

高压压缩比涡轮分子泵 工作原理和应用

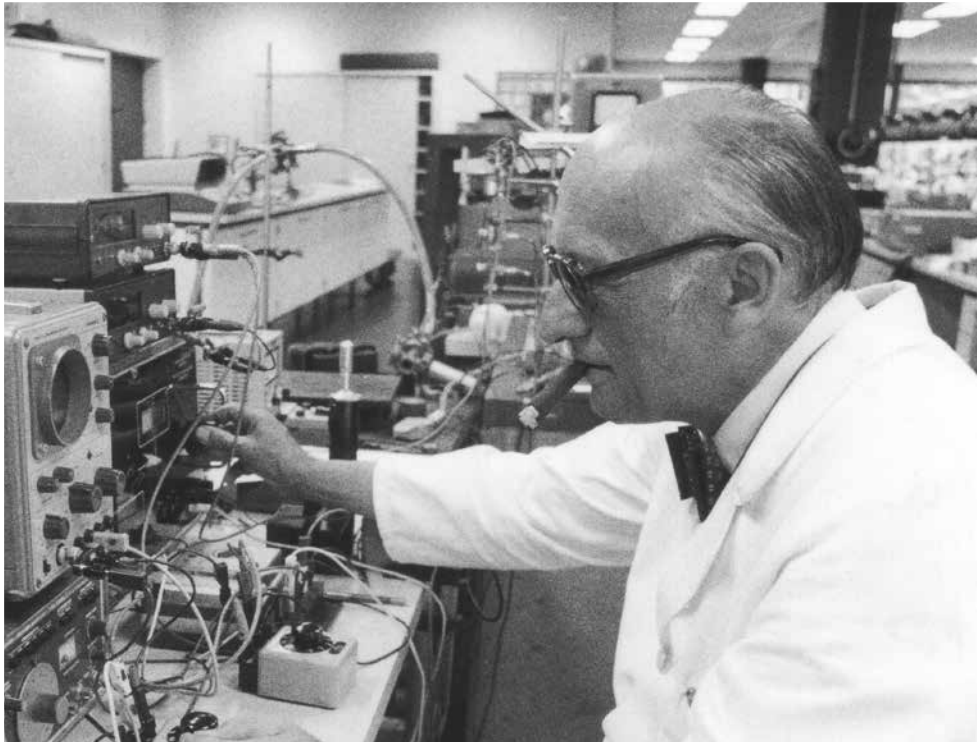
普发真空历史上的一个重要里程碑是在1955年发明了涡轮分子泵。从那时起，公司约3400名员工持续致力于改进真空技术。就在最近，激光平衡技术的发明又成为一大革新。它提供机器更长的使用寿命，同时能明显降低振动和噪音排放。但是，让我们从头开始。传统的涡轮分子泵工作原理的基础是什么？以及如何为您的应用选择合适的（前级）泵？



涡轮分子泵的发明

第一台涡轮分子泵是在1955年发明的。当时，Willi Becker博士在Arthur Pfeiffer Vakuumentchnik GmbH (现在的Pfeiffer Vacuum) 已经任职13年，担任技术实验室负责人。他关注的问题是如何防止扩散泵中的油回流到泵壳中。为此，他将一个旋转风扇轮作为挡板。通过这种方式，气体粒子沿压力梯度方向流动，没有明显的传导损失。在这相反方向，倒流的油分子被旋转的风扇轮反射。这阻止了分子到达高真空一侧。

在进一步的研究中，贝克尔博士注意到，这种设计不仅减少了扩散泵油回流的问题，同时还产生了较低的总压力。然后，他应用了一个转子-定子组合和多个串联的泵级。在这种设计中，他使用了左右两侧对称流模式--一个由皮带驱动的转子，速度达到16,000转/分钟。该泵重62公斤，抽速为900立方米/小时 是今天所有涡轮分子泵的先驱。1958年，在比利时纳穆尔举行的国际真空大会上，该泵首次被展示。如果没有这项发明，我们的现代生活将是不可想象的--因为没有涡轮分子泵，半导体生产的许多制造步骤以及无数的真空镀膜工艺将不可能实现。



