



中华人民共和国国家标准

GB/T 40401—2021/ISO 12154:2014

骨架密度的测量 气体体积置换法

Determination of density by volumetric displacement—
Skeleton density by gas pycnometry

(ISO 12154:2014, IDT)

2021-08-20 发布

2022-03-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言	I
引言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号	2
5 测量原理	2
6 测量仪器和测量程序	3
7 检测报告	6
附录 A (资料性)干扰	8
参考文献	10

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。

本文件使用翻译法等同采用 ISO 12154:2014《骨架密度的测量 气体体积置换法》。

与本文件中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

——GB/T 19587—2017 气体吸附 BET 法测定固态物质比表面积(ISO 9277:2010, IDT)；

——GB/T 21650.3—2011 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第 3 部分：气体吸附法分析微孔(ISO 15901-3:2007, IDT)。

本文件由全国颗粒表征与分检及筛网标准化技术委员会(SAC/TC 168)提出并归口。

本文件起草单位：上海市计量测试技术研究院、中国计量科学研究院、深圳国技仪器有限公司、贝士德仪器科技(北京)有限公司、理化联科(北京)仪器科技有限公司、安东帕(上海)商贸有限公司、中机生产力促进中心。

本文件主要起草人：吴立敏、陈鹰、王海、周莹、柳建峰、杨正红、侯长革、周琰、王梅玲、朱平。

引 言

固态材料的真密度定义为质量与该质量所占据体积的比值。因此,在计算真密度时,应减去由颗粒孔隙或颗粒内部空隙以及颗粒间间隙(如颗粒状或高度分散的样品)所占据的相应体积。

如果材料没有孔隙,只要测试液体不与该材料发生反应,即可通过测量固体排开液体体积的方法来得到真密度。该方法的准确性取决于液体体积测量的准确性。然而,通常测试液体不会轻易完全渗透进材料的孔隙、裂缝、裂隙。在这些情况下,如果材料不含分析气体无法穿透的闭孔,则可用气体替代液体测量材料的真密度。因此,用气体密度仪法测得的密度通常称为材料骨架密度,等同于不含闭孔的固态材料真密度。

用于测量固体体积的装置通常被称为气体密度仪,源自希腊语“pyknos”,意思是厚或密,气体密度仪还可分析形状不规则的材料。

确定样品的固体骨架体积和质量后就可容易地计算出骨架密度。

骨架密度的测量 气体体积置换法

1 范围

本文件规定了一种通过气体密度仪法快速有效地测定规则或不规则形状的固体材料样品的骨架密度的方法,包括粉末或整体单件样品。

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 9277 气体吸附 BET 法测定固态物质比表面积(Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption—BET method)

ISO 14488 颗粒 用于颗粒特性测定的取样和样品分离方法(Particulate materials—Sampling and sample splitting for the determination of particulate properties)

ISO 15901-3 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第3部分:气体吸附法分析微孔(Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption—Part 3: Analysis of micropores by gas adsorption)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

