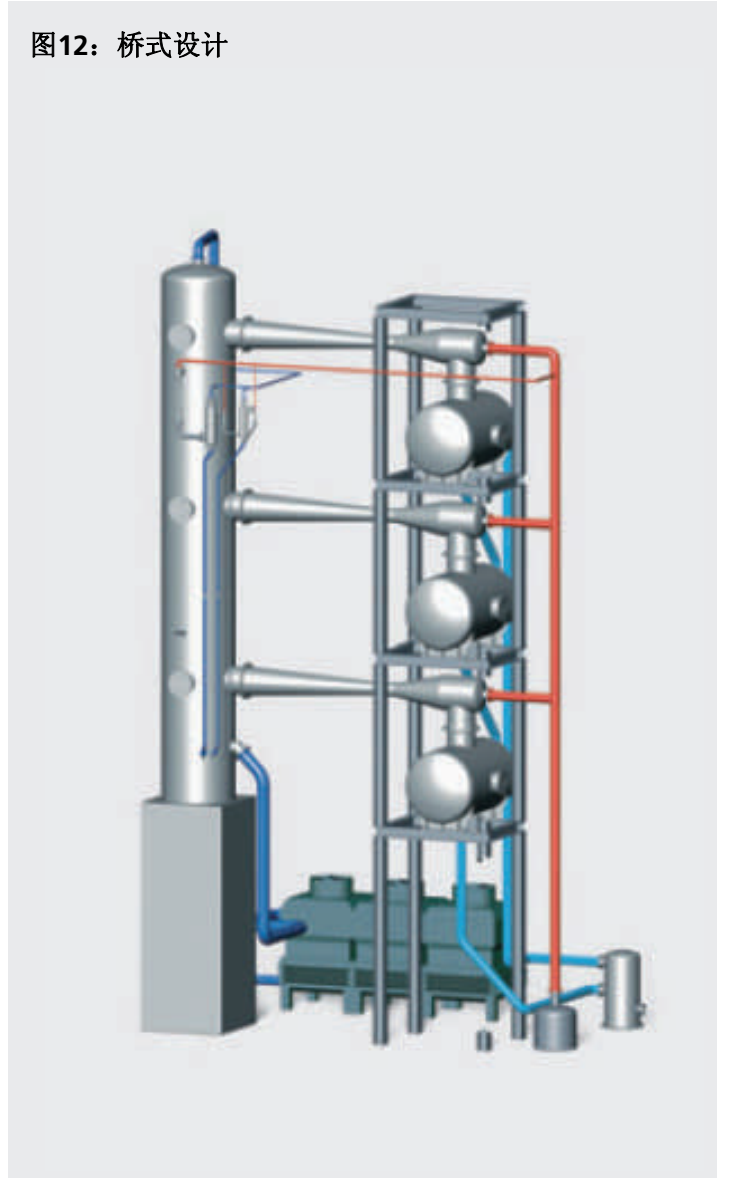
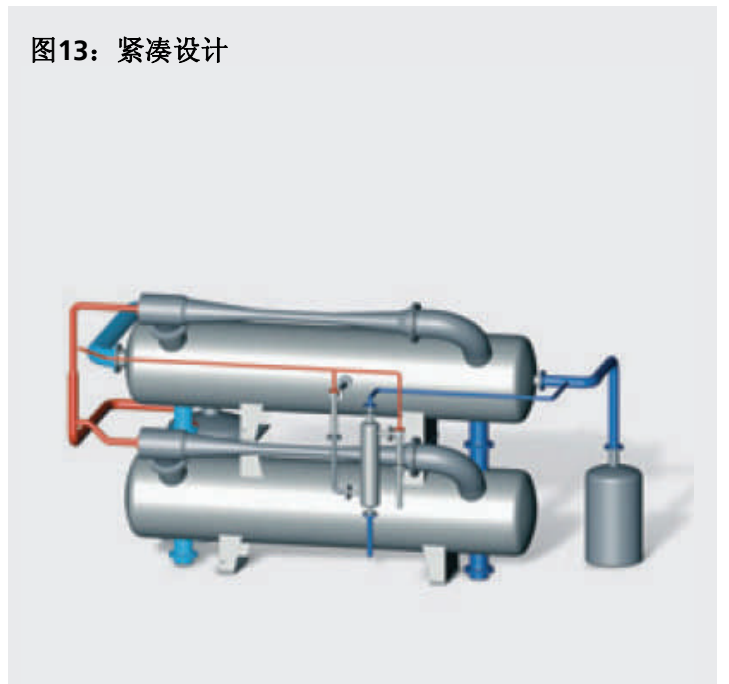


