

武器装备

高速催泪射流轨迹分析及抗风性能实验研究

陈磊, 李海鹏, 杨广明*, 李志豪, 王征

(公安部第三研究所, 上海 200120)

摘要: **目的** 探究高速催泪射流轨迹和外界风环境对催泪剂着靶性能的影响。**方法** 通过搭建高速射流瞬态采集和抗风性能测试平台, 系统研究射流动态特征及抗风性能, 并与现行单警催泪喷射器进行对比。**结果** 高速催泪喷射器射流初始直径达 5.5 mm, 呈较为规整的柱状, 初始速度达 138.9 m/s。在 1 m 处, 射流中心仍有明显的集束状, 周围出现空泡现象, 速度降为 88.3 m/s。在 3 m 处, 射流轨迹呈发散的胶丝状, 速度降为 42.9 m/s。单警催泪喷射器射流在 0.2、1、3 m 处的速度分别为 7.9、20.7、7.5 m/s, 射流在前进过程中逐渐分散成小颗粒状的液珠, 并在 3 m 处出现整体轨迹向下偏移。在抗风性能上, 使用模拟人体上躯干 600 mm×900 mm 靶标(瞄准脸部), 在 0~4 级侧向风作用下, 高速催泪喷射器射流的着靶率为 85.2%~57.4%, 中心侧向偏移小于 10 cm, 而单警催泪喷射器射流着靶率为 78.8%~4.2%, 中心侧向偏移超过 20 cm。**结论** 相比单警催泪喷射器, 高速催泪喷射器的射流轨迹具有良好的集束性和定向性, 射流速度整体更高, 同时在抗风性能方面也具有明显优势。另外, 射流轨迹特征对其抗风稳定性起到了关键作用。

关键词: 高速催泪射流; 瞬态采集; 射流轨迹; 抗风性能; 着靶性能; 效能评估

中图分类号: TJ06

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)07-0067-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.07.009

Trajectory Analysis of High-speed Lachrymatory Jet and Experimental Research on Its Wind-resistant Performance

CHEN Lei, LI Haipeng, YANG Guangming*, LI Zhihao, WANG Zheng

(The Third Research Institute of Ministry of Public Security, Shanghai 200120, China)

ABSTRACT: The work aims to explore high-speed lachrymatory jet trajectory and the effect of external wind environment on the target performance of lachrymator. A high-speed jet transient collection and wind resistance test platform was built to systematically study the jet's dynamic characteristics and wind-resistant performance, and compare it with the current spray with lachrymator. Results showed that the high-speed lachrymatory jet presented regular column shape at the beginning with an initial diameter of 5.5 mm and an initial speed of 138.9 m/s; At 1 m, the jet had an obvious characteristic of clustering in the center with cavitation occurred around it, and the speed decreased to 88.3 m/s; At 3 m, the jet trajectory presented a divergent filamentous pattern, and the speed decreased to 42.9 m/s. While the speeds of the general lachrymatory jet were 7.9 m/s, 20.7 m/s and 7.5 m/s at 0.2 m, 1 m and 3 m respectively. The jet gradually dispersed into small granular liquid beads during the advancing

收稿日期: 2024-03-07; 修订日期: 2024-04-23

Received: 2024-03-07; Revised: 2024-04-23

基金项目: 中央基本科研业务费专项资金重点项目(KYC23281)

Fund: Key Project of the Central Basic Scientific Research (KYC23281)

引文格式: 陈磊, 李海鹏, 杨广明, 等. 高速催泪射流轨迹分析及抗风性能实验研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(7): 67-73.

CHEN Lei, LI Haipeng, YANG Guangming, et al. Trajectory Analysis of High-speed Lachrymatory Jet and Experimental Research on Its Wind-resistant Performance[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(7): 67-73.

*通信作者(Corresponding author)

process, and the overall trajectory moved downward at 3 m. In terms of wind-resistant performance, a 600 mm×900 mm target simulating the upper torso of the human body (aiming at the face) was used. Under the actions of level 0~4 side winds, the target rates of the high-speed lachrymatory jet were 85.2% to 57.4%, the center lateral deviation was less than 10 cm; While for the general lachrymatory jet, the target rates were 78.8% to 4.2% and the center lateral deviation was more than 20 cm. The high-speed lachrymatory jet trajectory has better characteristics of clustering and directionality compared with the general lachrymatory jet, meanwhile the speeds are higher overall. On the wind-resistant performance, the high-speed lachrymatory jet has obvious advantages also. In addition, it indicates that the dynamic characteristics of jet trajectory play a key role in wind stability.

