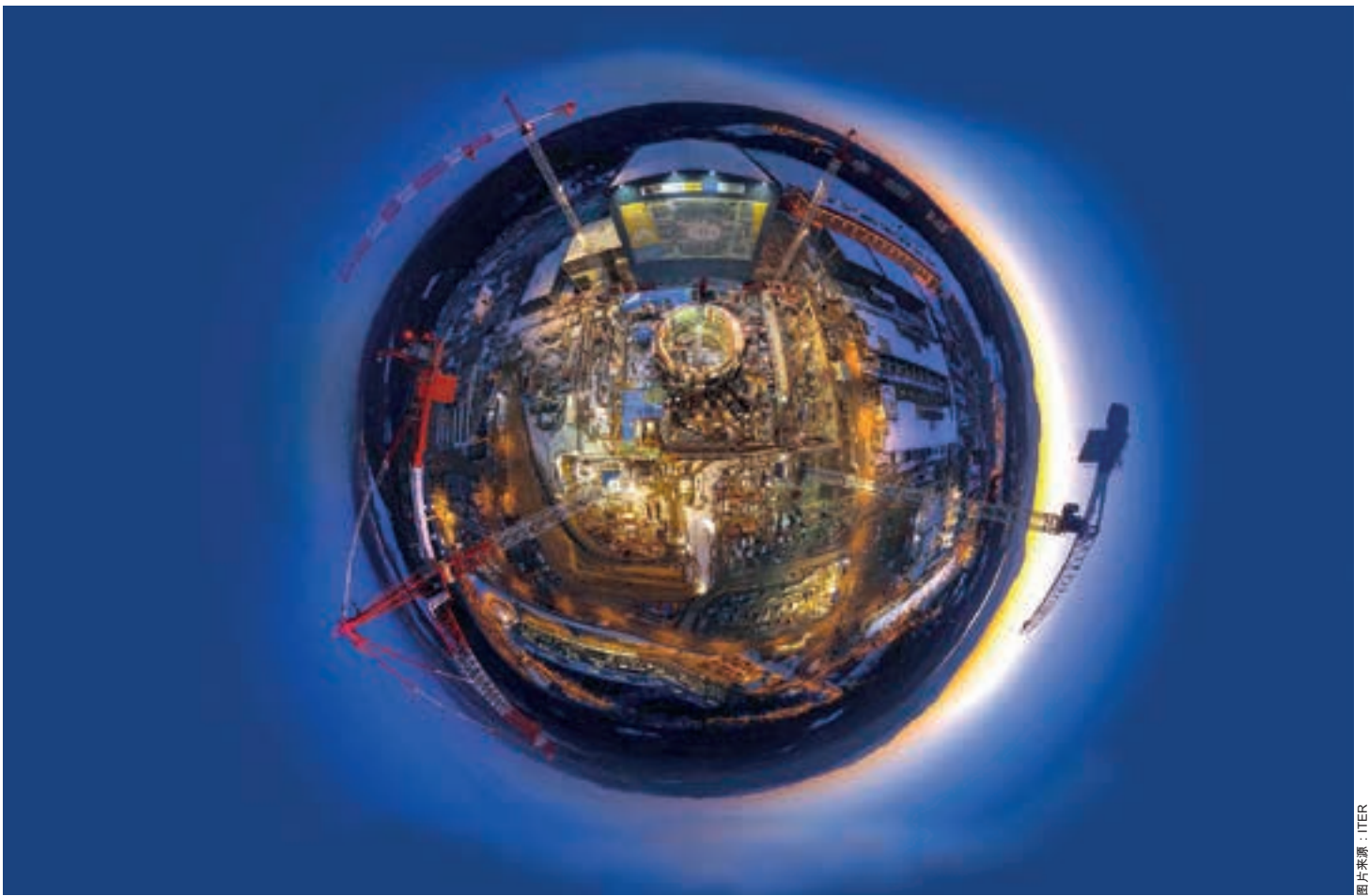


# 聚变反应堆中的真空

## 托卡马克和仿星器反应堆原理

图片来源：ITER



图片来源：ITER

## 以太阳光为原型

由于全球变暖和气候变化不断持续，从替代来源获取清洁能源的需求不断增长。多年来，科学家一直在尝试以太阳光为模板，在地球上制造人工太阳，以产生能源。其中涉及核聚变反应，即氢原子核聚变形成氦原子核。复制太阳上普遍存在的极端条件是最大的难点——因为这颗位于我们太阳系中心的恒星，其环境与地球上的完全不同。

### 核聚变原理

太阳上发生核聚变时，表面温度可达到约 6,000 摄氏度。而为将核聚变原理运用在地球上以产生能源，需要复制太阳上的反应。在此，真空技术起着关键作用，因为太阳被真空包围。

