

扁椭球形雨滴和冰粒后向散射 实验与理论研究*

王庆安

(南京大学大气科学系, 南京 210008)

刘黎平

(中国科学院高原大气物理研究所, 兰州 730000)

巢增明

(中国航天工业总公司第207研究所, 北京 100854)

张尧培

(南京大学信息物理系, 南京 210008)

摘 要 本文介绍了对扁椭球形雨滴和冰(雪)粒散射能力的实验模拟和测量技术, 报告了一个系列扁水(冰)椭球后向散射截面的实验测量结果; 并用扩张边界条件法(EBCM)计算出相应的理论值, 用 Mie 公式计算出等容积球形后向散射截面。将实验结果与理论计算作了综合对比分析, 得到了若干有用的结论。

关键词 扁水(冰)椭球 微波 RCS 测量系统 后向散射截面 扩张边界条件法

1 引言

实验研究指出^[1], 等效半径小于 $140\mu\text{m}$ 的小水滴可以认为是球形。从等效半径 $140\mu\text{m}$ 起, 水滴有了轻微的变形, 变形成为扁椭球, 随着尺寸的变大, 变形度也逐渐加大。摄影照片证明, 当等效半径大于 0.5mm 后, 下落水滴明显地成为扁椭球形状。另外相当大量的冰雹可近似用旋转扁椭球体来处理。因此, 轴对称椭球形, 尤其扁椭球形水滴和冰粒对电磁波散射特性的研究是一个重要的问题。这方面的实验研究在我国尚属空白, 国外有了一些报道^[2,3]。为此我们利用国内较先进的微波测量系统进行此项研究, 并选用 EBCM 法作理论对比计算。现将实验技术与结果、实验与理论计算结果的对比分析作报道。

2 测量样本

在散射场测量系统装置上摆放水椭球、冰椭球进行短暂时间的测量是很难作到的。也就是说, 要作到完全真实一致是极其困难的事情, 只有采用逼真度很高的模拟样品来进行。本研究选择了下述方法制作测量样本。

扁椭球水滴样本。在玻璃制品加工厂精细加工成尺寸、椭率和曲度相当逼真的扁椭球状极薄的玻璃壳膜, 盛上水(用极细针筒注水)即成扁水椭球, 见图 1。测量时, 先测空壳膜的散射场量, 作为背景场加以扣除, 即可得到扁水椭球的散射场量。

1995-08-02 收到, 1996-01-01 收到再改稿

* 国家自然科学基金(49275236)资助项目

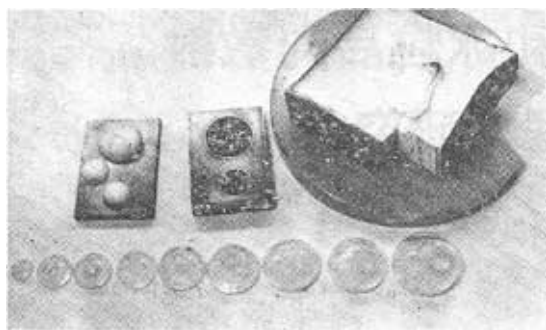


图 1 测量样本的制作

下排：扁冰椭圆玻壳模（半只）（整只系列照片略）；
上排：右—配方材料（已凝固），中—扁冰椭圆金属壳模（半只），左—扁冰椭圆代用品（金属模板上，半只）

料配方试验发现，选用不饱和聚脂（196^平）、钛白粉（ TiO_2 ）、促进剂（羧酸钴）、固化剂（过氧化甲乙铜）等，按一定重量比例的配方混合配出代用材料的介电常数 $\varepsilon = 3.322 - 0.060i$ ，与冰的 ε （约为 $3.17 - 0.004i$ ）相近。这与 Allan^[2]的实验十分一致。从重量配比由 8%~15% 作了一系列试验，发现 12% 的重量配比能使 ε 的实部在 3.1 上下，在个位小数上的轻度不稳定是与各种配料的纯度及 ε 测试的精确度有关。如果配方和测试特别精细，能配出相当精确的替代冰的材料。 ε 的测量是在微波波导中进行的。