KEY WORDS: high-speed lachrymatory jet; transient collection; jet trajectory; wind-resistant performance; target performance; effectiveness evaluation

非致命武器作为一类在公安实战领域应用的新型装备,在治安、反恐、防暴等方面具有广阔的应用前景^[1-5]。其作用机理旨在使目标暂时失能,而不造成致命性或永久性伤残^[6-10]。其中,高速催泪喷射器作为非致命武器装备的重要组成部分,通常采用枪形结构,以底火或压缩气体为动力源,击发辣椒素等催泪剂,射程可达6 m以上,可快速作用于人体的眼睛、鼻腔、口腔、暴露皮肤等部位,在极短时间对其造成强烈的刺激,使作用对象暂时失去抵抗能力^[11-13]。因此,开展高速催泪喷射器的效能评估具有重要意义,而目前国内鲜有相关研究工作的报道。

在实际使用过程中,催泪剂有效接触到人体眼睛、鼻腔、口腔、暴露皮肤等部位后,才能达到较好的制服效果^[14-16],因此催泪剂着靶性能是评估高速催泪喷射器效能的关键指标。催泪射流轨迹则是影响催泪剂着靶性能的主要因素,射流轨迹特征包括射流速度、直径、集束性等^[17],其影响作用动能、作用距离及着靶分布,因此采集分析高速射流的动态轨迹特征具有重要意义。其次,外界风环境是影响催泪剂射流轨迹和效能的另一个重要因素,风的存在可能会改变射流的轨迹,导致着靶率的降低和着靶偏移距离的增加。因此,需要探究外界风环境对催泪剂射流的具体影响,以便更准确地评估其着靶性能。最后,通过综合考虑射流轨迹特征和外界风环境的影响,可以得到着靶率和着靶偏移距离等着靶性能评价参数,这些参数有助于更全面地了解催泪喷射器的效能,并为实际使用提供有价值的参考。

对于固体子弹而言,因其弹道、弹速相对稳定,利用光幕靶测速仪^[18]采集子弹速度效果较好^[19-21],但对于高速射流,因其射流轨迹速度衰减快,光幕靶测速仪无法采集连续动态轨迹,显然难以满足测试需求。高速摄像机在催泪射流轨迹的采集方面具有独特优势^[11,22-23],它能够连续追踪射流动态轨迹,并实时传输到计算机,进而方便探究射流速度、直径、集束性等特征指标随时间的变化情况。Borges等^[11]采用高速摄像机采集了高速催泪射流对弹道明胶的侵彻轨迹变化特征,为高速催泪喷射器的安全使用提供了有效支撑。Weber等^[24]通过高速摄像机采集了高速射流

的动态演化轨迹,计算了瞬态速度,为高速催泪喷射器的使用提供了建议。以上2个研究主要考虑了高速催泪射流的动能风险,而均未探究高速催泪喷射器的抗风性能。

为研究高速催泪喷射器的射流轨迹及抗风性能,本文首先通过引入以高速摄像机为核心的射流瞬态采集分析系统,采集并分析射流轨迹特征,捕捉射流在空气中的动态变化状况,进而分析其速度、直径和集束性等关键参数。进一步搭建了射流抗风测试平台,模拟0~4级不同强度的侧向风环境,探究高速催泪射流在不同风速作用下的着靶率和着靶偏移规律。同时,本研究还引入现行单警催泪喷射器^[25]作对比,探究2种催泪喷射器在射流轨迹及抗风性能方面的不同,这将为高速催泪喷射器的效能评估提供支撑。

1 实验

1.1 催泪喷射装备

本研究使用的高速催泪喷射装置为枪形结构,型号为SD-02,采用电信号激发方式,具有激光辅助瞄准功能,使用高压气体为推动力,催泪弹有效击发催泪剂体积为 (10 ± 2) mL,催泪剂采用合成辣椒素(OC)。同时,使用现行单警催泪喷射器作为对比,单警催泪喷射器符合GA 884—2018《公安单警装备催泪喷射器》的要求^[25],且为同批次。主要参数如下:单罐催泪剂体积为 (70 ± 3) mL,催泪剂有效作用成分为合成辣椒素(OC),依靠罐体内压缩空气作为动力源。