图13：紧凑设计



# 安装与控制

## 可能的组合方式

制冷装置通常由三部分组成：

- 制冷装置本身；
- 被制冷介质的循环
- 冷却水的循环

闪蒸制冷装置大多在真空下操作，被制冷介质和/或冷却水必须从此真空下传递到相关循环工艺回路中。

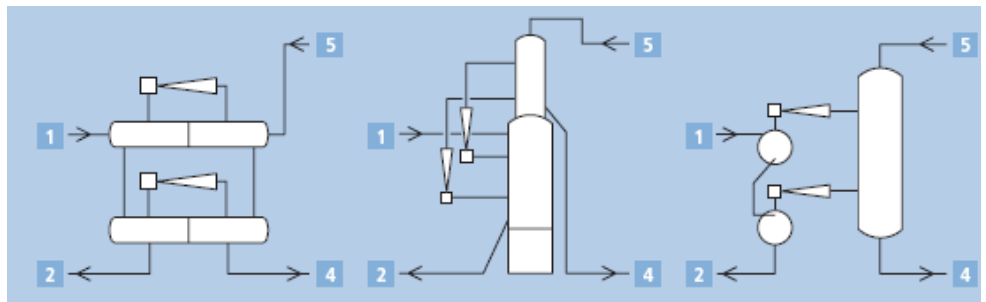
采用大气压布置可以实现从真空到大气的特别简单排放。但是如果这样布置所需的至少11m的高度无法达到，那么就需要采用非大气压安装方式（图11）。

下表给出了多种可能的设计安装组合方式：冷却装置可以以大气压或者非大气压方式排放，每种排放方式又可以匹配三种不同的待制冷介质循环和三种不同的冷却水循环。见下表图示：