威利-贝克尔博士，1958年在阿瑟-普发真空技术有限公司（今天的普发真空）的实验室里

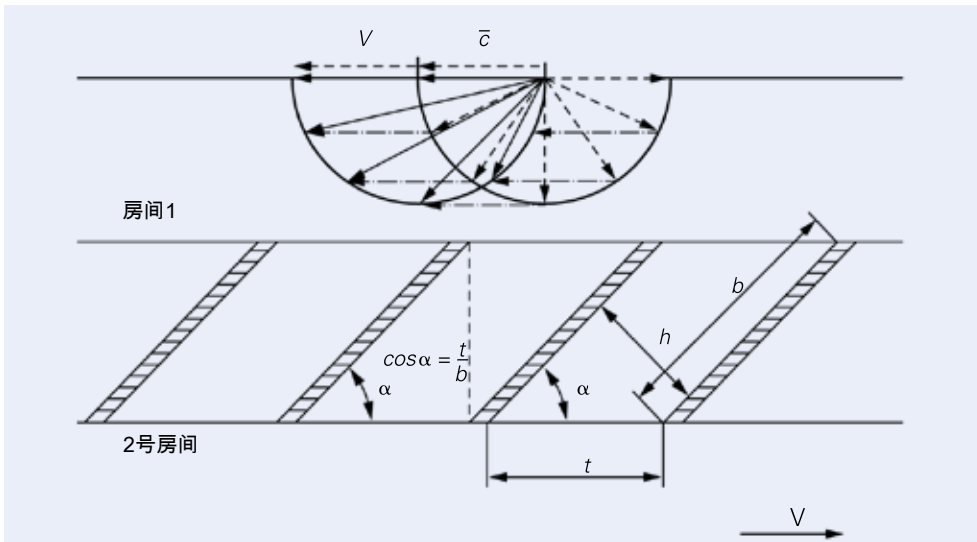


图1：涡轮分子泵的工作原理

工作原理和压缩比

涡轮分子泵是如何工作的？从快速旋转的叶片到被抽气的气体分子的动量转移是转子和定子叶片排列的泵送作用的基本原理（图1）。撞击到叶片上的分子被吸附在那里，并在短时间内再次离开叶片。叶片速度 v 被叠加到分子热运动速度 c 。分子热运动速度 c 是分子离开泵的速度。分子流动必须在泵中占主导地位。否则，叶片传递的速度分量将通过与其他分子的碰撞而丢失。因此，平均自由路径 T 必须大于通道高度 h 。在泵送气体的过程中，动能泵中会出现背压，导致倒流。 S_0 表示没有前级压力的抽速。它随着前级压力的增加而减少，在最大压缩比 K 时达到0值。

压缩比 K_0 ，可以根据Gaede[1]来估计。对于视觉密集型叶片结构（图1），Gaede的公式适用。



图2：转子和定子叶片的排列方式

$$K_0 = \frac{p_V}{p_A} = \exp\left(-\frac{vL}{\bar{c} \cdot g \cdot h}\right)$$

Gaede的公式

其中：

p_V = 前级真空压力

p_A = 吸气压力

v = 叶片速度

\bar{c} = 平均分子热运动速度

L = 通道长度

h = 通道高度

g = 用于指定平均冲击距离的系数，是通道高度的倍数 ($1 < g < 3$)

在图中用 $v \cdot \cos \alpha$ 替换公式 v ，用 b 替换 L ，用 $t \cdot \sin \alpha$ 替换 h ，我们可以得到

$$K_0 = \exp\left(\frac{v \cdot b}{\bar{c} \cdot g \cdot t \cdot \tan \alpha}\right)$$

根据Gaede的估计，假设叶片是视觉密集的，因此满足 $\cos \alpha = t/b$ 的条件（见图1）。对于较大的叶片间距，这意味着压缩量减少。

$$K_0 = \exp\left(\frac{1}{g} \cdot \frac{1}{\sin \alpha} \cdot \frac{v}{\bar{c}}\right)$$