扁冰椭圆水滴和冰粒的轴比（短半轴/长半轴）的选择：考虑雨滴形状与尺度间有以下关系^[1]：

$$\frac{\text{短半轴}}{\text{长半轴}} = \begin{cases} 1.0, & 0 < D_e \leq 0.028 \\ \left(1 - \frac{9}{32} \frac{D_e \rho V_T^2}{\mu}\right)^{1/2}, & 0.028 < D_e \leq 0.1 \\ 1.03 - 0.62 D_e, & 0.1 < D_e \leq 1.0 \end{cases}$$

D_e 为与椭圆同体积的球形水滴的直径(cm)； ρ 是饱和空气的水汽密度； μ 是水的表面张力系数； V_T 为雨滴的下落末速度。雨滴的 D_e 范围取为 0.01~1 cm，则短半轴/长半轴取值范围为 0.41~1.0。

考虑旋转椭圆冰雹的形状与尺度间的关系可采用：

$$\frac{\text{短半轴}}{\text{长半轴}} = \begin{cases} 1.0 - 0.2a, & 0 < a \leq 0.5 \text{ cm } (a \text{ 指长半轴}) \\ 1.0 - 0.22a, & 0.5 < a \leq 2 \text{ cm} \end{cases}$$

若 a 取到 2 cm，则轴比为 0.56，说明冰扁椭圆轴比可取为 0.5 以上。冰雹的 D_e 值一般为 0.01~4 cm。基于以上考虑，本实验对扁椭圆水滴和冰粒的轴比取为 0.7 左右。

3 后向散射微波测试系统

选用了国内两种精密微波测量系统（即微波暗室）。

扁冰椭圆冰滴样本。曾试验用扁壳膜注水冻结法成型，脱模成纯扁冰椭圆球迅速上机测量。因微波系统暗室内温度总是高于 0°C ，在频扫和角度扫描的短时间内(几十秒)，纯冰椭圆球会溶化，难以真实地进行。为此，采用化学物质，配制成有关物理常数与冰相近的材料，再用紫铜电极——电火花机床加工法，按预定尺寸和扁率精密加工出金属扁椭圆球壳模，见图 1。将配制的液糊状代用材料注入金属壳模中，立即放入烘箱，几小时后凝固成形。脱模即成完好的冰椭圆球代用品，见图 1。代用品的介电常数应与冰相同，至少相近。经过多种选

3.1 电磁散射特性测量实验室 RCS 测量系统

这是中国航天工业总公司第 207 研究所的精密实验室, 1989 年底建成并通过部级鉴定。主要测试装置是高性能全波段复量雷达散射截面(RCS)测量系统, 其组成框图见图 2。

此系统采用了特殊的暗室材料铺设方法, 低散射目标金属支架及先进的数据处理技术, 包括背景矢量相减技术及软件距离门技术, 降低了环境背景, 具有很高的低散射截面测试性能。目标的姿态对准采用激光与电波对准相结合的方法。其主要技术指标达到 80 年代中期国际先进水平。

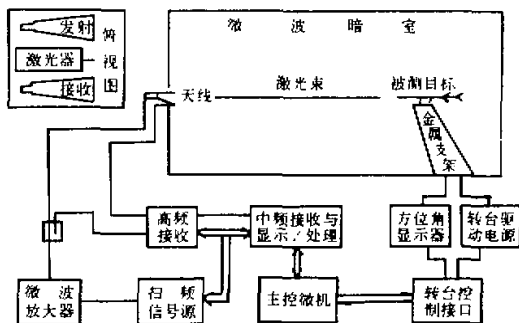


图 2 中国航天工业总公司微波测量系统示意框图

此系统的目标物必须是整体, 加工的壳模则是扁椭球整体(照片略)。在此系统上作了一个批量的扁椭球的后向散射能力——RCS 值的测量。

3.2 双站雷达散射截面(RCS)测量系统^[4]

此系统是南京大学信息物理系于 80 年代后期建成并投入使用, 简称南大系统。

其互易测量技术是发射天线和接收天线(探针)固定不动, 置于转台上的被测目标物自动绕接收天线转动。旋转一周, 可测得目标物的散射幅相特性。

由于是镜像法技术, 只需使用半个扁椭球作目标物, 测量结果就是整个扁椭球的情况。所以制造的壳模是半只模。

4 测试结果

4.1 中国航天工业总公司系统的测试结果

此系统的性能强, 测试精确度相当高。其 RCS 值是指 $RCS = 10 \log \sigma \text{ (dBsm)}$, 测试条件为:

雷达工作频率(即入射波频率): 8~10.75 GHz (扫频), 中心频率 9.375 GHz; 水平极化波(HH)及垂直极化波(VV)两种;

入射波方向与旋转轴(扁椭球粒子的短轴)夹角为 90° , 与扁椭球粒子的长轴(俗取名为 Z 轴)的夹角(ζ)为 0° 。

4.1.1 扁水椭球

共 10 个椭球, 系列序号为 0~9(见表 1)。其 RCS 值随频率的变化曲线见图 3。

选取中心工作频率 $f = 9.375 \text{ GHz}$ (相应 $\lambda = 3.2 \text{ cm}$), 由相应的 RCS 值换算出扁水椭球后向散射截面 $\sigma_{hh(HH)}$ 的数值见表 2。

4.1.2 扁冰椭球(代用材料)

因模具、配方加工费用昂贵, 先作了两只测试。其 RCS 值随频率的变化见图 3。其后向 σ_h 及相应 σ_{Mie} 值见表 3。

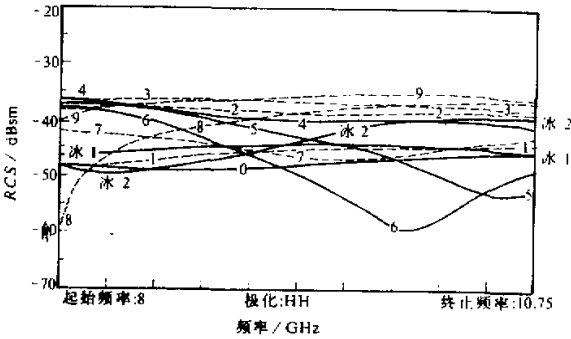


图3 散射体的 RCS 值(1994 年 11 月)

表 1 扁水椭球系列尺寸

椭球序号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
短轴长/mm	4.4	4.6	6.9	8.2	9.3	11.8	11.8	13.0	15.0	15.6
长轴长/mm	6.4	6.9	9.8	11.7	12.7	15.8	16.9	18.5	21.0	22.7
轴比	0.69	0.66	0.70	0.70	0.73	0.75	0.70	0.70	0.71	0.687
焦距 l /mm	4.65	5.14	7.06	8.35	8.65	10.51	12.10	13.16	14.70	16.49
等容球直径 D_e /mm	5.0	5.2	7.6	9.2	10.4	13.0	13.4	14.6	16.8	17.6

表 2 扁水椭球后向散射截面测量值 σ_0 (对 HH 波)

序号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RCS 值/dBsm	-47.71	-45.31	-38.89	-36.80	-39.87	-42.74	-49.92	-46.48	-38.75	-36.05
σ_0 测量值/ cm^2	0.169	0.294	1.291	2.089	1.030	0.532	0.102	0.225	1.334	2.483
σ_{Mie} 计算值/ cm^2	$T=20^\circ\text{C}$	0.095	0.116	0.781	1.662	2.108	2.066	1.901	1.278	0.378
	$T=10^\circ\text{C}$	0.090	0.112	0.782	1.662	2.145	2.067	1.906	1.281	0.363
	$T=0^\circ\text{C}$	0.084	0.107	0.788	1.655	2.159	2.053	1.891	1.263	0.339

注: σ_{Mie} 是对等容球 Mie 公式计算的后向散射截面^[3]。

表 3 扁冰椭球后向散射截面测量值 σ_0 (对 HH 波)

椭球序号	1 (小)		2 (大)	
短轴长/mm	8.4		12.6	
长轴长/mm	11.9		17.8	
轴比	0.70		0.70	
焦距 l /mm	8.43		12.57	
等容球直径 D_e /mm	9.4		14.1	
RCS 测量值/dBsm	-44.58 (9.375 GHz)		-43.21 (9.375 GHz)	
σ_0 测量值/ cm^2	0.348		0.478	
σ_{Mie} 计算值/ cm^2	$T=0^\circ\text{C}$		0.229	
	$T=-10^\circ\text{C}$		0.230	
	$T=-20^\circ\text{C}$		0.230	