### 设计安装的可能组合方式：

制冷装置以  
**2-级蒸汽喷射制冷装置**为例：

- 紧凑设计
- 塔式设计
- 桥式设计



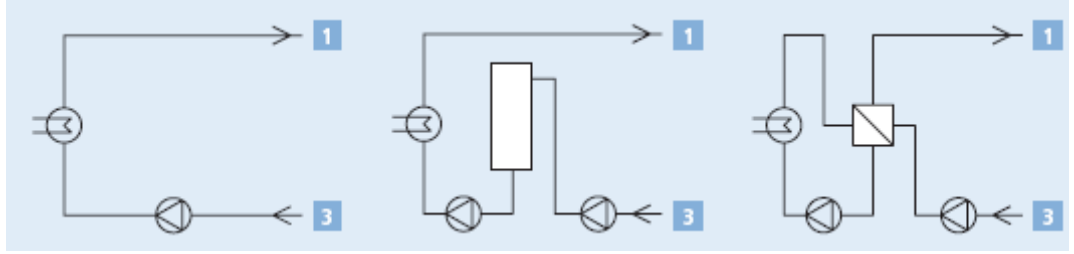
被制冷介质排放  
的基本安装类型，  
从真空

- 大气压
- 非大气压



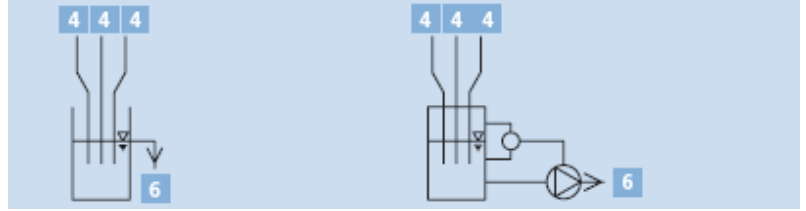
被制冷介质的循环

- 直接
- 直接，经由一个储槽
- 间接，通过中间热交换，根据换热介质的要求



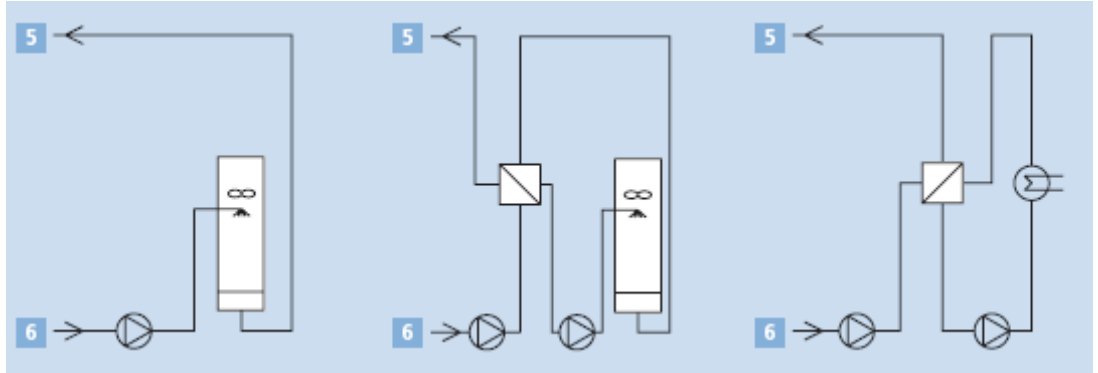
冷却水排放的基本安装类型，  
从真空

- 大气压
- 非大气压



冷却水的循环

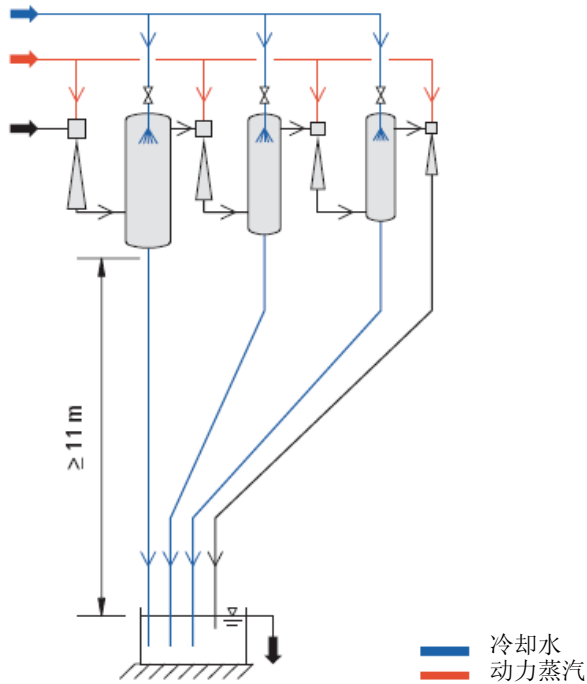
- 直接经冷却塔
- 间接，经中间换热到冷却塔
- 间接，经中间换热到其他热吸收器（河水、其他工艺...）



