



中华人民共和国国家标准

GB/T 20042.7—2024

代替 GB/T 20042.7—2014



质子交换膜燃料电池 第7部分：炭纸特性测试方法

Proton exchange membrane fuel cells—
Part 7: Test method of carbon paper properties

2024-12-31 发布

2025-07-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号	3
5 样品及测试准备	5
6 测试仪器和器具	6
7 厚度均匀性测试	6
8 电阻测试	7
9 机械强度测试	9
10 透气率测试	11
11 孔隙率测试	12
12 体密度测试	12
13 面密度测试	13
14 粗糙度测试	13
15 垂直方向导热系数测试	14
16 弯曲挺度测试	15
17 静态接触角测试	15
18 耐久性测试(酸氧化法)	15
19 测试报告	16
附录 A (资料性) 测试准备	17
附录 B (资料性) 测试报告	18
附录 C (资料性) 两个铜电极本体电阻、炭纸与电极间接触面电阻总和测试	20
附录 D (资料性) 平面方向透气率测试	21
附录 E (资料性) 孔隙率测试	23
附录 F (资料性) 表面粗糙度测试方法	24
附录 G (资料性) 弯曲挺度测试	26
附录 H (资料性) 静态接触角测试	27
附录 I (资料性) 耐久性测试(酸氧化法)	28
参考文献	29

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 20042《质子交换膜燃料电池》的第 7 部分。GB/T 20042 已经发布了以下部分：

- 第 1 部分：术语；
- 第 2 部分：电池堆通用技术条件；
- 第 3 部分：质子交换膜测试方法；
- 第 4 部分：电催化剂测试方法；
- 第 5 部分：膜电极测试方法；
- 第 6 部分：双极板特性测试方法；
- 第 7 部分：炭纸特性测试方法。

本文件代替 GB/T 20042.7—2014《质子交换膜燃料电池 第 7 部分：炭纸特性测试方法》，与 GB/T 20042.7—2014 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- 增加了“面电阻”“平面方向透气率”“弯曲挺度”“静态接触角”“耐久性”等术语及定义（见 3.1、3.5、3.11~3.13）；
- 增加了“面电阻”“平面方向透气率”“弯曲挺度”“静态接触角”“耐久性”等符号及定义（见第 4 章）；
- 增加了部分测试仪器和器具（见第 6 章）；
- 增加了“面电阻测试”（见 8.3）；
- 删除了“抗弯强度测试”（见 2014 年版的 8.2）。

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。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件由全国燃料电池及液流电池标准化技术委员会(SAC/TC 342)归口。

本文件起草单位：上海碳际实业集团有限公司、中国科学院大连化学物理研究所、中国华电科工集团有限公司、同济大学、武汉理工大学、华北电力大学、南京大学、机械工业北京电工技术经济研究所、中国质量认证中心有限公司、中汽研新能源汽车检验中心(天津)有限公司、济南思克测试技术有限公司、北京上电科赛睿科技有限公司、新研氢能源科技有限公司、国家电投集团氢能科技发展有限公司、新源动力股份有限公司、上海攀业氢能源科技股份有限公司、山东国创燃料电池技术创新中心有限公司、上海韵量新能源科技有限公司、上海捷氢科技股份有限公司、无锡市检验检测认证研究院、北京氢璞创能科技有限公司、航天氢能科技有限公司、北京科技大学、佛山仙湖实验室、福建亚南电机有限公司、上海智能新能源汽车科创功能平台有限公司、中国第一汽车股份有限公司、亿创氢能源科技(张家港)有限公司、未势能源科技有限公司、海卓动力(青岛)能源科技有限公司。

本文件主要起草人：姜永焱、侯明、明平文、尧克光、江靖、刘建国、张亮、姚颖方、李赏、王昕、卢琛钰、焦道宽、杨兴亚、张目清、齐志刚、周明正、戴海峰、董辉、李光伟、陈东方、赵小军、邱志岗、王刚、陈耀、朱孟倩、朱俊娥、靳殷实、唐浩林、郑丽萍、盛夏、刁力鹏、唐富民、梁栋、龚正伟、谢佳平。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

- 2014 年首次发布为 GB/T 20042.7—2014；
- 本次为第一次修订。

引 言

鉴于质子交换膜燃料电池技术发展,为服务质子交换膜燃料电池发电系统上下游制造商及其用户,GB/T 20042 提供了统一的术语及定义,并针对质子交换膜燃料电池堆及其关键零部件提供了统一的测试方法。

GB/T 20042《质子交换膜燃料电池》拟由以下七部分构成。

- 第 1 部分:术语。目的是界定质子交换膜燃料电池技术及其应用领域内使用的术语和定义。
- 第 2 部分:电池堆通用技术条件。目的是给出质子交换膜燃料电池堆的通用技术要求、试验方法、检验规则等内容。
- 第 3 部分:质子交换膜测试方法。目的是给出质子交换膜燃料电池中质子交换膜厚度均匀性、质子传导率等测试方法。
- 第 4 部分:电催化剂测试方法。目的是给出质子交换膜燃料电池电催化剂铂含量、电化学活性面积等测试方法。
- 第 5 部分:膜电极测试方法。目的是给出质子交换膜燃料电池膜电极厚度均匀性、Pt 担载量等测试方法。
- 第 6 部分:双极板特性测试方法。目的是给出质子交换膜燃料电池双极板气体致密性、抗弯强度、密度等测试方法。
- 第 7 部分:炭纸特性测试方法。目的是给出质子交换膜燃料电池炭纸厚度均匀性、电阻、机械强度等测试方法。



质子交换膜燃料电池

第7部分：炭纸特性测试方法

1 范围

本文件界定了质子交换膜燃料电池炭纸的术语和定义、描述了质子交换膜燃料电池炭纸特性测试方法,包括厚度均匀性测试、电阻测试、机械强度测试、透气率测试、孔隙率测试、体密度测试、面密度测试、粗糙度测试、垂直方向导热系数测试、弯曲挺度测试、静态接触角测试、耐久性测试和测试报告。

本文件适用于质子交换膜燃料电池炭纸的检测。

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。

GB/T 1040.3—2006 塑料 拉伸性能的测定 第3部分:薄膜和薄片的试验条件

GB/T 20042.1—2017 质子交换膜燃料电池 第1部分:术语

GB/T 28816—2020 燃料电池 术语

3 术语和定义

GB/T 20042.1—2017、GB/T 28816—2020 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

面电阻 **area specific resistance**

在规定的压力条件下,炭纸的欧姆电阻乘以其有效面积。

注:面电阻的单位为毫欧平方厘米($\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$)。

3.2

垂直方向电阻率 **through-plane resistivity**

与炭纸表面垂直方向的电阻率。

注:垂直方向电阻率的单位为毫欧厘米($\text{m}\Omega \cdot \text{cm}$)。

3.3

平面方向电阻率 **in-plane resistivity**

与炭纸表面平行方向的电阻率。

注:平面方向电阻率的单位为毫欧厘米($\text{m}\Omega \cdot \text{cm}$)。

3.4

垂直方向透气率 **through-plane gas permeability**

与炭纸表面垂直方向的透气率。

注:垂直方向透气率单位为毫升毫米每平方厘米小时帕[$\text{mL} \cdot \text{mm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})$]。

3.5

平面方向透气率 in-plane gas permeability

与炭纸表面平行方向的透气率。

注：平面方向透气率单位为毫升毫米每平方厘米小时帕 $[\text{mL} \cdot \text{mm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})]$ 。

