

液雾及颗粒的 激光测量原理

刘子超 赵云惠 著

宇航出版社

液雾及颗粒的激光测量原理

刘子超 赵云惠 著

宇航出版社

015
Dt21/33
内 容 提 要

液雾及粉尘的粒度与分布是能源与燃烧、化学反应、粉末冶金、喷雾干燥、尘埃爆炸、农药喷洒、污染与环境保护、两相流研究等许多工程技术领域十分重要的参量。

本书是论述用光学方法测量上述微粒群特性的技术专著。首先引述微粒群的基本特征和必要的光学理论基础，进而介绍激光散射和激光全息测量原理及方法。

本书可供上述有关专业的工程技术人员、研究人员参考，也可作为大专院校激光专业的教材。

液雾及颗粒的激光测量原理

刘子超 赵云惠 著

责任编辑：崔素言

宇航出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

纺织工业出版社印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：12.5 字数：290千字

1988年12月第1版第1次印刷 印数：1—1200册

ISBN 7-80034-136-4/TB·037 定价：4.00元

目 录

第一章 绪论.....	(1)
参考文献	(9)
第二章 液雾及固体颗粒的特征	(10)
2.1 概述	(10)
2.2 雾化机理	(11)
2.2.1 射流破碎	(12)
2.2.2 薄膜破碎	(14)
2.3 液雾及固体颗粒的特征.....	(15)
2.3.1 液雾及固体颗粒的尺寸分布	(15)
2.3.2 尺寸分布的数学表达式	(18)
2.3.3 液雾及固体颗粒的平均尺寸	(24)
2.3.4 模型独立分布	(36)
2.3.5 液雾及固体颗粒的空间分布	(39)
参考文献.....	(41)
第三章 粒子测量的光学基础及激光器.....	(43)
3.1 几何光学三大定律.....	(43)
3.1.1 反射定律及折射定律	(43)
3.1.2 折射率及光程	(45)
3.1.3 全反射	(47)
3.1.4 费马原理	(47)
3.1.5 光线方程	(50)
3.2 光在球面系统的成象	(53)
3.2.1 单个球面的折射	(53)

3.2.2	透镜成像	(56)
3.2.3	两薄透镜系统的成像	(60)
3.2.4	象差	(61)
3.3	光度学的一些概念	(62)
3.3.1	辐射功率	(62)
3.3.2	光通量	(63)
3.3.3	发光强度	(63)
3.3.4	亮度	(64)
3.3.5	照度	(64)
3.4	光的干涉	(66)
3.4.1	光的相干条件	(66)
3.4.2	干涉条纹可见度	(69)
3.4.3	杨氏干涉实验	(69)
3.4.4	两束平行光的干涉	(72)
3.4.5	空间相干性	(73)
3.4.6	时间相干性	(76)
3.5	光的衍射	(79)
3.5.1	惠更斯-菲涅耳原理	(79)
3.5.2	夫琅和费衍射	(84)
3.5.3	巴俾涅原理	(81)
3.5.4	菲涅耳衍射	(92)
3.6	光与物质的相互作用	(98)
3.6.1	光的吸收与色散	(99)
3.6.2	光的散射	(104)
3.6.3	光的自发辐射、受激辐射和受激吸收	(110)
3.6.4	原子辐射光谱线的线型与展宽	(115)
3.7	激光原理	(119)
3.7.1	粒子反转分布及增益系数	(120)
3.7.2	振荡的阈值条件	(122)