密度 density

样品质量与该质量所占体积的比值。

3.2

固体真密度 true solid state density

样品质量与样品致密固体骨架体积的比值,不包括开孔和闭孔、颗粒内部空隙、以及粗颗粒或高度分散颗粒间隙的体积。

3.3

骨架密度 skeleton density

样品质量和样品体积的比值,其中体积包括可能存在的闭孔体积,但不包括开孔体积以及块状样品中颗粒间隙的体积。

3.4

闭孔 closed pore

完全被孔壁封闭、不与其他气孔互通、任何流体均无法进入的孔。

3.5

开孔 open pore

没有被壁完全包裹、直接连接到表面或间接通到其他孔并连接到表面、流体可进入的孔。

3.6

表压传感器 gauge pressure sensor

测量相对压力的传感器。表压传感器测量值是相对于大气压力的值，即参比环境是大气压力。

3.7

绝压传感器 absolute pressure sensor

测量绝对压力的传感器。绝压传感器的信号或示值是相对于绝对真空压力的值，即参比环境是完全真空的零压力。

4 符号

表 1 中的符号适用于本文件。

表 1 符号

符号	名称	单位
ρ_s	骨架密度	g/cm^{-3}
m_{sample}	样品质量	g
V_{solid}	样品骨架体积	cm^3
V_{cell}	样品室体积	cm^3
V_{ref}	参比室体积	cm^3
V_{cal}	用于校准的参比样品体积	cm^3
p_1	膨胀前平衡表压 ^a	Pa
p_2	膨胀后平衡表压 ^a	Pa
$p_{\text{I.1}}$	膨胀前平衡表压(第一次校准) ^a	Pa
$p_{\text{I.2}}$	膨胀后平衡表压(第一次校准) ^a	Pa
$p_{\text{II.1}}$	膨胀前平衡表压(第二次校准) ^a	Pa
$p_{\text{II.2}}$	膨胀后平衡表压(第二次校准) ^a	Pa
p_0	分析开始时气体密度仪气压	Pa
p_i^*	气体密度仪绝对气压 $i(i=1,2, \text{I.1}, \text{I.2}, \text{II.1}$ 或 $\text{II.2})$	Pa
p_i	气体密度仪相对气压 $i(i=1,2, \text{I.1}, \text{I.2}, \text{II.1}$ 或 $\text{II.2})$	Pa

^a 表压(过量气体压力) p_i 定义为气体密度仪绝对压力 p_i^* 和分析开始时气体密度仪压力 p_0 的差值, 如 $p_i = p_i^* - p_0$ (见 3.6, 3.7 和 6.3, 2.1)。

5 测量原理

骨架密度是通过在气体密度仪中测定体积的方式获得。该技术是基于固体样品空间被气体体积的取代, 通过测量在等温条件下气体从一个气室膨胀到另一个气室来实现。首先, 样品干燥后称重并放入样品室, 在使用如图 1 a) 中所示结构 1 时, 将样品室加压到设定值; 然后分析气体膨胀到第二个气室, 即

参比室；仪器记录两个步骤的平衡压力。利用这些值可计算得到骨架密度。

对于根据如图 1 b) 中所示结构 2 的气体密度仪，首先把参比室加压到设定值，然后气体膨胀至样品室，该样品室中的初始压力低于设定值。不管哪种结构的气体密度仪，在开始分析前保证仪器中各个气室压力 p_0 (见第 6 章) 一致都是非常重要的控制条件。此外，应控制气体密度仪各个部分处于相同温度。

应使用足够纯净、惰性且不会吸附在固体样品上的理想气体(见 6.1)。因此在大多数应用中均选择使用氦气。优先选用氦气作为气体密度仪的分析气体的另一个原因是它可穿透极小的孔隙或裂缝。

注 1：对于具有较薄内壁、闭孔结构且易渗透的试样，由于氦气的显著穿透能力，其测量结果可能会有偏差。因此，如附录 A 中 A.6 所述，对于如纤维素和低密度多孔聚合物等有机样品，使用氦气的气体密度仪测量可能会出现差错。在上述样品的密度测试中，建议使用氮气、氩气、六氟化硫等气体，也可使用干燥的空气。

注 2：如果样品中不存在闭孔，那么通过气体比重法所测得的体积即为样品的真实体积。为了测试样品中是否含有闭孔，在进行初步的密度测试后，可将样品粉碎为粉末，可显露出任何可能的测试气体无法进入的闭孔。如果粉末样品密度测量值有增加，则说明原始样品中可能存在闭孔。

