



中华人民共和国国家标准

GB/T 15445.3—2025/ISO 9276-3:2008

粒度分析结果的表述 第3部分：试验曲线的参考模型拟合

Representation of results of particle size analysis—
Part 3: Adjustment of an experimental curve to a reference model

(ISO 9276-3:2008, IDT)

2025-12-02 发布

2026-07-01 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 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 符号和缩略语 1

5 试验曲线的参考模型拟合 2

 5.1 概述 2

 5.2 准线性回归方法 2

 5.3 非线性回归方法 3

6 拟合优度、残差标准差和探索性数据分析 5

7 结论 6

附录 A (资料性) 模型对回归拟合优度的影响 7

附录 B (资料性) 不同量类型分布对回归结果的影响 9

附录 C (资料性) 非线性回归示例 13

 C.1 对数正态分布非线性回归的电子表格应用示例 13

 C.2 五参数双峰分布模型示例 13

附录 D (资料性) χ^2 ——已知样本量数分布的检验 15

附录 E (资料性) 加权准线性回归 18

 E.1 加权准线性回归 18

 E.2 加权准线性回归中参数 a 和 b 的计算公式 19

 E.3 公式(E.3)和公式(E.4)的电子表格示例 19

参考文献 21

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 15445《粒度分析结果的表述》的第 3 部分。GB/T 15445 已经发布了以下部分：

- 第 1 部分：图形表征；
- 第 2 部分：由粒度分布计算平均粒径/直径和各次矩；
- 第 3 部分：试验曲线的参考模型拟合；
- 第 4 部分：分级过程的表征；
- 第 5 部分：用对数正态概率分布进行粒度分析的计算方法；
- 第 6 部分：颗粒形状和形态的定性及定量表述。

本文件等同采用 ISO 9276-3:2008《粒度分析结果的表述 第 3 部分：试验曲线的参考模型拟合》。

本文件增加了“术语和定义”一章。

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：中机生产力促进中心有限公司、合肥铭源检测技术服务有限公司、杭州合秩标准技术服务有限公司、深圳国技仪器有限公司、中国环境科学研究院。

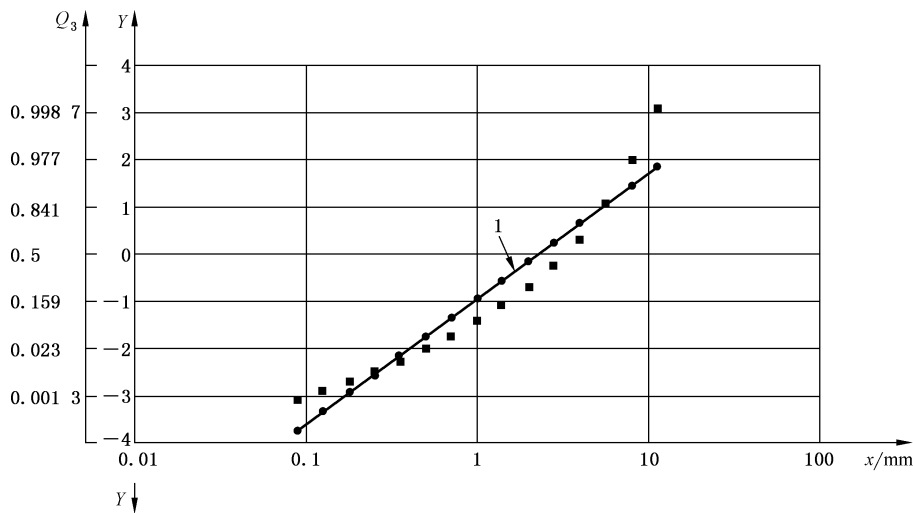
本文件主要起草人：侯长革、杨文、白雯宇、郑爱芬、王静、王健、朱培武、郭冰。

引言

粒径累积分布曲线呈 S 形,因此难以拟合到模型分布函数或进行统计比对。然而,通过采用适当的坐标系[如 对数正态分布,罗辛-拉姆勒(Rosin-Rammler)分布或盖茨-高登-舒兹曼(Gates-Gaudin-Schuhmann)分布(双对数坐标系)],可将此类 S 形曲线转换为直线,从而克服上述缺陷。工业中,颗粒目标粒度分布亦可通过分布模型来描述。

在此类转换后的坐标系中,经典线性回归假设试验点与理论直线间的偏差平方具有均值相等性。该假设仅适用于转换后的累积分布系统,而非其线性表征形式,故称为准线性回归。需特别指出,坐标尺度的扩展会导致图表两端偏差平方值产生数量级差异。此外,通过此方法获得的偏差平方和与任何简单分布均无关联,且无法支持统计检验。