1.2 射流轨迹采集分析

催泪射流瞬态采集系统的组成和试验场景如图1所示,主要由射流发射器固定装置、高速摄像采集系统、幕布、刻度尺、催泪射流收集装置等组成。其中,发射固定装置高度和前后位置可调;高速摄像采集系统由高速摄像机、补光灯、三脚架和控制显示器等组成。射流轨迹采集过程:设置高速摄像机采集模式为前触发,保存时间为3 s,调节高速摄像机与射流轨迹的垂直距离,设置高速摄像机的曝光时间,曝光时间过短则因亮度低无法捕捉对象;使用计量后



图 1 催泪射流轨迹瞬态采集分析

Fig.1 Transient collection and analysis of lachrymatory jet

的刻度尺标定轨迹距离,使刻度尺与发射装置口径平行;击发射流,同时触发高速摄像机,催泪剂通过压缩气体的推动作用在短时间内快速喷出,此时高速摄像机就可以拍摄下射流轨迹,并实时传输到计算机。

由高速摄像机采集图像后,使用刻度标尺标定图像中某一瞬态阶段的运动距离,利用平均速度法即可实时采集分析得到射流在 2 点或多点之间的平均速度。由于所取瞬态阶段的时长极短,因此可以将该平均速度作为这一阶段的瞬态速度。其计算公式为:

$$v = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{F \times \Delta L}{\Delta N} \quad (1)$$

式中: v 为某段运动轨迹的瞬态速度, m/s; Δt 为某段运动轨迹的运动时间, s; ΔL 为某段运动轨迹的运动距离, m; F 为高速摄像机帧率,表示高速摄像机在 1 s 时间内采集图像的帧数, fps; ΔN 为某段运动轨迹对应的帧数变化量。

考虑到摄像机镜头的固有特性,图像边缘区域可

能会出现光学畸变,射流在图像中的尺寸并不能真实反映其实际大小,会产生透视误差。为尽量减少光畸变及透视误差的影响,在采集瞬态速度时,镜头与射流轨迹保持垂直,并选择近焦距。另外,在速度计算时,将射流轨迹特征点选择在图像的中心区域,以尽可能减小速度测量误差。

1.3 抗风性能试验

根据催泪喷射器实际使用场景,本研究考虑了侧向风对催泪射流轨迹的作用效果,抗风性能测试示意图如图 2 所示。主要由变频风机、导流罩、布风导流板、着靶率试验靶标等组成,出风口为矩形形状,射流轨迹沿矩形高度的中线方向。设定催泪喷射器距离靶标 3 m 处进行试验,着靶率试验靶标模拟人体头部与躯干,尺寸为 600 mm×900 mm,靶标上有专用吸水垫,可实现瞬吸锁住催泪剂。为了模拟实际应用场景,并保持每次实验的一致性,催泪喷射器应对准靶标的面部位置(图 2 中瞄准点)进行喷射。

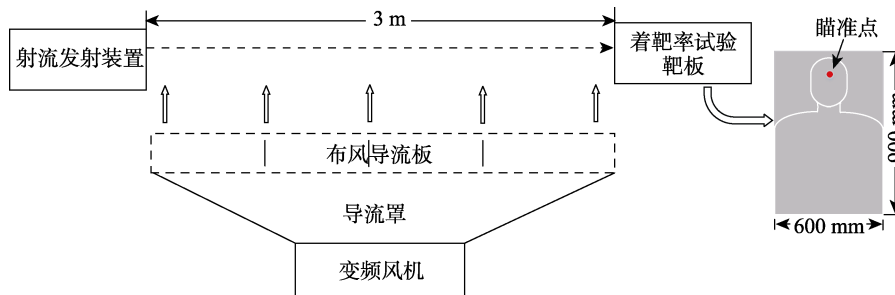


图 2 催泪射流抗风性能测试

Fig.2 Test for wind-resistant performance of lachrymatory jet

本研究设计 3 种风速,调节变频风机控制风速,风速分别为 0、2.1~2.7、5.5~6.2 m/s,按照 GB/T 28591—2012 《风力等级》中对风力等级的划分^[26],分别对应 0、2、4 级风。探究不同风速条件对催泪剂着靶率和着靶偏移距离(吸水垫的催泪剂中心位置与瞄准点间的直线距离)2 个参数的影响,用上述 2 个参数来表征催泪喷射器的着靶性能。其中,催泪剂着靶率的计算公式为:

