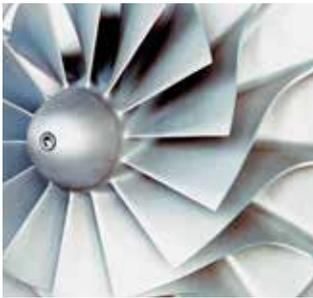




机械蒸汽再压缩应 用于蒸发器

技术与应用

机械蒸汽再压缩应用于蒸发技术



热分离，例如蒸发和蒸馏，都是高能耗的过程。在它们的发展过程中，为了节能降耗首先采用了生蒸汽加热的单效装置，接着又有了多效装置，然后又出现了热力蒸汽再压缩。最终，机械蒸汽再压缩也得以应用。

在传统的蒸发器中，产生的蒸汽热能有很大程度的损失或仅部分得到使用。相比之下，机械蒸汽再压缩可将蒸汽压缩到较高压力，因而热能得以提高，从而实现这股能量的持续循环。电能代替生蒸汽间接用于加热装置。

机械蒸汽再压缩降低了能源的消耗和二氧化碳生成，从而也降低了环境压力。

目录

蒸发装置节能设计工艺	3
机械蒸汽再压缩机的结构类型	7
功能原理与设计特点	10
调节机械蒸汽再压缩系统产能	11
现有多效装置通过机械蒸汽再压缩的能效优化	12
配备离心风机的蒸发装置示例	14
配备涡轮增压机的蒸发装置示例	17
配备旋转鼓风机的装置示例	18

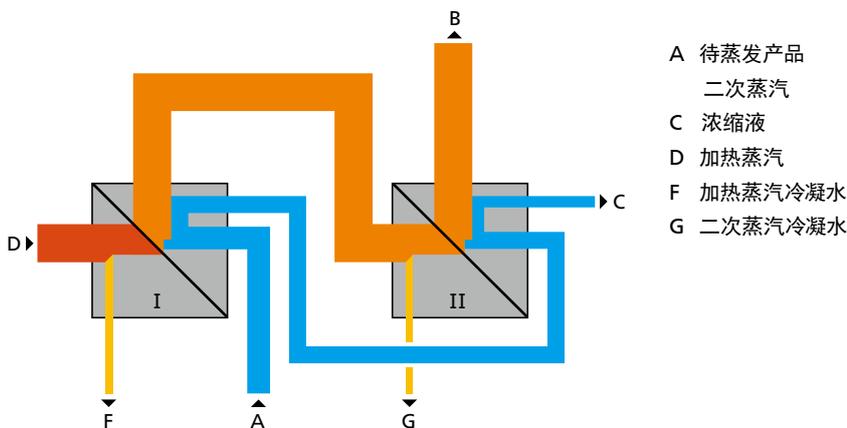
蒸发装置节能设计工艺

蒸发进行时，热量被传递到待蒸发的流体中。在工业规模的应用中，使用蒸发器作为热交换器间接进行这一过程。热量被用来加热流体，最终促使溶剂蒸发（大多情况下为水）。

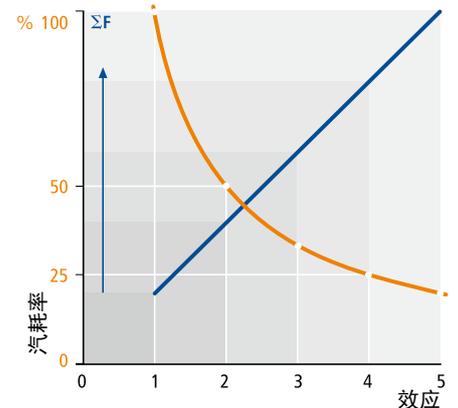
这样，流体中非挥发性物质的浓度就会增加。蒸发的溶剂被称之为二次蒸汽。因此，所产生的二次蒸汽含有与用于加热的蒸汽大致相同的热能，但是在较低压力和温度下。在冷凝过程中，这种热能会被浪费掉。

可使用不同的热载体来加热蒸发器。除热水或热油外，多数情况下会使用水蒸汽在蒸发器的加热一侧被冷凝，将释放的热量传递到蒸发一侧。

多效布置



两效直接加热蒸发器的热流图



汽耗率百分比和总换热面积ΣF随效数减少和增加

单效蒸发器的热流表明蒸汽中的热能（焓）必须与加热一侧的热输入大致相同。在水蒸发的正常情况下，由于产品一侧和加热一侧的蒸发热率大致相同，因此1kg/h的生蒸汽可产生1kg/h的二次蒸汽。

产生的二次蒸汽作为第二效的加热蒸汽使用，将整个系统的能量需求减少近一半。多效重复利用此原理，可进一步节省能源。

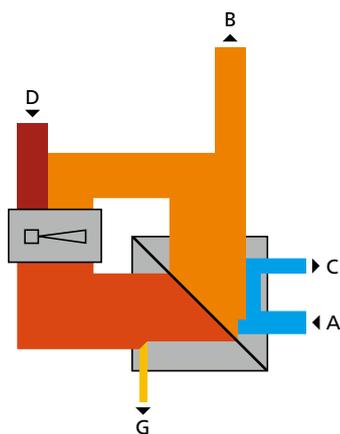
第一效的最高加热温度与最后一效的最低沸点温度形成了总温差，分布于各个效体。

用于所有效体的总加热面积随效数成比例增加，这样一来在能源节省量减少的同时，投资费用显著增加。

热力蒸汽再压缩

热力蒸汽再压缩

- A 待蒸发产品
- B 二次蒸汽
- C 浓缩液
- D 加热/动力蒸汽
- G 二次蒸汽冷凝水



蒸汽喷射蒸汽再压缩蒸发器的热流图



谷氨酸钠生产废水使用的配备热力蒸汽再压缩机的三效降膜强制循环蒸发装置。
蒸发率: 50 t/h

在热力蒸汽再压缩时，使用动力蒸汽将低压力和温度下蒸出的二次蒸汽压缩到第一效蒸发器的加热压力。

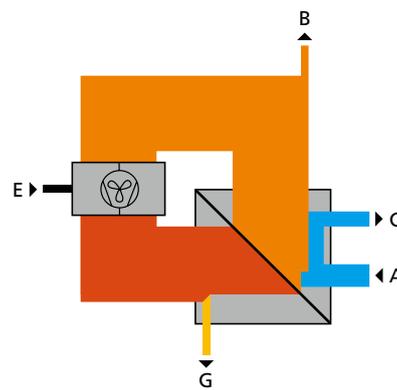
因此，使得第一效中的热能够再次用于加热。所需的加热蒸汽量会减少到为动力蒸汽量。为此采用蒸汽喷射蒸汽再压缩机（热力压缩机）。它们没有活动件，设计简单而有效，并能确保工作的可靠性。

