黄敏松, 雷恒池, 陈家田, 等. 2016. 机载光阵探头探测期间云粒子的破碎 [J]. 大气科学, 40 (3): 647-656. Huang Minsong, Lei Hengchi, Chen Jiatian, et al. 2016. Cloud particle shattering during sampling by airborne optical array probes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (3): 647-656, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.15106.

机载光阵探头探测期间云粒子的破碎

黄敏松^{1,2} 雷恒池^{1,3} 陈家田¹ 张晓庆¹

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室,北京 100029
2 中国科学院大学,北京 100049
3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044

摘 要 机载光阵探头探测时, 云粒子(液态和固态)进入二维光阵探头的采样区前, 会因与探头探测臂发生机 械碰撞, 或者与探头外壳产生的湍流和风切变相互作用而破碎。破碎程度与粒子类型、大小、粒子密度、探头入 口设计以及飞行空速等有关。利用 2008 年 7~9 月探测飞机(Y-12)在山西省太原地区的航测资料并对飞机采样 期间的云粒子破碎现象进行介绍和分析, 分析结果表明, 粒子到达时间间隔分布具有双模态特征: 长时间模态是 粒子空间分布的真实结构, 短时间模态则是云粒子破碎的结果。提出用粒子到达时间间隔阈值作为粒子破碎的判 定标准, 给出适用于 2008 年太原地区航测资料的粒子破碎识别阈值, 其中适合于探头云粒子成像仪(CIP)的阈 值是 2×10⁻⁵ s, 而探头降水粒子成像仪(PIP)的阈值是 1×10⁻⁴ s。所提的阈值对于以 Y-12 为机载探测平台, 以 CIP 和 PIP 探头为探测仪器所获取的其它航次云微物理图像资料的粒子破碎处理也是有一定的参考使用价值。 关键词 机载探测 光阵探头 粒子破碎 文章编号 1006-9895(2016)03-0647-10 中图分类号 P426.5+1 文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.15106

Cloud Particle Shattering during Sampling by Airborne Optical Array Probes

HUANG Minsong^{1, 2}, LEI Hengchi^{1, 3}, CHEN Jiatian¹, and ZHANG Xiaoqing¹

1 Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract During sampling by airborne optical array probes, cloud particles (droplets or ice crystals) will shatter before entering into the sampling area, either by mechanical impaction with the instrument arms or by interaction with turbulence and wind shear generated by the probe housing. The shattering efficiency depends on the habit, size, and density of particles, as well as the probe inlet design, and airspeed. The phenomenon of cloud particle shattering during airborne sampling is presented in this paper. The data analyzed were from the flights of the Shanxi Y-12 research plane in the Taiyuan area from July to September 2008. It is shown that the distribution characteristics of inter-arrival times of particles can be bimodal: the long-term mode reflects the true structure of cloud particles distributed in space, and the short-term mode is the result of cloud particle shattering. An inter-arrival time threshold is proposed as a criterion for particle shattering identification. For the data analyzed in this study, the value was 2×10^{-5} s and 10^{-4} s for Cloud Imaging

收稿日期 2015-01-12; 网络预出版日期 2015-05-19

作者简介 黄敏松,男,1983年出生,工程师,在职博士研究生,主要从事云降水物理、大气探测研究。E-mail: mission@mail.iap.ac.cn 资助项目 国家重大科研仪器设备研制专项 41327803

Founded by the National Major Program for Scientific Reasearch Instrument Development of China (Grant 41327803)

Probe (CIP) and Precipitation Imaging Probe (PIP), respectively. These values might also serve as reference thresholds for data from other Y-12 research plane flights.

Keywords Airborne observation, Optical array probe, Particle shattering

1 引言

自从粒子测量系统(PMS)于 20 世纪 70 年代 问世以来(Knollenberg, 1970, 1981), 其已被广泛 地应用于地面和空中测量,以辅助云降水物理研究 和卫星遥感订正等。在测量过程中,尤其在机载飞 行条件下, 云粒子(液态和固态) 进入二维探头的 采样区前,会因与探头臂发生机械碰撞,或者与探 头外壳产生的湍流和风切变相互作用而破碎。一个 云粒子可破碎为几个甚至几百个碎片,导致多计小 云粒子数目,少计大的云粒子(Korolev and Isaac, 2005)。因此,过去的30多年里有相当多的科学家 对 PMS 粒子测量系统数据采集过程中的粒子破碎 现象进行了研究并给出了一些比较可行和有效的 处理方法。Cooper (1978) 对光电阵列探头探测数 据进行了分析,给出了一个用于二维光阵探头探测 数据中去除破碎粒子的方法,他认为如果粒子图像 的到达时间间隔所对应的空间距离小于 2.5 cm,则 第 2 个粒子应该被视为粒子碎片予以去除。在 Cooper (1978) 工作的基础上, Heymsfield and Baumgardner(1985)提出了基于到达时间间隔的 破碎粒子滤除算法。Korolev and Isaac(2005)对粒 子破碎效应进行研究后指出,粒子破碎程度与粒子 类型、大小、粒子密度、探头入口设计以及飞行空 速等有关。云粒子破碎可以影响从二维探头测量结 果计算得到的云粒子浓度、含水量、雷达反射率等。 Field et al. (2006)分析了光电阵列探测仪所测粒子 到达时间间隔的双模态结构,认为长时间模态代表 着真实云结构而短时间模态则代表着破碎的冰粒 子,对四次航测资料中的三个航次资料处理分析, 他采用 2×10⁻⁴s 作为粒子破碎的判断阈值, 剩下的 一个航次资料则采用 1×10⁻⁵ s 作为粒子破碎的判 断阈值。Korolev et al. (2011, 2013)利用标准结构 的探头和改进结构的探头进行飞行探测实验对比, 结合 Field et al. (2006) 提出的破碎粒子滤除算法 对粒子破碎的成因及其影响进行初步的量化分析。 由于机载测量中粒子破碎不仅和粒子自身有关,还 和测量仪器以及机载平台有关,因此国内利用 Y-12 飞机进行机载探测时粒子破碎现象必然和国外不 同类型飞机探测时粒子破碎现象存在差异,国外研究中所提的粒子破碎判断阈值也不能直接运用到 国内的探测资料研究中。但国内目前并未对粒子破 碎进行任何相关研究,因此很有必要利用国内云微 物理飞机探测资料进行粒子破碎的研究,以提出适 合国内探测资料破碎粒子剔除的方法。本文介绍我 们的云粒子破碎处理分析思路和方法,给出适合 2008 年山西太原飞行探测资料的粒子破碎阈值以 及利用该阈值进行资料处理所获取的一些结果。

