

GJB 150.8A 淋雨试验解读及淋雨试验探讨

杨冬甫¹, 罗兰², 刘纲玲³

(1.重庆哈丁环境试验技术股份有限公司, 重庆 401533; 2.西南技术工程研究所, 重庆 400039;
3.中国电子科技集团公司第十研究所, 成都 610036)

摘要: 对自然界中云滴到雨滴的转化和降雨的形成过程进行了阐述, 同时对降雨过程中雨滴的形状、直径、降雨强度、终速度等的物性特点进行了分析。重点探讨了人工模拟降雨试验方法中关于雨滴直径 0.5~4.5 mm、雨滴终速度 9 m/s、行程、风速 18 m/s 等指标要求在实际试验中涉及的部分相关问题, 基于对降雨过程和降雨引起的破坏机理的分析, 结合淋雨设备原理和国内环境试验设备厂家现状, 对现行 GJB 150.8A—2009 淋雨试验中的雨滴直径、雨滴终速度提出了补充完善的建议和意见。

关键词: 环境试验; GJB 150.8A; MIL-STD-810H; 淋雨; 吹雨; 滴水; 雨滴

中图分类号: TJ06 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2021)07-0022-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.07.004

Interpretation and Discussion of GJB 150.8A Rain Test

YANG Dong-fu¹, LUO Lan², LIU Gang-ling³

(1. Chongqing Hardy Technology International Ltd, Chongqing 401533, China;

2. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China;

3. The 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China)

ABSTRACT: In this paper, the conversion of cloud droplets to raindrops and the formation process of rainfall in nature are described. At the same time, the physical characteristics of raindrop shape, diameter, rainfall intensity, final velocity, etc. are analyzed. Focused on some of the relevant issues involved in the actual test of the artificial simulated rainfall test method about the raindrop diameter 0.5~4.5 mm, the final raindrop speed 9 m/s, the stroke, the wind speed 18 m/s and other indicators, based on the analysis of the destruction mechanism resulting from rainfall process, combined with the principle of rain shower equipment and the current status of domestic environmental test equipment manufacturers, this paper puts forward supplementary and perfect suggestions and opinions on the raindrop diameter and final velocity of raindrops in the current standard GJB 150.8A—2009 rain test.

KEY WORDS: environmental test; GJB 150.8 A; MIL-STD-810H; rain; blowing rain; drip; raindrop

用于替代 GJB 150.8—86《军用设备环境试验方法 淋雨试验》的 GJB 150.8A—2009《军用装备实验

室环境试验方法 第 8 部分: 淋雨试验》已经颁布十多年了, 作为与 2000 年 1 月颁布的 MIL-STD-810F

收稿日期: 2021-02-18; 修订日期: 2021-04-02

Received: 2021-02-18; Revised: 2021-04-02

作者简介: 杨冬甫(1975—), 男, 主要研究方向为环境试验设备研制。

Biography: YANG Dong-fu (1975—), Male, Research focus: development of environmental test equipment.

引文格式: 杨冬甫, 罗兰, 刘纲玲. GJB 150.8A 淋雨试验解读及淋雨试验探讨[J]. 装备环境工程, 2021, 18(7): 022-028.

YANG Dong-fu, LUO Lan, LIU Gang-ling. Interpretation of GJB 150.8A and discussion of rain test[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(7): 022-028.

