



中华人民共和国国家标准

GB/T 43044.4—××××/ISO 21360-4:2018

真空技术 真空泵性能测量标准方法 第4部分：涡轮分子泵

Vacuum technology — Standard methods for measuring vacuum-pump
performance — Part4: Turbomolecular vacuum pumps

(ISO 21360-4:2018, IDT)

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

××××-××-××发布

××××-××-××实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会

发布

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是GB/T 40344《真空技术 真空泵性能测量标准方法》的第4部分。GB/T 40344已发布了以下部分：

- 第1部分：总体要求；
- 第2部分：容积真空泵；
- 第3部分：机械增压泵的特定参数；
- 第4部分：涡轮分子泵。

本文件等同采用ISO 21360-4:2018《真空技术 真空泵性能测量标准方法 第4部分：涡轮分子泵》。请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国真空技术标准化技术委员会（SAC/TC18）归口。

本文件起草单位：北京中科科仪股份有限公司。

本文件主要起草人：邹蒙、张勤德、李赏、李兵、宋海燕、张浩、顾艳庆。

引 言

原有的真空泵标准体系中，对某些种类真空泵性能参数的测量提出了各自的要求，测量装置和性能测量方法等内容多有重复，且表述不清晰。特定真空泵标准的制定以总体要求为基础，依据各自的特性来测定性能数据、极限值和特定运行条件。当特定真空泵的测量方法与总体要求存在差异时，以特定标准为准。GB/T 40344《真空技术 真空泵性能测量标准方法》旨在从真空泵性能共性和特性的角度提出标准测量方法，即总体要求和特定真空泵标准，拟由六个部分构成。

- 第1部分：总体要求。旨在提供一份用于测量真空泵性能参数的基础文件，简化了今后对特定真空泵标准的制定。包含了三种体积流率的测量方法，以及真空泵基础压力、压缩比和临界前级压力的测量方法。
- 第2部分：容积真空泵。旨在以总体要求为基础，对容积真空泵的性能测量标准方法加以补充，包含了容积真空泵的体积流率、基础压力、水蒸气容限、功耗和最低启动温度的测量方法。
- 第3部分：机械增压泵的特定参数。旨在描述机械增压泵的最大容许压差、有效压缩比、零流量压缩比和溢流阀压差的测量方法和特殊要求。
- 第4部分：涡轮分子泵。旨在描述了以流量法和小孔法测量体积流率的测量方法和测量装置，以及最大流量、临界前级压力、压缩比、基础压力、振动等参数的测量方法和测量装置。
- 第5部分：非蒸散型吸气剂泵。旨在以总体要求为基础，对非蒸散型吸气剂泵的性能测量标准方法加以补充。
- 第6部分：低温真空泵。旨在以总体要求为基础，对低温真空泵的性能测量标准方法加以补充。

真空技术 真空泵性能测量标准方法 第4部分：涡轮分子泵

1 范围

本文件连同 ISO 21360-1 描述了涡轮分子泵的性能测量方法。它适用于所有规格和型式的涡轮分子泵。包括：

- 带机械轴承或磁轴承的涡轮分子泵；
- 带或不带附加牵引级的或其它转子抽气级的涡轮分子泵；
- 带一个或多个进气口的涡轮分子泵。

由于涡轮分子泵有前级泵支持，体积流率-入口压力的曲线不能完全确定涡轮分子泵的性能。同时，涡轮分子泵的驱动装置和前级压力均影响其性能参数。

下列内容用以补充确定其性能参数：

- 涡轮分子泵的流量和前级压力；
- 压缩比曲线（涡轮分子泵的压缩比-前级压力）

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

ISO 21360-1:2012 真空技术 真空泵性能测量标准方法 第1部分：总体要求(Vacuum technology—Standard methods for measuring vacuum-pump performance—Part 1: General description)

注：GB/T 40344.1-2021 真空技术 真空泵性能测量标准方法 第1部分：总体要求（ISO 21360-1:2020，IDT）

3 术语和定义

ISO 21360-1 中界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

临界前级压力 critical backing pressure

p_c

当涡轮分子泵仍具有 $p_3/p_1 > 10$ 的压缩比，且清洁气流不流通时，涡轮分子泵和驱动装置能够连续运行而不发生损坏或过载的状态下，出气口处的最大前级压力 (p_3)。

注 1： p_1 是涡轮分子泵入口处的（高）真空压力。在此工作压力下，能够降低涡轮分子泵转速。 p_c 的值取决于转速和气体类型，因此这二者均要随 p_c 同时注明。