2 二维光阵探头

PMS 粒子测量系统的二维光阵探头主要有云 粒子图像探头(OAP-2DC)和降水粒子图像探头 (OAP-2DP)。现在国内的探测飞机(主要是 Y-12) 上面均装载了该类型探头的升级版,即由美国粒子 测量技术公司 (DMT) 所改进的仪器云粒子成像仪 (CIP) 和降水粒子成像仪 (PIP)。这两个成像仪 器均属于成像阵列探测仪,具有相同的工作原理。 当一个粒子经过由一激光光束所照明的采样空间 时,其影子就会投射到一个线性光电二极管阵列上 面。如果光电二极管所接收到的背景照明激光光强 因粒子遮挡被削弱超过 50%,则认为该光电二极管 被遮挡了。光电二极管的状态由仪器的电子电路以 与空气速度成正比的时钟频率进行扫描而获取,因 此每扫描一次,就会生成粒子图像的一条线(slice), 将一个粒子图像的多条线合并一块,最终会形成一 幅二进制的粒子影子数字图像,其中1表示未受遮 挡的像素, 0 表示遮挡的像素。沿着光电二极管阵 列(y 方向)的仪器像素精度由仪器的光学放大倍 数所决定,而与光电二极管阵列相垂直方向的像素 精度(例如,与气流流向平行,x 方向)则由时钟 频率和空气速度所决定。对于 CIP 和 PIP 而言, 经 过适当的频率设置后, x 和 y 方向的像素精度是一 致的,分别为 25 μm 和 100 μm。CIP 和 PIP 的线性 光电二极管阵列均含有 64 个光电二极管, 其测量 范围分别是 25~1550 µm (CIP) 和 100~6200 µm (PIP)。两仪器的采样面积位于仪器俩延伸臂之间 分别为 155 mm² 和 1550 mm²。两臂距离分别是 100 mm (CIP) 和 250 mm (PIP)。

文中数据来自2008年7~9月山西人影办探测飞 机 Y-12 在太原地区的全部航测 [其中,除 20080705 (2008年7月5日,为表示日期与航次方便,简写 为20080705,下同)、20080714和20080717有CIP 和 PIP 资料外,其余航次只有 PIP 资料]结果。利 用自主开发的云降水粒子图像数据处理软件对文 中数据进行分析,该软件可获取 CIP 和 PIP 探头图 像数据中的粒子大小、粒子的到达时间、粒径分布 等重要的粒子信息。

3 云粒子到达时间间隔

航测时, 云粒子一旦进入仪器采样区, 仪器就 会自动记录下此时粒子的到达时刻, 如果对前后两 个粒子到达仪器采样区的时刻值作差, 所得差值我 们称之为"云粒子到达时间间隔"。对某一航次或 某段时间内探测到的云粒子到达时间间隔进行统 计,则可获得该时间段内的云粒子到达时间间隔频 率分布状况。

结合粒子图像数据,统计了 2008 年 7~9 月山 西太原 Y-12 上 CIP 和 PIP 探头的航测资料,其中统 计了 CIP 在 7 月份航测中 8 个时间段的资料, PIP 则是 7~9 月中 27 个时间段的资料,这里取其中一 个时长为 2400 s 的统计结果进行作图分析,如图 1 所示。图 1a、b 是相应时间段内云粒子的到达时间 间隔散点图,横坐标表示粒子序数,纵坐标表示每 个粒子所对应的时间间隔;图 1c、d 是上部时间段 内云粒子到达时间间隔的出现频率(阶梯折线,实 线是其最佳拟合曲线),横坐标表示粒子时间间隔 的统计量,纵坐标表示相应时间间隔内出现的粒子 数占该时段内粒子总数的比值。从图 1 可看出,不 论是散点图还是阶梯折线图,CIP 数据和 PIP 数据 均呈现出双模态特征,但 CIP 数据的双模态分布更 为明显。

对上述 CIP8 个时间段资料和 PIP27 个时间段 的模态峰值进行统计列表,结果如表 1 和表 2 所示, 其中表 1 为 CIP 探头数据 8 个时间段的统计结果, 表 2 为 PIP 探头数据 27 个时间段的统计结果。从 表 1 和表 2 中可看出, CIP 统计资料中有 5 个时间 段粒子到达时间间隔分布呈双模态; PIP 有 6 个双 模态,即使在共同的时间段内(7 月份的 6 个时间 段), CIP 有 3 个时间段内呈现双模态特征,而 PIP 仅有 1 次出现双模态特征。可见 CIP 探头出现双模 态的概率要比 PIP 探头高许多,这个主要是由仪器 的分辨率以及结构所决定的。此外, PIP 探头的长



图 1 20080705 航次粒子到达时间间隔及其频率分布: (a、c) CIP 数据; (b、d) PIP 数据。图中时间为北京时间

Fig. 1 Particle interarrival times and the frequency distribution from flight 20080705: (a, c) Data from CIP; (b, d) data from PIP. The times, as shown in Fig. 1, are Beijing time (BJT)

表1 云粒子到达时间间隔分布的峰值统计(CIP)

Table 1Peak value statistics for the particle interarrivaltimes' frequency distribution (CIP)