几何比率取自图1。因子 g 在1到3之间[2]。 K_0 因此，随着叶片速度 v 和 \sqrt{M} 的增加呈指数增长。

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}}$$

R 是通用气体常数。

T 是热力学温度和

M 是分子质量。

因此，氮气的压缩比要比氢气的压缩比高得多。

抽气速度的计算

抽气速度 S_0 与吸气面积 A 和叶片的平均圆周速度 v ，即旋转速度成正比。如果考虑到叶片角度 α ，就可以得到这个结果。

$$S_0 = \frac{1}{2} \cdot A \cdot v \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha = \frac{1}{4} \cdot A \cdot v \cdot \sin 2\alpha$$

考虑到法兰盘的进口流导

$$L_F = \frac{\bar{c}}{4} \cdot A$$

和 45° 的最佳叶片角度，重质气体（分子量 >20 ）涡轮分子泵的有效泵送速度 S_{eff} 近似于以下公式

$$S_{eff} = \frac{S_0 + L_F}{S_0 \cdot L_F} = \frac{A \cdot v}{4 \cdot \left(\frac{v}{\bar{c}} + 1\right)}$$

通过将有效泵送速度除以最上层圆盘的叶片进口面积，并考虑辅助系数 $df \approx 0.9$ 和叶片厚度堵塞的面积，可以得到涡轮分子泵的最大特征泵送速度 S_A （图2中以氮气为例绘制的曲线）。

$$S_A = \frac{S_{eff}}{A} = d_f \cdot \frac{v}{4} \cdot \left(\frac{v}{\bar{c}} + 1\right)^{-1}$$

图3的Y轴上画出了以 $l \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2}$ 为单位的比抽速，X轴上画出了循环频率 f 和叶片的外半径（ R_a ）和内半径（ R_i ）的平均叶片速度 $v = \pi \cdot f \cdot (R_a + R_i)$ 。从X轴上的一个选定点垂直向上移动，与曲线的交点显示了该速度下泵 S_A 的最大特征泵送速度。乘以输入盘的叶片面积： $A = (R_a^2 - R_i^2) \cdot \pi$ ，就可以得到抽气速度。