II

3.7.3	谐振腔的稳定条件	(124)
3.7.4	激光的横模及高斯光束	(125)
3.7.5	激光的纵模	(129)
3.7.6	激光的特点	(133)
3.8	几种激光器	(134)
3.8.1	固体激光器	(135)
3.8.2	气体激光器	(142)
3.8.3	染料激光器	(146)
	参考文献	(147)
第四章	激光散射测量粒子尺寸的原理和应用	(149)
4.1	激光散射技术测量粒子尺寸的典型装置	(149)
4.2	光的检测	(155)
4.2.1	光电检测器	(155)
4.2.2	光学混频	(158)
4.3	衍射散射法测量颗粒尺寸的基本原理	(161)
4.3.1	单个粒子散射光强分布函数	(161)
4.3.2	不同尺寸粒子群的散射光强分布函数	(166)
4.3.3	利用散射光强分布函数测量粒子尺寸的具体方法和步骤	(168)
4.3.4	散射光能分布函数及粒子尺寸分布特性的测定	(172)
4.4	激光断层法的基本原理	(177)
4.5	激光多普勒技术测量粒子尺寸的基本原理	(183)
4.5.1	多普勒效应和多普勒频移	(183)
4.5.2	干涉条纹模型	(190)
4.5.3	粒子穿过条纹区时的信号与粒子尺寸的关系	(192)
4.6	激光散射技术测量粒子尺寸的实际应用	(203)
4.6.1	光路的调整	(203)
4.6.2	粒子场浓度、环境温度对测量的影响	(205)
4.7	激光粒度仪的校验	(210)

4.7.1 粒子模型	(211)
4.7.2 激光粒度仪的精度	(217)
参考文献	(219)
第五章 测量粒子的激光全息原理	(222)
5.1 激光全息的特点	(223)
5.1.1 全息照相与普通照相的区别	(223)
5.1.2 激光全息照相的过程	(225)
5.2 衍射与傅里叶变换	(229)
5.2.1 光场的复振幅	(229)
5.2.2 菲涅耳与夫琅和费衍射近似	(235)
5.2.3 透镜的透射函数	(238)
5.2.4 傅里叶变换	(241)
5.2.5 透镜的傅里叶变换性质	(245)
5.3 全息记录及再现	(250)
5.3.1 平面波干涉的全息图	(250)
5.3.2 点源全息图及全息物象关系式	(252)
5.3.3 同轴全息	(262)
5.3.4 离轴全息	(265)
5.3.5 菲涅耳全息	(272)
5.3.6 夫琅和费全息	(273)
5.3.7 傅里叶变换全息	(278)
5.3.8 体积全息	(282)
5.4 激光全息记录材料	(285)
5.4.1 卤化银乳胶曝光及显影原理	(285)
5.4.2 卤化银乳胶的一些性能	(287)
5.4.3 卤化银乳胶的冲洗处理过程	(289)
参考文献	(290)
第六章 粒子场的全息记录、再现及数据处理	(292)
6.1 粒子场的同轴夫琅和费全息	(294)

6.1.1	粒子场的同轴夫琅和费全息记录	(295)
6.1.2	粒子场的同轴夫琅和费全息再现	(301)
6.1.3	球形粒子的同轴夫琅和费全息	(305)
6.2	粒子场的离轴夫琅和费全息	(312)
6.2.1	粒子场的离轴夫琅和费全息记录	(313)
6.2.2	粒子场的离轴夫琅和费全息再现	(316)
6.2.3	球形粒子的离轴夫琅和费全息	(322)
6.3	粒子场的象全息及其放大率	(324)
6.3.1	粒子场的同轴象全息	(325)
6.3.2	粒子场的离轴象全息	(334)
6.3.3	象全息的放大率	(339)
6.4	全息象的分辨率	(343)
6.4.1	理想全息象的分辨率	(343)
6.4.2	光源大小对分辨率的影响	(348)
6.4.3	光源的谱线宽度对分辨率的影响	(351)
6.4.4	全息图尺寸、粒子与全息图的距离以及波长对 分辨率的影响	(354)
6.4.5	粒子尺寸、形状与分辨率的关系	(357)
6.4.6	记录介质分辨能力对全息象分辨率的影响	(362)
6.5	粒子场全息的数据处理	(369)
6.5.1	人工判读方法	(370)
6.5.2	半自动数据处理方法	(372)
6.5.3	全自动数据处理方法	(379)
6.6	多脉冲粒子场全息及显微照相法	(384)
6.6.1	多脉冲粒子场全息	(384)
6.6.2	多脉冲激光显微照相方法	(387)
	参考文献	(390)