使用一台热力蒸汽再压缩机与增加一效蒸发器具有相同的节省蒸汽/节能效果。但蒸汽喷射蒸汽再压缩机要节省成本。

机械蒸汽再压缩



食品生产用单效降膜蒸发装置的机械蒸汽再压缩机（离心风机）



- A 待蒸发产品
- B 二次蒸汽
- C 浓缩液
- E 电能
- G 二次蒸汽冷凝水

配备机械蒸汽再压缩机的蒸发器的热流图

机械蒸汽再压缩时，通过机械驱动的压缩机将低蒸发压力和温度水平下蒸出的几乎全部二次蒸汽再压缩到同一效蒸发器的加热压力。因此热能够再次用于加热，而不需要冷凝浪费掉。

与热力蒸汽再压缩相反，不需要动力蒸汽，并且在大多数情况下几乎只需要机械再压缩机所必需的电力驱动能量。能量需求成本通常比热力加热装置的成本要低得多。需要额外低热能来平衡总热量需求并启动装置。

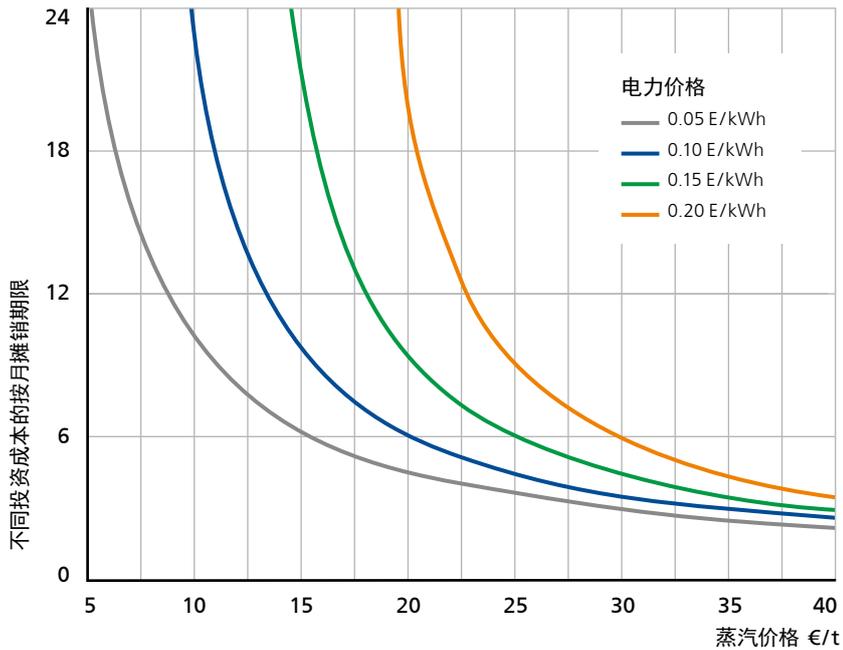
在热力加热装置中，所有的加热和/或动力蒸汽能都或多或少会在冷凝器中消耗在冷却水中。而在机械加热装置中只有很少部分会消耗。

这大大减少了能量需求，也减少了待消耗的残余热量。

机械蒸汽再压缩机所需的能量输入与需要克服的压差和温差几乎成正比，因此直接取决于安装的热交换器换热表面。随着表面的增加，所需输入功率会降低。压降以及特别是潜在产品的特定沸点升高值决定了要安装的压缩机处理量，并且也因此决定了蒸发装置的比能需求。

蒸发装置节能设计工艺

机械蒸汽再压缩—有收益的投资



根据能量价格，两类装置投资成本差异的摊销期限。

在许多情况下，机械蒸汽再压缩蒸发装置的投资成本要略高于相类似的热力加热装置。但由于运行期间的低能耗，这种差异可在相对较短的时间内被消除。

上图展示了根据蒸汽和电力价格可以摊销投资成本差异的期限。这一图示是基于蒸发装置20t/h的蒸发量、产品3.5K沸点升高以及90°C的沸腾温度建立的。



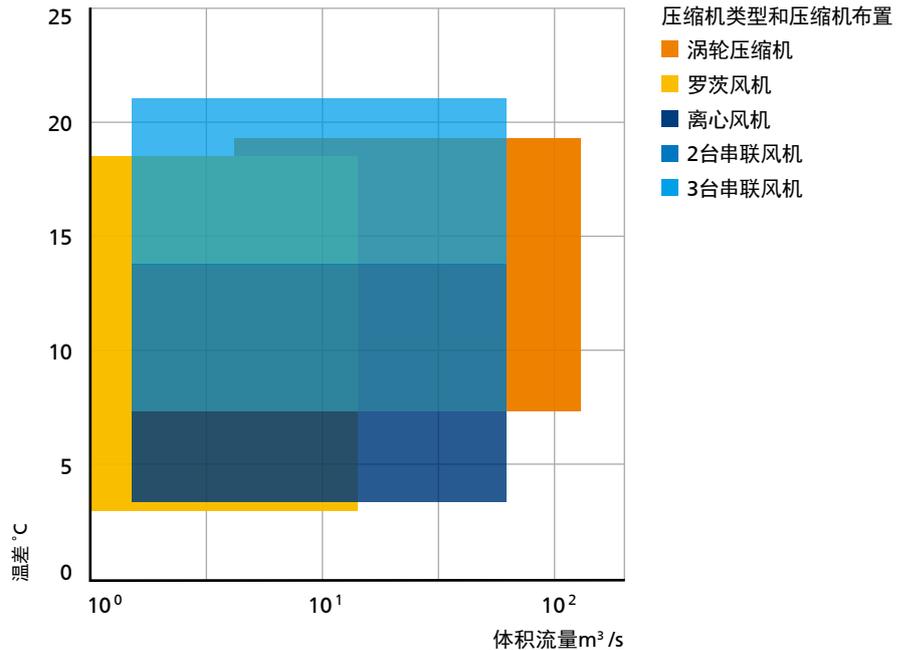
小麦淀粉污水使用的配备机械蒸汽再压缩机的单效降膜蒸发装置，蒸发率：17,000 kg/h