3.6

孔隙率 porosity

炭纸孔隙体积占其总体积的百分比。

3.7

体密度 bulk density

炭纸质量与表观体积的比值。

注 1：炭纸的表观体积为其平均厚度与表观面积的乘积。

注 2：体密度的单位为克每立方厘米 (g/cm^3) 。

3.8

面密度 area density

炭纸质量与表观面积的比值。

注 1：炭纸的表观面积为其表观长度与宽度的乘积；

注 2：面密度的单位为克每平方米 (g/m^2) 。

3.9

粗糙度 roughness

炭纸表面微小峰谷的微观不平度。

注 1：通常用一个取样长度 L 内，轮廓上各点到轮廓中线 X 绝对值的算术平均值(轮廓的算术平均偏差 R_a)或用最大轮廓峰高与最大轮廓谷深之和(轮廓的最大高度 R_z)来表示，单位为微米 (μm) 。

注 2：轮廓的中线(见图 1 中 X)包括轮廓的算术平均中线和轮廓的最小二乘中线两种。轮廓的算术平均中线是在取样长度范围内，将实际轮廓划分上下两部分，且使上下面积相等的直线。轮廓的最小二乘中线是在取样长度内，使轮廓上各点至一条该线的距离平方和为最小。

注 3：表面粗糙度相关术语及定义见 GB/T 3505—2009。

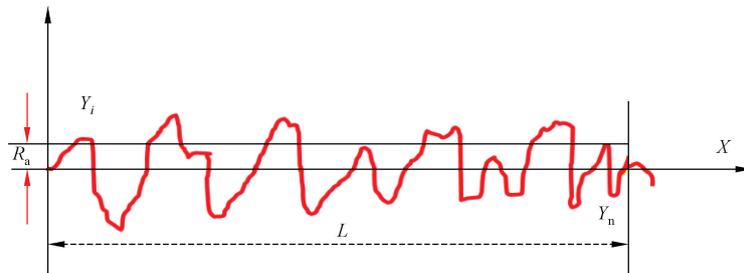


图 1 轮廓的中线及 R_a 示意图

3.10

导热系数 thermal conductivity

单位温度差、单位面积、单位时间内通过单位厚度炭纸的热量。

注：导热系数的单位为瓦每米开尔文 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 。

3.11

弯曲挺度 bending stiffness

炭纸在弹性形变范围内受力弯曲时所产生的单位阻力矩。

注：弯曲挺度的单位为毫牛米 $(\text{mN} \cdot \text{m})$ 。

3.12

静态接触角 static contact angle

液体在炭纸表面形成液滴并达到平衡时,在气液固三相交界点处做气液界面的切线,该切线与固液交界线之间的夹角。

注:静态接触角的单位为度($^{\circ}$)。

3.13

耐久性 durability

在规定的测试条件下,炭纸经过一定时间的耐久性测试后,相关指标的变化率。

注:耐久性相关指标的变化率用百分比($\%$)表示。

4 符号

下列符号适用于本文件。

注:本文件中使用的符号及含义与单位见表1,包括恰当的计量单位。

表1 符号、定义与单位

符号	定义	单位
	常用参数	
n	测量数据点数	
m	样品的质量	g
L_{cp}	样品的长度	cm
W_{cp}	样品的宽度	cm
	厚度均匀性	
\bar{d}	25 kPa 下,样品的平均厚度	μm
d_i	25 kPa 下,某一点样品的厚度测量值	μm
σ	25 kPa 下,样品的厚度标准偏差	μm
δ	离散系数,反映单位均值上的离散程度	
	电阻	
ρ_{in}	样品平面方向的电阻率	$\text{m}\Omega \cdot \text{cm}$
ρ_i	不同部位电阻率测量值	$\text{m}\Omega \cdot \text{cm}$
G	样品厚度校正系数	
D	样品形状校正系数	
ρ_t	样品垂直方向的电阻率	$\text{m}\Omega \cdot \text{cm}$
R_m	仪器的测量值,即样品垂直方向电阻、铜电极本体电阻和样品与两个电极间的接触电阻的总和	$\text{m}\Omega$
d	试验压强下样品的厚度	μm
r_c	面电阻	$\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$
R_c	两个铜电极本体电阻、样品与两个电极间的接触面电阻总和	$\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$
S	样品与两个电极之间的接触面积	cm^2

表 1 符号、定义与单位 (续)

符号	定义	单位
R_{m1}	厚度为 \bar{d}_1 时,仪器的电阻测量值,即样品垂直方向电阻和样品与两个电极间的接触电阻及两个镀金电极电阻的总和	mΩ
\bar{d}_1	样品 1 在测试压强下的平均厚度	μm
R_{m2}	厚度为 \bar{d}_2 时,仪器的电阻测量值,即样品垂直方向电阻和样品与两个电极间的接触电阻及两个镀金电极电阻的总和	mΩ
\bar{d}_2	两个样品 1 在测试压强下的平均厚度	μm
	机械强度	
T_s	样品的拉伸强度	MPa
F_b	样品断开时记录的负荷	N
F	弯曲测头向试样施加的作用力	N
L	试样夹顶端与弯曲测头间的距离	mm
γ	一定压力下样品的压缩率	%
d_{pi}	一定压力下的厚度	μm
d_0	样品的初始厚度,即压力为 25 kPa 下的厚度	μm
B	弯曲挺度	mN·m
d_r	测试样品的挠度,即弯曲测头的位移	mm
b	测试样品的宽度	mm
	透气率	
V_{pe}	样品垂直方向透气率	mL·mm/(cm ² ·h·Pa)
V_s	在压差 $P_s - P_0$ 下气体通过样品的体积流速	mL/min
P_s	测试样品时,微量压差计示数	Pa
P_0	空白样品的微量压差计示数	Pa
S_1	样品的有效面积,即边框的中间孔尺寸	cm ²
V_{in}	样品平面方向透气率	mL/min
R_1	内圆半径	mm
R_2	外圆半径	mm
\bar{d}_3	1 MPa 下,样品的平均厚度	μm
	孔隙率	
ϵ	样品的孔隙率	%
ρ_{CF}	碳纤维的密度	g/cm ³
	密度	
ρ_0	体密度	g/cm ³
ρ_s	面密度	g/m ²

表 1 符号、定义与单位 (续)

符号	定义	单位
	粗糙度	
R_a	轮廓算术平均偏差	μm
$ Y_i $	轮廓上各点到轮廓中线纵坐标绝对值	μm
n_s	轮廓曲线上选取的数据点	
$\overline{R_a}$	平均轮廓算术平均偏差	μm
n_a	选取的取样长度的个数	
R_z	轮廓的最大高度,即最大轮廓峰高和最大轮廓谷深之和	μm
Z_{pi}	最大轮廓峰高,轮廓最高点到中线的距离最大值	μm
Z_{vi}	最大轮廓谷深,轮廓最低点到中线的距离最大值	μm
$\overline{R_z}$	平均轮廓的最大高度	μm
S_a	表面平均高度偏差	μm
$\overline{S_a}$	平均表面平均高度偏差	μm
S_z	表面的最大高度,即最大峰高度和最大谷深度之和	μm
S_p	定义区域中最高点的高度	μm
S_v	定义区域中最低点的高度的绝对值	μm
$\overline{S_z}$	平均表面的最大高度	μm
	导热系数	
λ	导热系数	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
R	样品的热阻抗	$\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$
Φ	传导的热量	W
$T_1 - T_2$	样品上下表面的稳定温度差	K
t	传导热量的时间	s
A	样品的面积	m^2
d_r	样品厚度	m
R_H	样品上下表面接触热阻	$\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$
	耐久性	
η_i	样品厚度、面电阻、压缩特性等的变化率	$\%$
X_0	样品厚度、面电阻、压缩特性等的初始值	
X_1	耐久性测试后样品厚度、面电阻、压缩特性等的数值	