等同的试验方法，GJB 150A 增加了“滴水高度应确保水滴的终速度均为 9 m/s”的要求。这一变动使原有满足 GJB 150.8—86 的试验设备不能满足新的试验方法需求。

美国 2019 年颁布了 MIL-STD-810H，文中通过自然降雨形成和水滴运动分析该要求的合理性，提出了国内标准修订换版的建议，并对目前淋雨设备的现状进行探讨。

1 自然降雨

1.1 降雨的形成

水汽在高空遇到冷空气便凝聚成云滴（通常把半径小于 100 μm 的水滴称为云滴，半径大于 100 μm 的水滴称雨滴。标准云滴半径为 10 μm，标准雨滴半径为 1000 μm）或冰晶，云滴和冰晶的体积很小，不能克服空气阻力和上升气流的顶托，在空中聚成了云。

由液态水滴所组成的云体称为水成云；由冰晶组成的云体称为冰成云；由水滴和冰晶共同组成的云称为混合云。云滴和冰晶通过不断凝结、凝华，吸收周围水蒸气和水滴碰撞合并，体积约增大 100 多万倍后，云滴或冰晶增长到能克服空气阻力和上升气流的顶托，并且在降落至地面的过程中保持液态时，才成为降雨。

1.2 降雨的分类

降雨强度指单位时间内的降雨量，以 mm/min 或

mm/h 计。中国天气预报中的日雨量为 08~08 时 24 h 降雨量，降水等级划分见表 1。

表 1 降水等级划分

Tab.1 Rainfall classification

mm

降水等级用语	降水总量	
	12 h	24 h
毛毛雨、小雨、阵雨	0.1~4.9	0.1~9.9
中雨	5.0~14.9	10.0~24.9
大雨	15.0~29.9	25.0~49.9
暴雨	30.0~69.9	50.0~99.9
大暴雨	70.0~139.9	100.0~199.9
特大暴雨	≥140.0	≥250.0

1.3 雨滴

1.3.1 雨滴形状

表面张力作用使水滴成球形——表面积尽量小，但雨滴在降落过程中，水滴还要受重力、空气阻力的作用。雨滴越大，这些影响作用越突出。一般情况下，小雨滴（直径<0.25 mm）为近似球形，大雨滴（直径>5.5 mm）开始为纺锤形，如图 1 所示。大雨滴在下降过程中，因受空气阻力作用而呈扁平形，两侧微向上弯曲，雨滴不稳定，极易发生碎裂或变形，称暂时雨滴。把直径≤5.5 mm、降落过程中比较稳定的雨滴称稳定雨滴。自然降雨强度与雨滴平均直径的关系见表 2。

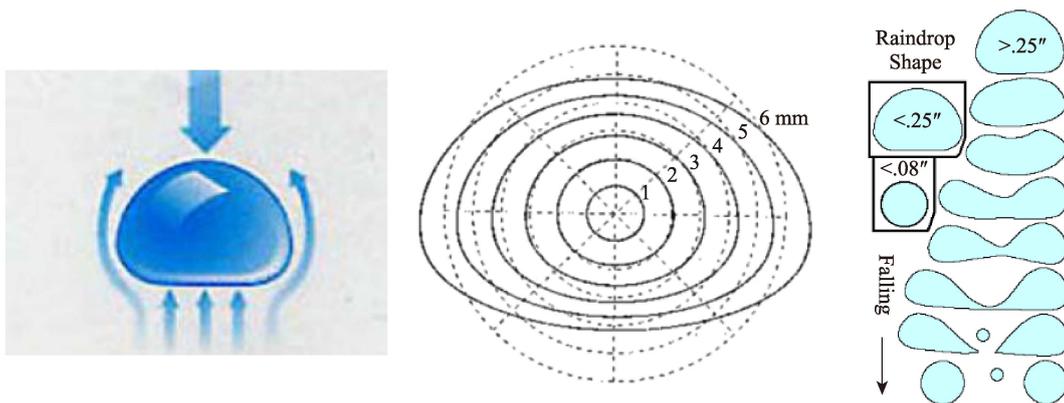


图 1 雨滴形状
Fig.1 Raindrop shape

表 2 降雨强度与雨滴平均直径

Tab.2 Rainfall intensity and average diameter of raindrops

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	雨滴平均 直径/mm	降雨强度 (mm·h ⁻¹)	雨滴平均 直径/mm
0.25	0.75~1.00	25.40	2.00~2.25
1.27	1.00~1.25	50.8	2.25~2.75
2.54	1.25~1.50	101.60	2.75~3.00
12.70	1.75~2.00	152.40	3.00~3.25

