

稠液雾对激光散射液滴尺寸测量影响的试验研究

北京航空航天大学 李伟民 张 岩 金如山

【摘要】 本文研究了稠液雾对激光散射液滴尺寸测量的影响。采用马尔文激光测雾仪，用五个内混合空气雾化喷嘴沿激光束排列来组成稠液雾，由此得出多重散射修正系数的数据。通过回归分析得出经验方程，该方程表示修正系数是遮光率 (OBS)，稀液雾状况下的索太尔平均直径 SMD_o 和稀液雾状况下的 Rosin-Rammler 分布的液滴尺寸分布参数 N_o 的函数，该经验方程可以非常好地概括试验数据，可以在实际试验中用于对高遮光率下得出的马尔文测雾仪数据进行修正。

一、前 言

马尔文激光测雾仪设计基于以下的假设，即激光光线只被散射一次。如果液滴颗粒密度很高（称为稠液雾），会出现多重散射现象，会引起液滴尺寸测量上的系统误差。Dodge 对这个问题做了试验研究^[1]，表明在遮光率 OBS 高的情况下，测量的索太尔平均直径 SMD 和 Rosin-Rammler 分布的液滴尺寸分布参数 N 值总是比他们的真实值为小（见图1），可以引入 SMD 和 N 的修正系数：

$$(CF)_{SMD} = SMD_m / SMD_o = 1 - 0.9456 \exp(-3.811T) \cdot \exp(-0.0204SMD_o) \quad (1)$$

$$(CF)_N = N_m / N_o = 1 - 0.4264 \exp(-3.6772T) \exp(-0.0130SMD_o) \quad (2)$$

式中 T 为透光率，下标 m 表示测量值， o 表示稀液雾值或真实值。

Dodge 的试验中的 N_o 值基本相同 $N_o \approx 2.0$ ，这样在他的修正系数经验方程中无法体现 N_o 的影响。

后来，Felton 等人^[2]做了理论分析。他得出如下的修正系数经验方程：

$$(CF)_x = \bar{X}_o / \bar{X}_m = 1.0 + 0.036 + 0.4947(OBS)^{0.997} N_m^{0.9 - 3.437(OBS)} \quad (3)$$

$$(CF)_N = N_o / N_m = 1.0 + 0.035 + 0.1099(OBS)^{0.65} N_m^{0.35 + 1.45(OBS)} \quad (4)$$

式中 $\bar{X}$ 为 Rosin-Rammler 分布的液滴尺寸分布参数，Rosin-Rammler 分布 Q （尺寸小于

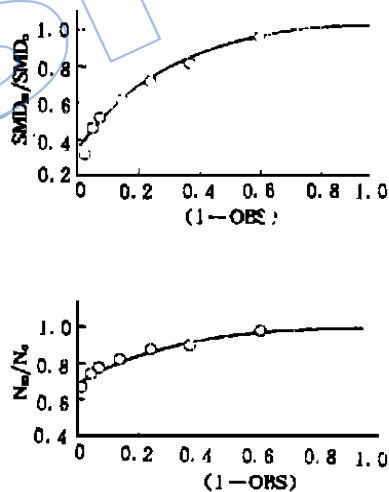


图1 遮光率对激光散射液滴尺寸测量的影响^[1]

直径 D 的液滴所占的体积分数) 为如下的方程:

$$Q = 1 - \exp \left\{ - (D/\bar{X})^N \right\} \quad (5)$$

显然, 在 Felton 的方程中, CF 是 OBS 及 N_m 的函数, 而不是 SMD 或 X_o (X_m) 的函数, 这与 Dodge 的结果是矛盾的。

本文作者基于对液雾特性测量的经验认为修正系数应该是 OBS 、 SMD_o 和 N_o 三者的函数。喷雾锥角, 测点离喷口距离 (油珠散布空间) 的影响不是独立的, 都已概括其中。本研究的目的在于通过精心安排的试验来证实这点, 同时根据我们的试验数据得出新的经验方程。

我们由以前的试验工作知道, 对航空燃气轮机 (除小发动机外), 只有在慢车状态的喷嘴流量下, 喷嘴产生的液雾可以当作稀液雾处理。此外, 经常要考虑稠液雾对液滴尺寸测量的影响。粗略地说, 对测量的 $SMD < 50 \mu m$, 当燃油流量高于 $30 g/s$ 时, 测量液雾尺寸的遮光率常常大于 40%。这样的液滴尺寸测量数据就应当修正。