6 测量仪器和测量程序

6.1 仪器

6.1.1 气体密度仪：具有固定体积的样品室(见图 1)^{[1][2][3]}。

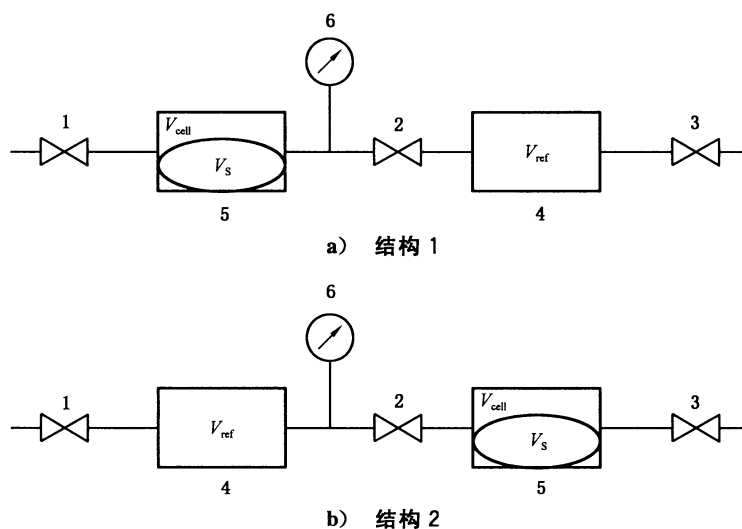
6.1.2 校准过的参考样品：通常为不锈钢材质的校准球，其体积已知且有溯源性。

6.1.3 分析气体：通常是氦气(见第 5 章)，纯度高于 99.996% (体积浓度)。

6.1.4 分析天平：分度值不低于 0.1 mg。

6.1.5 干燥箱：用于样品前处理，最好能在加热过程中气体吹扫或能在真空条件下加热。

图 1 是两种主要的具有固定样品室体积的自动气体密度仪结构示意图。仪器的主要部件是用气路连通的两个气室(用于放置样品或校准球的密封样品室和参比室)、一个压力传感器和三个阀门。两种结构的区别在于样品室和参比室的排布顺序。



标引序号说明：

1——阀门 1，气体进口；

2——阀门 2；

3——阀门 3，气体出口；

4——参比室；

5——样品室；

6——压力传感器。

注：压力传感器是绝压传感器或相对于大气压的表压传感器。

图 1 两种常见气体密度仪结构示意图

商用气体密度仪适用的样品体积范围可从 0.1 cm^3 到大约 500 cm^3 ，可通过选择不同体积的样品室，或通过放置不同体积的样品填充物来实现不同体积样品的测量。样品室体积的选择非常重要，因为气体置换法骨架密度测量的准确度与样品材料在样品室中占据的总体积的百分比密切相关。

6.2 样品的预处理和样品质量的测定

制备样品是气体密度仪测量得到准确结果的第一步。样品应事先干燥以获得其真实质量，同时可避免体积测量时水蒸气的干扰。推荐使用以下方法进行样品预处理，对于某些特殊材料可进行方法调整。

应按照 ISO 14488 中的规定进行取样。可通过定时抽真空、定时气流吹扫或重复吹扫（考虑多次冲洗）去除样品中的气体。湿样品应在外部的干燥箱中进行干燥。

热敏材料可置于硅胶中长时间干燥或进行冷冻干燥等。低熔点材料可使用气体吹扫进行干燥，在这种情况下，待吹扫和测量完成后再称量样品质量和样品杯质量。

注：当骨架密度测量结果的重复性在所使用气体密度仪的重复性限范围内时，可认为样品已脱气完全。

在样品预处理过程中应避免将干燥试样暴露于潮湿空气中，尽可能快地称量样品并将样品放入仪器，避免任何不必要的拖延。

除放入或拿出样品，应始终将盖子盖在样品室上，样品室应无尘且干燥，以获得精确分析结果。

使用分析天平精确称量样品质量 m_{sample} ，测量误差应小于样品质量的 0.1%。

- a) 称量空样品杯（样品容器）。
- b) 在样品杯中装入一定量的样品。使用尽可能多的样品以至少填满样品杯体积的三分之二（见附录 A 的 A.1）。
- c) 将装有样品的样品杯放入干燥箱中干燥。样品的加热时间和温度取决于材料及其耐受温度，可通过其他实验来确定这些条件。从干燥箱中取出样品杯放入装有活性干燥剂的干燥器中冷却至室温。在以后的步骤中尽可能减少样品与空气的接触。
- d) 称量并记录样品杯和样品的总质量。样品和样品杯的总质量减去空样品杯的质量得到样品的质量。
- e) 将装有样品的样品杯放入样品室，盖上样品室盖并小心地密封样品室。

应根据 ISO 9277 和 ISO 15901-3 中给出的建议制备微孔材料。

碳、沸石、金属有机骨架化合物等微孔材料很容易吸附空气中的杂质，且与空气中的水分有很高的亲合力，这些污染物会对样品的质量产生显著影响。这些不良影响会导致样品的质量难以准确测定，并且需要较长的分析程序来清除这些杂质以获得稳定的体积测量值。

对于这些材料，推荐的方法是将试样直接从真空干燥箱中转移到预先称重过的样品杯，并立即开始测试，即便温度还未降到室温。尽可能延长测试时间使样品冷却，并建立热平衡。在测试结束后立即称量样品和样品杯的质量。若条件允许，可在氮气氛围或者干燥空气中称重。用这个质量值计算得到样品的密度。

6.3 样品固体骨架体积的测定

6.3.1 比重测量

比重分析应按操作手册执行。最典型的现代自动气体密度仪允许对单一样品进行多次自动测量。通常需要重复测量以确保气体完全去除以及样品与分析气体达到适当的热平衡。应至少重复测量样品骨架体积 5 次。采用标准统计方法计算平均骨架体积和标准偏差。