注 2：带有清洁气流的测量会导致不同的结果[在进气口抽除轻质气体时，使用重质清洁气体会影响临界前级压力 (p_c) 的性能。]。因此，清洁气流的流量要为零。

3.2

最大流量 maximum throughput

Q_{\max}

涡轮分子泵能连续抽气而不发生损伤或毁坏的最高气体负荷。

注 1：单位为帕升每秒 ($\text{Pa} \cdot \text{L/s}$)，毫巴升每秒 ($\text{mbar} \cdot \text{L/s}$) 或标准立方厘米每分钟 (sccm)。

注 2：这个极限参数取决于涡轮分子泵的设计。大多数情况下，这个参数以涡轮分子泵规定位置的最高温度来给出。 Q_{\max} 值取决于诸如被抽气体、所使用的前级泵、转速和冷却条件等此类因素。这个参数取决于气体温度， Q_{\max} 所用单

位为 Pa·L/s 或 mbar·L/s 时，则应注明测试罩温度， Q_{\max} 所用单位为 sccm 时除外。

3.3

体积流率 volume flow rate

q_v

$$q_v = \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

式中

V ——体积；

t ——是时间。

示例：在 ISO 21360 系列标准中，体积流率指的是在理想条件下，单位时间内从测试罩流过涡轮分子泵入口的气体体积。

注 1：由于实际测量的原因，涡轮分子泵对给定气体的体积流率通常认为等于该气体的流量与给定位置的平衡压力之商。体积流率的单位为立方米每秒或升每秒。

注 2：术语“抽速”和符号“ S ”常用来代替体积流率。

[来源：ISO 21360-1: 2012, 3.1]

3.4

极限压力 ultimate pressure

测试罩中逐渐趋近的压力值。

注 1：极限压力始终低于基础压力 (p_{b1})。

注 2：它是涡轮分子泵所获得的最低压力。

注 3：制造商说明书中建议不给出极限压力值。因此，本文件中也不给出极限压力的测量程序。但是如果制造商列出了极限压力，宜说明完成测量的工作条件和测量时间。

3.5

涡轮分子泵基础压力 base pressure turbomolecular pump

p_{b1}

烘烤 48h 后，在测试罩中获得的压力。

注 1：此时涡轮分子泵和测试系统内无任何测试气体（见 5.6）。

3.6

有效压缩比 effective compression ratio

K_{eff}

涡轮分子泵前级压力 (p_3) 与其入口压力 (p_1) 之比。

$$K_{\text{eff}} = \frac{p_3}{p_1} \quad (2)$$

3.7

压缩比 compression ratio

K_0

涡轮分子泵负载气体流量为零时的最大压缩比，其中 p_{b3} 是前级泵的基础压力， p_{b1} 是涡轮分子泵的基础压力。

$$K_0 = \frac{p_3 - p_{b3}}{p_1 - p_{b1}} \quad (3)$$

4 符号和缩略语

符号	名称	单位
----	----	----

K_{eff}	真空泵压缩比	—
K_0	真空泵零流量最大压缩比	—
p_{b1}	涡轮分子泵基础压力	Pa (或 mbar)
p_{b3}	前级泵基础压力	Pa (或 mbar)
p_1	入口处 (高) 真空压力	Pa (或 mbar)
p_3	前级管路真空压力	Pa (或 mbar)
p_c	临界前级压力	Pa (或 mbar)
Q	真空泵流量	Pa · L/s (或 mbar · L/s)
Q_{max}	最大流量	Pa · L/s (或 mbar · L/s)
q_v	体积流率	L/s
q_{v0}	$K_{\text{eff}}=1$ 时的体积流率	L/s
q_{vB}	前级泵的体积流率	L/s
q_{vX}	预估的最大体积流率	L/s
T	热力学温度	K

5 测试方法

5.1 测试气体

本章中所有的测量宜采用纯度为 99.9% (质量) 的测试气体。测试气体诸如：氮气、氢气、氦气和氩气。

5.2 体积流率测量 (抽速)

5.2.1 通则

ISO 21360-1:2012, 5.1 和 5.2 规定了涡轮分子泵的体积流率测量方法。如未做其它说明或未列出其它测试装置时, 应按照 ISO 21360-1 的规定测量。