图中对配备热力蒸汽再压缩机的四效降膜蒸发装置和配备一台蒸汽再压缩机（离心风机）的单效降膜蒸发器进行了对比。投资成本仅包括蒸发装置，其他如建筑和基础设施等土木工程所需的额外开支并未计算在内。

机械蒸汽再压缩机的结构类型

离心风机、离心压缩机、旋转鼓风机

蒸发器换热表面两侧需要温差。这意味着加热蒸汽的温度和压力要高于待蒸发产品的沸腾温度和压力。在机械蒸汽再压缩装置中，通过在相应的再压缩机中压缩蒸出的二次蒸汽来实现温差。



根据温差和体积流量的压缩机类型和布置的应用

原则上，所有常用的压缩机类型都适合作为机械蒸汽再压缩机使用，也就是遵循实际位移原理运行的机器和动态操作的连续流机器。但实际中，蒸发装置使用的是下述三种类型的机器：

- 离心风机
- 离心（涡轮）压缩机
- 旋转（罗茨）鼓风机

中等和高处理量的离心风机是最常用的类型。如今，相对于涡轮压缩机，

较常使用两个或以上的串联风机，但在一些特殊应用中仍会用到涡轮压缩机。旋转鼓风机的应用领域仅限于小的蒸发率。

根据运行条件的各自应用决定了适合的压缩机类型。所需增加压力和待压缩蒸汽的体积流量是决定性参数。

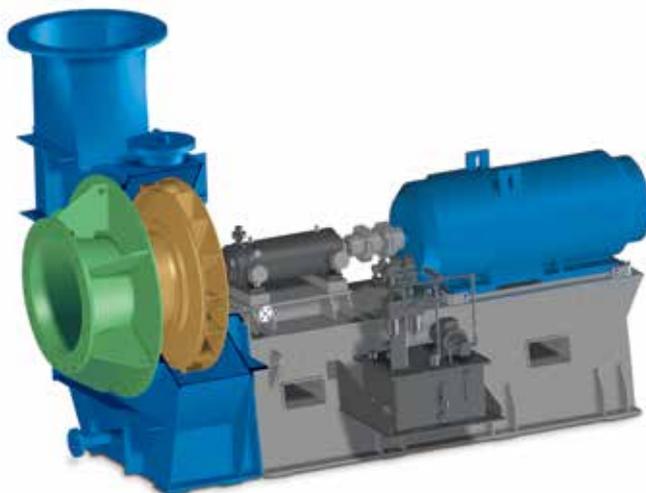
出口压力和入口压力的压力比称之为压缩比。饱和蒸汽温差来源于压力比。

机械蒸汽再压缩机的结构类型

离心风机

离心风机是一种连续流机器，配备螺旋式壳体，壳体下为搭载径向出口叶片和后弯式叶片的旋转叶轮。

蒸汽沿轴向通过吸嘴进入机器，在旋转叶轮的作用下从径向流出。随着离心速度增加，流量偏转，能量被转移到对应于叶片形状的蒸汽中。



离心风机 (资料来源: Piller)



通过叶轮后，蒸汽在螺旋壳体内被输送到排出喷嘴，在那里以较高压力和温度从机器排出。

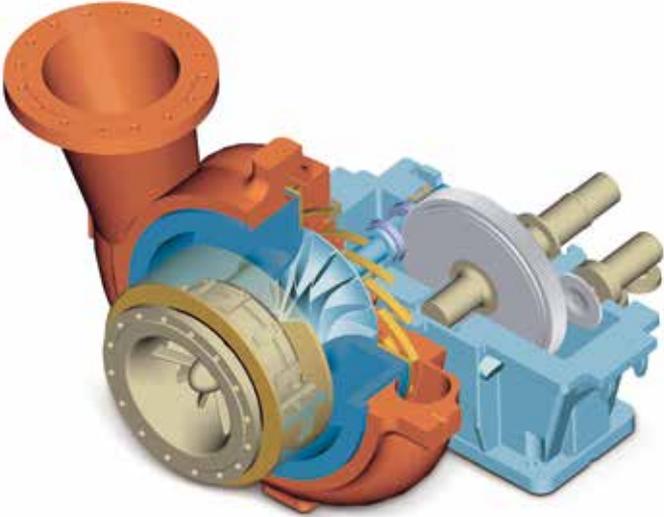
离心风机的壳体和叶轮均为焊接结构。壳体根据有关设计条件在需要时用加强筋补强。风机轴承配备有联接护罩和驱动电机，安装在风机壳体后方的底座上。

通常，离心风机的转速在2,000至5,000rpm之间，因此风机轴直接与驱动电机相连接。变频器调节与同步速度不同的工作点。使用横向布置的润滑油系统润滑风机轴承。在体积流量为1到140m³/h的情况下，最先进的高性能风机可实现的压缩比为1.2到1.4。

离心(涡轮)压缩机

与离心风机相类似，离心压缩机也是一种连续流机器，采用径向结构进行能量传递。离心压缩机也有一个螺旋式壳体和轴向吸嘴，壳体内部搭载一个通常为半开放式的旋转叶轮。

但离心压缩机的速度要快得多，范围也更大在12,000至18,000rpm之间，因此风机轴和电机之间需要一个齿轮箱。



离心压缩机 (资料来源: Atlas Copco)



活塞式鼓风机 (资料来源: Kaeser)

高转速和产生的离心力对叶轮的形状和稳定性有特殊要求,因此叶轮由高质量材料(不锈钢或钛合金)制成,并在大多数情况由铸坯整体铣削而成。通常使用铸造壳体。该机型的传动比对轴承和润滑系统以及机器监控提出更高要求。对于这种机型,在大多数情况下,由安装在吸入口的可调节进口导向叶片调节处理量。在单级涡轮压缩机的可比体积流量范围为1至140 m³/s的情况下,压缩比可以达到2以上。

旋转鼓风机

在旋转鼓风机也称为罗茨鼓风机中,两个双叶片或三叶片式旋转活塞会反向旋转。旋转活塞简单设计为对称的八边形形状,与圆周壳体共同构成所谓的输送室,蒸汽在这个输送室内被从吸入侧输送至机器的压力侧。