初始状态时，所有阀门均是关闭的，且系统内两个气室处于相同压力 p_0 。当打开阀门 1，样品室（结

构 1) 或参比室(结构 2) 充满分析气体, 此时气压升高, $p_1 > p_0$ 。关闭阀门 1, 对样品室(结构 1) 或参比室(结构 2) 的压力 p_1 进行准确测量。打开阀门 2, 让分析气体膨胀到第二个气室, 此时两个气室间形成新的平衡压力 p_2 , 准确测量 p_2 。打开阀门 3, 将分析气体排到大气或真空中。重复上述步骤进行测量, 直到连续的体积测量的重复性在使用者规定的范围内。

根据 6.3.2.2 和 6.3.2.3 的描述, 样品骨架体积将分别使用样品室和参比室的已知校准体积 V_{cell} 和 V_{ref} 、以及气体膨胀前的压力读数 p_1 和膨胀后的压力读数 p_2 来计算。最后, 用样品质量除以测得的样品固体骨架体积计算得到样品骨架密度(见 6.4)。

6.3.2 样品骨架体积的计算

6.3.2.1 概述

计算样品体积的方程中的压力 p_i 等于在测量开始时高于气体密度仪中初始气体压力 p_0 的压力差值。这意味着此处使用的每个压力值均代表了绝对压力和初始压力之间的差值。应注意: 在每次分析或校准开始前不能将气体密度仪的压力传感器调零。如果调零, 压力读数就等于气体压力的差值。

6.3.2.2 结构 1 气体密度仪 V_{solid} 的计算

当使用图 1 所示气体密度仪结构 1 时, 样品的固体骨架体积 V_{solid} 通过式(1)计算。

$$V_{\text{solid}} = V_{\text{cell}} - \frac{p_2}{p_1 - p_2} V_{\text{ref}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

6.3.2.3 结构 2 气体密度仪 V_{solid} 的计算

当使用图 1 所示气体密度仪结构 2 时, 样品的固体骨架体积 V_{solid} 通过式(2)计算。

$$V_{\text{solid}} = V_{\text{cell}} - \frac{p_1 - p_2}{p_2} V_{\text{ref}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

6.4 骨架密度的计算

骨架密度按式(3)计算。

$$\rho_s = \frac{m_{\text{sample}}}{V_{\text{solid}}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

6.5 校准程序

6.5.1 概述

校准程序用于测定气体密度仪样品室体积 V_{cell} 和参比室体积 V_{ref} 的精确值。在改变测量温度以及对样品室、管线、配件、样品杯/容器等进行任何更改后, 应进行气体密度仪的校准。校准应按操作手册进行。由于要校准两个体积, 校准过程包括两个独立的膨胀实验(校准步骤 I 和 II)。校准步骤 I 是空样品室的膨胀实验, 测量得到压力值 $p_{\text{I},1}$ 和 $p_{\text{I},2}$, 得到样品室体积 V_{cell} 和参比室体积 V_{ref} 之间的关系。校准步骤 II 是在样品室中放入已知体积为 V_{cal} 参考样品后的膨胀实验, 测量得到压力值 $p_{\text{II},1}$ 和 $p_{\text{II},2}$ 。

注: 参考样品通常由不锈钢、钛、氮化硅等高性能材料制成, 通常为具有足够体积、有校准证书的校准球(其标准值由认可机构赋予, 作为一级标准物质或可溯源的二级标准物质)。这种校准球在商用气体密度仪中通常以标准配置的校准套件形式提供。

结合这两个校准过程的结果可得到样品室体积和参比室体积。注意: 这里使用的所有压力均高于气体密度仪校准开始时的初始压力 p_0 (见 6.3.2.1)。

6.5.2 结构 1 气体密度仪的校准

执行校准步骤 I (空气密度仪的气体膨胀实验, 得到实验读数 $p_{I.1}$ 和 $p_{I.2}$)。

建立样品室体积和参比室体积的关系, 可由式(4)描述:

$$V_{\text{cell}} = \frac{p_{I.2}}{p_{I.1} - p_{I.2}} \cdot V_{\text{ref}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

执行校准步骤 II (样品室内放入校准体积为 V_{cal} 的参考样品后的气体膨胀实验, 得到实验读数 $p_{II.1}$ 和 $p_{II.2}$)。

建立样品室体积、参比室体积和参比样品体积的关系, 可由式(5)描述:

$$V_{\text{cell}} = V_{\text{cal}} + \frac{p_{II.2}}{p_{II.1} - p_{II.2}} \cdot V_{\text{ref}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