4.1.3 两种扁椭球对水平偏振(HH)与垂直偏振(VV)入射波的 σ_b 测量值之对比

两种偏振波时,RCS值随频率的变化曲线见图4。两种偏振波时,后向散射截面的差异见表4。

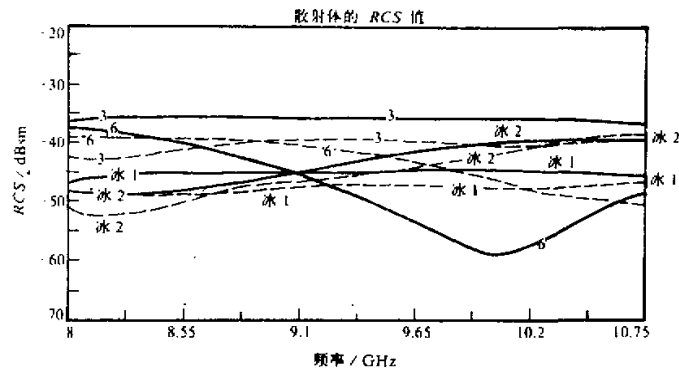


图4 两种偏振波 RCS 值随频率的变化
扁水椭球(3、6号),扁冰椭球(1、2号)
(实线:HH波,虚线:VV波)

表4 两种偏振波粒子后向散射能力比较

粒 子 序 号	扁水椭球		扁冰椭球	
	3	6	1 (小)	3 (大)
$\sigma_b(\text{HH}) / \text{cm}^2$	2.089	0.102	0.348	0.478
$\sigma_b(\text{VV}) / \text{cm}^2$	1.000	0.759	0.186	0.309
$\Delta\sigma_b / \text{cm}^2$	1.089	-0.657	0.162	0.169

4.1.4 系统的准确性和 RCS 值的最大误差

系统的准确性用金属材料标球作了检验,一个 RCS 值为-25 dBsm 的金属球,测量的最大误差小于 ± 0.5 dB。最大误差与暗室的背景状况有关,按误差矢量合成法确定。测量时,该暗室背景低于-65 dBsm,被测目标物的 RCS 值比背景量高出越多,其最大误差就越小。如 RCS 值为-55 dBsm,比背景高 10 dB,其最大误差为 ± 3 dB;若为-45 dBsm,比背景高 20 dB,其最大误差为 ± 1 dB。本测量对于扁水椭球(见表 2),最大误差均小于 ± 2 dB,平均约为 ± 1 dB;而对于扁冰椭球(见表 3),最大误差 $\leq \pm 1$ dB。

4.2 南大系统的测试结果

测试条件为:雷达工作频率 9368.5 MHz,垂直极化波;半个扁椭球是垂直放置,短半轴为旋转轴,垂直向上;入射波方向与旋转轴夹角为 90° 。

此系统的分辨力较中国航天工业总公司系统低,故所测样本的尺寸均较大。此系统特色是能给出各向散射的幅相散射特性曲线($\sigma \sim$ 双站角 θ),因其数据处理计算机终端出毛病,一直未能修复。为了利用其特色,我们手工操作,采样计算(5° 一个采样点,共 36 个点),用滑动平均平滑法绘制散射截面随 θ 的变化曲线。因采数点数明显减