日期	北京时间	秒数/s	短模峰值/s	长模峰值/s
20080705	09:20:31~09:53:55	2004	2×10^{-5}	5×10^{-1}
20080705	09:40:11~09:47:16	425	2×10^{-5}	1×10^{0}
20080714	09:25:20~09:28:24	184	—	6×10^{-1}
20080714	10:00:00~10:30:18	1818	1×10^{-5}	2×10^{-2}
20080717	$10{:}54{:}08{\sim}11{:}20{:}25$	1577	1×10^{-6}	2×10^{-3}
20080717	11:40:00~11:51:31	691	1×10^{-6}	1×10^{-6}
20080717	14:35:41~14:47:17	696	—	9×10^{-4}
20080717	15:30:00~15:53:53	1433	_	9×10^{-4}

表 2 云粒子到达时间间隔分布的峰值统计(PIP)

Table 2Peak value statistics for the particle interarrivaltimes' frequency distribution (PIP)

日期	北京时间	秒数/s	短模峰值/s	长模峰值/s
20080705	09:20:31~09:53:55	2004	_	7×10^{-2}
20080705	09:40:11~09:47:16	425	9×10^{-6}	1×10^{-2}
20080714	09:25:20~09:36:30	643	_	1×10^{-3}
20080714	10:00:00~10:32:31	1951	_	5×10^{-5}
20080717	14:35:41~14:47:43	722	—	3×10^{-3}
20080717	15:15:00~15:25:19	619	_	2×10^{-3}
20080717	16:15:00~16:16:21	1636	_	4×10^{-3}
20080813	14:10:17~14:46:43	2186	_	6×10^{-1}
20080813	14:50:00~14:52:36	156	_	5×10^{-1}
20080813	15:10:00~15:32:53	1373	_	1×10^{0}
20080814	12:01:57~12:09:67	460	_	2×10^{0}
20080816	12:36:44~13:30:09	3196	_	8×10^{0}
20080816	19:17:50~19:24:50	420	1×10^{-4}	2×10^{-1}
20080829	14:53:11~14:56:47	216	_	7×10^{-4}
20080829	14:58:00~14:59:26	86	_	4×10^{-3}
20080829	15:10:00~15:10:38	38	_	1×10^{-4}
20080829	15:30:00~16:09:33	2373	2×10^{-5}	9×10^{-1}
20080830	11:34:07~11:40:00	413	1×10^{-5}	1×10^{-2}
20080830	11:40:00~11:43:12	192	8×10^{-6}	3×10^{-3}
20080830	11:45:00~11:46:38	98	8×10^{-6}	2×10^{-3}
20080909	10:37:31~11:25:07	2856	_	6×10^{-3}
20080909	11:50:00~11:53:36	216	_	7×10^{-4}
20080909	$12{:}05{:}00{\sim}12{:}08{:}38$	211	_	8×10^{-5}
20080909	15:47:00~16:06:35	1175	_	4×10^{-3}
20080909	16:20:00~16:23:45	225	_	8×10^{-4}
20080909	16:40:00~16:41:31	91	_	5×10^{-4}
20080909	17:00:00~17:06:39	219	_	2×10^{-2}

时间模态峰值变化较大,PIP:长时间模态峰值为 $8 \times 10^{-5} s \sim 8 \times 10^{0} s$ 之间,相差5个数量级,短时间 模态峰值为 $8 \times 10^{-6} s \sim 1 \times 10^{-4} s$,近一个数量级; CIP:长时间模态峰值 $9 \times 10^{-4} s \sim 1 \times 10^{0} s$,近3个 数量级,短时间模态峰值 $1 \times 10^{-6} s \sim 2 \times 10^{-5} s$,一 个多数量级。长短时间模态不同变化反映出它们之 间物理学上差异。长时间模态峰值变化大,正好反 映云微物理特征,同一块云的不同部位云粒子浓度 是不同的,云与云之间的浓度差异就更大了。短时间模态峰值变化小则是另外一种物理机制(Field et al., 2003, 2006)所致——云粒子破碎。

4 云粒子的破碎

在飞行测量过程中, 云粒子与 OAP 探头的探 测臂等之间会发生碰撞, 或者与探测臂等周围产生 的空气动力, 如湍流、切变力等相互作用而破碎 (Korolev and Isaac, 2005)。云粒子破碎除了和空 速以及 OAP 探头的机械结构有关外, 还和云粒子 自身的物理结构相关, 这里利用 2008 年山西太原 Y-12 航测的图像资料分别对冰雪晶粒子、霰粒子和 液滴的破碎进行分析并提出适合粒子破碎剔除的 方法。

4.1 光阵探头采样时云粒子破碎

光阵探头机载测量时云粒子破碎情况如图2所 示,图 2a 是 PIP 探头在 20080705 航次探测中所测 量到的冰雪晶粒子破碎现象,图 2b 是 CIP 探头在 20080705 航次探测中所测量到的冰晶粒子破碎现 象,从图 2a 和 b 中均可看出一个冰粒子破碎后会 产生大小和分布不同的粒子群。粒子群中的碎片数 少则几十、多则几百,碎片的大小可以超越仪器的 精度和量程范围。图 2c、d 则是 PIP 探头在 20080705 航次探测中所测量到的霰粒子破碎现象, 霰粒子的 破碎多半是与探头臂发生机械碰撞才能产生,而诸 如探头外壳产生的湍流和风切变等空气动力学力 不易使其破碎,从图 2c、d 中可看出霰粒子破碎后 也能形成大小和数量不一的粒子群。图 2e、f 是 PIP 探头在 20080714 航次探测中所测量到的液相粒子 破碎现象。造成液态滴破碎的原因,除机械碰撞破 碎外,空气动力学力的作用也是一个重要原因。从 图 2e、f 中可看出测量过程中液滴因碰撞变形破碎, 也可看到在空气动力学力作用下发生的部分破碎 和完全破碎等情况,因此液滴破碎状况比固相粒子 要复杂些。但不论粒子相态如何,也不论粒子破碎 成因,从图2中可看出粒子破碎总是形成一簇在空 间中分布紧密的碎片粒子群,碎片之间的间隔和旁 边未破碎的粒子之间的间隔相比要紧密许多,从时 间尺度来看就是碎片的到达时间间隔要短于未破 碎粒子的到达时间间隔,而且会形成双峰的模态结 构。因此,如果碎片的到达时间间隔和未破碎粒子 的到达时间间隔在频率分布上能够无重叠地分开, 则可以采用到达时间间隔作为粒子破碎事件的判