被称为核聚变反应堆的大型实验设施用于在地球上再现太阳的环境。

核聚变反应堆是一种技术设施，原子核在其中经由可控的热核反应发生聚变。核聚变过程的目的是产生电力，因为在原子核聚合时将释放出巨大的能量。

目前，有两种常见反应堆：托卡马克反应堆和仿星器反应堆。这两种反应堆的工作原理基本相同，不同之处在于产生磁场的线圈形状和布置方式。在两种反应堆中，氢或氘的同位素被加热至 1.5 亿摄氏度。为了产生所需的热量，等离子体需在真空中自由悬浮，因为与其他微粒或墙壁接触均会导致热量散逸。因此，通常

要借助超导电磁铁产生场强高达 10 特斯拉的磁场。随后通过电热或电磁波加热等离子体，若条件适宜，即可触发核聚变。

在核聚变反应堆中，真空的作用是什么？

强劲可靠的高性能真空系统是运行聚变反应堆的重要要求之一。

- 将自由悬浮的等离子体与墙壁隔开：防止 1.5 亿度高温的等离子体与舱室墙壁之间发生热传导，这一点十分必要。否则，等离子体将立即冷却，聚变反应将会失败。
- 去除氦和杂质：在反应过程中，废产物氦以及墙壁材料的原子核作为污染物必须通过磁偏转从等离子体中清除。从等离子体中清除的氦和原子核冷却后，通过真空泵排出。
- 低温恒温器的隔热：许多聚变实验会采用超导线圈产生磁场。此类线圈通过液态氦冷却。在此需用真空泵生成所需的真空隔热层。

## 真空系统要求

极限真空高 ( 等离子体容器中  $< 1 \cdot 10^{-8}$  hPa ; 低温恒温器中  $< 1 \cdot 10^{-5}$  hPa )

- 输入过程气体前, 聚变反应堆的容器必须被排空到基础压力  $< 1 \cdot 10^{-8}$  hPa。所述过程气体为氢、氖或氦。运行过程中形成的气体负荷一般采用涡轮分子泵排出, 也可以考虑使用低温泵。原则上, 采用的泵技术必须具有高抽速, 以针对小分子过程气体。
- 为测量总真空压力, 会采用多种传感器。除了热导真空计 ( 皮拉尼真空计 ) 外, 还广泛采用冷阴极真空计。后者用于探测容器中的高真空压力和超高真空压力。
- 在许多情况下, 聚变反应堆中安装有高解析度四极杆质谱仪, 用于分析。该仪器用于探测氦和氖的比例。



Wendelstein 7-X 反应堆主安装阶段完成前不久, 摄于 2014 年 3 月 ( 图片 : IPP, Beate Kemnitz )

## 专家



## 提示

在运行过程中, 涡轮分子泵对于外部磁场十分敏感。这是由于磁场中的涡流。此类涡流将导致铝转子剧烈发热, 最坏情况下甚至可能损毁。具体而言, 该效应是由于磁场与转子轴线水平而产生的。为使涡轮分子泵在磁场内克服该效应运行, 普发真空为涡轮分子泵提供磁屏蔽:

- HiPace 80
- HiPace 300
- HiPace 700

HiPace 300 H 和 HiPace 700 H 可对小分子气体进行极高的压缩。因此, 它们特别适用于聚变实验。磁屏蔽的材料和壁厚度分别确定。这些参数也决定了允许涡轮分子泵暴露在其中的磁场强度。

## 与氦的兼容性

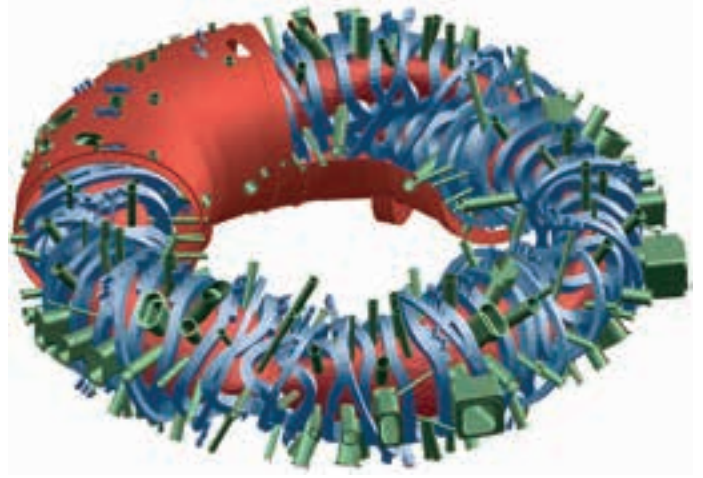
- 在某些聚变实验中，除了氢以外，还会使用氦。氦的应用按浓度低、中和高分类，但真空组件的材料有共通明确规定。例如，不能使用弹性体。出于气密性原因，前级泵不得使用铸铁外壳。
- 使用氦时，对真空部件的气密性要求尤其高： $Q < 1 \cdot 10^{-10} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 。但即使设备采用氢，除了检查泵和测量设备外，也仍需检查容器整体、其法兰和连接件有无泄漏。