第一章 绪 论

在许多工程技术及研究工作中，人们会遇到液体喷雾及固体颗粒的特征和运动的问题。在能源及燃烧工程技术领域里，液体燃料雾化质量的优劣，直接影响燃烧性能，如燃料的蒸发、点火的能量、火焰的长度、火焰的稳定性、燃烧效率以及排放的污染物和所形成的未燃的碳氢物等等。所谓液体燃料的雾化质量，是由下面的一些特征参数来表示的：即雾滴群的尺寸分布，平均尺寸，空间中雾滴数量的分布、容积分布及质量分布，雾滴的穿透性以及喷雾锥角等等。雾滴尺寸越大，燃料蒸发所需的时间就越长。在燃气轮机燃烧室中，液体燃料雾滴直径一般在 $10 \sim 400 \mu\text{m}$ 内，而平均尺寸则要求约在 $50 \sim 55 \mu\text{m}$ 之间。为了更有效地组织好燃烧，不仅要控制雾滴的平均尺寸在要求的范围内，还要控制经喷雾雾化后液滴的尺寸分布特性。工业用的煤粉的燃烧，也遇到类似的问题。煤粉颗粒的平均尺寸一般约在 $50 \mu\text{m}$ 左右。煤粉颗粒以及灰分粒子的尺寸，与灰分的沉积结渣之间的关系是一个重要的问题。采用煤油浆或煤水浆作为燃料时，煤浆的制备要求煤粉颗粒尺寸在某一范围内。例如，通常电力厂要求煤油浆中煤粉颗粒尺寸80%小于 $76 \mu\text{m}$ 。煤浆通过喷雾雾化后，要求液滴直径小于 $300 \mu\text{m}$ 。雾化质量的降低，会导致固体碳未燃尽率升高，甚至产生积渣。燃煤的燃气轮机中，燃烧后的灰分颗粒会使涡轮叶片产生剥蚀损伤。大气中的颗粒被吸入涡轮喷气发动机中，会造成压气轮及涡轮叶片

的剥蚀。颗粒的尺寸以及运动轨迹与损伤程度的关系是人们所关心的。固体火箭推进剂中，往往加进铝粉以提高性能。铝粉燃烧后产生的 Al_2O_3 凝聚成小的固体颗粒与燃气一同从喷管排出。这些固体颗粒的尺寸、浓度等等参数，对估计推力喷管中的两相流效应是很重要的。

在其它工业方面（如化工用的流化床技术），颗粒尺寸与过滤作用及化学反应等等有密切关系。在粉末冶金中，金属颗粒的生产以及其烧结质量，都与金属颗粒尺寸有关。喷雾干燥技术中，喷雾液滴的尺寸大小直接影响到干燥后固体颗粒的尺寸。喷雾冷却技术中，雾滴的尺寸影响冷却效果。粉末颗粒尺寸对其它粉末体的性能，如水泥的性能、药物的效力以及食品的味道等等，都有很大的影响。在农药的喷洒和灭火剂的喷洒中，其滴液的大小也直接影响它们的效力。

测定和控制工业排往大气中的污染物对环境保护是十分重要的。污染物颗粒的大小对人体的危害程度不同，尺寸在 $5\sim 10\mu\text{m}$ 的颗粒容易残留在人体的肺部，危害最大。引起工业事故的尘埃爆炸，与尘埃的尺寸及浓度等关系很大。

在涉及到两相流的问题中，液滴或固体颗粒在气流中的滑移速度是一个重要参数。然而，粒子的速度又与粒子的尺寸密切相关。颗粒或液滴在气流中的速度弛豫时间、温度弛豫时间与颗粒尺寸的平方成正比。例如，空气中直径为 $10\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ 的水滴的速度弛豫时间，分别为 $3\times 10^{-4}\text{s}$ 和 $3\times 10^{-2}\text{s}$ 。横向喷入气流中，颗粒的穿透深度又是与颗粒尺寸的平方大体成正比的。粒子在流场中的容积相对分数和质量相对分数，是两相流热力学性质中很重要的参数。煤粉或其它颗粒的管道气力输送技术、颗粒的旋风分离器的设计、两相