5 样品及测试准备

5.1 样品准备

5.1.1 测试的样品形状、尺寸和数量由测试和送样双方协商决定。

5.1.2 样品应无褶皱、划痕和破损。

5.1.3 样品应在 80 °C 条件下烘干 2 h。

5.2 测试准备

5.2.1 对于每项试验,应选择符合精度要求的检测仪器及设备,以便将测量误差减到最小。

5.2.2 试验开始前,应保持待测样品清洁,并由测试方和材料制造商协商试验条件。如无特殊规定,参考附录 A 和附录 B 中的试验条件要求和内容进行测试和记录。

5.2.3 每项测试至少测试 3 次(确保得到 3 个有效值)。

5.2.4 如无特殊说明,测试环境的温度为 23 °C ± 5 °C。

6 测试仪器和器具

本文件给出的试验方法使用的仪器和器具及其精度要求如下:

- a) 测厚仪:用于测量样品的厚度,精度不低于 0.001 mm;
- b) 长度测量仪:用于测量样品的长度和宽度,精度为 ±0.02 mm;
- c) 精密电子天平:用于测量样品的质量,精度为 ±0.1 mg;
- d) 四探针电阻率测试仪:用于测试样品平面方向的电阻率,精度为 ±0.1 mΩ · cm;
- e) 低电阻测试仪:用于测试样品的垂直方向电阻,精度为 ±0.01 mΩ;
- f) 机械性能试验机:用于测试样品的拉伸强度和压缩强度,测试精度为其量程 ±0.5%;
- g) 比重计:用于测量样品的比重,精度为 ±0.002 g/cm³;
- h) 表面粗糙度轮廓仪:精度为 ±0.1 μm;
- i) 微压差计:用于测试压差,精度为 ±2 Pa;
- j) 节流阀:用于调节进气流量;
- k) 气体流量计:用于测量气体流量,精度为其满量程的 ±1%;
- l) 挺度仪:能测定试样挺度所规定的弯曲力或力矩的装置,弯曲角度为 15° ± 0.3°;标称的弯曲长度为 50 mm,仪器测量范围至少为 0.05 mN · m ~ 5 mN · m;
- m) 导热系数测试仪:用于测试样品的导热系数,垂直方向导热系数测试所需仪器测量范围至少为 0.1 W/(m · K) ~ 10.0 W/(m · K),精度为 ±0.1 W/(m · K);
- n) 接触角测试仪:用来测量样品的接触角,测量分辨率:0.1°,测定精度 ±1°。

7 厚度均匀性测试

7.1 测试方法

7.1.1 每次测量前应校准测厚仪的零点,且在每组试样测量后应重新检查其零点。

7.1.2 将测厚仪的测量头平缓放下,避免样品变形和破损,进行测试,施加在样品表面的测试压强为 25 kPa,并将该压强下的厚度作为样品的初始厚度。

7.1.3 样品尺寸不小于 100 cm²,测量点不少于 25 个,且测量点应均匀分布。

注:测量头与测试样品的接触面积不小于 1 cm²,接触面积为 2 cm²。

7.2 数据处理

7.2.1 样品的厚度均匀性用平均厚度、厚度标准偏差和厚度离散系数表示。

7.2.2 平均厚度按照公式(1)进行计算。

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

\bar{d} ——25 kPa 下,样品的平均厚度,单位为微米(μm);

d_i ——25 kPa 下,某一点样品的厚度测量值,单位为微米(μm);

n ——测量数据点数。

7.2.3 厚度标准偏差按照公式(2)进行计算。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

σ ——25 kPa 下,样品的厚度标准偏差,单位为微米(μm);

\bar{d} ——25 kPa 下,样品的平均厚度,单位为微米(μm);

d_i ——25 kPa 下,某一点样品的厚度测量值,单位为微米(μm);

n ——测量数据点数。

7.2.4 厚度离散系数按照公式(3)进行计算。

$$\delta = \frac{\sigma}{\bar{d}} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

式中：

δ ——离散系数,反映单位均值上的离散程度;

σ ——25 kPa 下,样品的厚度标准偏差,单位为微米(μm);

\bar{d} ——25 kPa 下,样品的平均厚度,单位为微米(μm)。

取 3 个有效样品为一组,计算出平均值作为试验结果。

8 电阻测试

8.1 平面方向电阻率测试

8.1.1 测试方法

8.1.1.1 利用长度测量仪测量样品的长度和宽度。

8.1.1.2 按照第 7 章方法测量样品的平均厚度。

8.1.1.3 测量前先校准四探针电阻率测试仪的零点。

8.1.1.4 样品放置在仪器的测量台上,将测试仪的测量头轻轻放下,使探针接触到样品表面。

8.1.1.5 分别在样品靠近边缘和中心的至少 5 个不同部位进行测量,并记录测量值,在样品边缘附近取样时,应注意样品边缘与探针之间的最近距离大于四倍探针间距。

8.1.1.6 根据样品的形状及厚度,查取相应的校正系数,计算出样品平面方向的电阻率。

8.1.2 数据处理

按照公式(4)计算平面方向电阻率。

$$\rho_{\text{in}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\rho_i \times G \times D)}{n} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

ρ_{in} ——样品平面方向的电阻率,单位为毫欧厘米($m\Omega \cdot cm$);

ρ_i ——不同部位电阻率测量值,单位为毫欧厘米($m\Omega \cdot cm$);

G ——样品厚度校正系数;

D ——样品形状校正系数;

n ——测试的数据点数。

注: G 和 D 的取值一般从仪器使用说明中查到,部分设备内置校准直接读数,无需二次计算。

8.2 垂直方向电阻率测试

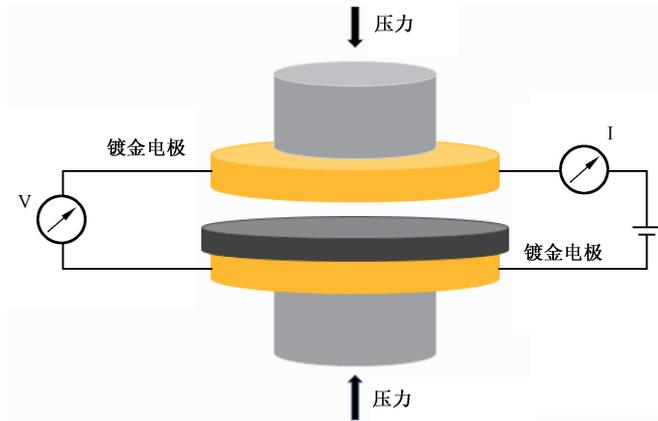
8.2.1 测试方法

8.2.1.1 将样品装在图 2 所示测试装置中的两个测量电极之间,测量电极为金电极或镀金的铜电极。

8.2.1.2 起始压强设置为 0.05 MPa,压强每增加 0.05 MPa,用低电阻测试仪测量两电极之间的电阻值,记录该压强下的电阻值 R_m ,恒压时间为 15 s,测试目标压强根据测试双方协商决定。