## 安装的两种方式

安装可以是在大气压或非大气压条件下：

图14：大气压安装



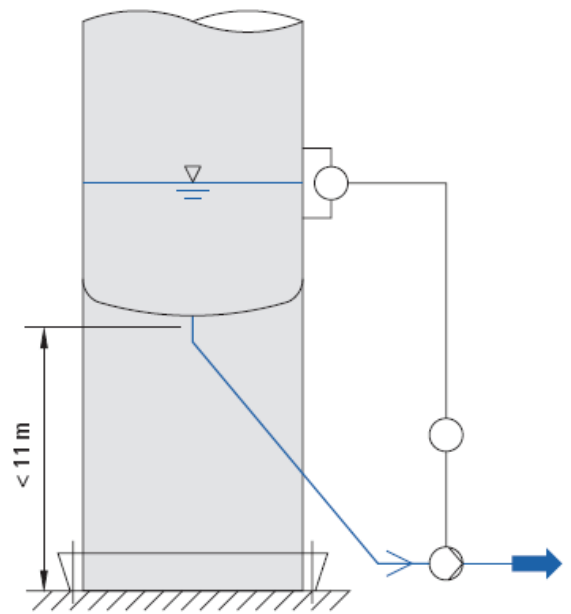
### 优点：

- 循环泵的吸入压力总是高于或等于大气压，因此几乎没有气蚀的风险。
- 真空室仅通过在大气腿中的液栓就可以与大气压隔离开来。
- 通常此系统不能认为是压力容器，因为这种布置不允许过压。

### 注意：

- 真空室的安装高度必须高于水封槽至少11 m。

图15：非大气压安装



### 优点：

- 真空室和水封槽之间的高度差可以小于11 m。

### 注意：

- 循环泵的吸入压力低于大气压，因此，循环泵必须被保护免于气蚀。
- 因为封闭结构，设备通常可认为是压力容器，在设计 and 制造时有专门的要求。

## 蒸汽喷射制冷装置的控制

### 对蒸汽喷射制冷装置进行控制:

为了使制冷能力满足相关的要求和/或减少操作费用

#### 能力控制

一套蒸汽喷射制冷装置的能力可以通过开关单个喷射泵的动力蒸汽阀来改变。假定有一股连续的介质有待制冷，制冷能力可以依照制冷后介质在蒸汽喷射制冷装置出口处的温度来控制。这可以通过手动或自动控制来实现。

#### 动力蒸汽流量控制—节省动力蒸汽的控制

蒸汽喷射冷却装置设计用于可能发生的最不利的操作条件，例如年最高冷却水温度。

图（图16）示是中欧地区的年度典型温度曲线。假定冷却水流量恒定，在一年大部分时间内冷凝压力显著低于工艺设计值。相应地，蒸汽压缩机可以在比工艺设计值低的压力下进行压缩。

根据喷射泵的特性，喷射泵出口处的最大允许排放压力与动力蒸汽压力在一定范围内成比例。最大允许排放压力总是至少与在下游冷凝器中的冷凝压力一样高。如果冷却水的温度下降，冷凝压力将相应降低。喷射泵就不需要压缩至高的工艺设计排放压力，而且动力蒸汽压力也能通过节流阀相应降低。因此，当保持制冷能力不变时蒸汽喷射冷却装置的动力蒸汽消耗降低。右图（图17和18）表明了这种关系。