5.2.2 前级泵规格

按照公式 (4), 涡轮分子泵的有效体积流率 (q_v) 取决于零压差 ($p_1=p_3$) 下的体积流率 (q_{v0}), 零流量 ($Q=0$) 时的压缩比 (K_0), 以及前级泵的体积流率 (q_{vB}):

$$q_v = q_{v0} \left(\frac{K_0 - q_v / q_{vB}}{K_0 - 1} \right) \quad (4)$$

可推导出公式 (5):

$$q_v = \frac{q_{v0}}{1 - 1 / K_0 + q_{v0} / (K_0 \cdot q_{vB})} \quad (5)$$

注: 公式 (4) 和公式 (5) 的推导见附录 A。

对于较小的 K_0 值 (例如氢, $K_0 \approx 1000$), 涡轮分子泵的体积流率受前级泵的规格影响。如果所用前级泵的体积流率 q_{vB} 由公式 (6) 推得, 这种影响可视为微乎其微。

$$\frac{q_{vX}}{q_{vB}} < 0.05K_0 \quad \text{或} \quad q_{vB} > 20 \left(\frac{q_{vX}}{K_0} \right) \quad (6)$$

在整个压力范围区间, 式中的 q_{vX} 是预估的涡轮分子泵最大体积流率。

由公式 (6), 按照涡轮分子泵说明书中已知某气体的 K_0 值可以选择适当的前级泵。

检测前级泵在 Q_{max} 工作点处是否仍具有经计算得到的抽速。

5.2.3 流量法测量体积流率 (抽速)

在时, 流量法是测量真空泵体积流率最常用方法之一, 并且适用于所有压力范围和所有规格的真空泵, 其间用来测量气体流量的流量计具有足够的精度。

ISO 21360-1:2012, 5.1 中规定了用于测量体积流率的流量法。

5.2.4 小孔法测量体积流率（抽速）

当没有合适的流量计用于测量小流量时，推荐使用此方法。

ISO 21360-1:2012, 5.2 中规定了用于测量体积流率的小孔法。

5.3 最大流量

5.3.1 测量方法

至少用两种规格的前级泵，泵在制造商规定的条件下运行时测量流量（ Q ），流量（ Q ）为前级压力（ p_3 ）的函数。应使用 ISO 21360-1:2012, 图 1 中规定的测试罩。宜采用合适的传感器来监控这些极限参数（见 3.2 的注 2）。当达到最大流量（ Q_{\max} ）时，至少在 4h 内，全部监控值应趋于稳定，且不应超过规定值。按制造商建议的前级泵流量，一台前级泵的流量适当小一些，另一台的流量与之相比较，是其流量的约 5 倍~10 倍。

该测试程序意在校验真空泵制造商所提供的数据，所以不是破坏性试验。然而，这个测试程序不应用于确定这些极限参数。

5.3.2 测试程序

把涡轮分子泵连接到测试罩上，使其产生恒定的气流并测量入口压力（ p_1 ）。前级管路装有真空计，用来测量前级压力（ p_3 ）。由高真空一侧逐步增加气体负荷，传感器读数稳定后进行记录。如果某个传感器读数超过规定值，关闭进气阀，同时应认定这次测试无效。对于最大流量（ Q_{\max} ），测试应至少进行 4h，而且全部读数都在规定值之内，涡轮分子泵的温度漂移在全过程中宜不超过 1K/h。

5.4 临界前级压力测量

3.1 中给出了临界前级压力定义，ISO 21360-1:2012, 5.5 规定了临界前级压力测量方法。

临界前级压力的定义不基于通过涡轮分子泵的有效气体流量，即进气阀（见 ISO 21360-1:2012 中图 8）保持关闭。因此临界前级压力仅当零流量时有效。

对于指定气体负载的其他情况，其前级压力将限制涡轮分子泵的运转。

5.5 压缩比测量方法

ISO 21360-1:2012, 5.5 中规定了压缩比测量方法和测量装置。

为减少其它气体在涡轮分子泵出口的含量，强烈建议使用另一台涡轮分子泵或扩散泵作为前级泵。这将使出口压力降低至 $p_3 < 10^{-2}\text{Pa}$ （ 10^{-4}mbar ），且不建议使用冷阱，以免对结果产生不可控制的影响。

对于给定气体，为了获得零流量压缩比（ K_0 ），其在涡轮分子泵出口管路处的分压力至少为 p_3 的 90%。

注：在涡轮分子泵出口处达到 90% 分压力的条件会难以实现，特别是使用干式前级泵时，因其对轻质气体的压缩比较小。

产品误差和测试时的泵温能对压缩比产生影响。在采用分压力测量时宜说明此点，采用推算法确定理论最大值时也宜说明此点。

5.6 基础压力的测量

ISO 21360-1:2012, 5.4 中规定了基础压力的测量方法，此压力不是极限压力。

5.7 振动测量

5.7.1 通用要求

应沿着电机轴线的径向，按 10Hz 到 5 倍于涡轮分子泵额定转速的频率范围，涡轮分子泵在无气载的正常条件下运行时，测量涡轮分子泵的振动。振动加速度和振动速度均应记录。