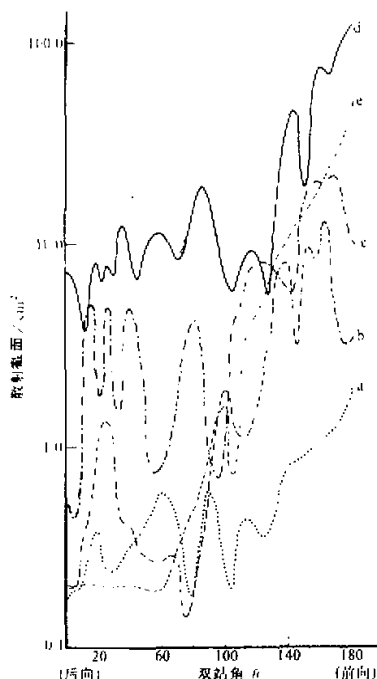


图5 散射截面方向图

(a) 扁冰椭球, 轴比 0.79, 短轴长: 12.8 mm, 长轴长: 16.2 mm; (b) 扁冰椭球, 轴比 0.89, 短轴长: 18.6 mm, 长轴长: 20.9 mm; (c) 扁冰椭球, 轴比 0.82, 短轴长: 19.8 mm, 长轴长: 24.1 mm; (d) 扁冰椭球, 轴比 0.87, 短轴长: 26.0 mm, 长轴长: 30.0 mm; (e) 扁冰椭球(代用品), 轴比 0.79, 短轴长: 16.4 mm, 长轴长: 20.8 mm

本实验的工作波长为 3.2 cm, 制作的散射体尺寸已较大的跨越谐振区, 且散射体是轴对称, 符合 EBCM 法条件, 故选用此法。此法理论及公式见文献[7,8]。

用 EBCM 法对扁冰椭球和扁冰椭球(对应中国航天工业总公司测量的样品)计算出后向散射截面 $\sigma_{\text{H(EBCM)}}$, 数值见表 5、表 6。

表 5 扁冰椭球后向散射截面理论值 $\sigma_{\text{H(EBCM)}}$

序 号		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
等效直径 D_e / mm		5.0	5.2	7.6	9.2	10.4	13.0	13.4	14.6	16.8	17.6	
$\sigma_{\text{H(EBCM)}} / \text{cm}^2$	$T = 0^\circ\text{C}$	HH 波	0.404	0.601	1.266	0.956	0.768	0.132	0.017	2.01×10^{-5}	4.79×10^{-1}	3.6×10
		VV 波	0.179	0.244	0.951	1.038	0.963	0.210	0.013	6.33×10^{-2}	0.495	0.791
	$T = 10^\circ\text{C}$	HH 波	0.414	0.603	1.257	0.922	0.740	0.124	0.016	5.71×10^{-4}	9.32×10^{-4}	1.88×10^{-1}
		VV 波	0.182	0.245	0.943	1.036	0.959	0.203	0.010	8.02×10^{-2}	0.468	0.761
	$T = 20^\circ\text{C}$	HH 波	0.402	0.599	1.265	0.955	0.768	0.132	0.016	1.45×10^{-4}	4.08×10^{-3}	3.16×10^{-1}
		VV 波	0.179	0.243	0.950	1.038	0.961	0.207	0.010	7.91×10^{-2}	0.480	0.769

少, 给出的曲线比较粗糙, 仅作参考。

此系统测出的几种较大尺寸扁冰椭球散射截面随 θ 的变化曲线见图 5。大的扁冰椭球散射截面随 θ 的变化曲线见图 5c。

5 理论计算

就理论研究而言, 国际上有相当多学者作了大量工作; 国内也有多名学者, 如蔡启铭、王宝瑞等, 以不同的方法和角度对椭球形粒子的散射特性作了计算研究。非球形粒子散射的理论计算方法有多种, 各自适用的条件不一, 必须选用。

考虑扰动法(Perturbation techniques)对于轻度的非球形比较有效。分离变量法^[6]适用于谐振区散射问题的求解, 就粒子的电子尺度而言, 其适用尺度范围有一定局限性。而 Barber 等在 Waterman P. C. 的积分方程法基础上提出的扩张边界条件法(Extended Boundary Condition Method, 以下简称 EBCM 法)^[7]对于尺度从 Rayleigh 区到几何光学区的任意尺寸和形状的散射问题均较适合。在对介质散射体处理时, Waterman 使用矢量 Huygen 原理, 而 EBCM 法使用了 Schelkunoff 等效理论, 效果好些。EBCM 法普适性较强。

表 6 扁冰椭球(及代用品)后向散射截面理论值 σ_{bEBCM}

序 号		冰 1 (小)	冰 2 (大)	代用品 1 (小)	代用品 2 (大)
$\sigma_{bEBCM} / \text{cm}^2$	HH 波	0.181	9.51×10^{-2}	0.165	2.98×10^{-1}
	VV 波	0.140	7.47×10^{-4}	0.134	8.65×10^{-2}