动力蒸汽的节省有助于提高年平均COP\*值。

\* 性能系数=制冷能力除以动力

图16: 一年中再冷却水的最高温度（中欧）

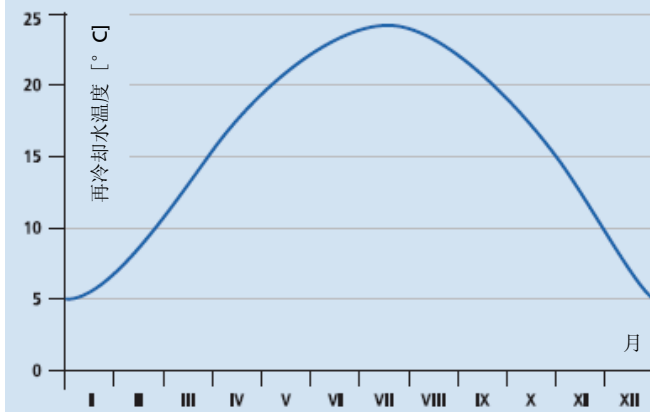


图17: 蒸汽消耗与冷却水温度的关系  
四级装置（有效冷却至10°C）

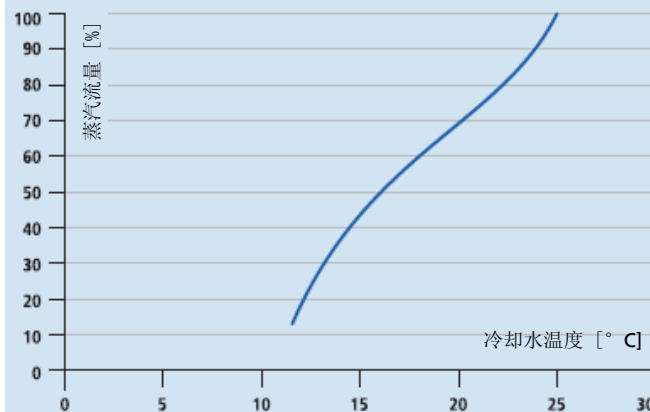
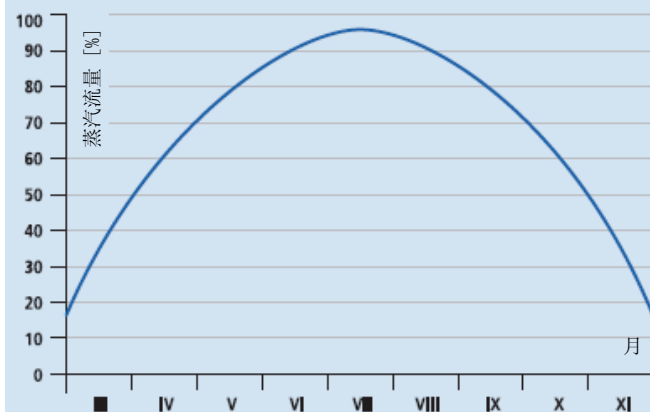


图17: 蒸汽消耗曲线

基于以上两图（图16和17）所示比例  
平均蒸汽消耗为最大值的72%



### 蒸汽喷射制冷装置的蒸汽、冷却水要求

蒸汽喷射制冷装置的蒸汽、冷却水要求是根据：

- 待制冷的介质
- 冷却水温度
- 动力蒸汽压力
- 装置的级数
- 要求在装置出口处被制冷介质达到的温度

图19显示了动力蒸汽和冷却水的消耗。例如：用一个二级的蒸汽喷射制冷装置将100 m<sup>3</sup>/hr的水从20℃冷到10℃，从图19可以看出，冷却水需求量约200 m<sup>3</sup>/hr（冷却水从24℃被加热到35℃），动力蒸汽消耗量约1800 kg/hr（7 bar g / 170℃）。而且从图上还可以看出，级数增加可以降低操作费用，但投资成本会增加（反之亦然）。

### 蒸汽喷射制冷装置中的最优的蒸汽和冷却水需求

制冷因子R有助于计算多大程度的冷却水升温可以带来低的操作费用。

$$\text{制冷因子 } R = K \cdot \frac{\text{蒸汽价格} / \text{t}}{\text{冷却水价格} / \text{m}^3}$$

K值是指平均蒸汽消耗，以百分比表示。例如，相对高的蒸汽价格就会导致高的R值。因而，小的冷却水温升将会节省操作费用，反之亦然（见图20）。在图中，K=0.7（工艺设计值的70%），是用于把100 m<sup>3</sup>/hr的水从20℃冷至5℃，相当于一个带有混合冷凝的三级蒸汽喷射制冷装置，制冷能力1745 kW。