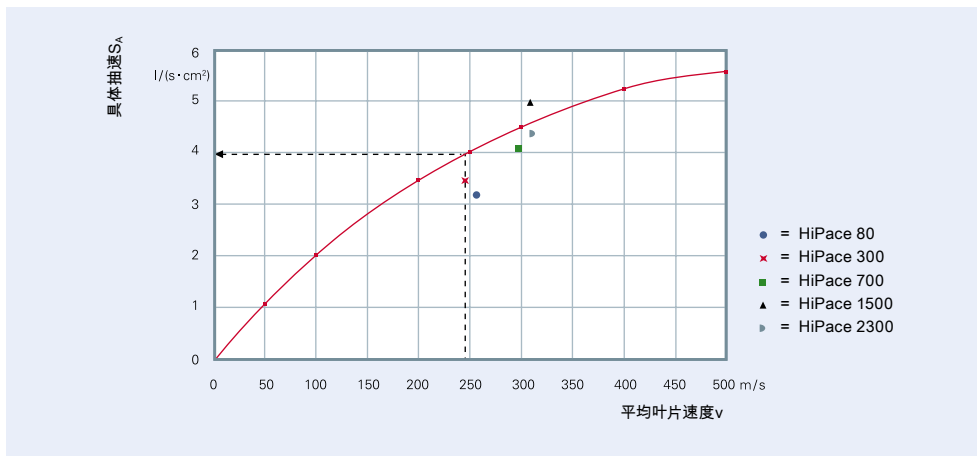


图3：涡轮泵的具体泵送速度。

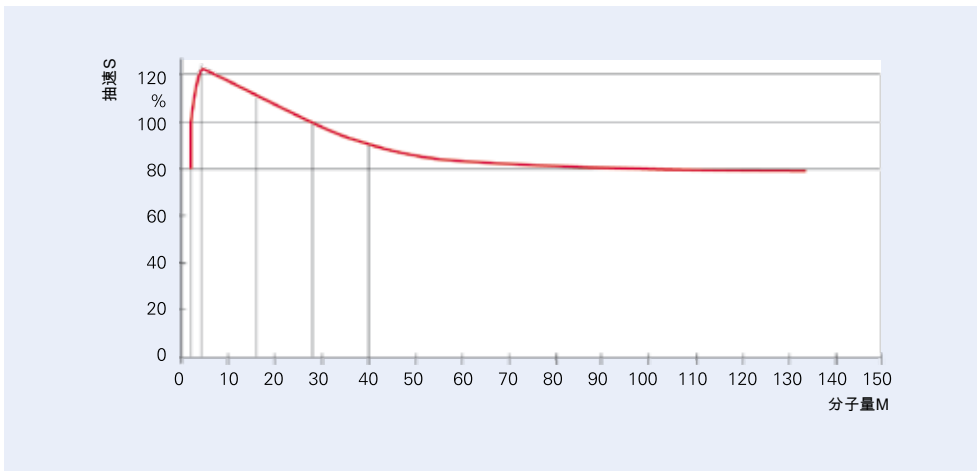


图4：泵送速度是相对分子量的函数。

图3中输入的点是根据所示的Pfeiffer Vacuum泵的测量值确定的。远高于曲线的点在实际上是不可能的。以这种方式确定的泵送速度还不能说明轻质气体的数值，例如氢气（图4）。如果涡轮分子泵是为低极限压力而设计的，就会使用不同叶片角度的泵级，并对氢气的最大泵速进行分级优化。这样就能同时为氢气（约1000）和氮气提供足够的压缩比的泵。由于空气中的氮气分压很高，压缩比应该在10的9次方左右。对于由转子和定子盘组成的纯涡轮分子泵，由于其分子流的要求，前级真空压力需要达到约 10^{-2} hPa（图5）。