$$r = \frac{\Delta m_1}{\Delta m_2} \quad (2)$$

式中: r 为催泪剂着靶率; Δm_1 为喷射结束后吸

水垫质量的变化量, g; Δm_2 为喷射结束后催泪剂质量的变化量, g。

2 结果及讨论

2.1 射流轨迹演化

高速催泪喷射器和单警催泪喷射器在 0.2、1、3 m 处的动态射流轨迹如图 3 所示。初始阶段的集束性方面,高速催泪射流在发射初期呈现出规整的柱状,直径约为 5.5 mm,显示出良好的集束性。这种集束性确保了射流在较短距离内能够保持较高的密度和冲

击力,单警催泪射流虽然也呈现柱状,但其直径较小,约为 0.8 mm,这种较小的直径可能导致其射流在更短的距离内开始发散。在射流轨迹的变化方面,射流到达 1 m 处时,高速催泪喷射器和单警催泪喷射器射流轨迹发散,但是高速催泪射流中心仍有明显的集束状,较高的速度也使射流前端受力复杂,周围出现空泡现象,而单警催泪射流分散成小颗粒状的液珠,这种分散状态可能会降低其覆盖范围和效果,因为液珠更容易受到空气阻力和风向的影响。随着

射流继续前进到 3 m 处时,两者发散范围比 1 m 处变宽,高速催泪射流轨迹呈发散的胶丝状,但轨迹方向未改变,表现出良好的定向性,而单警催泪射流轨迹中的小液珠呈现下抛物线式运动趋势,部分轨迹发生改变,定向性不明显,这是由于射流水平方向速度较低导致的。由此可知,与单警催泪射流相比,高速催泪射流轨迹的集束性和定向性均表现出明显优势,这是由于前者在发射过程中推动射流的能量远远高于后者。

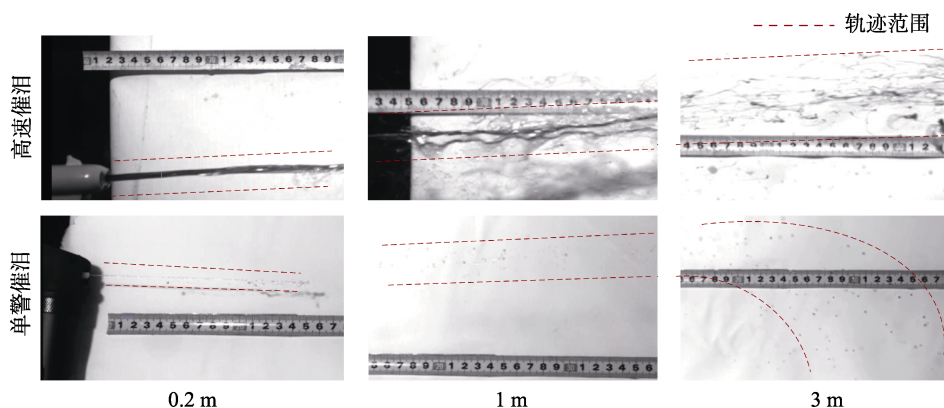


图3 催泪射流动态轨迹
Fig.3 Dynamic trajectories of lachrymatory jet

2.2 射流速度演化

射流速度是描述射流轨迹的一个重要参数,本文探究射流在发射口附近处(即 0~0.2 m)和射流持续喷射过程中(0.2~3 m)这 2 个阶段的速度变化情况,以求尽量完整地描述整个射流喷射过程。设定高速摄像机的采集帧率为 10 101 pfs,根据式(1)分别计算高速催泪射流和单警催泪射流在 0、0.05、0.1、0.15、0.2、1、3 m 处的瞬态速度。对于高速催泪射流,不考虑射流前端空泡现象,利用主轨迹进行速度计算;对于单警催泪射流,其射流在 1 m 和 3 m 处运动轨迹明显发散,因此只能选取某一小液珠作为特征点,以该特征点的运动计算瞬态速度。由图 3 可以看出,单警催泪射流在 1 m 射程内和高速催泪射流在 3 m 射程内的轨迹基本维持水平方向,竖直方向上的运动趋势不明显。单警催泪射流轨迹在 3 m 处的方向发生改变,小液珠的运动除水平前进外,还有明显的竖直降落趋势。通过选取某一特征点计算瞬态速度,可以得到该点的水平前进速度为 7.7 m/s,竖直降落速度为 2.1 m/s,可见水平前进速度占主导地位。另外,由于射流的水平前进速度对其作用有效性的影响更为关键,因此本文只考虑射流的水平速度。