1.3.2 雨滴直径和终速度

雨滴在静止空气下落过程中，受到重力、空气浮力和空气阻力的作用。浮力仅约为重力的 0.1%，计算雨滴终速度时，浮力可以忽略。

受重力加速度作用，雨滴在空气中的降落速度最初是逐渐增大的。随雨滴降落速度的增大，空气阻力也逐渐增大，则雨滴的加速度逐渐减少，最后减为 0。这时雨滴的降落速度达到最大值，称为雨滴终速度。

雨滴大小不同，终速度也不同。

2009年3月21日使用激光降水粒子谱测量的雨滴尺寸与终速度的数据如图2所示^[7]。图2中粗实线是利用 $D-V$ 经验公式 $V_f=9.65-10.3\exp(-0.6D)$ 计算的结果。在标准大气条件下，模拟仿真的雨滴直径与终速度关系见表3^[9]。由表3可以看出，毛毛雨（直径0.5 mm）的收尾速度为2 m/s，而暴雨（雨滴最大直径为5.5 mm左右）的雨滴最大收尾速度才能达到9 m/s。

1.3.3 雨滴行程

雨滴大小不同，达到终速度所需的行程也不同。通过模拟仿真给出了0.5~6 mm雨滴降落时间、高度、极限速度的关系，见表4^[8]。

劳师1941年实验结果：直径1.25 mm的雨滴，达到终速度，降落高度需要8 m；直径2 mm的雨滴，降落高度需要20 m；雨滴直径6 mm的雨滴，达到终速度，降落高度需要20 m以上。

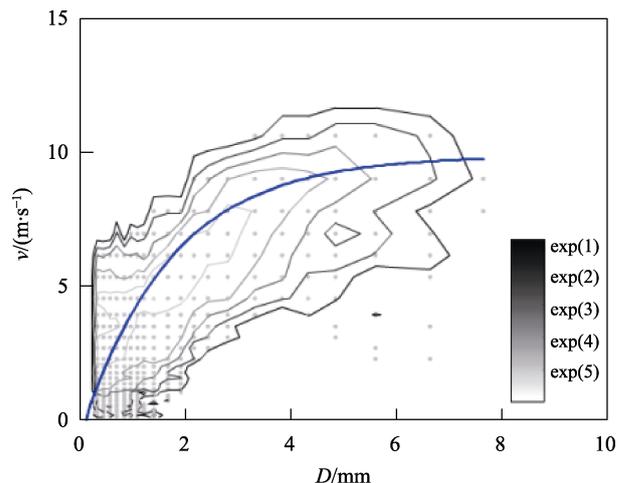


图2 雨滴直径和终速度关系（点表示例子个数分布，等值线表示粒子浓度）
Fig.2 Relationship between raindrop diameter and final velocity

表3 雨滴数值模拟
Tab.3 Numerical simulation of raindrop

雨滴直径/mm	终速度/(m·s ⁻¹)						
0.01	0.03	1.0	3.833	3.0	7.979	5.0	8.983
0.10	0.241	1.6	5.827	3.4	8.494	5.4	9.000
0.20	0.726	2.0	6.515	4.0	8.865	5.8	9.016
0.50	1.942	2.4	7.136	4.4	8.955		

表4 0.5~6 mm雨滴降落时间、高度、极限速度的数值模拟
Tab.4 Numerical simulation of falling time, height and limit velocity of 0.5 ~ 6 mm raindrops