为了研究遮光率、 SMD_o 和 N_o 对修正系数的影响, 我们必须采用同样类型的喷嘴来分别单独地改变 SMD 或 N , 为此采用空气雾化喷嘴。我们设计比较简单的喷嘴 (因为要用很多个喷嘴), 可以简便改换喷口尺寸, 然后分别控制每个喷嘴的空气速度和空气液体比, 来达到对 SMD , N 分别的控制又要使单个喷嘴的遮光率都在 42% 以下 (即都为稀液雾)。不仅如此, 为了下文所述的理由, 将五个喷嘴 (同样 SMD 和 N) 中, 有三个做成遮光率在 25%, 有两个做成遮光率在 42% 一档。这意味着很多个喷嘴, 要同样的 SMD , N , 又将遮光率分两等, 然后这五个喷嘴改变工作参数, 在都保持 N 不变下, 变 SMD (或 SMD 不变下, 变 N), 而仍然遮光率不超过 42%。

二、喷嘴及试验方法

本研究中所用的喷嘴是内混合空气雾化喷嘴, 如图 2 所示。用水作为工作液体。液体流经

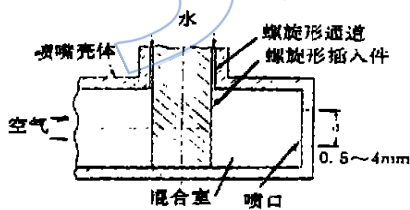


图2 内混合空气雾化喷嘴

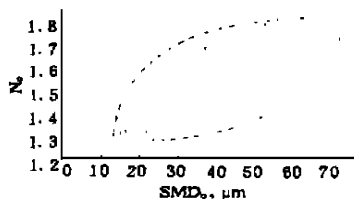


图4 单个喷嘴 (稀液雾) 的液雾特性数据范围

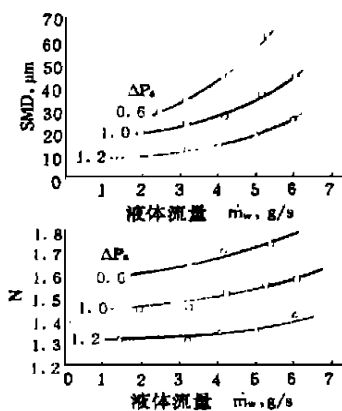


图3 液雾特性随 m_w 和 ΔP_a 的变化

一个螺旋形通道, 进入混合室与空气混合。水的供给压力、水的流量、空气供应压力、空气流量、因而混合室中的压力都可以分别地控制。通过改变空气流速, 气液比和喷口直径, 得出需要的 SMD_o , N_o , 然后将五个喷嘴沿激光光束排列, 将这些喷嘴以不同排列组合方式

打开工作,可以在同样 SMD_o 、 N_o 下,使遮光率由 25% 增至 92%。这些试验喷嘴都很简单、便宜,很容易改变其尺寸,也很容易控制其工作参数。

试验所用的其中一个喷嘴测量所得的 SMD_o 、 N_o (可以认为是稀液雾) 示于图 3。可以得出以下范围 $SMD_o \approx 10 \sim 80 \mu\text{m}$, $N_o \approx 1.2 \sim 1.9$ 内需要的 SMD_o 和 N_o 值。可以供我们选择的工作点如图 4 所示。虚线表示可以从一个喷嘴得到的 SMD_o 和 N_o 范围。

试验装置示意图如图 5 所示。如果同时打开两个、三个、四个喷嘴(有几种排列组合),遮光率分别在 50~70%, 70~80%, 83%~89% 范围,而五个喷嘴同时打开,遮光率为 92%。

这样的试验布置需要仔细的考虑。从排列的几个喷嘴喷出的液雾相互之间不能碰撞或相交。由于他们必须处于接收镜头的一个焦距长度内,他们不隔开太远。这些喷雾的中心线要与激光光束垂直,喷雾中心线与激光光束中心线要共一平面。为了要得出各个喷雾在不同工况下有相同的 SMD_o 、 N_o ,每个喷嘴要有自己的空气、液体流量的控制,这就是说各个喷嘴的空气压力降,液体流量各不相同。这一切构成本试验的复杂性,要求很严。本文研究所用的测雾仪是马尔文 2200 型。