图 2 机载探头测量中的粒子破碎现象: (a、b) 冰雪晶粒子破碎; (c、d) 霰粒子破碎; (e、f) 液滴破碎 Fig. 2 Examples of particle shattering during probe measurement, outlined by the rectangles: (a, b) Ice crystal shattering; (c, d) graupel shattering; (e, f) droplet shattering

断标记。

4.2 云粒子破碎判据

通常航测的一幅图像由自然粒子(为与破碎粒 子相区别,我们定义未破碎粒子为自然粒子,其中 包括破碎粒子的母体)和破碎粒子组成。一般情况 下,经过探头采样区的每个自然粒子均会被仪器所 记录并给以标记。一个云粒子破碎,可以产生许多 个破碎的小粒子,当这些破碎粒子经过采样区时, 有些会被仪器一个一个记录下来,从而形成许多帧 图像:而有些破碎粒子因其分布比较密集,粒子之 间的距离小于采样频率所对应的空间距离时则一 起被仪器以一个粒子形式记录下来,这时在一帧图 像内会包括几个甚至几十上百个破碎粒子。而一帧 内所含的粒子数除了和破碎的物理机制有关外,还 和仪器的分辨率相关。因为粒子的碎片大小一旦小 于仪器分辨率,即使其落入仪器采样区内也无法由 仪器所记录。因此,仪器的分辨率越高,其往往会 记录下更多的小碎片数目。

对于云粒子破碎现象的识别,人眼判断带有主 观性,而且由于粒子图像数量巨大,用人眼识别难 以完成,因此必须找到一种客观且能对大量资料进 行自动处理的方法,以替代人眼的工作。由于粒子 破碎后破碎粒子的到达时间间隔要短于自然粒子 的到达时间间隔,因此可对粒子到达采样区的时间 进行分析,得到比较准确的数学判据,并对所给判 据进行实际应用。

上节对粒子到达时间间隔统计发现, 粒子到达

时间间隔分布具有明显的双模态特征,而且结合具 体的粒子图像数据,可以确定,粒子到达时间间隔 分布的长时间模态反映的是云中粒子真实的分 布状况,短时间模态则是由粒子破碎的事件引起 的。因此可以利用粒子到达时间间隔作为粒子破碎 的判据。Field et al. (2003, 2006) 和 Korolev et al. (2011, 2013)等均利用两个模态连接处的最小值 作为破碎粒子识别的判据。考虑到长时间模态和短 时间模态之间连接区域必有破碎粒子和自然粒子 在到达时间间隔上的重叠,为了尽量减少将自然粒 子误判为破碎粒子,选择短模峰值作为破碎粒子识 别判据。同时,为了尽可能多将破碎粒子识别出来 并考虑到所选判据的普适性,选择统计表中短模峰 值的最大值作为最终的破碎粒子识别判据。因此, 分析表 1 和表 2 中的短时间模态。CIP 和 PIP 短模 态峰值范围分别是 1×10⁻⁶~2×10⁻⁵ 秒和 8× 10⁻⁶~1×10⁻⁴秒。将短模峰值范围的最大值2×10⁻⁵ 秒和 1×10⁻⁴ 秒分别作为 CIP 和 PIP 探头的粒子破 碎阈值,当某一粒子的到达时间间隔小于等于该阈 值时,连同其前一个粒子一起被认定为破碎粒子。

4.3 云粒子破碎判据的应用

4.3.1 云粒子破碎对测量的影响

根据粒子图像资料,利用云粒子破碎时间阈值 判据,即云粒子到达时间间隔 $T_j \leq 0.1 \text{ ms}$ (PIP)和 0.02 ms (CIP),对 2008年山西太原的航测资料进 行分析,并对与破碎相关的参量进行统计,表 3 和 表 4 给出每次航测的一些时间段有关粒子破碎参数 的统计结果。表中第一行符号意义如下: P_y 和 P_h 两列数字分别为左侧时间段内粒子破碎进行订正前后粒子尺度第一通道(CIP: 25 μ m; PIP: 100 μ m)粒子累计数。 D_{ps} 表示单个自然粒子破碎成粒子帧数范围, L_t 表示相应时间段内总的粒子帧数, L_p 则表示该时间段内因破碎形成的粒子帧数, L_p/L_t 则表示该时间段内破碎形成的粒子帧数与总的粒子帧数比值,也称"破碎效率"(Korolev and Isaac, 2005)。由于 8 月 13 日起没有 CIP 探头的有效数据,因此统计参数表格按照仪器分类进行统计。

表 3 粒子破碎有关参数统计结果 (CIP)

Table 3 Parameter statistics on particle shattering (CIP)

日期	北京时间	$P_{\rm y}$	$P_{\rm h}$	$D_{\rm ps}$	$L_{\rm t}$	$L_{\rm p}$	Lp/L_t
20080705	09:20:31~09:53:55	721	98	2~40	8671	3720	42.9%
20080705	09:40:11~09:47:16	283	86	2~19	4772	622	13%
20080714	09:25:20~09:28:24	406612	390979	2~43	467180	24277	5.2%
20080714	10:00:00~10:30:18	130952	124526	2~37	270016	14424	5.3%
20080717	10:54:08~11:20:25	154296	141603	2~51	300731	42403	14.1%
20080717	11:40:00~11:51:31	34155	15138	2~54	139461	51654	37%
20080717	14:35:41~14:47:17	112940	104549	2~47	242105	34229	14.1%
20080717	15:30:00~15:53:53	270134	258987	2~21	634115	28264	4.5%

