

浸河水环境对某小口径步枪的动力学影响分析

李玥, 王永娟

(南京理工大学, 南京 210094)

摘要: **目的** 研究浸河水环境对某小口径步枪自动机运动特性的影响规律。**方法** 采用摩擦系数仪测得在浸河水后自动机枪机框与枪机、导轨之间的摩擦系数, 获得浸河水浓度对 2 个摩擦系数的影响规律。根据某小口径步枪的三维模型, 在 ADAMS 平台中, 建立其虚拟样机模型, 并进行模型验证。在上述基础上, 将不同浸河水后运动副间的摩擦系数加载到模型中, 经仿真分析获得不同浸河水浓度对自动机运动特性的影响规律。**结果** 某小口径步枪的枪机、导轨与枪机框之间的摩擦系数随着浸河水浓度的增加而有所增大, 而自动机的后坐到位速度、复进开始速度、复进到位速度以及射频都会随着浸河水浓度的增加而下降, 其中, 后坐到位速度在不同浸河水浓度环境下的降低幅度最小, 其降低幅度小于 10%, 复进到位速度的降低幅度最大, 为 16.9%, 但自动机后坐最大速度与浸河水浓度无关。**结论** 浸河水环境会增大运动副间的摩擦系数, 增加自动机运动过程中的能量损耗, 且当浸河水的质量浓度增大到 20 kg/m³ 时, 出现后坐不到位故障, 运动副之间的摩擦系数对自动机的复进到位无影响。

关键词: 浸河水环境; 自动步枪; 虚拟样机; 自动机; 仿真; 运动特性

中图分类号: TJ22

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)06-0018-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.06.004

Dynamic Influence Analysis of a Small-caliber Rifle in Immersion Water Environment

LI Yue, WANG Yong-juan

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

ABSTRACT: In order to study the influence of immersion water environment on the motion characteristics of a small-caliber rifle automata machine, the friction coefficient between the machine frame and the machine as well as between the machine frame and the guide rail of the automaton after immersion water was measured by friction coefficient meter, and the influence of concentration on the two friction coefficients was obtained. In accordance with the three-dimensional model of a small-caliber rifle, the virtual prototype model was established and verified on the ADAMS platform. On the basis of the above experience, the friction coefficients between the kinematic pairs after different river water immersions are loaded into the model, and the influence law of different river water concentrations on the motion characteristics of the automaton was obtained through simula-

收稿日期: 2022-05-04; 修订日期: 2022-06-06

Received: 2022-05-04; Revised: 2022-06-06

基金项目: 基础加强重点项目 (2019-jcjq-zd-138-00)

Fund: Key Projects of Foundation Strengthening(2019-jcjq-zd-138-00)

作者简介: 李玥 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为轻武器系统仿真分析。

Biography: LI Yue (1998-), Female, Postgraduate, Research focus: simulation analysis of small arms system.

通讯作者: 王永娟 (1972—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为轻武器可靠性技术。

Corresponding author: WANG Yong-juan (1972-), Female, Doctor, Professor, Research focus: reliability technology for small arms.

引文格式: 李玥, 王永娟. 浸河水环境对某小口径步枪的动力学影响分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(6): 018-025.

LI Yue, WANG Yong-juan. Dynamic Influence Analysis of a Small-caliber Rifle in Immersion Water Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(6): 018-025.

tion analysis. The test and simulation results show that the friction coefficient between the gun machine, the guide rail and the gun frame of a small-caliber rifle will increase with the increase of the immersion water concentration, while the recoil speed, the start speed of the re-entry, the re-entry speed and the radio frequency of the automaton will decrease with the increase of the immersion water concentration, among them, the recoil-to-position speed has the smallest decrease in the immersion water environment with different river water concentrations, with its decrease range is less than 10%, and the return-to-position speed has the largest decrease in the flooded environment with different river water concentrations, with its decrease range is 16.9%, but the maximum recoil speed of the automaton is independent of the river water concentration in the immersion water environment. Therefore, the immersion water environment will increase the friction coefficient between the kinematic pairs and step up the energy loss during the movement of the automata machine. When the immersion water concentration increases to 20 kg/m^3 , the recoil failure occurs, and the friction coefficient between the kinematic pairs does not affect the reentry of the automatic mechanisms.

KEY WORDS: immersion water environment; automatic rifle; virtual prototype; automata machine; simulation; kinematic characteristics

枪械是武器装备中使用军种最多、装备数量最多的武器, 因此必须在各种严苛的环境都能可靠使用^[1-3]。由于我国地域辽阔, 河流众多, 纵横交错, 一旦发生局部战争或小规模冲突, 极有可能携枪泅渡, 因此 GJB 3484—98 环境试验中包括了浸河水环境的可靠性试验^[4-5]。GJB 3484—98 试验结果表明, 浸河水环境会对枪械的可靠性产生影响, 可能会产生后坐不到位和复进不到位等故障, 而目前并不了解浸河水环境对自动机的影响规律。

有许多人利用自动步枪的动力学仿真分析自动机受到的冲击、自动机在不同射击姿势下的运动特性、不同设计参数对自动机运动特性的影响以及自动机的运动可靠性^[6-12]。目前国内外尚没有浸河水环境因素对自动机运动特性影响的相关研究, 仅有一些研究者在进行可靠性研究时考虑了环境因素。张秀华等^[13]考虑了扬尘、淋雨和扬尘淋雨环境, 对 9 mm 手枪的开闭锁可靠性进行了分析。方峻等^[14-15]考虑了高低温、淋雨以及扬尘环境因素下影响抛壳和抽壳机构的因素, 并提出了预测抛壳机构和抽壳动作的失效判据, 最后利用蒙特卡洛法计算了出现故障的概率。