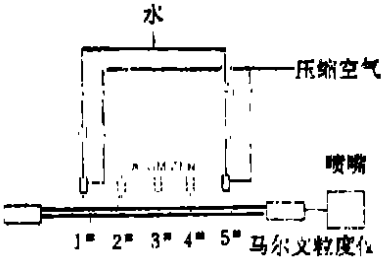


图 5 试验装置

三、结 果

检查不同的喷嘴可否得出同样的 SMD_o 、 N_o ,是本试验成功进行的基础。试验中 1~5 号喷嘴的水流量 m_w 分别为 3.5, 3.6, 3.7, 5.4, 5.6g/s, 1~3 号的空气压降 ΔP_a 为 80kPa, 4、5 号为 110kPa, 试验结果列如表 1。

由表 1 可见,对每个喷嘴分别控制其流量及空气压降,可以得出基本相同的 SMD_o 、 N_o 。测得 SMD 、 N 随遮光率变化的试验数据,取一组典型值示于图 6 和图 7。显然当 $OBS < 0.4$ 时, SMD 、 N 随遮光率增大剧烈变小。在这特定情况下,当 $OBS \approx 0.8$, $SMD_m/SMD_o = 0.63$, $N_m/N_o = 0.81$ 。试验得出的一组典型数据示于表 2, 其中 m_w 是水流量, ΔP_a 是喷嘴空气压力降。

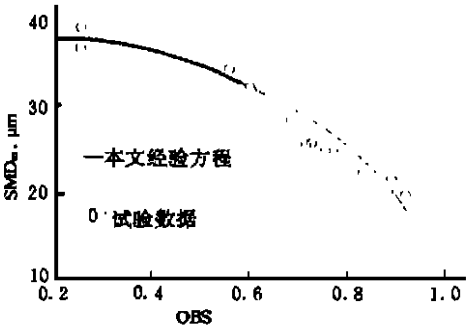


图 6 SMD_m 随 OBS 的变化

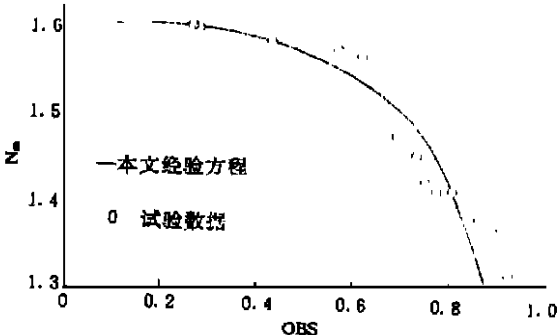


图 7 N_m 随 OBS 的变化

表 1 不同喷嘴可以达到一样的液雾特性

	喷 嘴 号						与平均值偏差
	1	2	3	4	5	平均	
$SMD_o, \mu\text{m}$	38.94	37.22	36.80	38.37	38.84	38.03	+ 3.2%, - 2.4%
N_o	1.62	1.63	1.60	1.59	1.59	1.606	$\pm 1.5\%$
OBS	0.248	0.246	0.252	0.418	0.421		

表 2 SMD_m 、 N_m 随 OBS 的变化

试验序号	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
喷嘴组合	1# 2#	2# 4#	1# 2# 3#	4# 5#	1# 2# 5#	2# 3# 5#	3# 4# 5#	1# 2# 3# 4#	2# 3# 4# 5#	1# 2# 3# 4# 5#
$SMD_m, \mu\text{m}$	33.47	31.61	27.80	25.19	25.30	24.87	24.56	22.20	21.64	19.41
N_m	1.58	1.57	1.48	1.46	1.43	1.42	1.42	1.39	1.38	1.33
OBS	0.561	0.61	0.683	0.704	0.730	0.757	0.792	0.833	0.887	0.92