注 1: 测试目标压强为 1.0 MPa。

注 2: 测试单一压强测试时,恒压时间为 15 s,并在报告中注明测试压强。



注: 样品放置在两块电极之间,在电极两侧施加一定的压强,通过记录不同压强下的电流和电压值,得到不同施加压强下的电阻值。样品面积比接触面积边缘大 5 mm~10 mm,保证压头全部压在样品上。

图 2 垂直方向电阻测试示意图

8.2.2 数据处理

按照公式(5)计算垂直方向电阻率。

$$\rho_t = 10^4 \times \frac{R_m \times S - R_c}{d} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

ρ_t ——样品垂直方向的电阻率,单位为毫欧厘米($m\Omega \cdot cm$);

R_m ——仪器的测量值,即样品垂直方向电阻、电极本体电阻和样品与两个电极间的接触电阻的总和,单位为毫欧($m\Omega$);

S ——样品与两个电极之间的接触面积,单位为平方厘米(cm^2);

R_c ——两个电极本体电阻、样品与两个电极间的接触面电阻总和,单位为毫欧平方厘米($m\Omega \cdot cm^2$);

注: R_c 用同种材料、不同厚度的炭纸,按照公式(C.1)计算得到。本试验采用金电极或镀金铜块,如 R_c 数值较小,则忽略不计,具体标定方法见附录 C。

d ——试验压强下样品的厚度,单位为微米(μm)。

取 3 个样品为一组,计算出平均值作为试验结果。

8.3 面电阻测试

8.3.1 测试方法

8.3.1.1 将样品按照图 2 所示放置在两个测量电极之间,然后施加压力。

8.3.1.2 压强每增加 0.05 MPa,用低电阻测试仪测量两电极之间的电阻值,记录该压强下的电阻值 R_m ,恒压时间为 15 s,测试目标压强根据测试双方协商决定。

注:测试单一压强测试时,恒压时间为 15 s,并在报告中注明测试压强。

8.3.2 数据处理

按照公式(6)计算样品在垂直方向的面电阻 r_c 。

$$r_c = R_m \times S - R_c \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

r_c ——待测样品的面电阻,单位为毫欧平方厘米($m\Omega \cdot cm^2$);

R_m ——仪器的测量值,即样品垂直方向电阻、电极本体电阻和样品与两个电极间的接触电阻的总和,单位为毫欧($m\Omega$);

S ——样品与两个测量电极之间的接触面积,单位为平方厘米(cm^2);

R_c ——两个电极本体电阻、样品与两个电极间的接触面电阻总和,单位为毫欧平方厘米($m\Omega \cdot cm^2$)。

注: R_c 用同种材料、不同厚度的炭纸,通过公式(C.1)计算得到。本试验采用金电极或镀金铜块,如 R_c 数值较小,则忽略不计,具体标定方法见附录 C。

每组样品数量不少于三个,计算出算术平均值作为试验结果。

9 机械强度测试

9.1 拉伸强度测试

9.1.1 测试方法

9.1.1.1 按照第 7 章方法测量样品的平均厚度。

9.1.1.2 按照 GB/T 1040.3—2006 的规定,将试样分成纵向和横向(没有方向的样品任意取一种方向)等间隔截取一定尺寸(70 mm×10 mm)的长条形试样。

9.1.1.3 将试样置于试验机的两夹具中(如图 3 所示)。试验机上、下夹具的中心线应与试样受力的方向平行,且在受力过程中保持试样在同一平面。测试过程中,试样不应在夹具内滑动,试验夹具也不应引起试样在夹具处断裂。夹具应内衬橡胶之类的弹性材料。

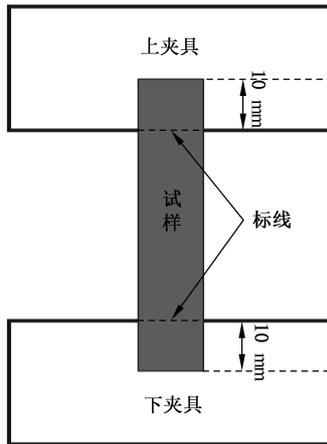


图 3 试样在夹具中的位置

- 9.1.1.4 在机械性能试验机上进行拉伸强度试验。拉伸速率应保持 10 mm/min。
- 9.1.1.5 样品断裂后,读取相应的负荷值。若试样在标线±5 mm 内某处断裂时,该结果应弃去不计。
- 9.1.1.6 样品按每个试验方向为一组,每组样品数应满足 5 次有效试验的要求。

9.1.2 数据处理

根据读取的断裂最大负荷及相应的样品宽度,按照公式(7)计算样品的拉伸强度。

$$T_s = 10^2 \times \frac{F_b}{W_{cp} \times d} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

- T_s ——样品的拉伸强度,单位为兆帕(MPa);
- F_b ——样品断开时记录的负荷,单位为牛顿(N);
- W_{cp} ——样品的宽度,单位为厘米(cm);
- \bar{d} ——25 kPa 下,样品的平均厚度,单位为微米(μm)。

每批样品取 5 个试样为一组,计算出平均值作为试验结果。

9.2 压缩特性测试

- 9.2.1 截取与试验机的平板夹具截面尺寸相同的送试材料作为样品。
- 9.2.2 将样品装在两块光滑的平板夹具之间。测试过程中,在两块夹具的外侧施加压力,使压强每增加 0.05 MPa 记录一个夹具位移值和样品的厚度 d_{pi} ,到达指定压强时,停止测试。
- 9.2.3 按公式(8)计算样品的压缩率。

$$\gamma = \frac{d_0 - d_{pi}}{d_0} \times 100\% \dots\dots\dots (8)$$

式中:

- γ ——一定压强下压缩率;
- d_{pi} ——一定压强下的厚度,单位为微米(μm);
- d_0 ——样品的初始厚度,即压强为 25 kPa 下时的厚度,单位为微米(μm);

取 3 个有效样品为一组,计算出平均值作为试验结果。

注 1: 如需多次压缩,本方法亦适用,但需记录每次数据。

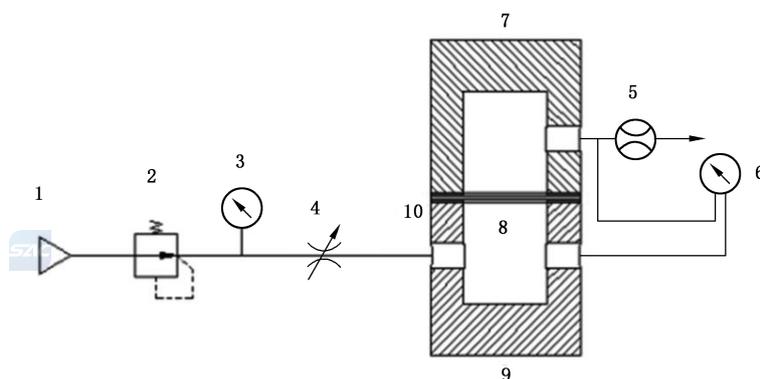
注 2: 测试单一压强下的压缩率,并在报告中注明测试压强。

10 透气率测试

10.1 垂直方向透气率测试

10.1.1 测试器具

试验中使用的测试装置示意图如图 4。



标引序号说明：

- 1 —— 气源；
- 2 —— 减压阀；
- 3 —— 压力表；
- 4 —— 节流阀；
- 5 —— 流量计；
- 6 —— 压差表；
- 7 —— 上夹具；
- 8 —— 样品；
- 9 —— 下夹具；
- 10 —— 硅胶垫片。