表 4 粒子破碎有关参数统计结果 (PIP)

Table 4 Parameter statistics on particle shattering (PIP) $D_{\rm ps}$ 日期 北京时间 P_{v} $P_{\rm h}$ L_{t} L_{p} Lp/L_t 20080705 09:20:31~09:53:55 2485 1717 2~19 30478 2802 9.2% 20080714 09:25:20~09:36:03 25134 21935 2~16 267802 18254 6.8% 20080714 10:00:00 \sim 10:32:31 142814 119111 2 \sim 17 519863 81653 15.7% 20080717 14:35:41~14:47:43 110531 83349 2~18 422226 73527 17.4% 20080717 15:15:00 \sim 15:25:29 105370 90870 2 \sim 21 349220 47035 13.5% 20080717 16:15:00 ${\sim}16{:}16{:}21$ 207533 178326 2 ${\sim}13$ 592523 87113 14.7% 20080813 14:10:17 \sim 14:46:43 10651 7479 2 \sim 21 103609 15838 15.3% 20080813 14:50:00~14:52:36 146644 76512 2~30 953279 208215 21.8% 20080813 15:10:00~15:32:53 19686 18671 2~8 45936 2600 5.7% 20080814 12:01:57~12:09:37 91303 65904 2~56 517226 93772 18.1% 20080816 12:37:44~13:30:09 7821 6458 2~14 57060 4503 7.9% 20080816 19:17:50~19:53:09 157 90 $2 \sim 13$ 3307 234 7.1% 20080829 14:53:11~14:56:47 24590 19650 2~19 94409 15267 16.2% 20080829 14:58:00 \sim 14:59:26 56534 43518 2 \sim 17 389320 62406 16% 20080829 15:10:00~15:10:38 160232 100576 2~23 724947 211903 29.2% 20080829 15:30:00~16:09:33 3732 2808 2~18 42608 3714 8.7% 20080830 11:34:07~11:40:00 6145 5382 2~11 13150 1163 8.8% 20080830 11:40:00~11:43:12 45882 24363 2~29 241545 88724 36.7% 20080830 11:45:00~12:46:38 275183 161696 2~60 799783 243513 30.4% 20080909 10:37:31 \sim 11:25:07 76648 65648 2 \sim 22 262653 31719 12.1% 20080909 11:50:00 ${\sim}11:53:36$ 166300 128769 2 ${\sim}19$ 518475 105377 20.3% 20080909 12:05:00~12:08:38 107568 87503 2~27 544068 81595 15% 20080909 15:47:00~16:06:35 10225 6699 2~30 163047 4774 2.9% 20080909 16:20:00~16:23:45 67863 52978 2~18 452850 56889 12.6% 20080909 16:40:00 \sim 16:41:31 79395 60855 2 \sim 17 491014 70848 14.4% 20080909 17:00:00~17:06:39 9662 8515 2~13 112495 3858 3.4% (1) 单个粒子破碎形成的碎片数量(D_{ps})

每个粒子破碎后都能产生多个碎片(帧),对 于同一个探头 CIP 或者 PIP,由于航速、风速以及 探头与风向夹角等因素的差别,使得粒子与探头支 撑臂碰撞破碎后产生的碎片个数和大小都有很大 的差异。因此,表3和表4中 Dps可达几十个。破 碎形成碎片数的多少和大小还与采样探头结构有 很大关系。对比分析表3和表4(20080705~ 20080717)的单个粒子破碎形成的碎片数(Dps), CIP 测量中产生的碎片数明显高于 PIP,这与两者 的碰撞条件差异有关,同时也与仪器的结构和分辨 率大小有关。单从表4的Dps数据来看,Dps数最大 值变动范围较大,最大可达到60个,这个主要和 测量环境有关。

(2) 破碎粒子对测量粒子谱的贡献

图 3a、b 分别给出 CIP 和 PIP 探头在 20080705、 20080714、20080717 三个航次所测量破碎粒子出现 次数(*P*_p)及其与原始粒子出现次数(*P*_y)比值的 尺度分布统计平均结果。图中虚线表示破碎粒子出 现次数均值的尺度分布,实线表示 *P*_p与 *P*_y比值均 值的尺度分布。由图 3a、b 可见 CIP 和 PIP 资料的 统计结果均显示破碎粒子出现次数的尺度分布呈 现指数分布,而且覆盖整个测量范围。但是破碎形 成小尺度粒子占绝大多数,这与 Korolev et al. (2011,2013)的统计结果是一致的,从图 3a、b 的 *P*_p/*P*_y的尺度分布曲线看出,破碎粒子对粒子尺 度分布的两端贡献较大。

(3) 破碎粒子总数 *L*_p 对测量粒子总数 *L*_t 的贡献

从表 3 和表 4 中可以看出, *L*_p/*L*_t的比值变化范 围较大, CIP: 4.5~42.9,数值大于 10 的有 5 个, 占 5/8; PIP:数值范围 2.9~36.7,10 以上有 17 个, 占 17/26,破碎形成的粒子帧数占总的粒子帧数超 过 10%的在所选取的探测数据段内均超过了 50%。 Korolev and Isaac (2005)在分析粒子破碎时发现枝 状冰晶的破碎效率均在 10%以上,而在分析到达时 间间隔算法有效性时 Korolev et al. (2013)发现 CIP 的破碎效率达到了 43%。

4.3.2 粒子形状对粒子破碎的影响

利用云粒子破碎时间阈值判据,对 PIP 探头所 测得的霰粒子和大粒子(主要是不规则形状的冰雪 晶粒子)的破碎现象进行研究,分析粒子形状对粒 子破碎的影响。所用霰粒子资料取自 20080705 航