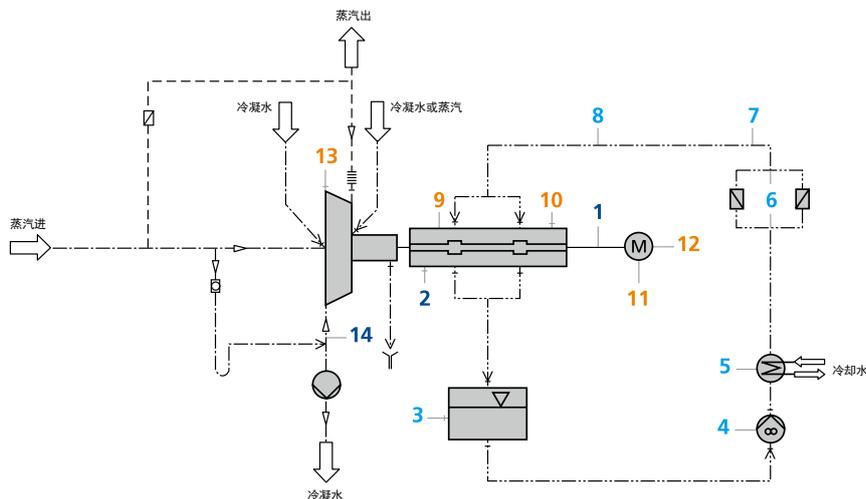
在旋转活塞的形状、壳体和相对紧密的间隙的共同作用下,确保输送室跟随旋转将蒸汽从吸入侧输送至压力侧,并适当密封防止蒸汽泄漏回流到吸入侧。由于输送室的尺寸不会随运动发生变化,因此在这种特殊的容积式压缩机中没有内部密封。压缩机会排出已经压缩的蒸汽。输送室中的蒸汽仅通过部分回流被压缩到反压力。由于必须保持紧密的间隙,并且由于热膨胀会导致一些问题,因此这些机器仅限于较小性能范围的应用。尽管如此,在体积流量范围0.05至15m³/s的情况下,压缩比可以达到2及以上。

功能原理与设计特点

监测与安全设备

蒸发装置的最佳运行需要安全和充分的加热。在配备机械蒸汽压缩机的机器中，压缩机长期稳定可靠的运行至关重要。

为及时发现机器工作中出现的异常情况、提供设备损耗预警并防止设备的机械损伤，需要许多监测和安全设备。



以离心风机为例，展示这些监测和安全设备：

- 叶轮转速 (1)
- 轴振动 (2)
- 轴承温度 (9、10)
- 壳体温度 (13)
- 壳体内流体 (14)
- 油泵 (4)
- 油箱液位和油温 (3)
- 油的压力和流量 (6、7、8)
- 冷器 (5)
- 动机轴承温度 (12)
- 机线圈温度 (11)

压缩机的驱动力

各种不同类型的电机能够用于驱动蒸汽再压缩机。对于每种工况，驱动装置在其效率和可用动力类型的基础上进行选择。

通常使用三相电流异步电动机作为驱动装置。电动机具有相当的优势是由于其标准化的防护类型和尺寸，较低的功率/重量比和较小的提及，以及最低的维护要求。

在某些情况下，使用直流电动机和燃气机，有时还会使用蒸汽涡轮机。

三相电流异步电动机

根据极对数，三相电流异步电动机可在与主频率同步转速3,000、1,500、1,000或750rpm下运转，或者使用变频器在可变转速下运转。可以使用两种类型的电动机：低压电机和高压电机。在400V或690V电压供电的情况下，低压电机能够在630kW或1,250kW功率下运转。高压电机和变频器能够用于功率高达约6,000kW的情况。

异步电动机的效率在一个很宽的负载范围内持续高水平。



蒸汽涡轮机

如果产生的废蒸汽能够得以回收利用，变速蒸汽涡轮机用作压缩机的原动机也是可取的。

调节机械蒸汽再压缩系统产能

所有工业蒸汽装置都适用一个事实，因此也同样适用于配备机械蒸汽再压缩机的蒸发装置：装置所需的蒸发率在运行期间可能不同。因此，在设计中必须考虑调节产能的可能性。

可能会出现短期产能波动，如蒸发装置必须随着上游工艺操作条件的波动来调节。

装置如需在低负荷下长期运行则是另一种需要考虑的情况。

原则上，质量流量、产品温度或其他产品参数的修改都会导致装置特性的变化，并且需要对装置中传递的热流量进行调节。这可以通过相应地调节压缩机产生的压力和/或增加饱和温度来实现。

调节概念

除了装置组件的调节尺寸外，工作点所需的变量也会影响蒸汽再压缩机最佳调节设计的选择。

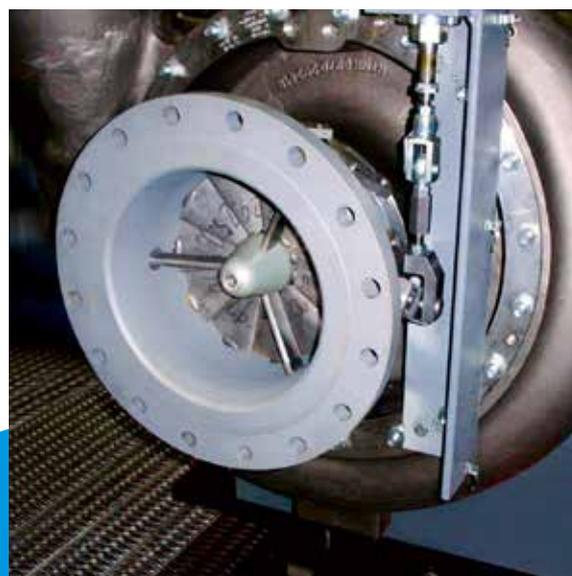
在大多数传统的连续流机器中，可以使用不同的调节机制来影响压缩机曲线，这种曲线用于显示输送的体积流量与相应压力或饱和蒸汽温度升高之间的相关性。最终的特性图应当进行优化，确保装置设计的不同工作点实现最佳的效率水平。