流喷管流动特性的研究等，都离不开对颗粒尺寸分布特征以及运动速度和轨迹等参数的了解。

由此可见，大量工程技术及研究领域，测量液滴及固体颗粒的特性及其运动是十分必要的。为了方便，我们把液滴或固体颗粒统称为粒子。实际上，从测量技术的角度来看，它们之间的区别不大。粒子群的特征可以理解为粒子的尺寸分布、粒子的平均尺寸、粒子在流场中的空间分布（包括数量、容积浓度和质量浓度分布）、粒子的速度及加速度（直线运动或旋转运动）、运动轨迹、粒子的形状，以及粒子群在运动中的变化（如破碎、凝聚、燃烧）等等。准确地测量这些参数不是很容易的。这是因为，粒子数量多，尺寸细小，而且尺寸分布在一定范围之内。表1-1列举了一些典

表1-1 一些典型粒子的尺寸范围

粒 子	尺寸范围 (μm)
液体燃料喷雾（燃气轮机）	10~400
雾化干燥的喷雾	10~1000
煤油浆的雾化	10~300
油烟	0.03~1
粉煤	3~600
煤烟	1~100
飞灰	1~200
杀虫剂	6~10
雨滴	600~6000

型的粒子尺寸范围。粒子的形状是各式各样的。最简单的形状是球形，只有尺寸比较小的液滴呈现球状，而固体颗粒的形状就很不规则，例如多角状、片状、针状、粒状等等。粒子的形状影响粒子在气流中的运动。形状的多样化，使得粒

子的大小只能用某些具有统计意义的平均尺寸来表征。单个粒子可以有很多统计尺寸，只有测量大量粒子，才能得到平均的统计尺寸(这样的尺寸才有意义)。根据粒子的体积、表面积和投影面积，以及投影外形的周长等，可以定义各种意义下的直径，例如等效体积直径，等效面积直径，体积面积直径，投影面积等效直径，等效周长直径等等。

由于粒子的数量很大，形状又是各式各样，且尺寸大小分布在某一范围内，故粒子尺寸只能通过一定统计意义下的直径表征。要想得到一定的测量精度，测量粒子的数量就不能太少。玻文 (Bowen) 和戴维斯 (Davies) ^[1] 曾作过如下估计：当测量粒子的体积、面积、平均直径时，在具有95%的置信度下，被测量粒子的数量与测量精度的关系如表1-2所示。

表1-2 测量准确度与测量粒子数量的关系

测量粒子数量	测量准确度 (%)
500	± 17
1400	± 10
5500	± 5
35000	± 2

测量粒子的方法很多。由于要测量的粒子群特征参数很多，粒子数量大且尺寸分布宽，具体的实验和工作条件又很不相同，故很难说哪一种方法是最完善的。只能根据要求和具体情况进行选择。例如在粉末工艺或测定大气中的污染物颗粒时，常常采用取样的办法，对颗粒试样进行粒子尺寸分布等测量。其方法有：光学法或电子显微镜法，惯性法，过滤

法，静电集尘法，电感应法，热沉淀法，光散射法，放射线方法，全息摄影法，等等。如何通过取样测量得到粒子群整体的特征，是个重要问题。很多实际情况是不宜采用取样办法的。例如流场中的粒子群，不但要测量其尺寸分布，而且还要测量其空间分布、速度等等。应该采取不干扰流场及粒子场的方法，直接测量运动中的粒子群特征。在不干扰测量对象的方法中，用得最广泛的是光学方法。射线吸收方法也是一种不干扰场的测量手段之一，可采用 α 、 β 或 γ 射线，或 x 射线，甚至中子射线，也可以采用可见光线。但这种方法并没有得到广泛使用。放射性带来的问题，是工作不方便，更重要的是，粒子对射线的吸收系数与粒子浓度以及粒子尺寸之间的关系比较复杂，而且与粒子的物质性质有关。