注：测试池由两块具有气体进口和出口及凹槽的不锈钢板夹具组成，样品放置在两夹具中间，两侧形成气室。气体进入测试池在样品的两侧流动，从而可维持样品两侧保持一定的压力差。进气流量通过节流阀控制，两侧的压力差主要通过压差表控制，气体的流量由气体流量计（如：质量流量计、皂泡流量计或皮膜流量计）测量。

图 4 垂直方向透气率测试装置示意图

10.1.2 测试方法

10.1.2.1 按照第 7 章方法测量样品的平均厚 \bar{d} 。

10.1.2.2 将样品放置在两片大小相同的中空边框之间，边框的中间孔面积为 S_1 ，在一定温度、压力下制成边缘不漏气的样品/边框组件。组件压制过程，保证样品有效部分不变形、不破损。

注：边框的中间孔面积大于 2 cm^2 。

10.1.2.3 将压好的样品/边框组件装入两侧带有进气、出气口的平板夹具之间，使两侧形成气室，测试气密性。两个平板夹具均应具有密封元件。

10.1.2.4 将测试池按照图 4 所示安装在试验装置上，并保证测试池无外漏。

注：外漏的检测方法为，将样品放入测试池，堵住压差表的出口和流量计的出口，打开节流阀，通入一定压差的气体，关闭节流阀，观察压差表的示数，若 2 min 内无明显变化，则装置气密性良好。

10.1.2.5 调节节流阀，用压差表控制一定的压差，在室温和一定的压力差下稳定至少 5 min，根据流量

计示数,计算流速 V_s 、压差表示数 P_s 。

注:压差选取 2 Pa~300 Pa。

10.1.2.6 将与 10.1.2.3 中相同大小的中空边框压制成测试组件,压制条件同 10.1.2.2。

10.1.2.7 按照 10.1.2.4 中方法组装后进行测试。在同 10.1.2.5 相同的流速 V_s 下,读取空白样品微量压差计的示数 P_0 ,对测试结果进行校正。

注:在报告中注明使用的气体介质,优先使用干燥空气。

10.1.3 数据处理

按照公式(9)计算样品的垂直方向透气率。

$$V_{pe} = \frac{60 \times V_s \times \bar{d}}{[S_1 \times 1\,000 \times (P_s - P_0)]} \dots\dots\dots (9)$$

式中:

V_{pe} ——样品的垂直方向透气率,单位为毫升毫米每平方米小时帕[mL·mm/(cm²·h·Pa)];

V_s ——在压差($P_s - P_0$)下气体通过样品的体积流速,单位为毫升每分(mL/min);

\bar{d} ——样品的平均厚度,单位为微米(μm);

S_1 ——样品的有效面积,即边框的中间孔尺寸(cm²);

P_s ——测试样品时,压差表示数,单位为帕(Pa);

P_0 ——空白样品的压差表示数,单位为帕(Pa)。

取 3 个有效样品为一组,计算出平均值作为试验结果。

10.2 平面方向透气率测试

平面方向透气率测试方法见附录 D。

11 孔隙率测试

孔隙率测试方法见附录 E。

12 体密度测试

12.1 测试方法

12.1.1 使用精密电子天平称量样品的质量 m 。

12.1.2 按照第 7 章方法测量样品的平均厚度 \bar{d} 。

12.1.3 用长度测量仪测量样品的长度 L_{cp} 和宽度 W_{cp} 。

12.2 数据处理

按照公式(10)计算样品的体密度:

$$\rho_0 = \frac{10^4 \times m}{W_{cp} \times L_{cp} \times \bar{d}} \dots\dots\dots (10)$$

式中:

ρ_0 ——样品的体密度,单位为克每立方厘米(g/cm³);

m ——样品的质量,单位为克(g);

L_{cp} ——样品的长度,单位为厘米(cm);

W_{cp} ——样品的宽度,单位为厘米(cm);

\bar{d} ——样品在 25 kPa 下的厚度,单位为微米(μm)。

取 3 个有效样品为一组,计算出平均值作为试验结果。

13 面密度测试

13.1 测试方法

13.1.1 采用长度测量仪测量样品的长度 L_{cp} 和宽度 W_{cp} 。

13.1.2 用精密电子天平称量样品的质量 m 。

13.2 数据处理

按照公式(11)计算样品的面密度:

$$\rho_s = \frac{10^4 \times m}{L_{\text{cp}} \times W_{\text{cp}}} \dots\dots\dots(11)$$

式中:

ρ_s ——样品面密度,单位为克每平方米(g/m^2);

m ——样品质量,单位为克(g);

L_{cp} ——样品的表观长度,单位为厘米(cm);

W_{cp} ——样品的表观宽度,单位为厘米(cm)。

取 3 个样品为一组,计算出平均值作为试验结果。

14 粗糙度测试

14.1 粗糙度测试

14.1.1 测试方法

14.1.1.1 按照 5.1 准备样品。

14.1.1.2 将样品放置于表面粗糙度轮廓仪的测试台上。

14.1.1.3 通过粗糙度的等级确定取样长度和行程长度,选取轮廓中线。

14.1.1.4 在一定取样长度 L 内,测试表面轮廓曲线,读取曲线上各点到轮廓中线的距离 Y_i 。

注:取样长度 L 为 5 cm。

14.1.1.5 在评定长度范围内,测出 m 个取样长度 L 的粗糙度轮廓曲线,计算表面粗糙度。



14.1.2 数据处理

14.1.2.1 轮廓算术平均偏差按照公式(12)计算。

$$R_a = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^n |Y_i| \dots\dots\dots(12)$$

式中:

R_a ——轮廓算术平均偏差,单位为微米(μm);

$|Y_i|$ ——轮廓上各点到轮廓中线纵坐标绝对值,单位为微米(μm);

n_s ——轮廓曲线上选取的数据点。

注: R_a 值在仪器上直接读取。

14.1.2.2 平均轮廓算术平均偏差按照公式(13)计算。

$$\overline{R_a} = \frac{1}{n_a} \sum_{i=1}^m R_a \dots\dots\dots(13)$$

式中：

$\overline{R_a}$ ——平均轮廓算术平均偏差,单位为微米(μm)；

R_{a_i} ——第 i 个取样长度内的轮廓算术平均偏差,单位为微米(μm)；

n_a ——选取的取样长度的个数。

14.1.2.3 轮廓的最大高度 R_z 按照公式(14)计算：

$$R_z = \max\{Z_{P_i}\} + \max\{Z_{V_i}\} \dots\dots\dots(14)$$

式中：

R_z ——轮廓的最大高度,即最大轮廓峰高和最大轮廓谷深之和,单位为微米(μm)；

Z_{P_i} ——最大轮廓峰高,轮廓最高点到中线的距离最大值,单位为微米(μm)；

Z_{V_i} ——最大轮廓谷深,轮廓最低点到中线的距离最大值,单位为微米(μm)。

注： R_z 值在仪器上直接读取。

14.1.2.4 平均轮廓的最大高度按公式(15)计算。

$$\overline{R_z} = \frac{1}{n_a} \sum_{i=1}^m R_z \dots\dots\dots(15)$$

式中：

$\overline{R_z}$ ——平均轮廓的最大高度,单位为微米(μm)；

R_z ——第 i 个取样长度内的轮廓的最大高度,单位为微米(μm)；

n_a ——选取的取样长度 L 的个数。

取 3 个有效样品为一组,计算出平均值作为试验结果。

14.2 表面粗糙度测试

表面粗糙度测试方法见附录 F。

15 垂直方向导热系数测试

15.1 测试仪器

任何满足条件的导热系数测试仪均可。垂直方向导热系数测试所需仪器范围至少为 $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \sim 10.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,精度为 $\pm 0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