雨滴直径/mm	降落时间/s	高度/m	终速度/(m·s ⁻¹)	雨滴直径/mm	降落时间/s	高度/m	终速度/(m·s ⁻¹)
0.5	1.06	1.748	1.94	3.0	3.42	22.835	8.01
1.0	1.96	6.357	3.84	3.5	3.44	24.449	8.64
1.5	2.84	13.37	5.57	4.0	3.36	24.549	8.91
2.0	2.8	15.210	6.54	4.5	3.04	22.079	9.03
2.5	3.12	18.997	7.31	5.0	3.02	22.048	9.04

分析表明，雨滴降落高度>10 m时，所有雨滴的速度都达到雨滴终速度的95%以上。因此模拟降雨时，雨滴降落高度在10 m以上才比较合理，并且雨滴的大小和组成尽量与天然降雨相近。

1.4 降雨危害

GJB 150.8A—2009《军用装备实验室环境试验方法 第8部分：淋雨试验》中给出了淋雨的环境效应。

1) 大气中环境影响。包括干扰或破坏无线电通信，限制雷达的有效性。由于能见度低，使飞机操作受到限制和使翼面升力降低（只在暴雨期间），损坏飞行中的飞机。影响炮和导弹的发射。降低光学装置能见度和光学观测效果，甚至无法进行光学监测。降低户外工作效率，引起引信误动作等。

2) 雨扑击。淋雨碰撞冲蚀装备表面。

3) 积雨/渗透。包括造成某些材料的强度降低，泡胀、锈蚀的可能性增大，腐蚀甚至生长霉菌，增加设备质量。使电气和电子设备不能工作或不安全，电气设备失效。装备内部结冰，可能会由于元器件膨胀或破裂造成缓慢性能退化和功能失效，改变换热，使推进剂燃烧减慢等。

2 人工模拟淋雨试验

2.1 淋雨试验目的及相关标准

淋雨试验是人工模拟降雨的手段，目的在于确定下列与淋雨、水喷淋和滴水有关的环境影响：保护罩、外壳和密封垫的有效性；设备在淋雨暴露期间或之后

满足其性能要求的能力;设备由于淋雨造成的物理损坏;雨水排除装置的有效性;检验包装的有效性。

目前国内应用较多的淋雨试验相关标准和方法有:GJB 150.8A—2009《军用装备实验室环境试验方法 第 8 部分:淋雨试验》、GB/T 2423.38—2008《电工电子产品环境试验 第 2 部分:试验方法 试验 R:水试验方法和导则》、GB 4208—2017《外壳防护等级 (IP 代码)》、GJB 4.13—1983《舰船电子设备环境试验-外壳防水试验》、JJF 17—2012《淋雨试验设备校准规范》等。

2.2 GJB 150.8A—2009 淋雨试验解读

GJB 150.8A—2009 淋雨试验包含了程序 I (降雨和吹雨)、程序 II (强化)、程序 III (滴水) 三种试验方法。适用于评价在贮存、运输/工作期间可能暴露于淋雨、水喷淋或滴水下的设备。

2.2.1 程序 I

适用于户外使用且没有防降雨和吹雨措施的设备,是模拟自然界降雨的试验。

2.2.1.1 雨滴产生

GJB 150.8A—2009 没有限定雨滴产生的方式,但采用水分配器时,给出了终速度 9 m/s 的要求。程序 I 淋雨和吹雨雨滴的产生应按照淋雨试验对象的危害机理和试验目的选择雨滴产生方式。考虑雨滴谱雨滴直径和降雨强度的关系,程序 I 降雨强度为 102 mm/h 时,雨滴的平均直径为 2.75~3.0 mm,采用水分配器更合适。稳态雨采用水分配器时,去掉聚乙烯管,减小水滴直径,在程序 III 滴水试验时,再加大直径。使用喷嘴需考虑水滴直径小、喷雾水滴速度矢量方向不一致等因素影响。