它基于以下条件：

- 冷却水流量保持恒定；
- 蒸汽流量可控。

图19：连续操作蒸汽喷射制冷装置（带有混合冷凝）的蒸汽和冷却水需求

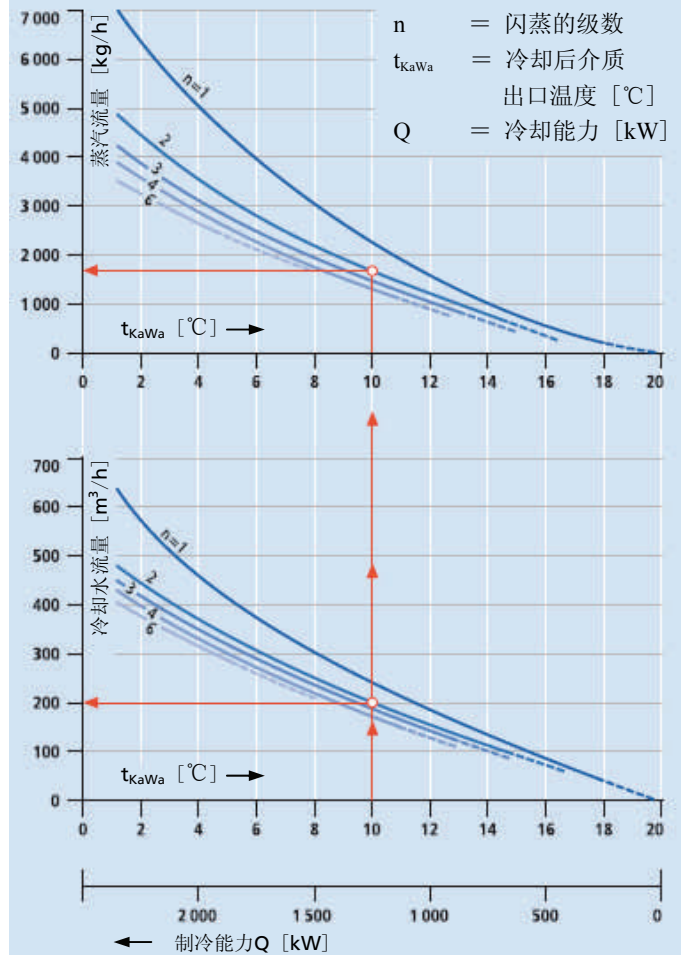
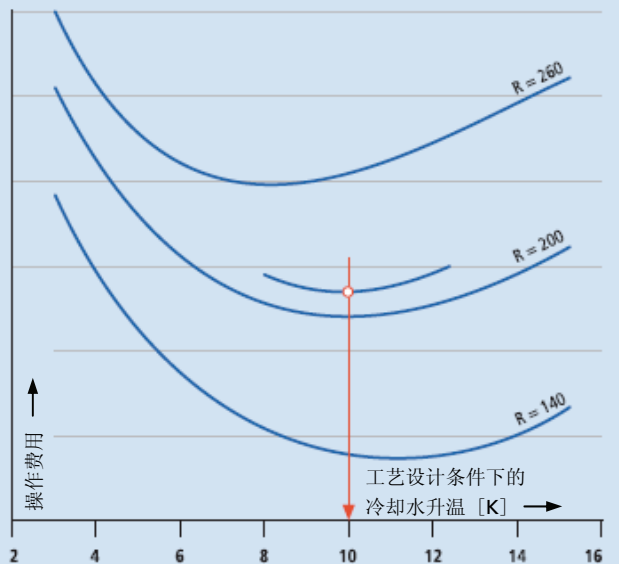