图 3 20080705、20080714 和 20080717 三个航次测量中破碎粒子均值的尺度分布及其与原始粒子比值均值的尺度分布:(a) CIP 探头数据的统计结果;(b) PIP 探头数据的统计结果

Fig. 3 Distribution of shattered particle size and the ratio of occurrence between shattered particles and natural particles for flights 20080705, 20080714 and 20080717: (a) Statistics from CIP data; (b) statistics from PIP data



图 4 PIP 探头中大粒子和霰粒子破碎后产生的帧数与出现频率 Fig. 4 Fragmented image frames and the frequency distribution for large particles and graupel from PIP

次时间 09:40:11~09:47:16(北京时间,下同; PIP), 共7分 15秒; 大粒子资料取自 20080714 航次时间 10:41:01~10:41:30 (PIP),共30 秒测量记录。

图4给出了大粒子和霰粒子的一个粒子破碎后 产生的帧数及其出现频率。从图中可以看到,大粒 子和霰粒子破碎后产生的总帧数不超过20,但出现 频率较高的是生成帧数在2~6之间,而其中以形 成2个粒子帧的出现频率最高。

对 PIP 测量中两种粒子破碎效率进行统计分析,结果如表 5 所示。从表中可看出大粒子的破碎效率大于霰粒子,接近 2 倍的关系,也就是在测量过程中 PIP 更容易受到大粒子破碎的影响。由于所选的大粒子主要是辐枝状聚合物,因此从表中可以初步推断:与辐枝状聚合物相比,相同大小的霰粒

子的破碎效率较低。辐枝粒子之间的连接较弱,除 碰撞破碎之外,探头臂周围产生的湍流扰动以及粒 子在探头探测臂前的突然减速都可能造成粒子破 碎;对于霰粒子而言,这些空气动力很难使其破碎, 一般来说机械碰撞是霰粒子破碎主要因素。

表 5 PIP 粒子破碎程度统计

Fable 5	Shattering	efficiency	statistics	from	PIP

粒子类型	粒子总数	破碎形成的粒子帧数	破碎效率
霰粒子	4772	612	12.82%
大粒子	3528	845	23.95%

4.3.3 粒子相态对粒子破碎影响

选用 CIP 探头所测得的粒子资料研究粒子相态对粒子破碎的影响。固相粒子(以冰晶为例)数据选自 20080705 航次 09:30:46~09:32:46 两分钟长度数据,液相粒子(以液滴为例)数据选自 20080714 航次 10:15:00~10:20:00 五分钟长度数据。

图 5 是不同相态粒子破碎后产生的粒子帧数与 其出现频率的关系。除每个破碎粒子破碎成 2 帧为 最高出现频率外,就是破碎帧数范围很大,两个例 子都展示出能够破碎成 20 帧以上。这一点与 PIP 固态粒子情况有很大差别。而且从图 5 还可看出液 相粒子破碎后形成的粒子帧数要大于固相粒子破 碎后形成的粒子帧数。

同样利用粒子破碎效率的概念,对两种不同相态的粒子在 CIP 测量期间的破碎程度进行比较,具体如表 6 所示。从表 6 中可以看出无论是液相粒子还是固相粒子,和 PIP 的破碎程度相比(表 5),在CIP 测量期间都有比较大的破碎效率 39.27%(固相

粒子)和 45.85%(液相粒子),尤其是液相粒子的 破碎程度更加严重。当然 CIP 的破碎程度更重说明 了"云"探头 CIP 和"雨"探头 PIP 相比,更易受 到粒子破碎的影响,这和 Korolev and Isaac (2005)的分析结果也是一致的。

表 6 CIP 粒子破碎程度统计

Table 6 Shattering efficiency statistics from CIP

粒子类型	粒子总数	破碎形成的粒子帧数	破碎效率
固相粒子	899	353	39.27%
液相粒子	2349	1077	45.85%

4.3.4 粒子谱数据的订正

利用到达时间间隔阈值对航测图像资料中的 破碎粒子进行识别和剔除,这里选取 20080705 航 次 09:40:11~09:47:16 时段探头 CIP 和 PIP 所探测 的资料进行破碎粒子的剔除,以获取订正后的粒子 谱数据。订正前(实线)和订正后(虚线)的两个 探头粒子谱如图 6 所示。从图中可以看出,粒子破 碎对小粒子谱的贡献比较大,运用到达时间间隔阈



图 5 CIP 探头中冰晶粒子与液滴破碎后形成的粒子帧数及其频率分布 Fig. 5 Fragmented image frames and the frequency distribution for ice particles and droplets from CIP

值的方法可以很好地把破碎粒子和自然粒子分开。此外,从图中还可以看出运用到达时间间隔阈值方法对 CIP 粒子谱的改善比对 PIP 粒子谱的改善比较大,这也说明了粒子破碎对 CIP 的影响比对 PIP 的影响更大。

5 讨论

(1) 云粒子到达时间间隔分布的双模态分布

粒子到达时间间隔分布曲线呈现双模态分布 特征:长时间模态和短时间模态。长时间模态体现 了云中真实的微物理结构,是自然云粒子之间距离 的反映,是云内粒子数密度不同造成的;短时间模 态是云粒子破碎的结果。短时间模态峰值比长时间 模态的峰值小 3~5 个数量级,这是由粒子破碎后 形成的特有分布特征所决定的。粒子破碎形成破碎 碎片,成片、密集地分散于空中,数密度远大于云 中自然粒子的数密度,相邻碎片之间的距离也短于 自然状态下相邻粒子之间的距离。因此,碎片的到 达时间间隔必然短于自然粒子的到达时间间隔,时 间分布状态图上就呈现出双模态特征。

长时间模态峰值变化大和短时间模态峰值变 化小是破碎粒子双模态分布的另一个特征。前者反 映云中粒子空间分布变化大,即云粒子数密度变化 大,是自然现象。后者是粒子破碎机理所决定的。