表1-3 一些主要的激光测量粒子的方法与测量的范围

分 类	主要方法	所测粒子尺寸
激光散射法	瑞利 (Rayleigh) 散射法 米 (Mie) 散射法 夫琅和费 (Fraunhofer) 衍射法 干涉法	$<0.05\mu\text{m}$ $<10\mu\text{m}$ $1\sim1000\mu\text{m}$ $3\mu\text{m}\sim\text{mm}$
激光照相法	全息摄影法 显微照相法	$2\mu\text{m}\sim\text{mm}$ $5\mu\text{m}\sim\text{mm}$

光学方法之所以用得最广泛，除了不干扰、不接触流场和粒子场外，还具有测量的粒子尺寸范围宽，光电转换响应时间短，分辨能力较高的优点。光学方法由于采用激光这种强相干光源，从而得到很大的发展。在数据处理方面，可采用电子计算机。因此，激光和计算机相结合，成为现代光学方法的特点。根据激光与粒子的相互作用，以及测量的原理，可

以把典型的激光测量粒子的方法分为两大类：一是激光散射方法，另一是激光照相法。表1-3列举了一些主要的激光方法及其所测粒子尺寸范围。可以看到，可测量粒子的尺寸范围是很宽的，从 μm 到 mm 数量级。这对大多数液雾及固体颗粒的测量来说是很合适的。

光射到粒子时，会引起粒子对光的吸收与散射。当粒子尺寸比波长大得多时，散射的光又可分为粒子对光的反射、经折射后透射及衍射三部分。衍射的光集中在入射光附近不大的立体角内，其它部分的光则散射到各个方向。玻伦(Bohren)与霍夫曼(Huffman)^[2]对可见光射到水滴的情况进行了计算，结果表明，粒子反射光只占散射光的6.6%，而通过水滴一次透射的光占88%。由于水滴对可见光的吸收很小，故绝大部分光从各个方向散射出去。散射光强随散射角的分布情况，包含着粒子尺寸的信息，通过测量光强的角分布或光能随立体角的分布，就可算出粒子的尺寸分布。

瑞利散射光强与粒子体积的平方成正比，但这只适用于粒子尺寸小于 $0.05\mu\text{m}$ 的情况。如果粒子折射率与周围流场介质的折射率相差不大，这个关系的适用性就可扩大到 $4\mu\text{m}$ 。这对大多数粒子群还是不够的。米散射光强的角分布与粒子尺寸的关系很复杂，必须通过计算机来计算。然而米散射理论仅适用于尺寸小于 $10\mu\text{m}$ 的粒子，对大多数情况下的液体喷雾及固体颗粒也不实用。

粒子的夫琅和费衍射光强与粒子在光入射方向的投影面积成正比（或与粒子直径平方成正比）。它的衍射图样分布宽度与粒子尺寸直接相关，包含着粒子尺寸的信息。在接收屏上接收其衍射光强的径向分布或衍射光能的立体角分布，就可以得到粒子尺寸分布的信息。这种衍射方法已广泛应用

于液体喷雾及固体颗粒的尺寸分布及平均尺寸的测量中。并且已有商业产品，使用方便，其数据由微机实时处理。当粒子形状偏离球形很多时，测量的误差就比较大，因为这种方法是建立在球形粒子衍射图样的模型上的。同时，衍射法接收的是入射光柱内全部粒子的衍射光，因而测量不到空间某点的粒子尺寸分布。采用断层技术的激光散射法，可以得到空间某点的粒子尺寸分布。

如果采用两束相干光照射粒子，接收在某角度的散射光强，就可以得到运动粒子散射光的多普勒 (Doppler) 频移，以及干涉条纹的可见度 (或多普勒信号振幅的调制度)。前者包含了粒子速度的信息，后者包含了粒子尺寸的信息。干涉法的最大优点是能够同时测量粒子的速度及尺寸，这对大多粒子场的研究是很重要的。由于两束相干光的干涉条纹间隔可以调节，所以干涉法能够测量比较宽尺寸范围的粒子群。由表1-3可知，它比夫琅和费衍射法可测的范围要宽得多。这种方法的商业仪器是在激光多普勒测速仪的基础上发展起来的。由于光学系统及数据处理要求高，它的价格比较贵。