合并式(4)和式(5)得到式(6)和式(7), 使用参考样品的已校准体积值和校准步骤 I 和 II 得到的压力值, 计算样品室体积和参比室体积。

按式(6)计算样品室体积。

$$V_{\text{cell}} = \frac{p_{I.2} \cdot (p_{II.1} - p_{II.2})}{p_{I.2} \cdot p_{II.1} - p_{I.1} \cdot p_{II.2}} \cdot V_{\text{cal}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

按式(7)计算参比室体积。

$$V_{\text{ref}} = \frac{(p_{I.1} - p_{I.2}) \cdot (p_{II.1} - p_{II.2})}{p_{I.2} \cdot p_{II.1} - p_{I.1} \cdot p_{II.2}} \cdot V_{\text{cal}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

6.5.3 结构 2 气体密度仪的校准

执行校准步骤 I (空气密度仪的气体膨胀实验, 得到实验读数 $p_{I.1}$ 和 $p_{I.2}$)。

建立样品室体积和参比室体积的关系, 可由式(8)描述:

$$V_{\text{cell}} = \frac{p_{I.1} - p_{I.2}}{p_{I.2}} \cdot V_{\text{ref}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

执行校准步骤 II (样品室内放入校准体积为 V_{cal} 的参考样品后的气体膨胀实验, 得到实验读数 $p_{II.1}$ 和 $p_{II.2}$)。

建立样品室体积、参比室体积和参比样品体积的关系, 可由式(9)描述:

$$V_{\text{cell}} = V_{\text{cal}} + \frac{p_{II.1} - p_{II.2}}{p_{II.2}} \cdot V_{\text{ref}} \quad \dots\dots\dots(9)$$

合并式(8)和式(9)得到式(10)和式(11), 使用参考样品的已知校准体积值和校准步骤 I 和 II 得到的压力值, 计算样品室体积和参比室体积。

按式(10)计算样品室。

$$V_{\text{cell}} = \frac{p_{II.2} \cdot (p_{I.1} - p_{I.2})}{p_{I.1} \cdot p_{II.2} - p_{I.2} \cdot p_{II.1}} \cdot V_{\text{cal}} \quad \dots\dots\dots(10)$$

按式(11)计算参比室体积。

$$V_{\text{ref}} = \frac{p_{I.2} \cdot p_{II.2}}{p_{I.1} \cdot p_{II.2} - p_{I.2} \cdot p_{II.1}} \cdot V_{\text{cal}} \quad \dots\dots\dots(11)$$

7 检测报告

检测报告应包括以下内容:

- 检测日期；
- 引用本文件及可接受的误差范围；
- 样品明细和样品制备方法；
- 气体密度仪类别及其制造商、气室体积、样品质量、样品体积、温度；
- 样品骨架密度,包括不确定度(根据“测量不确定表达指南(GUM)^[4]”得到的重复测量组合标准偏差)。

附录 A

(资料性)

干 扰

A.1 不合适的样品量

关于样品量,操作者最常犯的错误是使用的样品量太少。自动气体密度仪的样品室和膨胀室体积是标定过的,使得当样品几乎填满样品室时会获得最大的测量准确度。简单地说,宜始终使用样品杯能容纳的最大样品量。如果只能获得有限量的样品,最好在样品中加入校准过的钢球,然后从获得的测量体积中手动减去钢球体积以得到样品体积。

大多数商用气体密度仪均有几个不同尺寸的样品容器(样品杯),能根据样品量的多少进行不同的选择。

A.2 热效应和压力稳定性

气体密度仪测量压力时,周围温度应恒定且处处相等。样品、分析气体和气体密度仪分析部件之间热平衡的建立是仪器稳定性的重要指标。如果样品室或参比室温度和所含气体温度发生变化,测量稳定性就会降低,直到仪器再次建立热平衡。在样品和样品室温度不平衡的情况下,由于气体膨胀以及与之相关的压力变化,仪器的输出结果会产生漂移。

如果气体密度仪采用表压传感器而不是绝压传感器,则在测量期间应保持大气压力 p_0 恒定。因此,相比压力测量准确度,重要的是要确保在测试期间, p_0 足够稳定^[1]。