## 适用于辐射环境

对于所有使用的真空部件，采取的基本原则之一是，电子元器件安装时必须与实际泵或测量设备保持一定距离。这是因为现代的数字式电子元件可被辐射毁坏。唯一可行的办法，是通过长线缆将控制设备和执行器（泵、测量设备等）分开。通常，规定线缆接头材料不得含有卤素，线缆长度可达 100 m 或更长。

## 在磁场强度高的区域内运行

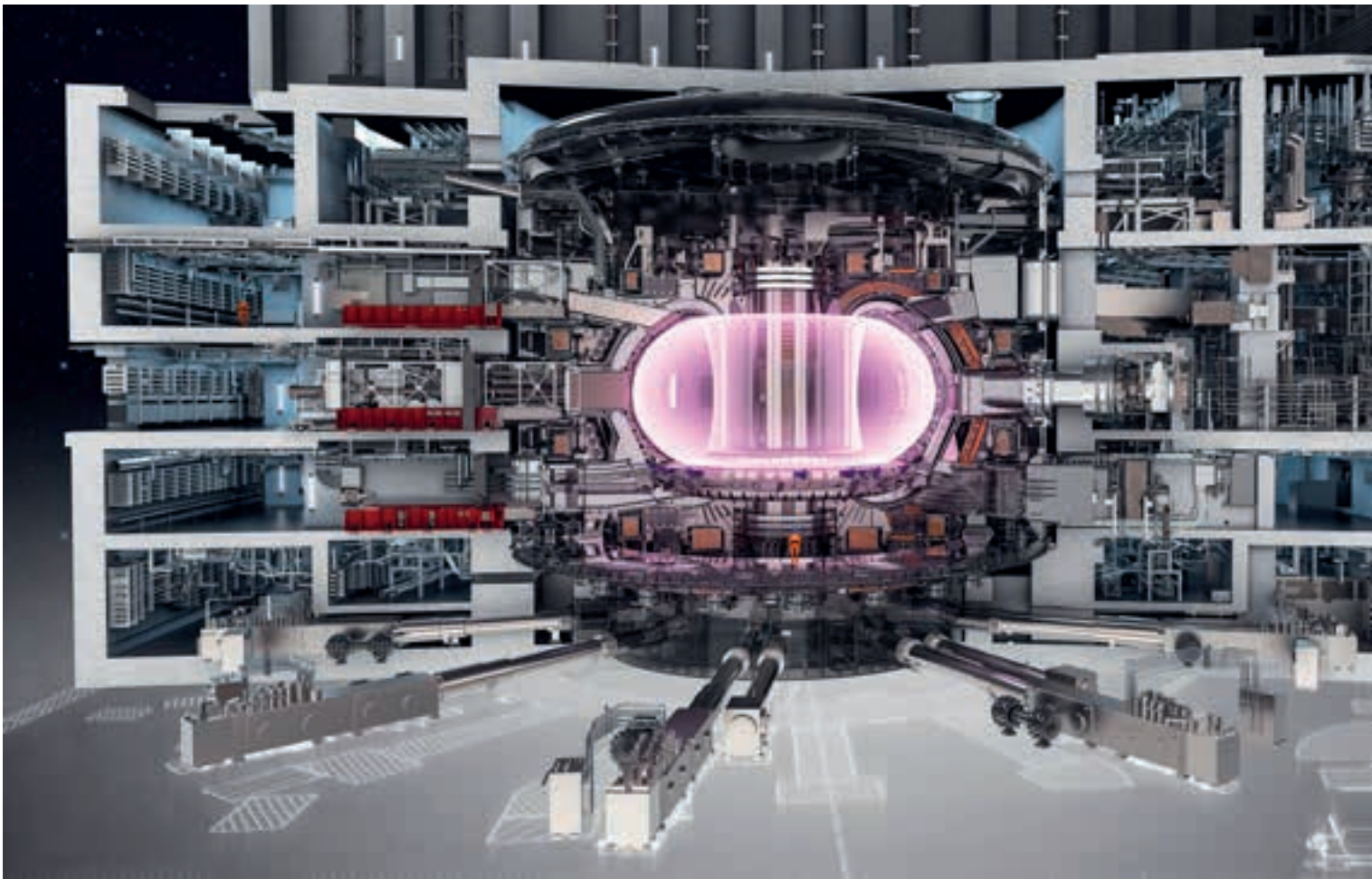
- 在真空部件安装地点，聚变反应堆运行所需的高强度磁场（若干特斯拉）仍可达到  $H > 100 \text{ mT}$  的水平。因此，所有部件必须带有磁屏蔽。对于涡轮分子泵，尤其必须采用屏蔽，以避免转子在涡流作用下发热。
- 制造真空容器的材料要求则与之相反。在此，磁导率越高越好。这意味着外部产生的磁场不应受干扰，并且材料不应被涡流加热。