注：实际冰与代用品的计算值有差异，球大时，差异大些(但本身数值很小)，这是折射指数有差异所致。

计算使用的参数：

入射波长 3.2 cm；波の入射角：入射波的传播方向与扁椭球自转轴的夹角为 90°。

水的复折射指数($m = n - jk$) (对于 $\lambda = 3.2 \text{ cm}$)

0°C	$n = 7.25$	$k = 2.68$
10°C	$n = 7.81$	$k = 2.42$
20°C	$n = 8.124$	$k = 1.972$

冰的复折射指数($m = n - jk$) (对于 $\lambda = 3.2 \text{ cm}$)

冰(0°C)	$n = 1.78$	$k = 0.0024$
代用材料	$n = 1.82$	$k = 0.0024$

为了对实验结果作对比分析，精确计算出其等容积球形体的散射能力，也是一个很好的参照。Mie 理论是对球形体散射的经典计算模式，作者也对 Mie 理论作了实验验证^[5]，故本文算出 σ_{Mie} 列于表 2、表 3 中。为了检查实验数据的可靠性，可用已发表文献中的数据作对比。Oguchi 对大气中水凝物的散射研究作了较全面的回顾和评述^[9]，他强调和引用了 Warner 等^[10]的结果，Warner 用 Waterman 的扩张边界条件法计算了扁水椭球的归一化后向散射截面。扁水椭球的尺寸中，只有等容球直径为 5.8mm 的一种与本实验的尺寸相近。从 Warner 给的一数据图中，可换算出这种尺寸的扁水椭球(轴比 = 0.55，温度 $T = 10^\circ\text{C}$)对 9.4 GHz 微波的后向散射截面为

$$\sigma_{b(HH)} = 0.333 \text{ cm}^2, \quad \sigma_{b(VV)} = 0.083 \text{ cm}^2$$

以及轴比 = 0.7，等容直径为 5.8 mm 的扁水椭球对 5.6 GHz 电磁波的后向散射截面为

$$\sigma_{b(HH)} = 0.035 \text{ cm}^2.$$

将本实验表 2 中 0 号和 1 号样品的 $\sigma_{b(HH)}$ 来比较，可见与 Warner 的数值相近。由于两者参数不完全一样，其结果也不可能完全相同。仅此，就可以说明中国航天工业总公司系统的实验数据是可靠的。

6 结论

对表 2~6 作综合对比分析，可得出以下几点结论：

(1) 扁椭球形雨滴和冰粒后向散射截面 σ_b 的量级大小(以 D_e 为粒子大小的表征)；

(i) 综合实验结果和理论计算值，对于 3.2 cm 水平偏振波， D_e 为 mm 量级到 2 cm，轴比 0.7 左右的扁椭球形雨滴，其 $\sigma_{b(HH)}$ 的量级为 $10^{-1} \sim 2 \times 10^0 \text{ cm}^2$ 。而对于垂直偏振波，从 3 及 6 号两个的实验值与 σ_{bEBCM} 值看，这类尺寸上下的扁水椭球(轴比 0.7 左右)的 $\sigma_{b(VV)}$ 量级落在 $10^{-1} \sim 2 \times 10^0 \text{ cm}^2$ 区间内，可能适当偏小些。

(ii) D_e 在 1.5 cm 以下的扁冰椭球, 其 σ_h 的量级约在 $5 \times 10^{-1} \text{ cm}^2$ 以下。

(iii) 对于扁水椭球, 除小尺寸 0 和 1 号外, 基本上实验测量值 σ_h 均高于理论值 $\sigma_{h(\text{EBCM})}$; 对于扁冰椭球更是如此。

究竟实验值和理论值那个更接近真值? 有待今后再作实验和引入其他理论法的计算来分析。但从我们掌握实验各步的严格程度及测试系统的高性能来看, 所测得的数据应受到重视。另外实验值与理论计算值无量级性差异, 也反证了 EBCM 法正确可用。是否 EBCM 法适当低估了实际散射能力, 值得探讨。