离心风机和涡轮压缩机最重要的调节变量如下：

- 转速控制
- 预旋转控制
- 吸入压力控制
- 旁路控制



变频器柜



进口导向叶片

采用机械蒸汽再压缩对现有多效装置的能量优化

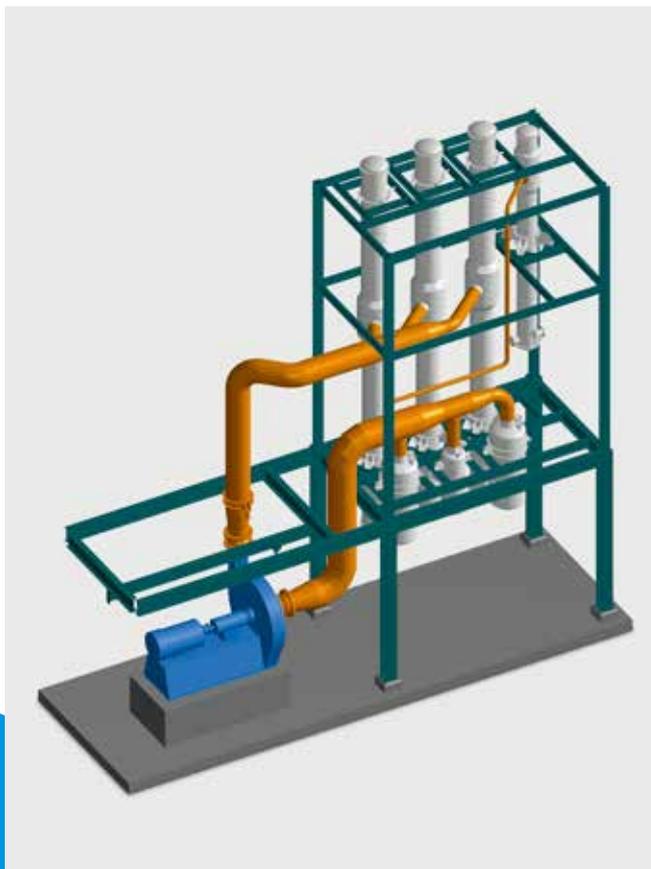
过去几十年里，全球安装了数千台多效蒸发装置。它们或者直接使用生蒸汽进行加热，或者会加装热力蒸汽再压缩机。

近些年来，大多数地区的蒸汽成本大幅增加。与使用电动机械蒸汽再压缩机加热的最先进的装置相比，过去常用的最优装置布置现在已经不再有优势。在这种情况下，问题是如何弥补运营成本的不足。

预计在未来能量成本还会增加。以增加效率来降低能量需求通常是不可行的。因此，应该评估通过机械蒸汽再压缩进行加热的改造。



改造前：直接加热的三效降膜蒸发装置



改造后：通过机械蒸汽再压缩加热的改造装置

改造

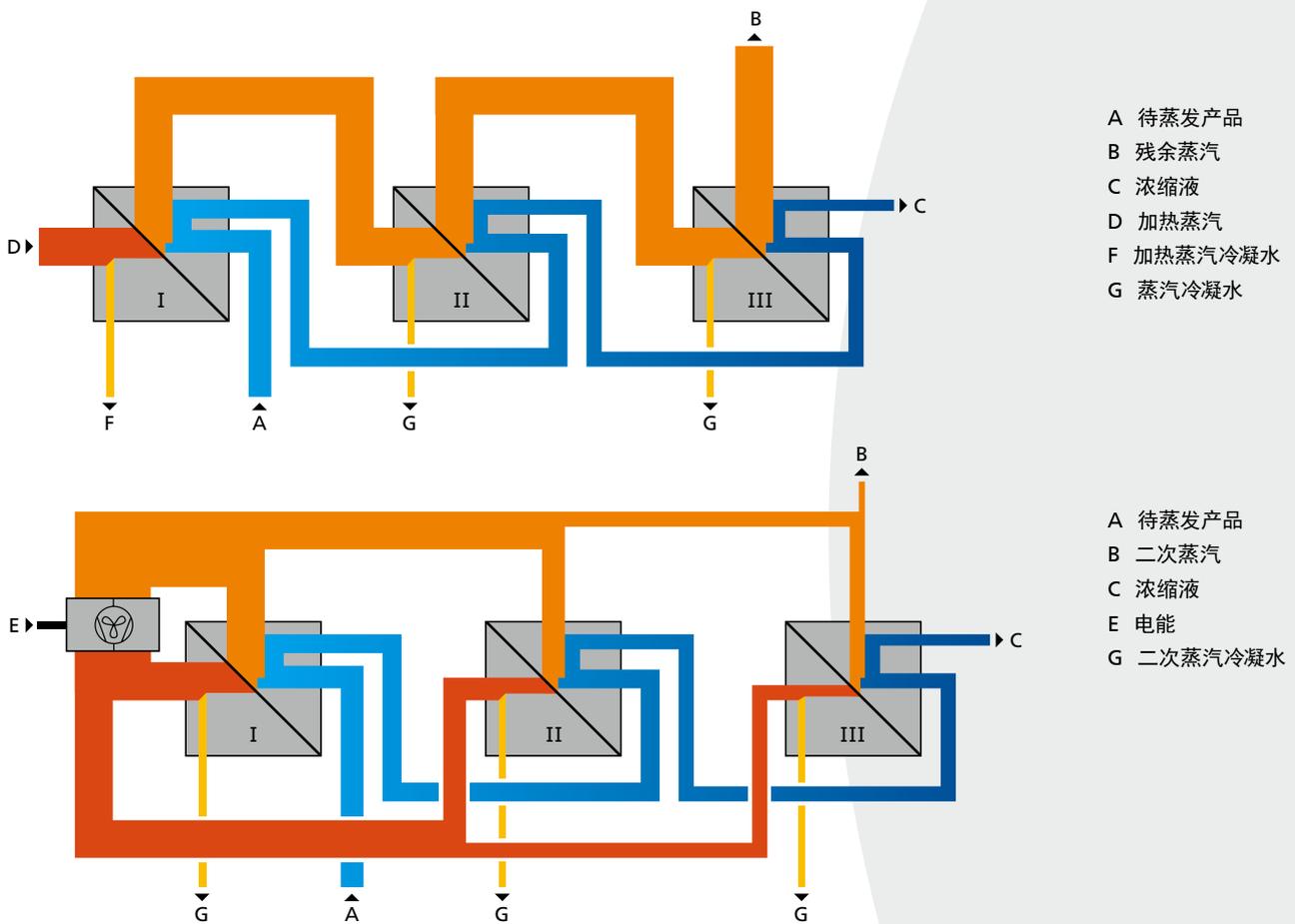
在许多情况下，多效蒸发装置都会考虑各换热表面的微小温差，因此它们适合通过机械蒸汽再压缩进行加热。改造后的机器可以并行加热现有有效体。为此，拆除现有二次蒸汽管道，改换为安装一个或多个机械再压缩机和新的二次蒸汽管道。