粒子到达时间间隔的双峰现象,主要取决于有 否粒子破碎。但是,并不是只要存在粒子破碎就会 有双峰出现。例如,表 2 PIP 20080705 航次中 09:20:31~09:53:55 (2004 s)时间只有长时间模态 峰值,没有显示出短时间模态峰值,但是在 09:40:11~09:47:16 (425 s)时间段,出现明显的短 时间模态峰值,这个和所测时间段内的自然云粒子 分布状态有关,如果所测的时间段内自然云粒子分



图 6 20080705 航测时段利用到达时间间隔阈值对探头所测粒子数据进行订正前后对比,图中纵坐标中 F(D)表示粒子谱,:(a) CIP;(b) PIP Fig. 6 Comparison of size distributions before and after inter-arrival time corrections on flight 20080705, F(D) means the particle spectrum : (a) CIP; (b) PIP 布相对较密时则可能将短时间模态和长时间模态 平滑上升连接起来,这样就只有长时间模态而没有 明显的短时间模态。

(2) 不同仪器对粒子破碎的影响

表1和表2的统计分析结果以及对粒子谱数据 的订正均表明,"云"探头CIP 在测量过程中受粒 子破碎的影响要远大于"雨"探头PIP。这里除了 因为CIP 探头的分辨精度比较高,能看到更多破碎 后的细小粒子外,还跟探头的结构有很大关系。CIP 探头前端的两根向前延伸的探测臂是垂直向前,长 度比较短,同时两臂之间的距离也比较短。PIP 探 头前端的两根向前延伸的探测臂是斜侧着向前延 伸,长度也比较长,采样区内两臂之间的距离也比 较大。PIP 探头更宽大的采样视场空间导致其对粒 子产生的气动压迫效应要远小于CIP 探头对粒子的 气动效应。因此改进 OAP 探头的机械设计是很有 必要的。

(3) 粒子形状和相态对自身破碎的影响

表 5 和表 6 分别表明粒子破碎和粒子自身的形 状与相态有很大的关系。不同相态的粒子中,液相 粒子的破碎效率要高于固相粒子。而同为固相粒 子,辐枝状聚合物的破碎效率却高于霰粒子。破碎 效率不同表明粒子自身的物理结构对粒子破碎有 很大的影响。不同的物理结构导致粒子破碎的难易 程度不同以及破碎时形成的碎片数也不同。此外, 不同物理结构的粒子所受的破碎机理也可能是不 同的。

(4) 云粒子破碎机制

航测时,对云粒子采样期间,有时云粒子会产 生破碎,原因有二:"静止"的云粒子与采样探头 的探测臂等之间发生碰撞,或者与支撑臂等周围产 生空气动力,如湍流、切变力等相互作用,[见 Korolev and Isaac (2005)的图 16]任何云粒子在被 采样期间的撞击破碎,会由于其与碰撞物之间的相 对角度不同,使得破碎效率和破碎程度可能有所不 同。

对于液态粒子而言,除了跟固态粒子一样,在 "碰撞冲击力"作用下可以产生破碎外,有时液态 粒子会在采样区内产生变形,或变形加上另一种破 碎,这不能完全用"撞击力"来解释。这可能是在 探测臂周围存在某种空气动力,如湍流、切变力等, 在液态滴与这些力之间位置等适当条件下,产生此 种现象。有时较大尺度辐枝状聚合物,由于聚合单 体之间的连接较弱,也可能在这些力的作用下变形 甚至破碎。

(5) 破碎粒子的识别以及识别算法的有效性

粒子破碎后产生的破碎粒子群对云粒子结构、 粒子谱的确定有一定的影响,应该从资料中将它们 剔出。在处理软件中加入粒子破碎判据,对于两帧 或两帧以上连续到达时间间隔 $T_i \leq 2 \times 10^{-5}$ s (CIP 探头资料) 或者 $T_i \leq 1 \times 10^{-4}$ s (PIP 探头资料), 加 上它们前面通过时间较长的一帧,共同组成破碎粒 子群,一并予以剔除。采用这种方法能够识别出绝 大部分的破碎粒子。由于到达时间间隔算法的有效 性依赖于一个粒子破碎事件中至少要有两个碎片 粒子被记录下来,因此,当一个粒子破碎事件仅有 一个碎片被记录下来或者整个破碎事件中进入仪 器采样区中的碎片被仪器以一个粒子图象帧记录 下来,这时到达时间间隔算法是无效的。此外,在 高密度场合,自然状态下的两个粒子以及枝状粒子 部分进入仪器采样区或者偏焦导致一个粒子分为 两部分等则有可能被算法误判为破碎的粒子碎片。 而当一个碎片被弹射到一个自然粒子边上时到达 时间间隔算法在识别出破碎的碎片时也会将自然 粒子误判为破碎粒子。由于粒子破碎过程的随机性 和自然云粒子形态的多样性,以及二维成像探头有 限的成像精度和灰度等级,再加上每次航测所得的 粒子数很多, 对到达时间间隔方法的破碎粒子识别 率还无法进行准确确认。

在这里我们依靠仪器所记录的粒子图像,忽略 掉仅一个破碎碎片被记录下来的情形,以"到达时 间间隔"方法识别出的破碎粒子数为总基数,利用 人眼对 20080705 航次的到达时间间隔算法的识别 结果进行验证,并定义:

错误识别率=错误识别的粒子数/总的粒子数,(1) 准确识别率=准确识别的粒子数/总的粒子数,(2) 其中,总的粒子数为到达时间间隔方法识别出的总 破碎粒子数;错误识别的粒子数为到达时间间隔方 法识别出的破碎粒子数中的非破碎粒子数,识别方 法为人眼判断;准确识别的粒子数为到达时间间隔 方法识别出的破碎粒子数中真实破碎碎片数,识别 方法为人眼判断。