导热系数采用导热系数仪进行测试,一般包括两个等温板装置、一个或多个热流传感器和必要的环境条件控制设备组成,包括冷热等温面、热流传感器、试样厚度测试仪和可控环境试验箱,典型的装置如图 5 所示。温差测量的不确定性应处于实际温差的 $\pm 0.5\%$ 范围之内。传感器准确度为最小输出的 $\pm 0.5\%$,等温板压强控制范围至少为 1 MPa 。

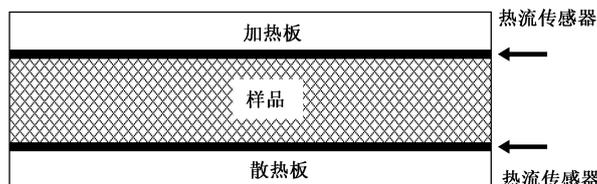


图 5 带两个热流传感器和一个试样的装置

15.2 测试方法

15.2.1 剪裁一定尺寸的炭纸作为样品。样品形状和尺寸应与加热盘和冷却盘的形状和尺寸相同；样

品数量为 15 个,应无褶皱、划痕和破损;环境温度控制在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,利用长度测量仪测试待测样品的尺寸,计算样品的面积 A 。

15.2.2 将 n 个样品重叠后,利用测厚仪在 1 MPa 压强下测量样品的总厚度。

注:样品的个数 n 为从 1 到 5 的变量。

15.2.3 将 n 个样品重叠后放置在导热系数测试仪中,缓慢施加 1 MPa 压强避免样品损坏。样品的表面应与仪器的散热盘紧密接触。

15.2.4 设定加热板的温度为 T_2 和散热板的温度为 T_1 ,操作仪器,使热量在样品厚度方向传递,并测量热流量参数(热阻抗参数亦可)。

注:加热板和散热板的温度差 $T_2 - T_1 \geq 60\text{ K}$ 。

15.3 数据处理

15.3.1 按公式(16)计算热阻抗。

$$R = \frac{10^6 \times (T_2 - T_1) \times A}{\Phi} \quad \dots\dots\dots(16)$$

式中:

R ——样品的热阻抗,单位为开尔文平方米每瓦($\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$);

$T_2 - T_1$ ——流经样品的热流量达到稳定时,样品上下表面的实际温度差,单位为开尔文(K);

A ——样品的面积,单位为平方米(m^2);

Φ ——传导的热流量,单位为瓦特(W)。

15.3.2 利用热阻抗 R 作为 y 轴数据处理,样品厚度 d_r 作为 x 轴数据,做折线图。

15.3.3 利用图像处理软件对折线图做线性拟合,得到图像斜率 k 。

15.3.4 根据公式(17)、公式(18)得知, $R-d$ 图像斜率的倒数即导热系数, y 轴截距即为接触热阻。

$$R = \frac{1}{\lambda} \times d_r + R_H \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$\lambda = \frac{1}{k} \quad \dots\dots\dots(18)$$

式中:

λ ——导热系数,单位为瓦每米开尔文[$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$];

d_r ——样品厚度,单位为米(m);

k —— $R-d$ 图像的斜率;

R_H ——样品上下表面接触热阻,单位为开尔文平方米每瓦($\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$)。

16 弯曲挺度测试

弯曲挺度测试方法见附录 G。

17 静态接触角测试

静态接触角测试方法见附录 H。

18 耐久性测试(酸氧化法)

耐久性测试(酸氧化法)方法见附录 I。

19 测试报告

根据所做试验,测试报告应提供足够多的、正确的、清晰和客观的数据用来进行分析和参考。报告中应包含各章中所有的数据。报告有三种形式,摘要式、详细式和完整式。每个类型的报告都应包含相同的标题页和内容目录。测试报告可按照附录 B 所提供的格式进行编写。

注:报告模板由检测机构自行建立,报告内容由双方协商决定。



附录 A

(资料性)

测试准备

A.1 总则

本附录描述了测试准备的典型项目。每项试验分别选择满足精度要求的检测仪器及设备,以便将测量误差减到最小。宜通过书面的测试计划列入下列内容:

- a) 目的;
- b) 测试规范;
- c) 测试人员资格,测试人员进行过操作培训,有操作仪器的经验,并熟知安全操作规程;
- d) 质量保证标准(见 GB/T 19000—2016 及相关标准);
- e) 结果不确定度(见 GB/T 27418—2017);
- f) 对测量仪器及设备的要求;
- g) 测试参数范围的估计;
- h) 数据采集计划。

A.2 数据采集和记录

为满足目标误差要求,数据采集系统和数据记录设备应满足采集频次与采集速度的需要,其性能宜优于性能试验设备。



附 录 B
(资料性)
测试报告

B.1 总则

根据所做试验,测试报告宜提供足够多的、正确的、清晰和客观的数据用来进行分析和参考。报告中宜包含各章中所有的数据。报告有三种形式,摘要式、详细式和完整式。每个类型的报告都宜包含标题页和内容目录。

B.2 报告内容

B.2.1 标题页

标题页宜介绍下列各项信息:

- 国家标准编号;
- 样品名称、材料组成,规格;
- 样品状态调节及测试标准环境;
- 测试机型号;
- 每次测试的结果以及结果的平均值;
- 测试日期、人员。

标题页宜包括下列内容:

- 报告编号(可选择);
- 报告的类型(摘要式、详细式和完整式);
- 报告的作者;
- 测试的场所;
- 测试的名称;
- 测试申请单位。

B.2.2 内容目录

每种类型的报告宜提供目录。

B.3 报告类型

B.3.1 摘要式报告

摘要式报告宜包括下列各项数据:

- 测试的目的;
- 测试的种类,仪器和设备;
- 所有的测试结果;
- 每个测试结果的不确定因素和确定因素;
- 摘要性结论。

B.3.2 详细式报告

详细式报告除包含摘要式报告的内容外,宜包括下列各项数据:

- 测试操作方式和测试流程图；
- 仪器和设备的安排、布置和操作条件的描述；
- 仪器设备校准情况；
- 用图或表的形式说明试验结果；
- 测试结果的讨论分析。

B.3.3 完整式报告

完整式报告除了包含详细内容,宜有原始数据的副本和下列各项:

- 测试进行时间；
- 用于测试的测量设备的精度。



附 录 C

(资料性)

两个铜电极本体电阻、炭纸与电极间接触面电阻总和测试

C.1 两个铜电极本体电阻、样品与两个电极间的接触面电阻总和按照公式(C.1)计算：

$$R_c = \frac{(R_{m1}\bar{d}_2 - R_{m2}\bar{d}_1)S}{\bar{d}_2 - \bar{d}_1} \dots\dots\dots(C.1)$$

式中：

R_c ——两个铜电极本体电阻、样品与两个电极间的接触面电阻总和，单位为毫欧平方厘米 ($m\Omega \cdot cm^2$)；

R_{m1} ——厚度为 \bar{d}_1 时，仪器的电阻测量值，即样品垂直方向电阻、两个铜电极本体电阻、和样品与两个电极间的接触电阻的总和，单位为毫欧 ($m\Omega$)；