图20：操作费用的最优化



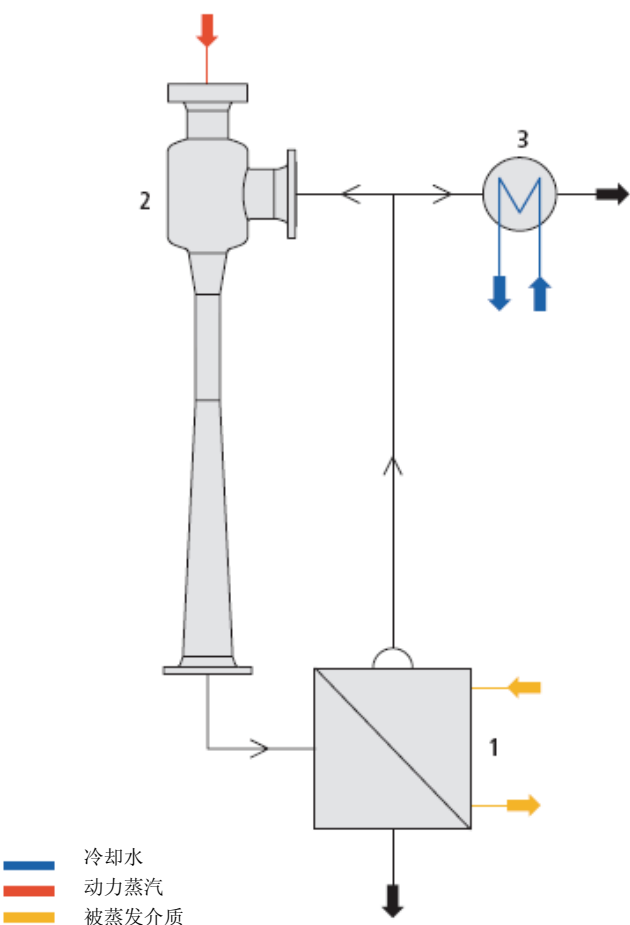
# 热回收装置

许多工艺排放水或者水溶液的温度相当高。在此情况下，热回收装置可以：

- 降低操作费用
- 通过更好的使用能量减少污染

原则上，GEA Jet Pumps的热回收工艺很类似于闪蒸制冷过程，见第4页。但是热回收工艺的目的在于热能的再利用。为了在较高温度水平回收热能，闪蒸/蒸发出的二次蒸汽被喷射泵（=热压缩器）再压缩至较高的压力。

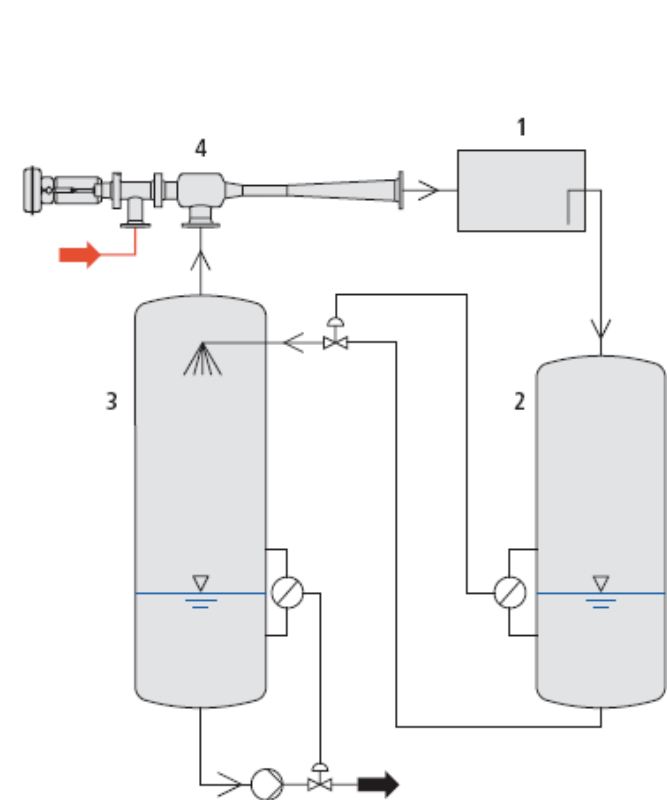
图21：化学工业



- 1 蒸发器
- 2 喷射泵（热压缩器）
- 3 冷凝器

在蒸发器中，在绝压200kPa和60℃下产生二次蒸汽。很大比例的二次蒸汽可以通过蒸汽喷射泵再利用于加热。在此例中，与用新蒸汽加热相比，约60%的新蒸汽质量流量可通过二次蒸汽的再利用而节省下来（假定：新蒸汽0.3MPa(g)）。