通过这种方式，变更装置中的能量流，使得大部分蒸出的蒸汽现在被用于加热全部效体。只需要极少量的生蒸汽和冷却水。

下面的热流图以三效装置为例来展示这种情况。

投资

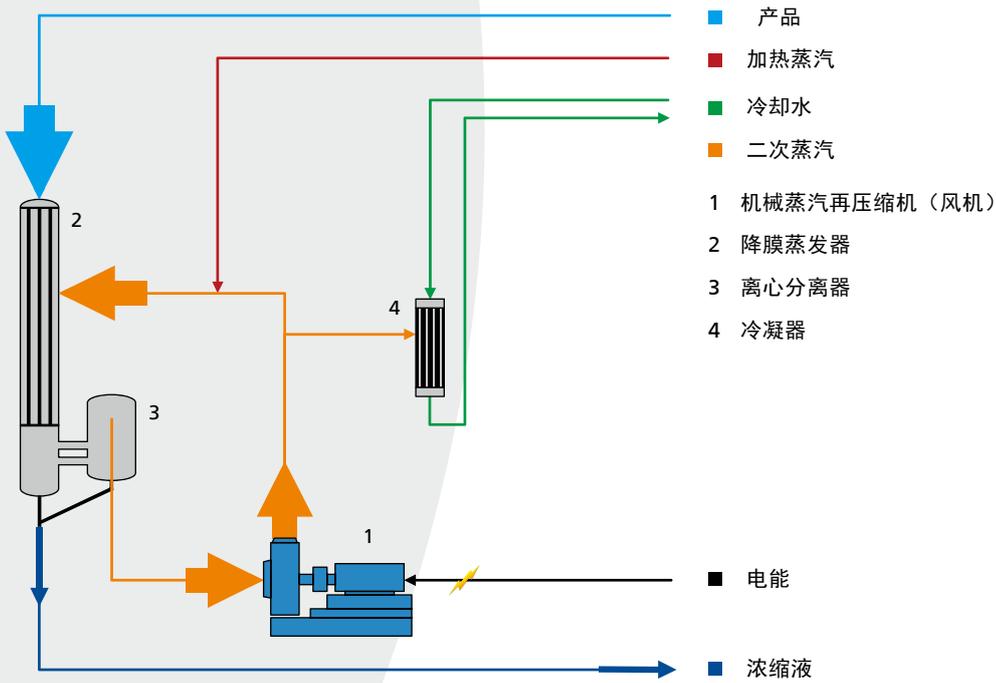
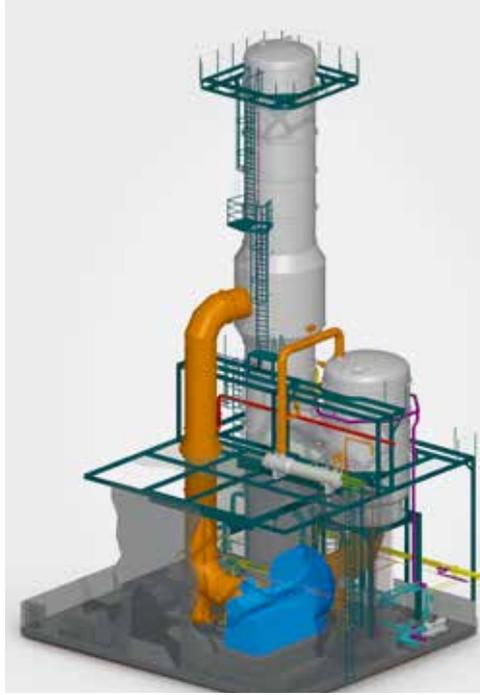
改造成本会在很短的时间内回收，类似情形参见第6页中的图表。