\bar{d}_1 ——样品 1 在测试压强下的平均厚度，单位为微米 (μm)；

R_{m2} ——厚度为 \bar{d}_2 时，仪器的电阻测量值，即样品垂直方向电阻、两个铜电极本体电阻、和样品与两个电极间的接触电阻的总和，单位为毫欧 ($m\Omega$)；

\bar{d}_2 ——两个样品 1 在测试压强下的平均厚度，单位为微米 (μm)；

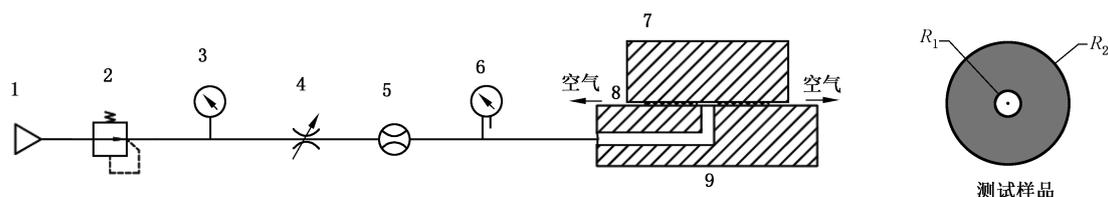
S ——样品与两个电极之间的接触面积，单位为平方厘米 (cm^2)。

注：不同样品的 R_c 进行重新标定。

附录 D
(资料性)
平面方向透气率测试

D.1 测试器具

平面方向透气率测试装置如图 D.1 所示。



标引序号(符号)说明:

- 1 ——气源;
- 2 ——减压阀;
- 3 ——压力表;
- 4 ——节流阀;
- 5 ——流量计;
- 6 ——压差表;
- 7 ——上夹具;
- 8 ——测试样品;
- 9 ——下夹具;
- R_1 ——内圆半径;
- R_2 ——外圆半径。

图 D.1 平面方向透气率测试装置示意图

D.2 测试方法

D.2.1 测量样品在 1 MPa 下的平均厚度 \bar{d}_3 。

D.2.2 将样品裁剪成同心圆环,其中内圆半径为 R_1 ,外圆半径为 R_2 。

D.2.3 按照图 D.1 所示的试验装置,将测试样品放置在上夹具和下夹具之间,使样品表面能完全被夹具覆盖,给夹具施加压力,使样品承受压强达到 1 MPa。

注:与样品接触的夹具上下表面保持平行且粗糙度小于 $10 \mu\text{m}$,内圆半径 4 mm,外圆半径 22.5 mm。

D.2.4 调节节流阀,用压差表控制一定的压差,在室温和一定的压差下稳定至少 15 s,根据流量计示数和压差表示数,记录流速 V_s 、压差 P_s 。

注:使用气源为干燥空气。压差为 20 kPa~30 kPa。

D.3 数据处理

用公式(D.1)计算样品的平面透气率。

$$V_{in} = \frac{60 \times 100\,000 \times V_s \times \ln(R_2/R_1)}{[2 \times 3.14 \times \bar{d}_3 \times P_s]} \dots\dots\dots (D.1)$$

式中：

V_{in} ——样品的平面透气率,单位为毫升毫米每平方厘米小时帕 $[\text{mL} \cdot \text{mm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})]$;

V_s ——在压差 $(P_s - P_0)$ 下气体通过样品的体积流速,单位为毫升每分 (mL/min) ;

R_1 ——内圆半径,单位为毫米 (mm) ;

R_2 ——外圆半径,单位为毫米 (mm) ;

P_s ——测试样品时,压差表示数,单位为帕 (Pa) ;

\bar{d}_3 ——1 MPa 下,样品的平均厚度,单位为微米 (μm) 。

取 3 个有效样品为一组,计算出平均值作为试验结果。

附 录 E
(资料性)
孔隙率测试

E.1 测试方法一(压汞法)

参考 GB/T 21650.1—2008 规定的方法进行孔隙率测试。

E.2 测试方法二(溶液法)

E.2.1 按照 5.1 准备样品。

E.2.2 按照第 7 章方法测量样品的平均厚度 \bar{d} , 利用长度测量仪测量样品的长度 (L_{cp}) 和宽度 (W_{cp}), 利用精密电子天平称量样品的质量 m 。

E.2.3 将正庚烷和二溴乙烷配成一定体积比例的混合液, 注入具塞量筒内。

E.2.4 将样品纤维剪碎, 并用玛瑙研钵碾压粉碎至长度小于 2 mm, 放入具塞量筒内的混合液中, 用玻璃棒搅拌, 使纤维分散在混合液中, 盖上磨口塞, 将其放入 25 °C ± 1 °C 的恒温水浴里, 具塞量筒的塞及颈部要露出水面。

E.2.5 观察混合液, 若纤维在混合液内上浮或下沉, 则需要相应加入正庚烷或二溴乙烷, 以调节混合液密度, 直至纤维在混合液内均匀悬浮。

E.2.6 将混合液静置 4 h 后, 若纤维仍均匀分布于混合液内, 用比重计测量该温度下混合液的密度, 即为纤维的密度值 (ρ_{CF})。

E.3 数据处理

按照公式(E.1)计算样品的孔隙率:

$$\epsilon = \left[1 - \frac{10^4 \times m}{\rho_{CF} \times W_{cp} \times L_{cp} \times \bar{d}} \right] \times 100\% \dots\dots\dots (E.1)$$

式中:

- ϵ —— 样品的孔隙率;
- m —— 样品的质量, 单位为克(g);
- ρ_{CF} —— 碳纤维的密度, 单位为克每立方厘米(g/cm^3);
- L_{cp} —— 样品的长度, 单位为厘米(cm);
- W_{cp} —— 样品的宽度, 单位为厘米(cm);
- \bar{d} —— 样品的平均厚度, 单位为微米(μm);

取 3 个有效样品为一组, 计算出平均值作为试验结果。

注: 在测试报告中注明所使用的方法。

附 录 F
(资料性)
表面粗糙度测试方法

F.1 测试仪器

3D 表面轮廓仪或任何满足条件的表面粗糙度测试仪均可。

F.2 测试方法

F.2.1 按照 5.1 准备样品。

F.2.2 调试测试仪器准备测试。

F.2.3 将样品放置于测试台,选择合适的镜头(放大倍数)至纤维清晰可见,进行扫描。仪器观察软件取样为 2 cm×3 cm,后续分析软件设定基准面,可在取样面积内进行不同面积表面粗糙度测试及线条粗糙度测试。

F.2.4 移动测试台,更换测试区域,重复操作,得到 3 个~5 个测试区域的数据。

F.3 数据处理

F.3.1 表面平均高度偏差按照公式(F.1)计算。

$$S_a = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |Z_{ij}| \dots\dots\dots (F.1)$$

式中:

- S_a ——表面平均高度偏差,单位为微米(μm);
- $M、N$ ——评定区域中相互垂直两个方向上的采样点数;
- Z ——物体表面区域轮廓上点到基准平面的距离。

F.3.2 平均表面平均高度偏差按照公式(F.2)计算。

$$\overline{S_a} = \frac{1}{n_a} \sum_{i=1}^{n_a} |S_a| \dots\dots\dots (F.2)$$

式中:

- $\overline{S_a}$ ——平均表面平均高度偏差,单位为微米(μm);
- S_a ——第 i 个测试区域的表面平均高度偏差,单位为微米(μm);
- n_a ——选取的测试区域个数。