由图 8、9 可见, SMD_o 较小时稠液雾下液滴尺寸测量值随 OBS 的变化更陡。

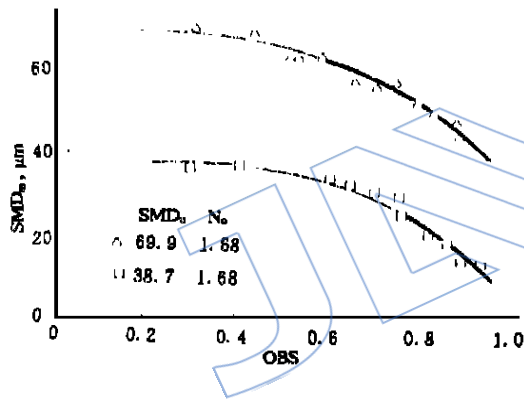


图 8 $N_o =$ 常数下 SMD_m 随 OBS 的变化

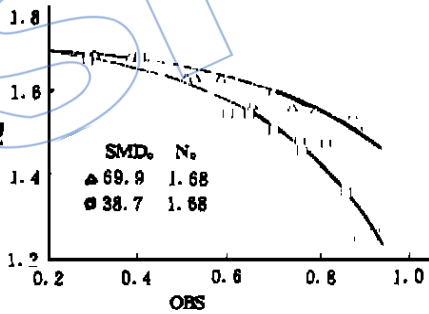


图 9 $N_o =$ 常数下 N_m 随 OBS 的变化

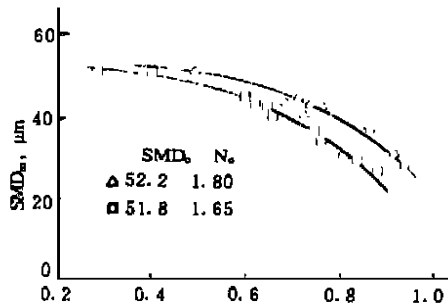


图 10 $SMD_o =$ 常数下 SMD_m 随 OBS 的变化

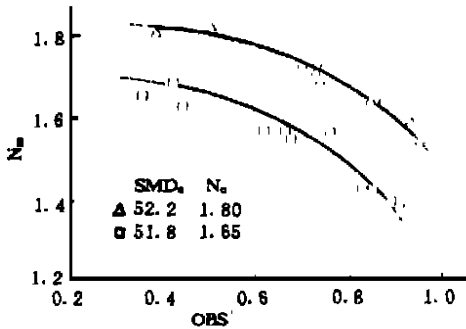


图 11 $SMD_o =$ 常数下 N_m 随 OBS 的变化

测量的影响由图 10、11 可见, N_o 较小时稠液雾下液滴尺寸测量值随 OBS 的变化更大。这些试验数据用回归分析概括, 表明修正系数应该是 OBS 、 SMD_o 和 N_o 的函数。这样的

数据拟合误差常小于 5%。为了便于与 Dodge 的经验方程做比较, 我们选用如下的函数形式:

$$CF = 1 - a \exp \{ -b(1 - OBS) - cSMD_o - dN_o \} \quad (6)$$

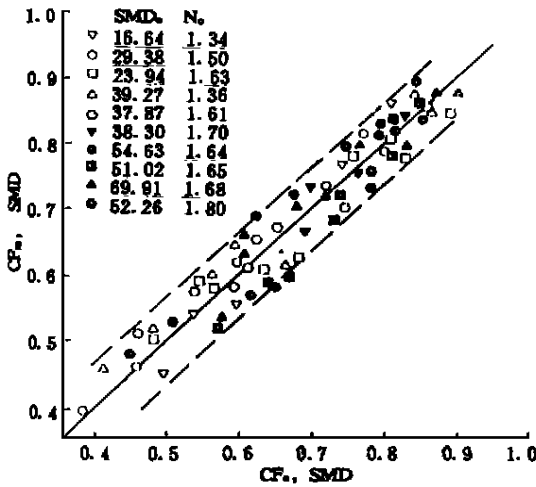


图 12 CF_{SMD} 的数据概括 (虚线代表 $\Delta_{max} = \pm 8\%$)

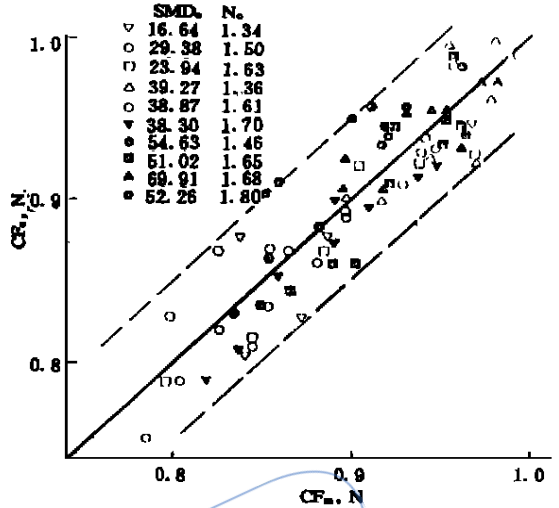


图 13 CF_N 的数据概括 (虚线代表 $\Delta_{max} = \pm 5\%$)

式中, a 、 b 、 c 、 d 为常数, 由试验数据进行回归分析得出。方程 (6) 两边取对数:

$$\ln(1 - CF) = \ln a - b(1 - OBS) - cSMD_o - dN_o \quad (7)$$

设 $y = \ln(1 - CF)$, $X_1 = 1 - OBS$, $X_2 = SMD_o$, $X_3 = N_o$, $b_0 = \ln a$, $b_1 = -b$, $b_2 = -c$, $b_3 = -d$