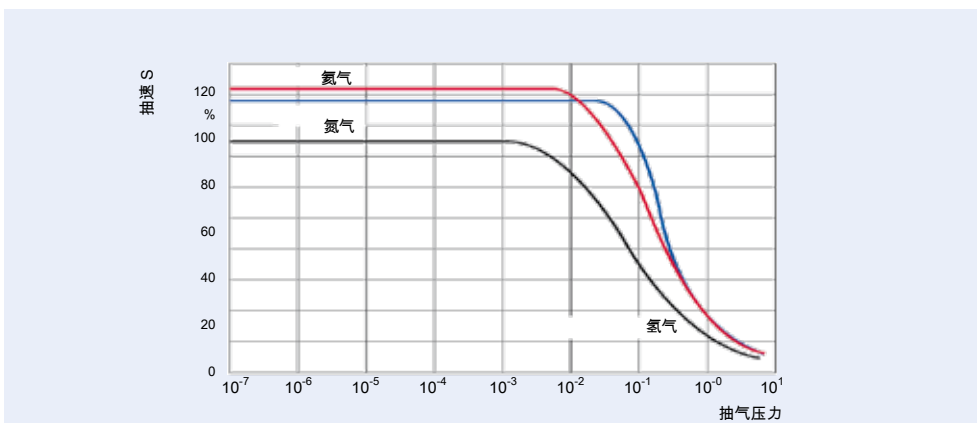


图5：抽速与抽气压力的关系。

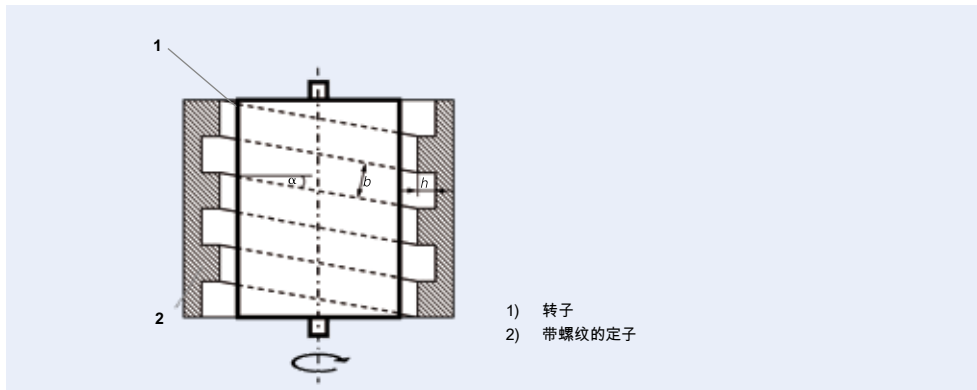


图6：霍尔韦克级的工作原理。

霍尔韦克级的特殊功能

Holweck级 (图6) 是一个多级Gaede分子泵，有一个螺旋形的泵通道。由于转子的旋转，进入泵通道的气体分子在泵通道的牵引方向上得到一个速度。由于转子和分离分隔Holweck级的挡板之间存在间隙，因此会出现回流损失。为了尽量减少回流，间隙的宽度必须保持较小。

圆柱形套筒 (1) 被用作霍尔韦克平台的转子，它在定子 (2) 的螺旋通道中旋转。如果定子被安排在转子的外部和内部，两个霍尔韦克级可以很容易地被整合到一个泵中。这样，被泵送的气体颗粒首先通过转子外侧的定子通道，然后再通过转子内侧的定子通道向上输送。从那里，它们通过一个收集通道，到达前级泵。现代涡轮分子泵有时有几个这样的 "折叠式" 霍尔韦克级，其泵送速度 s_0 是相同的。

$$S_0 = \frac{1}{2} \cdot b \cdot h \cdot v \cdot \cos \alpha$$

这里， $b - h$ 是通道的横截面， $v \cdot \cos \alpha$ 是通道方向的速度分量。随着通道长度 L 和速度 $v \cdot \cos \alpha$

$$K_0 = \frac{v \cdot \cos \alpha \cdot L}{c \cdot g \cdot h} \text{ mit } 1 < g < 3$$

压缩比就会增加。

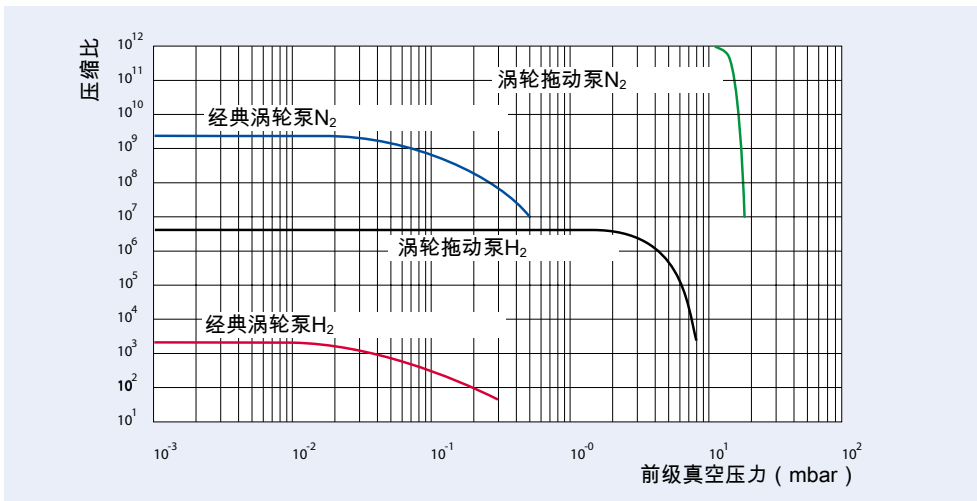


图7：纯涡轮分子泵和涡轮拖动泵的压缩比。

今天，涡轮泵配备了Holweck级，是为了使极限压力在0.5-5hpa之间，以隔膜泵为前级建立起涡轮分子泵系统，这些被称为涡轮拖动泵。由于涡轮泵的高压缩比，只需要很小的泵送速度就可以为Holweck级产生低的本底压力。因此，排气通道--特别是通道高度和到转子的间隙--可以保持得非常小，分子流可以保持在1 hPa范围内。氮气的压缩比同时增加了所需的10的3次方数量级。