计算机图像：Wendelstein 7-X 反应堆中的低温恒温器、磁线圈和等离子体容器（图片：IPP）

## 参考

多年来，普发真空一直是技术强大、誉满全球的聚变实验合作伙伴。对我们而言，与用户紧密合作，共同制定解决方案一直是重中之重。工艺最关键的部分是确定最佳的产品组合或针对各种应用的解决方案。在此仅举下列客户参考项目为例：



### Wendelstein 7-X ( 仿星器反应堆 )

- 47 x HiPace 2300 C 涡轮分子泵
- HiCube Eco 分子泵组
- ModulLine 真空计 ( 带遥控电子元件 )
- ASM 310 检漏仪
- HPA 220 质谱仪

### ITER ( 托卡马克反应堆 )

- 可兼容氦的罗茨泵, 已获专利, 普发真空独家供应
- 移动式残留气体分析系统
- 移动式检漏仪



可兼容氦的 Okta 1500 GM 罗茨泵, 氢压缩率极高



应用范围极广的特制检漏仪。从 H<sub>2</sub> 到 Xe, 所有气体均可检测, 并且适用压力范围广泛。



## 普发真空产品及其优势一览

### HiPace 涡轮分子泵

- 高抽速
- 轻质气体压缩率高
- 用于高强度外部磁场的变型
- 外部驱动电子元器件距泵可达 100 m
- 可现场维护



### ACP 多级罗茨泵

- 外部驱动电子元器件
- 无摩擦运行，故无磨损
- 无碳氢化合物回流
- 产生极净真空
- 无触点泵模块
- 无微粒真空
- 可订购无氟版



### 罗茨泵

- 不锈钢制，已获专利
- 兼容氙
- 抽速：250 至 25000 m<sup>3</sup>/h
- 磁力耦合 — 密封性极佳，使用寿命长
- 压缩率高，亦可用于轻质气体



### 舱室和部件

- 大尺寸
- 可定制
- 通用部件



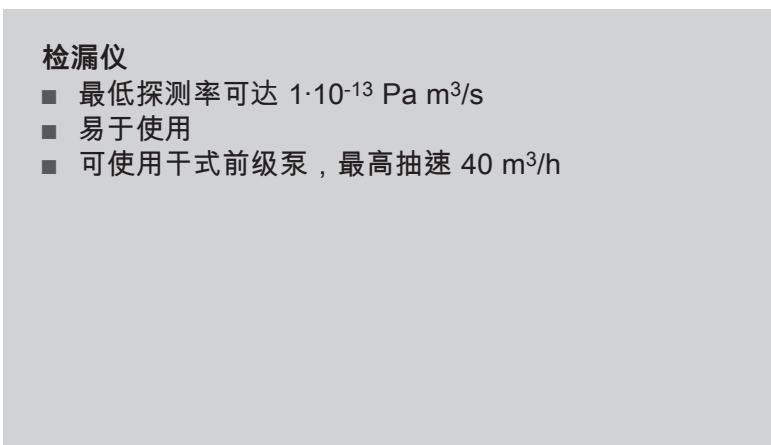
### 真空计

- 磁屏蔽最高 70 mT (ModulLine)
- 电缆长度最长 500 m
- Profibus 接头



### 质谱仪

- 残余气体分析和泄漏检测
- 高解析度质谱仪，也可用于探测氦和氖
- 不同变型，适合多种应用



### 检漏仪

- 最低探测率可达  $1 \cdot 10^{-13}$  Pa m<sup>3</sup>/s
- 易于使用
- 可使用干式前级泵，最高抽速 40 m<sup>3</sup>/h



## 我们提供一站式真空解决方案

普发真空代表着为客户在世界范围内提供创新的、定制化的真空解决方案，完美的技术，全方位的支持和可靠的服务。

## 完整的产品线

从一个配件到复杂的真空系统：  
我们是唯一能提供完整的产品线和技术服务的供应商。

## 理论与实践的完美结合

得益于我们的专业技术和完善的培训体系！  
我们为您提供完整的生产技术提升方案和全球统一的一流的现场服务。

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

[www.pfeiffer-vacuum.com](http://www.pfeiffer-vacuum.com)

**PFEIFFER**  **VACUUM**