采用多脉冲调Q选模的激光，摄下运动中的粒子场，再经再现过程，就可以得到三维粒子场的象。这就是全息摄影方法。再现得到的粒子场象，就好象在某时刻把粒子场“冻结”下来。只要拍摄了全息图，在任何时候都可以进行粒子的测量。全息摄影的景深大，这是一个很重要的特点。因此通过一次摄影，就能把整个粒子场体积内的粒子记录下来。这是其它光学方法办不到的。干涉法是逐点进行测量。夫琅和费衍射法是逐线进行测量，为测量整个粒子场，需要在不同时刻内进行多次测量，仅当被测的粒子场为稳态时，这

种测量才在统计意义下反映真实的粒子分布，而且工作量之大是显而易见的。全息摄影法一个最重要的特点是拍摄得到的粒子场象是三维的，这是其他光学方法不能做到的。于是粒子在空间中的分布可以由一次拍摄得到。采用多脉冲的全息激光光源，就能一次得到粒子的速度及加速度矢量（直线或旋转运动）。全息摄影又一个特点是记录的信息量非常大，在一张全息图中，包括有粒子的尺寸分布，空间分布，速度和加速度分布，以及粒子在运动中的变化（如雾化或燃烧过程）等等信息。这一方法的最大困难是数据提取和处理。幸好，现在已经可以采用计算机数字图象处理办法来解决。

多脉冲显微照相虽然与普通照相没有实质性的区别，但由于采用多脉冲调Q激光光源，故可以拍摄快速运动的粒子群。显微照相方法简单，容易实现。显微照相的景深很小，一次照相只能记录下一薄层体积内的粒子。为测量整个粒子场，就要进行多次拍摄。光源的多脉冲特点，使显微照相能够获得粒子二维速度的数据，同时也可以拍摄多次脉冲时间内粒子运动过程的变化。这两种方法的数据处理问题，与全息摄影法一样，也由计算机数字图象处理系统来完成。

本书的目的不在于包罗万象地介绍所有测量粒子的各种方法，而是介绍使用比较广泛而又有发展前途的激光方法。本书第二章介绍描述粒子群尺寸分布的各种数学模型，以及粒子的各种统计平均尺寸的定义和意义。此外还简略地介绍了液体雾化的机理。第三章介绍粒子激光测量技术中涉及到的光学基础以及激光原理。第四章介绍激光散射方法，包括衍射法和干涉法（多普勒技术），同时还介绍了断层法的原理。第五章及第六章介绍激光全息摄影方法和显微照相技术。这一章重点研究和讨论了各种粒子场全息技术，以及粒

子场全息的放大率和分辨率，同时还扼要地介绍了全息的数据处理方法，最后，研究了多脉冲激光全息及显微照相测量粒子速度及加速度的技术。本书在介绍基本概念和原理时，用到了一些必要的数学知识，这对于学过大学高等数学的读者来说是不难接受的。对于波动光学及激光不大熟悉的读者，第三章的内容将会有所帮助。本书是作者近几年来在北京航空学院多次为航空工业部举办的短训班以及为研究生讲课的讲义基础上写成的。作者希望它对不同领域中（例如能源及燃烧工程，动力工程，两相流或多相流研究，石油，化工，冶金，环境保护，建材，医药，食品工业等）从事液体喷雾及固体颗粒测量工作的工程技术人员和科研人员，大专院校有关专业的教师、研究生和高年级学生，在了解和掌握激光测量粒子方法方面能有所帮助。

参 考 文 献

- [1] I.G. Bowen, G.P. Davies, "Particle size distribution and the estimation of Sauter mean diameter", *Shell Technical Note, ICT 28* (1951).
- [2] C.F. Bohren, D.R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, John Wiley & Sons, New York, 1983.