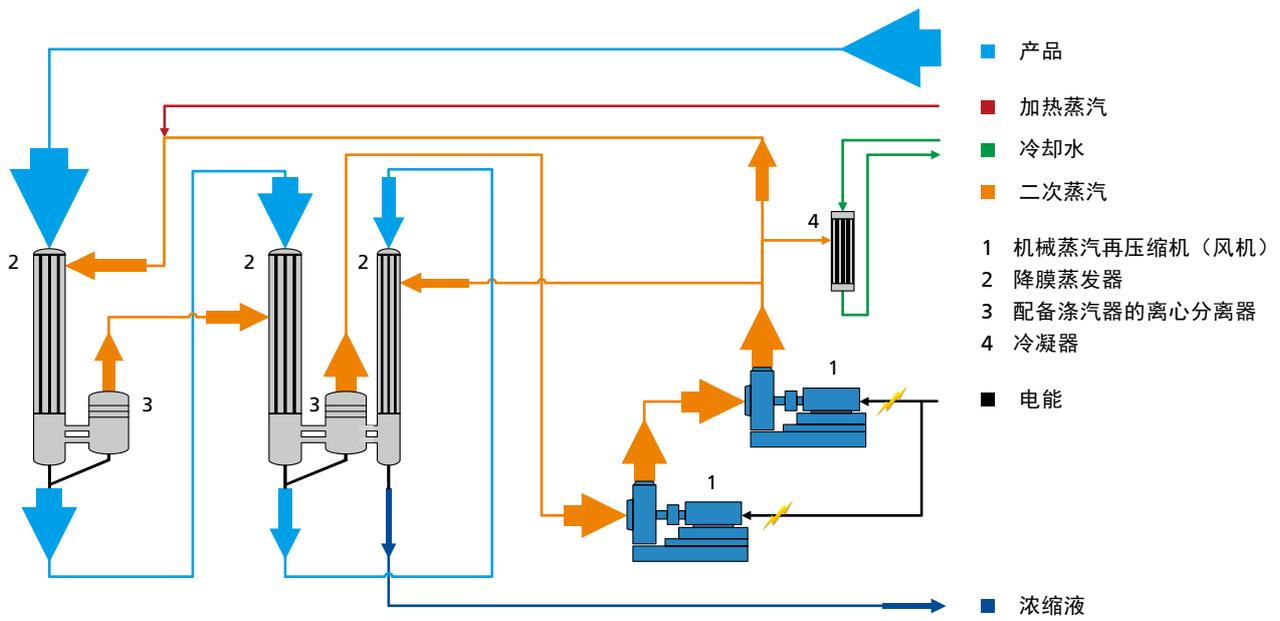
上图：三效直接加热蒸汽装置的热流图

下图：机械蒸汽再压缩加热的改造装置的热流图

配备离心风机的蒸发装置示例

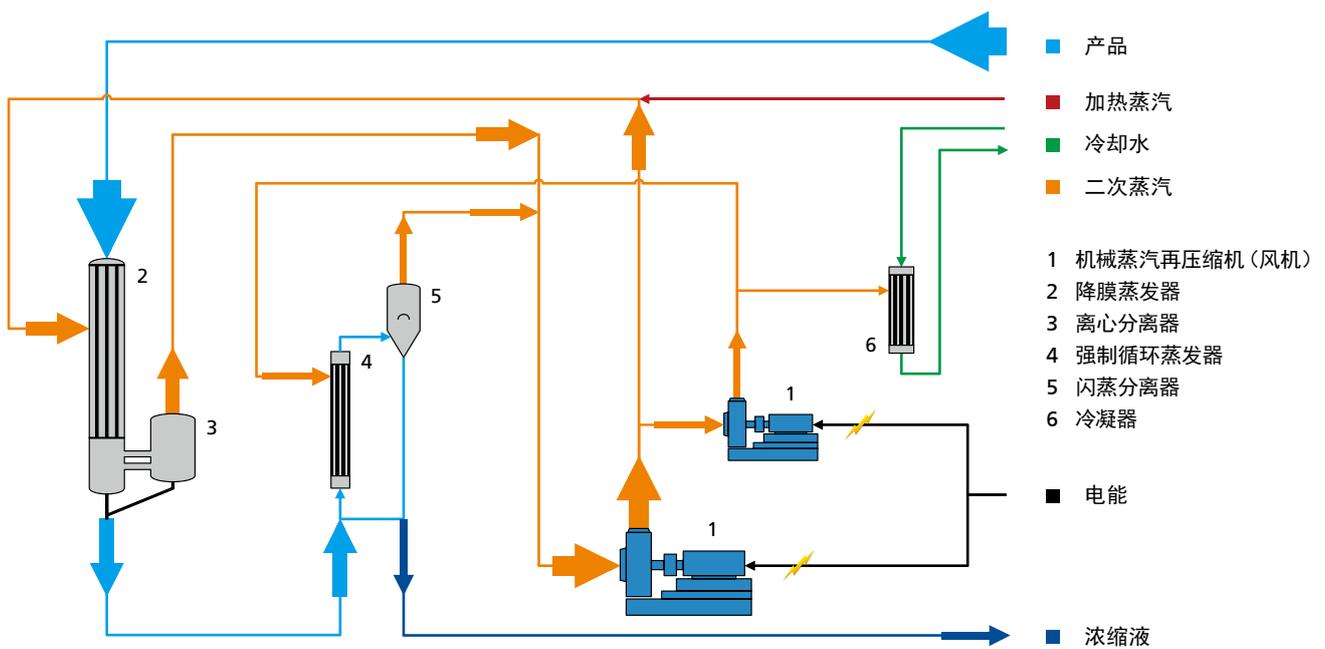


配备离心风机的机械蒸汽再压缩单效降膜蒸发器



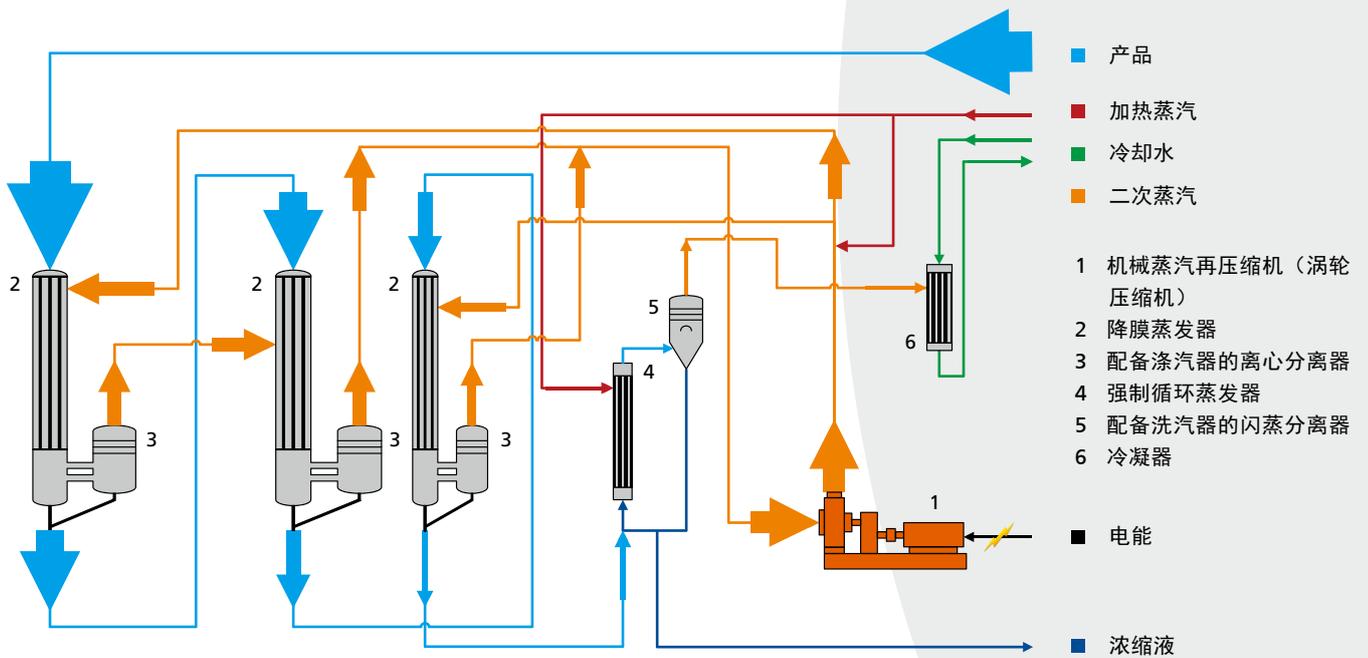
配备两台串联离心蒸汽风机的并联布置的二效降膜预蒸发器和高浓缩蒸发器

配备离心风机的蒸发装置示例



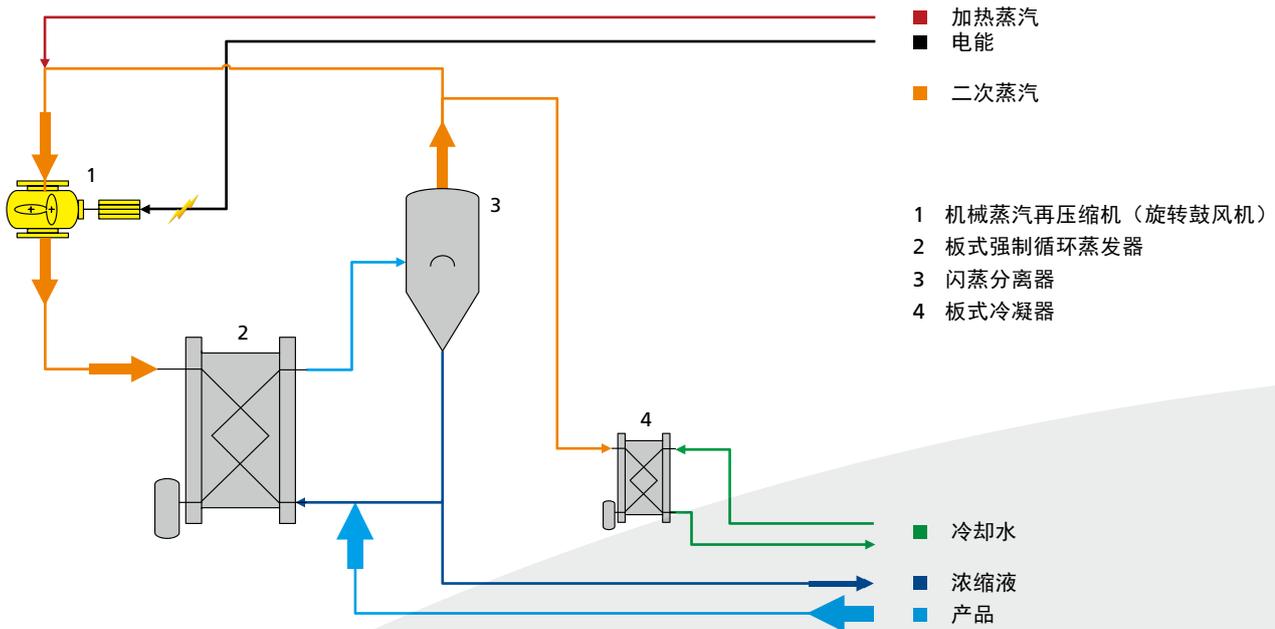
配备离心蒸汽风机作为主要再压缩机和辅助小型部分流量风机（增压器）的二效降膜+强制循环蒸发器

配备涡轮压缩机的蒸发装置示例

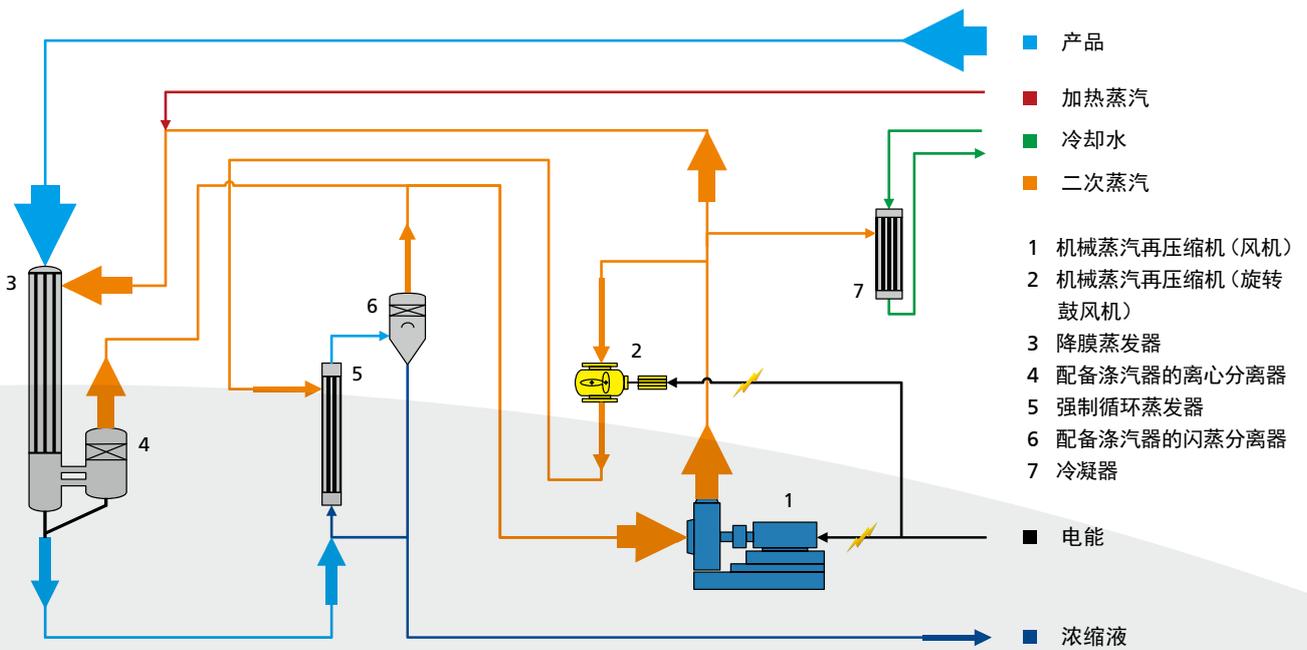


配备离心（涡轮）再压缩机的三效降膜预蒸发器和蒸汽直接加热式强制循环蒸发器的装置

配备旋转鼓风机的装置示例



配备旋转鼓风机的单效强制循环蒸发器。
蒸发器的加热体设计采用板式热交换器。



配备离心风机的单效降膜预蒸发器和配备升压旋转鼓风机的单效强制循环高浓缩蒸发器装置



We live our values.

Excellence • Passion • Integrity • Responsibility • GEA-versity

GEA is a global technology company with multi-billion euro sales operations in more than 50 countries. Founded in 1881 the company is one of the largest providers of innovative equipment and process technology. GEA is listed in the STOXX ® Europe 600 Index. In addition, the company is listed in selected MSCI Global Sustainability Indexes.

GEA China 基伊埃中国

No. 99, Hexiang Road Minhang District
闵行区鹤翔路99号

201109 Shanghai China

201109 中国上海

Tel +86-21-2408 2288

Fax +86-21-2408 2222

sales.china@gea.com

gea.com