F.3.3 表面的最大高度按照公式(F.3)计算。

$$S_z = S_p + S_v \dots\dots\dots (F.3)$$

式中:

- S_z ——表面的最大高度,即最大峰高度和最大谷深度之和,单位为微米(μm);
- S_p ——定义区域中最高点的高度,单位为微米(μm);
- S_v ——定义区域中最低点的高度的绝对值,单位为微米(μm)。

注: S_z 值直接由仪器读取。

F.3.4 平均表面的最大高度按照公式(F.4)计算。

$$\overline{S_z} = \frac{1}{n_a} \sum_{i=1}^{n_a} |S_z| \dots\dots\dots (F.4)$$

式中：

$\overline{S_z}$ ——平均表面的最大高度,单位为微米(μm)；

S_a ——第 i 个测试区域的表面最大高度,单位为微米(μm)；

n_a ——选取的测试区域个数。



附 录 G
(资料性)
弯曲挺度测试

G.1 测试方法

G.1.1 将测试样品裁切成长度不小于 80 mm、宽度为 38.0 mm±0.2 mm 的长方形。

注 1: 取样仪器参考 QB/T 1671 的规定。

注 2: 弯曲挺度测试分横向和纵向。

注 3: 弯曲挺度测试时,弯曲角度为 15°。

G.1.2 根据材料弯曲挺度测定仪所规定的方法开展测试。如图 G.1 所示,将样品的一端夹于试样夹内,注意夹子不宜夹得太紧,以免引起试样损坏和读数偏差。

G.1.3 若材料弯曲挺度测定仪可向两个侧面弯曲,设置弯曲为 15°时,立即读数,然后样品再经过零点位置向另一个侧面弯曲 15°,再读数,待测样品宜有 5 张试样得到 10 个读数。测定后,从试样夹上取下的试样不能再使用。

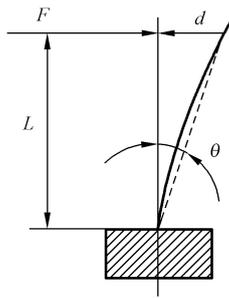


图 G.1 挺度测试原理示意图(两点加荷法)

G.2 数据处理

样品的弯曲挺度按照公式(G.1)进行计算。

$$B = \frac{F \times L^3}{3 \times d_r \times b} \dots\dots\dots (G.1)$$

式中:

B —— 弯曲挺度,单位为毫牛米(mN·m);

F —— 通过移动弯曲测头向试样施加的作用力,单位为牛顿(N);

L —— 弯曲长度,即试样夹顶端与弯曲测头间的距离,单位为毫米(mm);

d_r —— 测试样品的挠度,即弯曲测头的位移,单位为毫米(mm);

b —— 测试样品的宽度,单位为毫米(mm)。

注: 本附录规定样品的测试长度(弯曲长度 *L*)为 50 mm,测试样品的宽度 *b* 为 38 mm。

每次测试的挺度值,宜以弯曲试样至 15°时的算术平均值作为报告结果。每组试验个数不少于五个,试验结果以弯曲挺度的算术平均值表示。

弯曲挺度测试也可按照 GB/T 23144—2023 中规定的两点加荷方法进行测试。

附录 H

(资料性)

静态接触角测试

H.1 测试方法

H.1.1 将样品置于仪器的试样台上。确保样件放置平整,不产生皱纹和扭曲。

H.1.2 在针头末端悬挂 $3\ \mu\text{L}\sim 4\ \mu\text{L}$ 水滴。升高试样台使试样表面接触悬挂的水滴,然后移开试样以完成水滴的转移,如图 H.1 所示。此过程中,不应令水滴滴落或喷出到样件表面。

注:水滴体积标注在报告中,使用去离子水进行试验。

H.1.3 通常情况下,在水滴转移后 $30\ \text{s}\pm 10\ \text{s}$ 内进行接触角的测量。参考 ASTM D5946 的规定通过水滴图像的尺寸测量接触角。

H.1.4 移动样品,使下一滴水滴滴在样件的新测试部位,在同一样品上测量不低于 5 次(5 次~10 次)接触角,如图 H.1 所示。

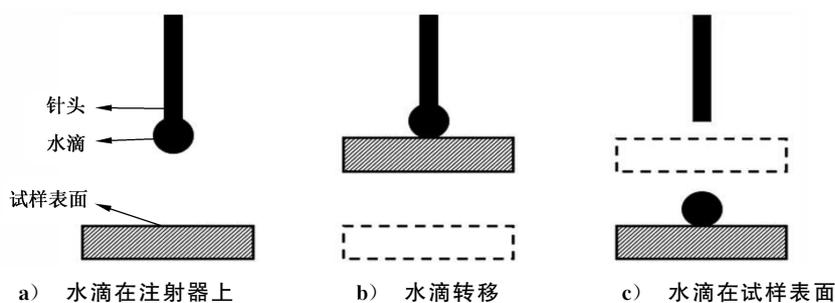


图 H.1 水滴转移示意图

H.2 数据处理

每组样品数量不少于三个,样品的静态接触角以三个样品的算术平均值表示,取三位有效数字。其中,每个样品的静态接触角取三次测量的算术平均值。

附 录 I
(资料性)
耐久性测试(酸氧化法)

I.1 样品制备

样品为不小于 100 cm² (10 cm×10 cm)的正方形炭纸,至少 5 份。

注:采用可重复批次的样品。

I.2 测试方法

I.2.1 选取 2 份~3 份的样品,按照本文件规定的测试方法测试样品的厚度、面电阻、压缩特性等作为初始值。

I.2.2 将剩余样品置于 15% H₂O₂ + 1 mol/L H₂SO₄ 混合溶液中,溶液体积比为 1 : 1,并恒温水浴 (80 ℃)处理,过程中盛放溶液的容器需要使用保鲜膜封口。中间需要观察试剂的量,若试剂存量不足,需及时调配添加。

注:所用化学试剂的纯度等级为分析纯。

I.2.3 样品处理 20 天后取出,使用去离子水反复冲洗后置于烘箱中 120 ℃烘干 2 h。

I.2.4 随后按照本文件规定的测试方法再次测试样品的厚度、面电阻、压缩特性等。

I.3 数据处理



按公式(I.1)分析炭纸的耐久性:

记录炭纸样品的厚度、面电阻、压缩特性等的变化率为 η_i 。

$$\eta_i = \frac{X_0 - X_1}{X_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(I.1)$$

式中:

η_i ——样品的厚度、面电阻、压缩特性等的变化率;

X_0 ——样品的厚度、面电阻、压缩特性等的初始值;

X_1 ——耐久性测试后样品的厚度、面电阻、压缩特性等的数值。

参 考 文 献

- [1] GB/T 3505—2009 产品几何技术规范(GPS) 表面结构 轮廓法 术语、定义及表面结构参数
- [2] GB/T 19000—2016 质量管理体系 基础和术语
- [3] GB/T 21650.1—2008 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第1部分：压汞法
- [4] GB/T 23144—2023 纸和纸板 弯曲挺度的测定 两点法、三点法和四点法的通用原理
- [5] GB/T 27418—2017 测量不确定度评定和表示
- [6] QB/T 1671 纸与纸板物理性能试验专用冲切样器具通用技术条件
- [7] ASTM D5946-17 Standard Test Method for Corona—Treated Polymer Films Using Water Contact Angle Measurements
-