受喷嘴雾化原理、孔径等影响,很难给出水压和雾滴直径的准确关系,但可以明确随着压力的升高,雾滴直径会变小。如孔直径 0.5 mm 的喷嘴在压力为 0.5 MPa 时,雾滴直径为 1~2 mm。如使用喷嘴,应考虑降低喷嘴压力,尽量增大雨滴直径,同时合理布置喷嘴位置,降低吹雨试验时水滴速度矢量方向不同的影响。

2.2.1.2 吹雨-角度

GJB 150.8A—2009 中规定:根据试件布置风源位置,以使雨水具有水平方向到 45°的变化,并均匀扑打在试件一侧面。水平风速应不小于 18 m/s,在试件放入试验装置前于试件处测量。GJB 150.8—86 中规定:雨滴由喷头产生,雨滴直径为 0.5~4.5 mm;风源相对于试验样品方向,应使雨从水平方向变到 45°角均匀地对试验样品一侧面吹打。雨滴初速度、吹风、重力作用下呈 45°角扑击在试件侧面,标准中未给出允许偏差范围,而且滴雨运动角度测量难度大,实施困难。

2.2.1.3 预热

试件与雨水之间的温差能影响淋雨试验的结果。对密封的试件,在每个暴露周期开始时,应使试件温度加热到高于水温 10 °C,使试件内部产生负压,可更好地检验试件密封效果。

2.2.1.4 吹雨-转动

风吹雨对垂直暴露表面的影响通常比水平表面的影响更大,而对垂直或接近垂直方向的雨而言,其影响则正好相反。为使所有表面都暴露于试验条件下,试验时试件应转动。

GJB 150.8A—2009 试验步骤中规定,预热的侧面吹风 30 min 后转动试件,预热后,再转动试件。对热容量较小的试件,试件内产生负压的效果不理想,且实际应用中实际可操作性不强。

吹雨模拟 3 种使用状态:试件静置,自然界风吹雨形成不同角度;车载外装试件移动,无风时,雨扑击产品的角度变化;前两种状况叠加。因此可以应该根据试件外形、具体安装应用条件选择以下 3 种方式:

- 1) 四侧面分别进行预热-吹雨-转 90°,适用于所有侧面均暴露的类似矩形试件。
- 2) 部分侧面进行预热-吹雨-转 90°,适用于部分侧面均暴露的类似矩形试件。
- 3) 预热后边吹雨边旋转,特别适用于侧面均暴露的外形非类似矩形的试件,也适用于状况 1)。

2.2.1.5 试验用水

GJB 150.8A—2009 要求:除另有规定外,淋雨试验所用水可以使当地水源的水。但标准中未规定水循环使用时的水质要求。

2.2.2 程序 II

强化不是模拟自然降雨,而是考核受试设备防水性,为设备的防水性提供一个较高的置信度。适用于大型受试设备,有风源的淋雨试验不能满足试验要求时采用。

2.2.2.1 雨滴尺寸

GJB 150—86 中雨滴直径为 2~4.5 mm, GJB 150A—2009 将雨滴直径改为 0.5~4.5 mm 是比较合理的,2019 版的 MIL-STD-810H 该指标同为 500~4500 μm。喷嘴雾化水颗粒直径一般在 2 mm 以内,压力越高,颗粒直径越小。

2.2.2.2 水压

GJB 150A—2009 要求:可按技术文件规定适当改变压力,但最小喷嘴压力为 276 kPa。GJB 150.8—86 要求为 375 kPa。

基于伯努利方程,喷嘴流出速度为:

$$v=C_v \cdot (2P/\rho)^{0.5} \quad (1)$$

式中: C_v 为喷嘴效率,取 0.95; P 为喷嘴前压力,

Pa; ρ 为水滴密度, kg/m^3 。

根据式 (1), 表压为 276 kPa 时, 喷嘴水滴速度为 22.3 m/s; 375 kPa 时, 达到 26.0 m/s。考虑喷嘴到被测试件表面行程中, 水滴速度受空气阻力影响的衰减, 喷嘴压力为 276 kPa 时, 水滴速度为 18 m/s 左右。