图22：造纸工业



- 1 干燥筒
- 2 收集槽
- 3 闪蒸罐
- 4 喷射泵（热压缩器）

通过闪蒸将从造纸机的干燥筒出来的较热冷凝液的余热带走。用喷射泵将其压缩到较高的加热蒸汽的压力水平。在此情况下，为满足造纸工业非常精确的控制要求，喷射泵被设计适用于不同流量（喷嘴针阀控制）。

# 蒸汽喷射制冷装置的设计准则

尽管已标准化，蒸汽喷射冷却装置通常还是量身定制的设备，这是由于各种不同的应用、操作人员的特殊性以及尺寸、结构、布置、操作模式等方面的要求都存在很大差别。

应当首先回答下列问题：

1. 被制冷的是什么？	流体特性，例如沸点升高、晶体析出等等？
2. 被制冷的量有多少？	质量流量或体积流量；间歇还是连续？
3. 制冷范围？	进口和出口温度？ 在间歇操作时的时间周期？
4. 动力能量？	可用的动力蒸汽压力水平？蒸汽成本是多少？哪种质量流可用（可以考虑废蒸汽或者闪蒸蒸汽）？
5. 冷却方式？	可用冷却介质的类型和数量？成本是多少？
6. 冷却介质的温度？	工艺操作期间冷却水的最低和最高温度是多少？
7. 安装的类型？	大气压还是非大气压？
8. 冷凝的类型？	直接（冷凝液和冷却介质混合）还是间接（冷凝液和冷却介质不混合）？
9. 需要的制冷能力？	预期什么类型的负载分布（满负荷还是部分负载）？
10. 结构材质的类型？	操作介质的类型、安装的位置、（气候等），以及操作员的经验，都可能要求采用特殊的结构材质。
11. 是否有更多的法规/标准？	是否有法律条例或工作标准必须被考虑？
12. 特殊要求？	是否有从类似装置操作中获得的特殊经验？或者关于蒸汽喷射制冷装置有特别要求？
13. 备注：	

# 我们的产品范围摘要

## 喷射泵

可传送和混合气体、液体、粒状固体；用于液体的直接加热；用作热泵；通过专门设计可用于很多不同的应用领域，例如核技术、高压技术等。

## 蒸汽喷射真空泵

由碳钢、不锈钢、哈斯特镍合金、钛、石墨、玻璃、瓷等材质制成。吸入口压力直到0.01mbar，很小和很大的能力都能处理；也能结合机械真空泵；在化工、制药、食品工业都有广泛应用；也应用于炼油厂和炼钢厂脱气。

## 产品蒸汽驱动喷射真空泵

使用来自许多不同类型工艺的产品蒸汽。

## 真空/蒸汽喷射制冷装置

可生产冷水，可冷却液体和产品溶液，甚至是侵蚀性和磨蚀性的溶液，配备或不配备蒸汽喷射压缩器或机械压缩机。

## 项目研究、工程

针对于我们产品范围内的装置。

所有产品都是基于经多年成功验证的WIEGAND技术。

## 热回收装置

为了从废气、蒸汽/空气混合物、排汽、冷凝水和产品中回收利用余热；带有机械或热压缩机。

## 冷凝装置

配有表面或混合冷凝器，有或无蒸汽再压缩机，用于在真空下冷凝蒸汽和蒸汽/气体混合物。

## 真空脱气装置

用于从水中或其他液体中除去溶解的气体。

## 加热和冷却装置

用于热水加热反应器、接触式干燥机等操作的移动装置或固定装置。

## 气体洗涤器

用于废气的清洗和除尘，分离悬浮颗粒、冷却和处理气体，冷凝蒸汽、从废气中回收和再生产品，吸收气体污染物。



## GEA Jet Pumps GmbH

Einsteinstrasse 9-15, 76275 Ettlingen, Germany  
Tel. +49 7243 705 0, [www.geajet.com](http://www.geajet.com), [info@geajet.de](mailto:info@geajet.de)

## 基伊埃工程技术(中国)有限公司

上海市闵行区鹤翔路99号 201101

电话: +86-21-2408 2288 传真: 2408 2199