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 \quad (8)$$

采用多元线性回归分析方法来概括全部试验数据, 可以决定 b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 。这样得出

$$SMD / SMD_o = (CF)_{SMD} = 1 - 1.2739 \exp \{ -5.1028(1 - OBS) - 8.5087 \cdot 10^{-3} SMD_o - 0.1642 N_o \} \quad (9)$$

$$N_m / N_o = (CF)_N = 1 - 0.08769 \exp \{ -4.5803(1 - OBS) - 0.01626 SMD_o + 1.1280 N_o \} \quad (10)$$

式中 SMD 单位为 μm ($15 < SMD_o < 80$, $1.2 < N_o < 1.9$) 测量得出的修正系数 $CF_{m,SMD}$ 、 $CF_{m,N}$ 与由方程 (9) 和 (10) 所计算的修正系数 $CF_{c,SMD}$ 、 $CF_{c,N}$ 的比较示于图 12 和图 13。 CF_{SMD} 的经验方程在拟合全部试验数据时的拟合误差最大为 $\pm 8\%$, CF_N 的经验方程相应地为 $\pm 5\%$ 。

在实验使用上述方程时, 需逐次逼近求解, 而由马尔文直接得出的是 SMD_m 和 N_m 。

四、讨 论

我们探索一下, 如果认为修正系数不随 N_o 变化, 数据拟合误差将如何? 用同样方法得:

$$(CF)_{SMD}' = 1 - 0.9445 \exp \{ -3.4639(1 - OBS) - 6.9418 \cdot 10^{-3} SMD_o \} \quad (11)$$

$$(CF)_N' = 1 - 0.7262 \exp \{ -3.3064(1 - OBS) - 0.02285 SMD_o \} \quad (12)$$

试验得出的 CF 值与由方程 (11) 和 (12) 计算的 $CF_{c,SMD}'$ 、 $CF_{c,N}'$ 的比较表明: 方程 (11) 对 CF_{SMD} 的拟合误差为 26%, 而方程 (12) 对 CF_N 的拟合误差为 15%。显然, N_o 对修正系数的影响是不可忽视的。

如果认为修正系数不随 SMD_o 变化, 数据拟合误差会如何? 用同样方法得:

$$(CF)_{SMD}'' = 1 - 27.1732 \exp \{ -4.0866(1 - OBS) - 2.1419N_o \} \quad (13)$$

$$(CF)_N'' = 1 - 14.8844 \exp \{ -5.3214(1 - OBS) - 2.3860N_o \} \quad (14)$$

测量得出的修正系数与由方程 (13) 和 (14) 计算的修正系数 $CF_{c,SMD}''$ 、 $CF_{c,N}''$ 的比较表明, 方程 (13) 对 CF_{SMD} 的拟合误差为 31%, 而方程 (14) 对 CF_N 的拟合误差为 18%。显然, SMD_o 对修正系数的影响更是不可忽视的。

有趣的一点是, 本文研究者用 OBS 、 SMD_o 、 N_o 来概括数据时发现几者的影响有以下次序: $OBS > SMD_o > N_o$ 。而如果用 OBS 、 SMD_m 、 N_m 来概括数据时, 发现三者的影响有以下次序: $OBS > N_m > SMD_m$ 。这在一定程度上解释了为什么 Dodge 忽略了 N_o 的影响, 而 Felton 忽略了 SMD_m 的影响。本文的工作把 Dodge 和 Felton 两人的矛盾结果得到了统一和澄清。

另一个值得讨论的问题是: 在实际喷嘴液滴尺寸测量中, 主要是喷嘴流量加大 (喷雾锥增大并不很多, 因而激光光程增大不很多), 引起液雾颗粒密度增大, 而形成高的遮光率; 而 Dodge 的试验中, 采用并排七个喷嘴, 使光程增大 (而液雾颗粒密度基本不变) 来增大遮光率, 这样由增大光程导致增大遮光率的试验数据得出的经验方程, 可否应用于主要由增加颗粒密度而增大遮光率的修正上去? 这是个值得研究的问题。