在图9中，我们可以看到压缩比曲线向更高压力的方向移动了大约10的2次方。在为高气体吞吐量而设计的涡轮分子泵中，在气体吞吐量、前真空兼容性和颗粒容忍度之间做出了妥协。在这种情况下，Holweck级的间隙距离尺寸要大一些。



图8：带有隔膜泵的HiCube Eco涡轮分子泵站

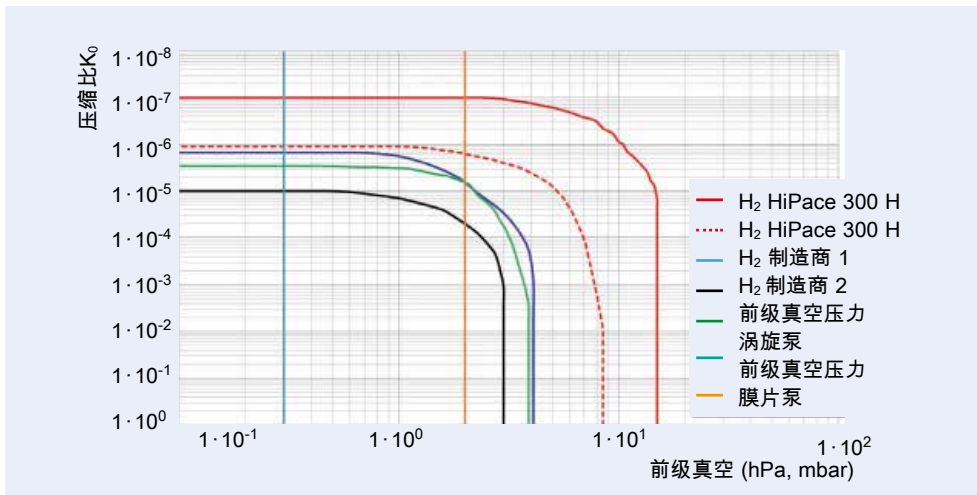


图9：纯涡轮分子泵和涡轮拖动泵对氢气的压缩比。

选择正确的前级泵

涡轮分子泵和前级泵的压缩在获得最低的压力范围起着重要作用。这对于氢气等轻质气体来说尤其如此。在以前的超高真空应用中，前级泵已经能够提供 10^{-2} hPa左右的低压。涡轮分子泵的压缩比可以在此基础上确定。旋片泵、多级罗茨泵或泵站等前级泵可以提供这样的低前级压力。尽管旋片泵是比较经济的选择，但当涡轮泵关闭时，有油倒流的风险，特别是在错误操作的情况下。干式前级泵甚至泵站，能产生很低的前级真空，其价格要高得多，而且需要相对较大的空间，这在许多应用中是一个不利因素。这里最理想的解决方案是使用一个小型的、低成本干式前级泵。



图10：前级泵 - DuoLine旋片泵和ACP多级罗茨泵。

大多数涡轮分子泵是全能型的。除了良好的压缩性能，它们还提供大的泵送速度和高的气体吞吐量。然而，在极少数超高真空应用中，高气体吞吐量根本没有发挥任何作用。相反，泵送速度和对轻质气体的出色压缩比才是最重要的。涡轮分子泵的霍尔韦克级为最大压缩值进行了优化，这不可避免地减少了泵的气体吞吐量。然而，这对上述应用来说是次要的。然而，备用泵和涡轮分子泵的总压缩比的很大一部分可以转移到涡轮泵上的事实是非常有利的。因此，带有压缩优化的霍尔韦克级的涡轮分子泵可以在明显高于前级压力的情况下排气，以达到相同的极限压力。因此，在使用带有压缩优化的霍尔韦克级的涡轮分子泵时，一个小型隔膜泵就足以产生超高真空（见图9，表1）。

Backing pump	Type	Fore vacuum pressure (hPa)	Final pressure (hPa)
two-stage rotary vane pumpe	Duo 6	0.003	$2.47 \cdot 10^{-11}$
Diaphragm pump (2 stage)	MVP 015-2	3.000	$2.75 \cdot 10^{-11}$
Diaphragm pump (3 stage)	MVP 020-3	1.300	$2.65 \cdot 10^{-11}$
Multi-stage Roots pump	ACP 15	0.032	$2.56 \cdot 10^{-11}$