(2) 扁水(冰)椭球, 其后向散射能力(σ_h)较其同体积球形体的后向散射能力(σ_{Mie})相差比较大。对于 D_e 为 mm 到 cm 量级的扁水椭球, 尺寸小的和尺寸大的粒子的实验值 σ_h 比相应的 σ_{Mie} 大得多; 而在中间尺寸处, 其 σ_h 小于相应的 σ_{Mie} 。另外理论值 $\sigma_{h(\text{EBCM})}$ 与 σ_{Mie} 也相差较大。这种实际数据说明, 在气象雷达方程中, 对于较大的雨滴和冰雹的散射问题, 用 Mie 理论处理十分粗糙, 应引入扁椭球形散射算法。本实验也证实了 Atlas^[1] 的部分看法。其实验研究指出, 扁冰椭球较其等容积球在后向散射能力上有差异; 对不同偏振态入射波, 扁椭球不同尺寸及相对入射波的不同摆放法, 两者差异程度不一样, 有时成正差异, 有时成负差异。

(3) 两种偏振波下扁椭球后向散射能力的差异

扁冰椭球对水平偏振波的后向散射截面 $\sigma_{h(\text{HH})}$ 高于对垂直偏振波的 $\sigma_{h(\text{VV})}$ 。实验值要高出几个 dB 的幅度, 这与文献[3]的实验结果相符。Atlas 指出, 冰雹直径小于等于 0.5% 时, 对水平偏振波的散射比对垂直偏振波要强些。而理论计算值 $\sigma_{h(\text{EBCM})\text{HH}}$ 比 $\sigma_{h(\text{EBCM})\text{VV}}$ 也高些, 只是高的幅度不太大。

扁水椭球对水平偏振波的后向散射截面 $\sigma_{h(\text{HH})}$ 与对垂直偏振波的 $\sigma_{h(\text{VV})}$ 相比, 有高有低, 没有表现出系列性(尺寸)的偏高或偏低。无论实验值还是理论值均基本上反映出, 尺寸在谐振区(见下文解释)前的粒子的 $\sigma_{h(\text{HH})}$ 和 $\sigma_{h(\text{EBCM})\text{HH}}$ 分别高于 $\sigma_{h(\text{VV})}$ 和

$\sigma_{h(\text{EBCM})\text{VV}}$; 尺寸在谐振区及其后的较大粒子, 情况则基本相反。

(4) 扁水椭球的实测后向散射截面 $\sigma_{h(\text{HH})}$ 随尺寸(以 D_e 表示)的增大呈曲线型变化, 见图 6。较小的扁椭球形雨滴($D_e < 1 \text{ cm}$), 其 σ_h 随尺寸增加而增大; 当 D_e 为 0.8~1.0 cm 时, $\pi D_e / \lambda$ (可视作尺度参数, 即电子尺度)约为 0.8~1.0 (因 $\lambda = 3.2 \text{ cm}$), 此时 σ_h 最大。通常在工程领域, 讨论雷达散射截面时, 将尺度参数在 1.0 附近时, 称散射体处于谐振区; 当入射波长比目标物特征尺度小得多时, 称其处于高频区, 反之则处于低频区。而在谐

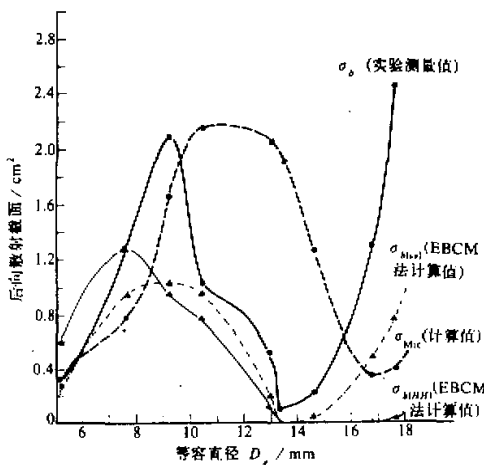


图 6 扁水椭球后向散射截面随尺寸的变化规律

振区散射体的散射截面最大。本实验证实了这一通常看法, 与 Asano 的理论计算结果^[6]一致。Asano 等指出, 在所谓谐振区, 散射有效系数(后向散射截面与椭球截面积之比)最大。