图 4 所示的射流速度结果表明,高速催泪射流的在发射口附近处(即 0、0.05、0.1、0.15、0.2 m)的速度分别为 101.0、111.2、131.3、138.9、138.9 m/s,射流在短时间内持续加速。这是由于初始高压气体压力大,射流在喷嘴内部受到约束,一旦离开喷嘴约束

消失,它能够在极短的时间内为射流提供巨大的加速度。而后,射流速度由 0.2 m 处的 138.9 m/s 降低到 1 m 处的 88.3 m/s,在 3 m 处的速度则衰减至 42.9 m/s。这主要是由于在流体演化过程中,由于黏性作用产生的摩擦阻力和压差阻力共同导致了射流能量的损失和速度的降低。此外,射流的形态和稳定性也会影响流体阻力的大小,射流在前进过程中出现了分散和不稳定的情况,增加了与空气的接触面积,进而增大了流体阻力,使得射流在远距离处的速度显著下降。

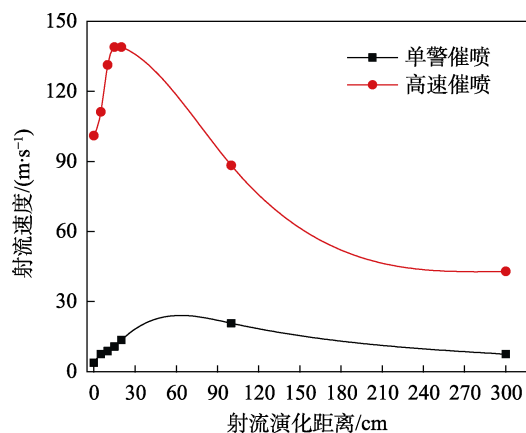


图4 催泪射流速度
Fig.4 Velocity of lachrymatory jet

同样,单警催泪射流速度表现出随距离先增加后减小的特点,在 0、0.05、0.1、0.15、0.2 m 处的速度分别为 3.8、7.5、8.8、10.7、13.5 m/s,先明显增速

后缓慢增速。而后, 射流速度由 0.2 m 处的 13.5 m/s 继续增加至 1 m 处的 20.7 m/s, 到 3 m 处衰减至 7.5 m/s。这是由于在发射口附近, 压缩气体瞬间释放, 射流增速明显, 但由于单警催泪射流喷射持续时间较长, 在射流离开喷嘴后的一段时间内, 气体压力较为稳定释放, 使得射流速度缓慢达到一个相对稳定的最大值。在 1~3 m 阶段, 随着罐内气体释放导致的压力降低, 以及流体阻力的持续作用, 射流速度逐渐减小。

从图 4 中速度峰值对应的演化距离可以发现, 单警催泪射流的加速过程明显比高速催泪射流持续时间长, 且速度整体变化规律较高速催泪射流更加平缓。这是由于速度峰值对应的演化距离受到气体压力释放速率、喷嘴设计以及使用环境等多种因素的影响。单警催泪喷射器采用了更为精细的喷嘴设计, 以在较长距离内保持射流的稳定性和集中性, 同时其气体压力的释放速率更为稳定, 使得射流速度变化较为平缓。