A.3 湿度和吸附气体的影响

只有当样品自身的蒸汽挥发压力几乎为零时,其体积测量才能不受干扰。含有挥发性成分的样品在气体密度仪的样品室中会排出气体,导致在几个连续分析中压力测量值发生变化,体积或密度的测试结果也相应发生变化。样品材料孔隙内存的空气也会影响体积测定。与样品体积相比,样品中可能存在的液态水体积通常是微不足道的,但水蒸气压力可能显著改变结果。由于仪器实际测量的是压力,任何影响系统压力的因素均会影响体积和密度测量值。由于水或吸附的气体在测试过程中会被驱除,未完全干燥或未完全脱气的样品的影响表现为样品体积的增加和密度的降低。如果在分析结束时样品的质量减少,则应使用新的干燥或脱气样品质量来计算密度。

如果待分析材料具有与湿气含量相关的膨胀或收缩效应,则无法通过气体密度仪来测量密度。

A.4 漏气

如果在样品盖密封圈表面有样品残留,则可能发生漏气。当仪器设置为固定数量的填充和膨胀测试时,这个微量的漏气现象可能会被忽视。但是,如果仪器设置为需达到一定要求的分析精度时,仪器并会在一定次数的测试后显示出错信息,测量被终止,其可能的误差来源就是样品盖密封圈有污染。每次测量前检查密封圈非常重要,并在需要进行清理。

A.5 可渗透的样品

渗透影响最常见于含有闭孔的样品。当使用氦气分析有机样品或一些微孔碳样品时,也会观察到类似的影响。氦气能渗透薄壁,甚至能进入某些材料的内部结构,这导致不正确的密度测量。这种情况下可使用其他气体进行测试,如氮气或干燥的空气,这些气体通常表现出较低的渗透能力。

A.6 可压缩的样品

非刚性、闭孔泡沫等某些样品在正常施加的实验压力下就会坍塌,导致测量得到的体积减少(和密度增加)。降低置换气体的压力通常会得到满意的分析结果。

A.7 热敏感材料

一些材料,特别是一些易爆物和药物等,不能在室温以上温度加热以排除从空气中吸附的污染物,唯一的方法是采用氦气反复吹扫来实现试样清洗,同时进行多次测量以确定实际需要气体吹扫清洗的次数。一旦达到充分的清洗,便能获得稳定的测量结果。

A.8 高比表面积样品

对于纳米粉体等大表面积样品,粉体表面和气-固吸附界面上气体分子中心之间的环空体积可能非常大,导致测量骨架体积变大且计算出来的骨架密度与实际相比偏小。可利用气体分子有效直径(即范德华直径)和粉体比表面积等信息来进行环空体积影响的修正^[5]。

A.9 细磨的样品

需要认识到,气体密度仪测量非常细的粉体得到的密度与相同材料的大块样品的测得密度往往会不同。造成这样结果的原因在于:在制备许多精细粉体材料的过程中,位于表面附近的原子或分子经常被迫离开它们在固体结构内的位置平衡。对于大块样品,靠近表面的原子百分比可忽略不计。然而,随着颗粒粒径减小,该百分比增加,从而对密度产生影响。

参 考 文 献

- [1] Tamari S. Optimum design of the constant-volume gas pycnometer for determining the volume of solid particles. *Meas. Sci. Technol.* 2004, 15 pp. 549-558.
- [2] Webb P.A., & Orr C. *Analytical Methods in Fine Particle Technology*. Micromeritics Instrument Corp, Norcross, GA, 1997.
- [3] Lowell S., Shields J.E., Thomas M.A., Thommes M. *Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore Size and Density*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2004.
- [4] ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement—Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).
- [5] Ayral A., Halippou J., Woignier T. Skeletal density of silica aerogels determined by helium pycnometry. *J. Mater. Sci.* 1992, 27 pp. 1166-1170.
-

中华人民共和国
国家标准
骨架密度的测量 气体体积置换法
GB/T 40401—2021/ISO 12154:2014

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238
读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

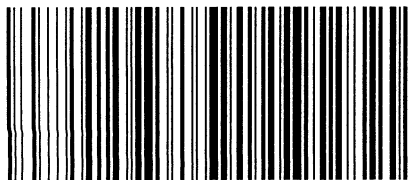
*

开本 880×1230 1/16 印张 1 字数 27 千字
2021年8月第一版 2021年8月第一次印刷

*

书号: 155066·1-67935 定价 18.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



GB/T 40401-2021



码上扫一扫 正版服务到