表1：使用HiPace300H和不同的前级泵所能达到的极限压力



图11：HiPace 300 H涡轮分子泵

这种优化的涡轮分子泵具有很高的真空兼容性，因此隔膜泵毫无疑问仍然可以在间歇模式下运行。只有当前级的真空压力达到一个不允许的高值时，才需要开启它。众多的应用表明，隔膜泵的运行时间不到总时间的10%。除了由此带来的能源节约外，前级泵较低的热辐射和最终在实验室中几乎无噪音的运行也不应被低估。

此外，为了保持极低的压力（见图9和表1），通常连接在涡轮分子泵下游的离子捕获泵就不再需要了。

因此，通过现代涡轮分子泵中Holweck级的智能互连，可以大大增加压缩比，特别是对轻质气体。简单、小型的前级泵可用于在低UHV范围内产生非常低的压力。与过去使用的选择相比，这是一个非常大的优势。然而，同样重要的是指出这些解决方案的局限性。高压比的涡轮泵不太适合大气体负荷。

2021年，Pfeiffer真空公司推出了激光平衡技术。这是一种新颖的方法，为涡轮泵的转子提供更有有效的平衡。不再将平衡配重拧入平衡孔，而是借助于高能激光束去除材料。因此，质量平衡的方法是完全相反的。这种方法确保显著降低残余不平衡，从而减少振动和噪音排放，延长球轴承的使用寿命。因此，Pfeiffer真空公司的涡轮分子泵可以被更有效率的使用。

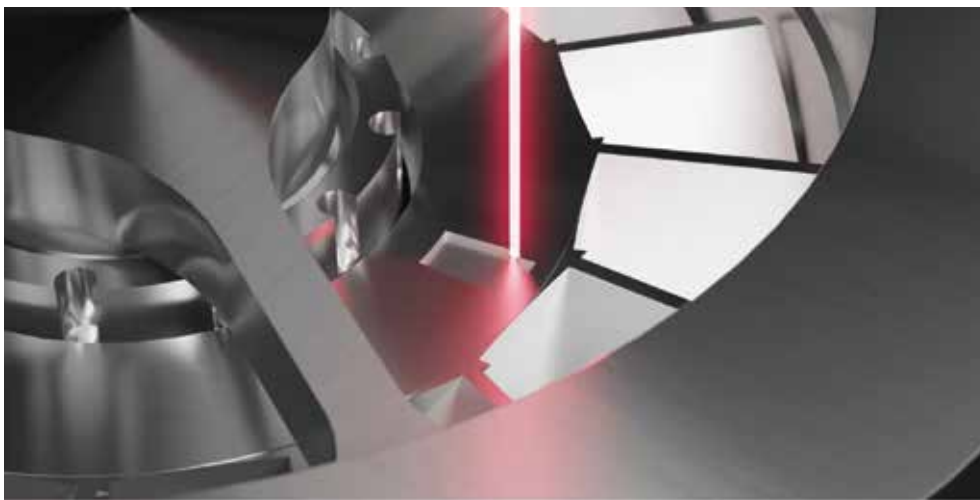
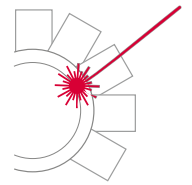


图12：作为激光烧蚀的先驱，普发真空公司能够在纳米级范围内平衡转子

Your Success. Our Passion.

We give our best for you every day –
worldwide!

您是否正在寻找
完美的真空解决方案？
请联系我们：

普发真空技术（上海）有限公司
Pfeiffer Vacuum
(Shanghai) Co., Ltd.
T +86 (21) 3393 3940
info@pfeiffer-vacuum.cn

Pfeiffer Vacuum GmbH
德国总部
T +49 6441 802-0



Errors excepted. All data subject to change without prior notice. PI 0539 PZH (June 2022/0)

Follow us on social media
#pfeiffervacuum



www.pfeiffer-vacuum.cn

PFEIFFER  **VACUUM**