2.3 射流抗风性能

高速催泪喷射器和单警催泪喷射器在不同侧向风条件下的射流着靶情况如图 5 所示。对着靶图进行边界处理后可以观察到: 无风条件下, 高速催泪射流和单警催泪射流的着靶中心与瞄准点在左右方向(侧风方向)几乎无偏差, 说明它们的射流轨迹在稳定环境下具有较高的准确性; 2 级风速下, 高速催泪射流和单警催泪射流的着靶中心侧向偏移距离分别为 3.5、20.5 cm, 高速催泪射流着靶几乎均落在脸部区域, 显示出较好的抗风稳定性, 而单警催泪射流着靶只覆盖脸部少量区域, 与高速催泪射流表现出了显著差异; 随着风速增加到 4 级, 高速催泪射流的着靶中心侧向偏移距离虽然也有所增加, 达到了 9.2 cm, 但其着靶仍然大部分落在脸部区域, 保持了较高的命中率, 而单警催泪射流的着靶中心已经远离瞄准点, 无法测量偏移距离, 仅有少部分着靶覆盖脸部区域, 表明其射流轨迹在 4 级侧风环境下受到了严重影响。因此, 侧风条件下高速催泪喷射流的轨迹偏移情况明显优于单警催泪射流, 这种差异主要得益于高速催泪射流具有较大的动能和更好的稳定性, 能够在侧向风作用下保持较好的命中率, 而单警催泪射流速度相对较低, 动能较小, 因此在侧向风的影响下更容易出现偏移和散射。

高速催泪喷射器和单警催泪喷射器的射流抗风着靶率结果如图 6 所示。在无风、2 级和 4 级等 3 种不同侧向风条件下, 高速催泪射流的着靶率分别为 85.2%、74.0%、57.4%, 单警催泪射流的着靶率分别为 78.8%、63.5%、4.2%, 高速催泪射流的着靶率均明显高于单警催泪射流。这一差异在无风条件下相对较小, 但随着风速的增加, 两者的差距逐渐拉大。在无风情况下, 高速催泪射流着靶率损失主要由于雾化

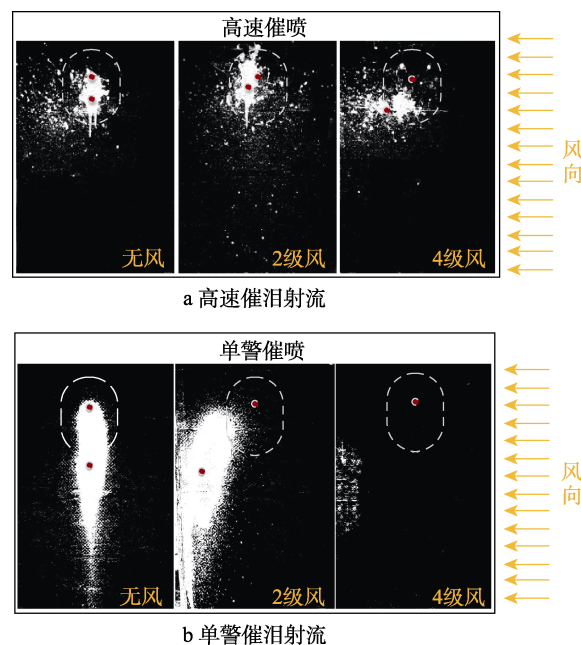


图 5 抗风性能着靶图

Fig.5 Wind-resistant target performance: a) high-speed lachrymatory jet; b) general lachrymatory jet

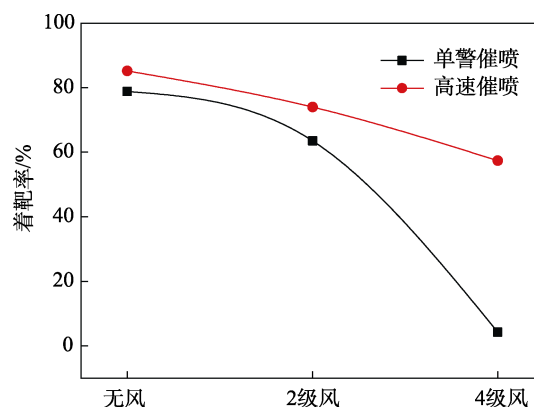


图 6 催泪射流抗风着靶率结果

Fig.6 Wind-resistant target rates of lachrymatory jet

效应, 在高速射流的作用下, 液体被迅速分散成小颗粒, 即发生雾化, 液体在高速射流的作用下被破碎成细小雾滴, 尽管没有风的干扰, 雾化颗粒在射流轨迹传输中发生偏移和飘散, 会对着靶率产生影响, 而单警催泪射流着靶率的损失主要是由于水平动能低, 部分催泪剂未达到靶板上。在有风条件下, 风速成为影响着靶率主导因素, 随风速增大, 单警催泪喷射的着靶率显著降低, 尤其是 4 级风速下, 单警催泪射流的着靶率只有 4.2%, 催泪剂几乎全部在喷射过程中损失。