2.2.2.3 喷嘴

GJB 150A—2009 中明确喷嘴间距 (平面二维间距, x 、 y 轴两个方向的间距) 为 $71\text{ cm} \times 71\text{ cm}$, 距离试件表面距离: 侧面为 48 cm, 顶部为 81 cm。但对喷嘴的类型 (例如实心锥是圆形还是方形、扩散角等) 没有给出明确要求, 不利于提高淋雨试验的一致性和复现性。

2.2.3 程序 III

程序 III 滴水不是模拟降雨, 是针对有防雨措施但可能由于冷凝或上表面可能有泄漏产生滴水的设备。

2.2.3.1 水滴

GJB 150.8A 中 4.3.3 条规定: “程序 III 采用分撒管 (见图 1), 分撒管外套聚乙烯套管, 降水滴增大到最大限度”。

GJB 150.8A 中规定“使用试验装置应能提供大于 $280\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的滴水量……采用的滴水高度应确保水滴的最终速度约为 9 m/s ”, 但 7.2.3 程序 III 的步骤中要求“承受高度不小于 1 m 的降雨 15 min”。实际应用中, 水滴的最终速度与降雨高度只能兼顾其一。

2019 版的 MIL-STD-810H METHOD506.6 的 4.1.3 Procedure III-Drip 中, 已经去掉雨滴速度 9 m/s 的要求, 使用规定的滴水高度 (不小于 1 m), 从试验样品的上主表面开始测量。

GJB 150.8A 中 6.1.3 规定的最终速度约为 9 m/s , 不符合试验目的要求。7.2.3 中的降雨应为“滴水”。

2.2.3.2 分配器

GJB 150.8A 和 MIL-STD-810 中均给出了同样的两种水分配器方案, 如图 3、4 所示。

图 3 所示的针头式简易装置给出了水深和滴水速度的关系, 能满足程序 I 和程序 III 对水滴直径和水量的要求。图 4 分配器适用于程序 III, 水滴直径大, 可能超出程序 I 的直径要求。

程序 III 的水滴直径最大限度可以达到 5 mm 以上, 超过程序 I 雨滴直径 $0.5\sim 4.5\text{ mm}$ 的要求。因不能使用相同的分配器, 采用简易装置时需要加装聚乙烯管增大水滴直径。