图 1 试验数据出自 GB/T 15445.1—2008 的附录 A,给出了 90 μm~11.2 mm 范围内的筛分测量结果示例。



标引符号说明:

- Q_3 —— 体积累积分布或质量累积分布;
- x —— 粒径;
- Y —— 标准正态分布的分位数;
- 1 —— 准线性回归(完整直线);
- —— 准线性拟合点;
- —— Q_3 数据点。

图 1 对数正态分布图(纵轴为标准正态坐标,表示经逆标准正态分布变换后的累积分布值;横轴为对数坐标,表示粒径)及其准线性回归(完整直线)示例

上述与非线性坐标系对应的数学处理方法符合准线性回归原理。其中, Y 轴的非线性变换会导致 Y 方向偏差的非线性转换(例如:对分布尾部与中心区域的偏差需采用不同计算方式)。

为补偿 Y 轴非线性变换对 Y 值差异的非线性影响,可在准线性回归中引入权重因子(见附录 E)。

非线性回归可提供最优拟合结果并具有最高灵活性,例如支持数量分布的统计检验、截断或多峰分布的拟合以及任意模型的匹配,但这需要预设初始近似值并依赖数值数学算法。

在未变换的尺度下,试验点与模型间残差的标准差可用于量化对齐程度,并支持试验分布的统计比

较。若该值大于 0.05(示例阈值),则表明参考模型不适用。

颗粒表征,如粒度的累积分布或频度分布,在不同方法、仪器上存在很大差异。

GB/T 15445 旨在促进颗粒表征表述方法协同并有助于分析数据的变换,由 6 个部分构成。

- 第 1 部分:图形表征。以直方分布,频度和累积分布图形来表示粒度分析,目的在于规定由测量数据求得上述各种分布遵循的标准术语。
- 第 2 部分:由粒度分布计算平均粒径/直径和各矩。目的在于提供一些相关的公式,为给定的粒度分布计算平均粒径或平均直径以及各矩值。
- 第 3 部分:试验曲线的参考模型拟合。目的在于规定在统计学框架下将试验曲线拟合为参考模型的方法,并明确了拟合后残差偏差的评估准则。
- 第 4 部分:分级过程的表征。目的在于提供一种用来表征分级工艺的数学基础知识。
- 第 5 部分:用对数正态概率分布进行粒度分析的计算方法。为累积粒度分布服从对数正态概率分布的颗粒系统的粒径表征方法提供理论依据,目的在于明确验证用粒度分布函数所作的计算。
- 第 6 部分:颗粒形状和形态的定性及定量表述。目的在于规定对颗粒形状和形态进行定性及定量表述的规则和术语。

GB/T 15445 的 6 个部分分别规定了不同的颗粒表征分析结果表述方法。

粒度分析结果的表述

第 3 部分：试验曲线的参考模型拟合

1 范围

本文件规定了在统计学框架下将试验曲线拟合为参考模型的方法，并明确了拟合后残差偏差的评估准则。该参考模型亦能作为维持产品质量的目标粒度分布依据。

本文件适用于以下参考模型的拟合过程：

- a) 正态分布(拉普拉斯-高斯分布)：适用于沉淀法、冷凝法制得的粉末或天然产物(如花粉)；
- b) 对数正态分布(高尔顿马卡利斯特分布)：适用于研磨或破碎制得的粉末；
- c) 盖茨-高登-舒兹曼分布(双对数坐标系)：适用于细颗粒分布极值分析；
- d) 罗辛-拉姆勒分布：适用于粗颗粒分布极值分析；
- e) 其他任意模型或组合模型(若采用非线性拟合法，见附录 C 的双峰分布示例)。

本文件能为粒度分布分析相关的产品质量保障或工艺优化提供重要支持。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

本文件没有需要界定的术语和定义。

4 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件。

a ：直线截距(直线方程)

b ：直线回归线的斜率(梯度，直线方程)

d' ：RRSB 分布截距参数

GGS：盖茨-高登-舒兹曼(Gates-Gaudin-Schuhmann)

LND：对数正态分布，定义见 ISO 9276-5

n ：粒径段数量

n_F ：自由度(即数据点个数 n 减去拟合模型参数的数量)

N ：实测样品中的颗粒数

\mathbf{p} ：模型参数的集合(向量形式)

q ：粒度分布频度函数

$Q(x)$ ：观测累积分布函数(粒径小于 x 的颗粒占比，取值范围 0~1)

$Q^*(x; \mathbf{p})$ ：模型估计值(基于参数 \mathbf{p} 的参考模型理论累积分布)

r ：粒度分布量的类型($r=0$ ：数量分布； $r=3$ ：体积分布或质量分布)

RRSB：罗辛-拉姆勒(Rosin-Rammler)(斯珀林和贝内特修正)(源自威布尔分布)