理论计算结果完全证实了实测结果, 无论 $\sigma_{b(HH)(EBCM)}$ 及 $\sigma_{b(VV)(EBCM)}$ 还是要 σ_{Mie} 随 D_c 的变化曲线(见图 6), 均反映了这一谐振区特点, 且 $\sigma_{b(EBCM)}$ 曲线的谐振区所在位置与 $\sigma_{b(\text{测量值})}$ 的曲线基本吻合。本项结论十分显著, 很有意义。

(5) 扁椭球散射能力的方向性趋势

由图 5 可见, 基本上前向散射能力最强, 后向散射能力弱或较弱。以前向为对称轴, 散射截面曲线向两侧呈对称形状, 且呈一定起伏朝后向方向逐步减弱。对此, 图 5a、d、e 表现得很明显。这与 Barber^[7]给出的结果基本相一致, Barber 指出, 无论长椭球还是扁椭球, 其前向散射最强, 后向散射小, 中间向散射曲线呈起伏状(约 1~3 个起伏)。至于, 究竟后向散射在各向散射中小到什么程度? 侧向散射曲线起伏个数? 以及图 5b、c 表现出正前向 σ 反而变小, 准前向则很大等, 这些问题和现象有待进一步实验和理论研究。

7 存在问题和改进方向

(1) 未能对测量系统的可靠程度进行更严格地验证。为此, 除了应用较多近期国外报道作对比外, 考虑 Mie 理论是公认的精确模式, 准备同时进行球形介质体的测量和计算对比分析。

(2) 进行不同椭率(即不同轴比)、不同入射角和侧向散射截面的测量和计算。

(3) 引入分离变量法的计算结果来作对比。

参 考 文 献

- 1 Pruppacher, H. R. et al., 1970, A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air, *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, **96**, 247~256.
- 2 Allan, L.E. et al., 1978, Measurements of the Backscatter matrix of dielectric spheroids, *IEEE T. A. P.*, Vol. AP-26, No.4, 579~587.
- 3 Atlas, D. et al., 1963, Back-scatter by oblate ice spheroids, *J. Atmos. Sci.*, **20**(1), 48~61.
- 4 张尧培等, 1991, 双站雷达散射截面快速测量技术, *南京大学学报*, **27**(1), 49~56.
- 5 王庆安等, 1987, 水滴和冰球后向散射截面的实验研究, *南京气象学院学报*, **10**(3), 268~275.
- 6 Asano, S. et al., 1975, Light scattering by a spheroidal particle, *Applied Optics*, **14**(1), 29~49.
- 7 Barber, P. et al., 1975, Scattering of electromagnetic waves by arbitrarily shaped dielectric bodies, *Applied Optics*, **14**(2), 2864~2872.
- 8 蔡启铭、徐宝祥、刘黎平, 1990, 降雨强度、雨区衰减与双线偏振雷达观测关系的研究, *高原气象*, **9**(4), 347~355.
- 9 Oguchi, T., 1981, Scattering from hydrometeors: a survey, *Radio Sci.*, **16**(5), 691~730.
- 10 Warner, C. et al., 1976, Scattering and depolarization of microwaves by spheroidal raindrops, *Radio Sci.*, **11**(11), 921~930.

An Experimental and Theoretical Study of Electromagnetic Backscattering from the Axially-Symmetric Oblate Water and Ice Ellipsoids

Wang Qing'an

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210008)

Liu Liping

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Chao Zengming

(Research Institute No.207, China National Space Industry Administration, Beijing 100854)

Zhang Yaopei

(Department of Information Physics, Nanjing University, Nanjing 210008)

Abstract This paper describes the experimental simulation and measuring technique of the scattering from oblate water and ice ellipsoids. The measuring results of the backscatter cross section are given for a series of oblate ellipsoids. The backscatter cross-sections of oblate ellipsoids and those of the corresponding sphere of equal volume are calculated using the Extended Boundary Condition Method and Mie formula respectively. The experimental data obtained are reliable. The experimental data are compared with theoretical results. Some useful conclusions are thus drawn.

Key words oblate water and ice ellipsoid RCS microwave measuring system backscattering cross section extended boundary condition method