3 淋雨设备现状

3.1 国产设备

由于市场需求相对较小等原因, 淋雨试验箱没有引起国内大型气候环境试验设备行业厂家的重视, 产

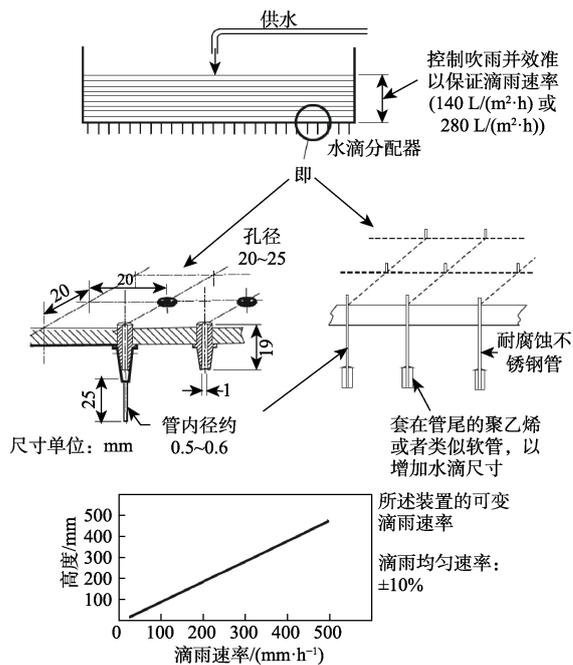


图 3 稳态淋雨和滴水试验简易装置
Fig.3 Simple device for steady rain and drip test

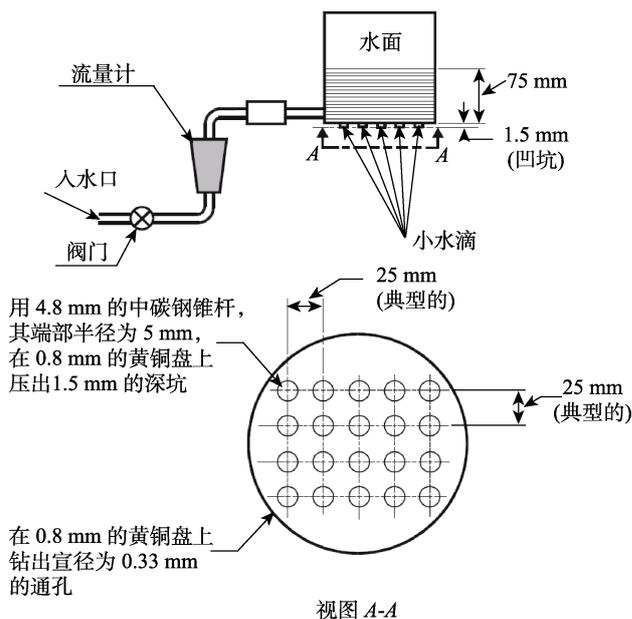


图 4 滴水试验水分配器
Fig.4 Water-distributor of drip test

品研制技术水平普遍较低, 不能完全满足试验标准要求。国内一家环境试验设备厂家生产的淋雨试验箱的技术规格 (部分) 见表 5, 外形如图 5 所示。

分析技术参数数据可以发现以下问题:

1) 产品属性中满足 GJB 150.8—86 淋雨试验, 但防水试验水压已按照 GJB 150.8A—2009 更新为 276 kPa。

2) 风速 $5\sim 18\text{ m/s}$ (转台进风处中心水平风速), 与 JJF 17—2012《淋雨设备校准规范》不一致。

3) 防水性试验“雨滴直径 $2\sim 4.5\text{ mm}$ ”, 喷嘴雾化

表 5 国产淋雨试验箱技术规格
Tab.5 Technical specification of domestic rain chamber

参数类型		参数值
产品属性	箱体尺寸	1500 mm×1500 mm×1600 mm(深×宽×高)
	总功率	24 kW
满足试验标准		GJB 150.8—1986 淋雨试验
主要技术参数	温度范围	(RT+10)~55 °C
	风速范围	5~18 m/s (转台进风处中心水平风速)
	旋转工作台	尺寸: $\phi 800$ mm, 且转台转速可以调节
滴雨试验	滴水盘面积	760 mm×760 mm, 滴水盘高度可调节
	距离	滴雨距离 ≥ 1 m
防水性试验	冲水压力	≥ 276 kPa
	不锈钢喷嘴	顶置、方格式, 喷嘴角度可调节
	雨滴直径	2~4.5 mm



图 5 国产高风速淋雨箱外形

Fig.5 Appearance of domestic rain chamber with high wind speed

水滴直径大部分在 2 mm 以内, 是 GJB 150.8—86 的要求, 严格验收会不合格。

4) 滴水盘面积为 760 mm×760 mm, 滴雨距离为 1 m。滴雨速度不满足 GJB 150.8A—2009 降雨试验要求, 考虑内箱高度 1.6 m 及转盘高度, 能做滴水试验的试件高度仅 500 mm 左右。

5) 总功率为 24 kW, 如果严格按照 GJB 150.8A—2009 设计, 风机风口尺寸应与工作室深×宽相同, 即 1.5 m×1.5 m, 18 m/s 风速时, 风量为 145 800 m³/h, 风机轴功率 > 90 kW, 电机功率达到 132 kW。根据功率分析, 吹风口规格不能满足标准要求。