由图 3 可以观察到, 高速催泪射流轨迹在 3 m 处具有很好的集束性和定向性, 同时射流速度整体较高, 因此其抗风稳定性明显较强; 而单警催泪射流在 3 m 处本身出现轨迹向下偏移, 在侧向风作用下偏移更加明显, 抗风稳定性较差, 可见射流轨迹特征对抗风稳定性起到了关键作用。因此, 为了提高催泪喷射

器的抗风性能,可以从以下几个方面进行优化:提高射流的集束性和定向性,使催泪剂更集中地朝目标方向喷射;增加射流的速度,使其能够更快地穿过风力影响区域,减少被风吹散的可能性;优化喷射器的喷嘴设计,以适应不同的风速和风向条件。

3 结论

本文分别搭建了射流瞬态采集平台和抗风性能测试平台,并从射流轨迹特征和抗风性能2个方面对高速催泪喷射器进行了研究,并与单警催泪喷射器作对比。得出如下结论:

1) 高速催泪喷射器射流初始直径达5.5 mm,呈较为规整的柱状,初始速度达138.9 m/s。在1 m处,射流中心仍有明显的集束状,周围出现空泡现象,速度降为88.3 m/s;在3 m处,射流轨迹呈发散的胶丝状,速度降为42.9 m/s。单警催泪喷射器射流在0.2、1、3 m处的速度分别为7.9、20.7、7.5 m/s,射流在前进过程中逐渐分散成小颗粒状的液珠,并在3 m处出现整体轨迹向下偏移。高速催泪喷射器射流相比单警催泪喷射器具有良好的集束性和定向性,同时射流速度整体更高。

2) 抗风性能上,使用模拟人体上躯干600 mm×900 mm靶标(瞄准脸部),在0~4级侧向风作用下,高速催泪射流着靶率为85.2%~57.4%,中心侧向偏移小于10 cm,相比单警催泪喷射器着靶率78.8%~4.2%,中心侧向偏移超过20 cm,高速催泪喷射器射流抗风性能显著提升。

3) 高速催泪喷射器射流具有很好的集束性和定向性,同时射流速度整体较高,这些轨迹特征对其抗风稳定性起到了关键作用,而单警催泪喷射器的喷射持续时间较高速催泪喷射长,定向性和集束性欠佳。合适的喷嘴设计能够优化喷射流的形态和速度分布,使催泪剂在射出后能够保持较高的速度。

参考文献:

- [1] EREN DEMIR E, ALI TEKINER M, İSBİR TURAN A. The Role of non-Lethal Weapons in Public Security[J]. Journal of Criminology and Criminal Law, 2022, 60(3): 59-75.
- [2] MANHAS N S, STAHL D, SCHELLENBERG M, et al. Non-Lethal Weapon: Injury Patterns and Imaging Correlates for Firearm Alternatives[J]. Clinical Imaging, 2021, 79: 165-172.
- [3] WAHL P, SCHREYER N, YERSIN B. Injury Pattern of the Flash-Ball®, a Less-Lethal Weapon Used for Law Enforcement: Report of Two Cases and Review of the Literature[J]. The Journal of Emergency Medicine, 2006, 31(3): 325-330.
- [4] 杨东昌, 马永忠. 非致命武器发展现状及趋势[J]. 中国

设备工程, 2020(6): 235-238.

YANG D C, MA Y Z. Development Status and Trend of Non-Lethal Weapons[J]. China Plant Engineering, 2020(6): 235-238.