算法从 CIP 和 PIP 探头资料中识别出的破碎粒 子总数分别是 3719 个和 2801 个,其中被误判为破 碎粒子的数目分别是 597 和 317,分别占到了识别 数的 16.1%和 11.3%,准确的识别率分别是 83.9% 和 88.7%。Korolev et al. (2013) 经过实验对比指出 到达时间间隔算法无法完全滤除粒径小于 500 μm 以下的碎片粒子,该算法的有效性取决于仪器的分 辨率和电子系统的响应时间。到达时间间隔算法的 准确识别率除了和仪器相关外,还和飞行测量时的 具体情况相关,比如自然云内的粒子数浓度等,但 综合起来考虑,到达时间间隔方法能将绝大部分的 破碎粒子碎片识别出来,而且和经过结构改进的探 头实际飞行实验数据对比(Korolev et al., 2013) 也表明该方法是比较有效的,因此保守估计的话 80%以上的准确率是没问题的。因此单纯的到达时 间间隔算法是无法完全识别出所有的破碎碎片,减 少探测资料中碎片伪迹的途径需从仪器本身和算 法完善两方面入手。

(6) 所提阈值的适用性

粒子破碎除了和粒子本身物理结构有关,还和 飞机的飞行速度、飞机和仪器的外形结构以及仪器 挂载的位置等有关。本文所提出的阈值是从对山西 Y-12 探测飞机于 2008 年在太原航测资料的统计分 析中获取的,在统计过程中不考虑粒子的晶型和具 体的大气环境条件。因此利用此阈值对山西 Y-12 探测飞机在其它年份探测的资料进行处理分析也 是适用的。此外,目前国内的云物理探测飞机主要 是国产的 Y-12 飞机,飞机的改装和仪器的挂载位 置基本一样,因此所提阈值对于国内以 Y-12 飞机 为机载平台,以 CIP 和 PIP 探头为探测仪器,这样 组合所获取的云物理探测图像资料的处理分析也 是有一定的参考使用价值。

6 总结

通过对 2008 年 7 月到 9 月太原地区飞行航测 的云粒子图像资料分析,我们得到如下结果:

(1) 云粒子通过探头采样区时到达时间间隔 *T_j* 的出现频率呈现双模态形式,长时间模态表示真实 云结构,短时间模态是粒子破碎的结果。长时间模 态峰值变化较大,短时间模态峰值变化较小。云粒 子到达时间间隔 *T_j* 双模态形式的出现频率还表明 CIP 探头比 PIP 探头对云粒子破碎影响更严重。

(2) OAP 探头对云粒子采样期间,有时云粒子 会产生破碎,原因有二:"静止"的云粒子与探头 的探测臂等之间发生碰撞,或者与探测臂等周围产 生空气动力,如湍流、切变力等相互作用。粒子破 碎程度不同,有的完全破碎,有的部分破碎,有的 破碎成数量大、尺度小的粒子帧,有的破碎成数量 小但尺度大的粒子帧;液态滴除破碎外还可能变 形,有时伴随部分破碎,等等。

(3) 2008 年 7~9 月所有航次随机时间段内破 碎粒子总数与测量粒子总数之比的数值范围较大 (CIP: 4.5%~42.9%; PIP: 2.9%~36.7%),反映 了破碎的真实状况;云粒子破碎形成的破碎粒子覆 盖整个测量尺度,改变了粒子谱分布。因此有必要 滤除碎片伪迹。

(4) 对于 2008 年山西 Y-12 飞机的航测资料, CIP 探头以粒子到达时间间隔≪2×10⁻⁵ s, PIP 探头 以粒子到达时间间隔≪1×10⁻⁴ s 作为云粒子破碎的 判据进行处理是比较准确可靠的。

致谢 感谢山西省人影办提供了 2008 年的太原航测资料,感谢中国科 学院大气物理研究所沈志来老师对本文方法研究中给予的帮助和指导。

参考文献(References)

- Cooper W A. 1978. Cloud physics investigations by the University of Wyoming in HIPLEX 1977 [R]. Bureau of Reclamation Rep. No. AS119, Laramie, WY: Dept. of Atmospheric Science, University of Wyoming.
- Field P R, Heymsfield A J, Bansemer A. 2006. Shattering and particle interarrival times measured by optical array probes in ice clouds [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 23: 1357–1371, doi:10.1175/JTECH1922.1.
- Field P R, Wood R, Brown P R A, et al. 2003. Ice particle interarrival times measured with a fast FSSP [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 20: 249–261, doi:10.1175/1520-0426(2003)020<0249:IPITMW>2.0.CO;2.
- Heymsfield A J, Baumgardner D. 1985. Summary of a workshop on processing 2-D probe data [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 66: 437–440.
- Knollenberg R G. 1970. The optical array: An alternative to scattering or extinction for airborne particle size determination [J]. J. Appl. Meteor., 9: 86–103, doi:10.1175/1520-0450(1970)009<0086:TOAAAT>2.0.CO;2.
- Knollenberg R G. 1981. Techniques for probing cloud microstructure [M]// Hobbs P. Clouds: Their Formation, Optical Properties and Effects. London: Academic Press, 15–91, doi:10.1016/B978-0-12-350720-4. 50007-7.
- Korolev A, Isaac G A. 2005. Shattering during sampling by OAPs and HVPS. Part I: Snow particles [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 22: 528– 542, doi:10.1175/JTECH1720.1.
- Korolev A V, Emery E F, Strapp J W, et al. 2011. Small ice particles in tropospheric clouds: Fact or artifact? Airborne icing instrumentation evaluation experiment [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 92: 967–973, doi:10.1175/2010BAMS3141.1.
- Korolev A V, Emery E F, Strapp J W, et al. 2013. Quantification of the effects of shattering on airborne ice particle measurements [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 30: 2527–2553, doi:10.1175/JTECH-D-13-00115.1.