综上所述, 产品既不能满足 GJB 150.8—86 的要求, 也无法满足 GJB 150.8A—2009 的要求。

由于 GJB 150.8A 中在降雨和滴水中都规定“滴水高度应确保水滴的终速度均为 9 m/s”, 国内有厂家将滴雨盘安装到试件上表面 4.5 m 高处, 希望借助重力

加速度使雨滴速度达到 9 m/s。这忽略了雨滴直径和空气阻力的影响, 实际雨滴直径较小时, 终速度达不到 9 m/s, 雨滴直径较大时, 行程高度又远远不够, 也无法达到这一要求。

3.2 进口设备

一台 2006 年意大利进口的淋雨试验箱如图 6 所示。风口尺寸与试验箱迎风截面相同, 水滴的产生使用分配器, 吹雨使用 3 个水平布置的喷嘴通过总管转轴调节角度。能满足 GJB 150—86 的要求, 但同样存在不满足 GJB 150A 中稳态雨试验雨滴速度 9 m/s 和滴水试验时有效空间太低的问题。



图 6 意大利风源淋雨箱 RT 9000 MIL (2006 年)

Fig.6 RT 9000 MIL rain chamber imported from Italy

4 结语

1) GJB 150.8A—2009 中降雨试验雨滴速度 9 m/s 不符合实际降雨状况, 也极难实现, 建议实际试验应根据失效或破坏机理对雨滴直径和雨滴速度进行合理剪裁。

2) 吹雨的角度应给出偏差范围, 以具备可实施性。

3) 作为参考标准的 MIL-STD-810F 已经实施超过 20 年, 建议 GJB 150.8A—2009 在修订新版时, 完善补充相关内容。

4) 用于校准 GJB 150.8A—2009 《军用装备实验室环境试验方法 第 8 部分: 淋雨试验》中淋雨试验设备的 JJF 17—2012 《淋雨设备校准规范》, 也建议及时进行同步调整。

参考文献:

- [1] GJB 150.8—86, 军用装备实验室环境试验方法 淋雨试验[S].
GJB 150.8—86, Environment test methods for military equipments Rain test[S]
- [2] GJB 150.8A—2009, 军用装备实验室环境试验方法 第 8 部分: 淋雨试验[S].
GJB 150.8A—2009, Laboratory environment test methods for military materiel Part 8: Rain test[S]
- [3] MIL-STD-810H, Department of defense test method

- standard—Environmental engineering considerations and laboratory tests[S].
- [4] 王伟民, 刘华强, 王桂玲, 等. 大气科学基础[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
WANG Wei-min, LIU Hua-qiang, WANG Gui-ling, etc. Fundamentals of Atmospheric Science[M]. China Meteorological Press, 2011
- [5] 吕梅, 姚展予, 张伟. 雨滴谱仪探测数据分析[C]//第27届中国气象学会年会论文集. 北京: 中国气象学会, 2010.
LYU Mei, YAO Zhan-yu, ZHANG Wei. Data analysis of raindrop spectrometer[C]// Proceedings of the 27th Annual Meeting of Chinese Meteorological Society. BEIJING: China Meteorological Society, 2010.
- [6] 吕宏兴, 武春龙, 熊运章, 等. 雨滴降落速度的数值模拟[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(2): 14-21.
LYU Hong-xing, WU Chun-long, XIONG Yun-zhang, etc. Numerical Modeling on Rain Drops Falling Velocity. Journal Of Soil Erosion and Soil and Water Conservation Vol.3 No.2 Jun., 1997.
- [7] 孙学军, 孙海洋, 江志东. 不同大气条件雨滴下落速度的数值仿真[J]. 计算机仿真, 2011, 28(12): 402-406.
SUN Xue-jin, SUN Hai-yang, JIANG Zhi-dong. Numerical simulation of terminal velocity of raindrops falling under different atmospheric conditions[J]. Computer Simulation, 2011, 28(12): 402-406.