- [5] 吴琼, 汪送. 非致命武器装备系统成熟度评估研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(10): 10-15.
- [6] MARTÍNEKOVÁ H, SMETANA M. Dynamics of Norm Contestation in the Chemical Weapons Convention: The Case of 'Non-Lethal Agents'[J]. Politics, 2020, 40(4): 428-443.
- [7] ROBBE C, PAPY A, NSIAMPAN N, et al. NATO Standardized Method for Assessing the Thoracic Impact of Kinetic Energy Non-Lethal Weapons[J]. Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety, 2023, 7(1): 7.
- [8] 施磊, 赫雷, 周克栋, 等. 连续绿色激光非致命武器致伤效应实验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(7): 46-50.
- [9] SHI L, HE L, ZHOU K D, et al. Experimental Study on Wounding Effect of CW Green Laser Non-Lethal Weapon[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(7): 46-50.
- [10] 汪送. 防暴动能钝性弹道冲击实验测试研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 1-7.
- [11] WANG S. Review on Experimental Tests of Anti-Riot Kinetic Projectiles Blunt Ballistic Impact[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(12): 1-7.
- [12] 于小牧, 汪送. 非致命动能弹头部冲击响应分析[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(4): 67-73.
- [13] YU X M, WANG S. Head Impact Response Analysis of Non-Lethal Kinetic Energy Projectiles[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(4): 67-73.
- [14] BORGES J, SAUTIER C, KREBS-DROUOT L, et al. Death and Non-Lethal Weapons: A Case of Homicide by Penetrating Injury without Projectile[J]. Forensic Science International, 2022, 337: 111374.
- [15] DE LARRINAGA M. (Non)-Lethality and War: Tear Gas as a Weapon of Governmental Intervention[J]. Critical Studies on Terrorism, 2016, 9(3): 522-540.
- [16] 丁勇. 高速催泪喷射器在警务实战中的应用[J]. 公安教育, 2023(12): 39-42.
- [17] DING Y. Application of High-Speed Tear Sprayer in Police Actual Combat[J]. Gong An Jiao Yu, 2023(12): 39-42.
- [18] 甘春霖. 非致命化学武器研发与使用的伦理考量[D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- [19] GAN C L. Ethical Considerations in the Development and Use of Non-Lethal Chemical Weapons[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2019.
- [20] 徐艳峰. 软杀伤弹药用天然刺激药剂的制备研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.

- XU Y F. Study on Preparation of Natural Stimulating Agents for Soft-Killing Ammunition[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [16] 孙振斌. 催泪喷射器中刺激组分的分析方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- SUN Z B. A Study on Analytical Methods of Irritant Components in Lachrymator[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [17] 胡成, 陈涛, 包志明, 等. 压缩空气泡沫射流轨迹研究[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(7): 976-979.
- HU C, CHEN T, BAO Z M, et al. Study on Trajectory of Compressed Air Foam Jet[J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(7): 976-979.
- [18] 中华人民共和国公安部. 光幕靶测速仪校准规范: GA/T 1727—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- Calibration Specifications for Speedmeter of Photoelectric Screen Target: GA/T 1727—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [19] DONG T, YANG J Q, CHEN D, et al. Analysis of the Capture Rate of Barrel Weapon Test Based on Laser Screen Velocity Measurement System[J]. IEEE Access, 2021, 9: 9636-9642.
- [20] CHU W B, ZHAO D E, LIU B W, et al. Research on Target Deviation Measurement of Projectile Based on Shadow Imaging Method in Laser Screen Velocity Measuring System[J]. Sensors, 2020, 20(2): 554.
- [21] 胡艳岭. 气动枪械发射原理有关问题的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- HU Y L. Research on the Launching Principle of Pneumatic Firearms[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [22] MA H P, CHEN P, SHI H B, et al. Measurement of Bullet Velocity Parameter from High-Speed Sequential Images[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1827(1): 012027.
- [23] 刘颖茜, 姚小明, 李碧波. 高速摄像在某强冲击试验中的试验弹测速应用研究[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(5): 904-910.
- LIU Y X, YAO X M, LI B B. Research on Velocity Measurement of Projectiles Using High-Speed Photography in Strong Impact Test[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024, 43(5): 904-910.
- [24] WEBER A, WÖSS C, KNEUBUEHL B P, et al. Skin Laceration Caused by a Short Distance Shot from a Pepper Spray Launcher: A Case Report[J]. International Journal of Legal Medicine, 2023, 137(2): 609-612.
- [25] 中华人民共和国公安部. 公安单警装备 催泪喷射器: GA 884—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- Individual Police Equipment—Spray with Lachrymator: GA 884—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 风力等级: GB/T 28591—2012[S]. 北京: 中国气象局, 2012.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Wind Scale: GB/T 28591—2012[S]. Beijing: China Meteorological Administration, 2012.