5.7.2 测试装置

涡轮分子泵应自由安放，按制造商的操作说明垂直或水平放置在铺有至少 4mm 厚橡皮垫的无振动固体基座上，以实现测试泵与基座的解耦。基座可是混凝土板块，其质量至少是涡轮分子泵质量的 5 倍，但不能少于 100kg。

警示——应对测试场地内的人员安全进行规定。

涡轮分子泵入口法兰应使用标准法兰封闭并密封。振动测量头应安装在涡轮分子泵上一个与电机轴成直角的平面上。此平面与涡轮分子泵质心的距离不应大于涡轮分子泵最大尺寸的十分之一。

在配置涡轮分子泵和测试装置过程中，涡轮分子泵连同其盲板法兰的质量增加不应超过 3%，在测试过程中不应有其它物体连到泵上。

应使用至少 750mm 长，并能弯折 90° 以上的柔性软管把涡轮分子泵连接到前级泵上。

5.7.3 测试程序

在测量前，涡轮分子泵在无气载的正常运行条件下，应运行至少 30min。开始测量时应关闭前级泵。

6 测试报告

测试报告中宜包括以下测量数据：

- 体积流率测量数据（抽速，3.3）；
- 压缩比测量数据（3.7）；
- 最大流量测量数据（3.2）；
- 临界前级压力测量数据（3.1）；
- 基础压力测量数据（3.5）；
- 振动测量数据（5.7）。

测试报告应包括测试泵的一般信息：

- 涡轮分子泵的类型和编码/系列号；
- 驱动装置的类型和编码/系列号；
- 法兰类型和规格，名义转速和涡轮分子泵的最大功耗；
- 环境温度。

6.1 体积流率测量数据

- 所用方法（流量法或小孔法）；
 - 如应用小孔法，提供小孔尺寸；
 - 如应用小孔法，提供标准流导值和计算所用的公式；
- 测试罩规格；
- 转速；
- 所用前级泵或前级压力；
- 所用冷却方法和数据；
- 所测气体类型；
- 如使用清洁气体，提供清洁气体量；
- 图表：抽速—入口压力。

6.2 压缩比测量数据

- 转速；
- 所用前级泵；
- 所用冷却方法和数据；
- 所测气体类型；
- 图表：压缩比—前级压力。

6.3 最大流量测量数据

- 转速；
- 所用前级泵（干式/油）或前级压力；
- 所用冷却方法和数据；
- 所测气体类型；
- 如使用清洁气体，提供清洁气体量；

- 最大流量值。

6.4 极限真空测量数据

- 转速
- 所用冷却方式和数据；
- 所测气体类型；
- 临界前级压力值。

6.5 基础压力测量数据

- 转速；
- 所用冷却方式和数据；
- 所用前级泵或前级压力；
- 基础压力值。

6.6 振动测量数据

- 转速；
- 测试仪器说明文件；
- 振动测量方向；
- 振动测量位置；
- 图表：振动数据—频率范围。

附 录 A
(资料性附录)

公式 (4) 和公式 (5) 的推导过程

假设在有效压缩比 (K_{eff}), 压缩比 (K_0) 和体积流率 (q_v) (抽速) 及其理论最大值 (q_{v0}) 之间有线性关系[见公式 (A.1)]。

$$q_v = q_{v0} \left(\frac{K_0 - K_{\text{eff}}}{K_0 - 1} \right) \quad (\text{A.1})$$

如果有效压缩比 (K_{eff}) 接近 1 时, 这里的体积流率 (q_v) 就变成其最大值 q_{v0} 。另一方面, 对于最大值 $K_{\text{eff}}=K_0$, 则按定义, 体积流率将为 0。有效压缩比 $K_{\text{eff}}=p_3/p_1$ 可写成前级泵的体积流率与涡轮分子泵的体积流率之比[见公式 (A.2)]。

$$K_{\text{eff}} = q_v / q_{vB} \quad (\text{A.2})$$

推导出公式[见公式 (A.3)]:

$$q_v = q_{v0} \left[\frac{K_0 - (q_v / q_{vB})}{K_0 - 1} \right] \quad (\text{A.3})$$

它可解成公式 (A.4)。

$$q_v = \frac{K_0 \cdot q_{v0}}{K_0 + (q_{v0} / q_{vB}) - 1} \quad (\text{A.4})$$

按 K_0 化简:

$$q_v = \frac{q_{v0}}{1 - 1 / K_0 + q_{v0} / (K_0 \cdot q_{vB})} \quad (\text{A.5})$$

参考文献

- [1] ISO 3529-2 Vacuum technology—Vocabulary—Part 2: Vacuum pumps and related terms