由 Beer 公式

$$OBS = 1 - (I/I_o) = 1 - \exp \{ -c(\sum n_i A_i) l \} \quad (15)$$

式中 I 、 I_o 为光强及起始光强, n_i 为液滴颗粒密度, A_i 为液滴横截面积, l 为光程长 (受液雾散射), c 为常数。该式说明, 遮光率增大可以由两种不同因素引起: ①由颗粒密度增大引起的, 这主要是由于流量加大引起 (在 SMD 近似不变下), 颗粒密度与喷嘴流量成正比。②光程长, 对单个喷嘴这取决于喷雾锥的大小, 测点与嘴口的距离, 在 Dodge 研究中取决于同时打开的喷嘴数。问题可表达为: 不管遮光率是由那一个因素引起变化的, 只要遮光率的数值一定 (同时 SMD_o 、 N_o 一定), 对应的修正系数是否是一定的。如果这一点成立, 则本文得出的修正系数公式 (以及 Dodge 的工作), 可以在实际喷嘴试验中应用。

要回答这问题并非容易, 本文研究中巧妙地通过喷嘴设计和喷嘴 SMD_o 、 N_o 、 OBS 的同时控制得到初步解决, 由表 1 和表 2 可看出, 本文研究中设计的各喷嘴在稀液雾下 (单独工作) 给出基本相同的 SMD_o 、 N_o , 而其 OBS 又可分为两组, 一组在 25%, 另一组在 42%。我们采用这两组喷嘴的不同排列组合得出高的遮光率, 遮光率由 25% 增大到 92% 的过程中, 可以由以下两种原因引起: (1) 光程长增大, 例如表 2 中序号 6、8、9 等, (2) 光程长增大及液滴颗粒密度增大相结合, 例如序号 7、10、11、12、15 等。

由上述两种方式造成高遮光率 (关键是喷嘴的起始遮光率, 喷嘴流量有两档) 而引起液雾特性测量值的变化, 可以采用一个规律来概括, 看不出两种排列组合在修正系数上有什么差别。由此我们确信, 只要遮光率值一定 (SMD_o 、 N_o 亦一定), 修正系数可认为是单一值, 与构成高遮光率的原因 (或历程) 无关。因而本文的结果可以在喷嘴试验中实际应用。

参 考 文 献

- [1] Dodge, Lee G., "Change of Calibration of Diffraction-based Particle Sizers in Dense Spray", Optical Engineering, Sept. 1984.
- [2] Felton, P. G. et. al., "Measurement of Drop Size Distribution in Dense Spray by Laser Diffraction" ICLASS-85, 1985.

STUDY ON ATOMIZATION MODEL AND COMPUTATION OF PREFILMING AIRBLAST ATOMIZER

Gan Xiachua and Zhao Qishou

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

An atomization model for prefilming airblast atomizer is formulated on the basis of analysis and experiments, and put in to numerical computation. A breakup criterion of liquid film is provided to judge the film disintegration extent. Quantitative relations between the wavelength-frequency spectrum of the film wave and its correspondingly formed droplet size-number are considered. A Trace-Statistical method is presented to perform the model computation. A numerical example of atomization of a three-dimensional axisymmetric atomizer has been completed. The consistence of the computational results with the experimental data demonstrates that this model is feasible.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF DENSE SPRAY ON DROP SIZE MEASUREMENT BY LIGHT SCATTERING TECHNOLOGY

Li Weiming, Zhang Yan, Chin Jushan

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

The effect of dense spray on drop size measurement by light scattering technology was studied by using Malvern instrument with five duplicated internal mixing airblast atomizers aligned with laser beam. The correction factor data for multiple scattering were obtained. By regression analysis, an empirical equation was obtained which correlated the correction factor as a function of obscuration (OBS), Sauter Mean Diameter under dilute spray condition SMD_0 and drop size distribution parameter for Rosin-Rammler distribution under dilute spray condition N_0 .

The experimental data showed definitely that the correction factor is not only a function of OBS, SMD_0 , as proposed by Lee Dodge, but also is a function of N_0 . The correlation fits the experimental data very well, and can be used for practical purposes to correct the data from Malvern drop sizer at high obscuration conditions.

THE MECHANISM OF LIQUID-COOLED VANE FOR HIGH-TEMPERATURE TURBINE

Liu Dezhang and Yuan Baoning

(*Nanjing Aeronautical Institute*)

ABSTRACT

In this study the flow pattern and heat exchange coefficient have been obtained, and relation between them have been determined in the circumstance of vapour-liquid two-phase boiling of water coolant through a even heated straight tube. The influences of the coolant flow parameters on the flow pattern and heat exchange have been studied by changing the coolant flow speed, or the flowrate at the entrance under certain