本文以某小口径步枪作为对象, 利用 ADAMS 软件建立了自动步枪的连发虚拟样机模型, 通过分析不同浓度浸河水环境下影响的参数, 并通过试验测出参数变化, 修改虚拟样机模型中的参数, 得到该自动步枪在不同河水浓度环境下的运动特性, 分析了浸河水环境对自动机运动特性。总体浸河水环境下自动机运动特性分析流程如图 1 所示。

1 浸河水环境对摩擦系数的影响分析

1.1 摩擦系数测量试验

由于在浸河水环境下, 河水可通过间隙进入到自

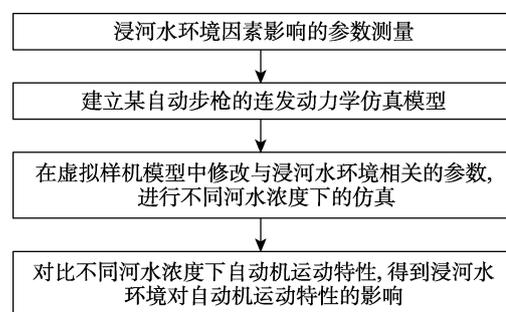


图 1 浸河水环境下某自动步枪的自动机运动特性分析流程

Fig.1 Automata motion characteristics analysis process for an automatic rifle in a river immersion environment

动机内, 在自动机运动过程中, 由于泥沙颗粒和水的存在, 会改变接触表面的相关接触特性参数。在有泥沙存在的物体表面, 会使物体接触表面之间的摩擦系数较正常情况下不同。不同浸河水浓度下, 自动机与导轨之间有不同的摩擦系数, 通过改变摩擦系数可以模拟不同浸河水浓度下摩擦特性对自动机运动的影响。

根据 GJB 3484 的浸河水试验环境, 以尘土粒度小于 0.08 mm 占 75%和在 $0.08 \sim 0.2 \text{ mm}$ 占 25%的混合颗粒制作河水。采用摩擦系数仪分别在 0 、 1.5 、 3.0 、 4.5 kg/m^3 的浸河水质量浓度下对枪机框试件、枪机和导轨之间的摩擦系数进行测试, 见图 2、3。

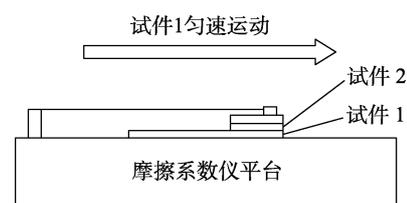


图 2 摩擦系数测试平台

Fig.2 Coefficient of friction test bench

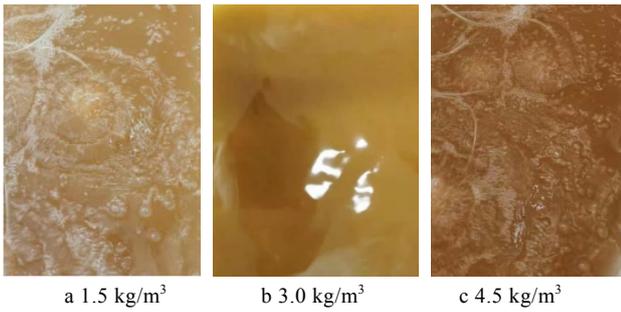


图3 不同浓度河水

Fig.3 Different concentrations of river water

试验步骤如下：1) 将导轨、枪机和枪机框试件的运动接触表面保持在干燥状态，测量枪机框与导轨、枪机之间的摩擦系数，将它作为初始参照；2) 以 GJB 3484 的浸河水试验环境作为基本要求，将 3 个试件分别置于浸河水环境中，之后固定在摩擦系数仪平台上；3) 启动摩擦系数仪，使枪机框试件匀速运动，在摩擦系数仪的显示屏上获得摩擦系数的数据；4) 测量 20 组数据，取平均值，得到一个河水浓度下的摩擦系数；5) 改变浸河水质量浓度为 0、1.5、3.0、4.5 kg/m³，再次运用上述步骤进行测量，得到不同河水浓度下的摩擦系数。

1.2 摩擦系数测量结果及分析

由表 1 可知，导轨材料与枪机材料的摩擦系数最小值均在未浸河水时，对比正常条件下导轨材料的摩擦系数，在浸河水质量浓度为 0、1.5、3.0、4.5 kg/m³ 时，摩擦系数的增加幅度分别为 3.52%、17.09%、38.69%、71.86%。由此可知，导轨材料的摩擦系数在浸河水浓度增加时，其增加幅度也增大。从表 1 可以看出，导轨材料的摩擦系数在浸河水质量浓度为 4.5 kg/m³ 时最大。不同浓度下导轨材料的摩擦系数曲线见图 4。可以看出，导轨材料的摩擦系数随着浸河水浓度的增加而增大。

对比正常条件下枪机材料的摩擦系数，在浸河水质量浓度为 0、1.5、3.0、4.5 kg/m³ 时，摩擦系数的

表 1 不同浸河水浓度下摩擦系数的测量结果
Tab.1 Measurement of the coefficient of friction at different river concentrations

浸河水质量浓度/(kg·m ⁻³)	材料	摩擦系数
未浸河水	导轨	0.199
	枪机	0.244
0	导轨	0.206
	枪机	0.301
1.5	导轨	0.233
	枪机	0.370
3.0	导轨	0.276
	枪机	0.417
4.5	导轨	0.342
	枪机	0.452

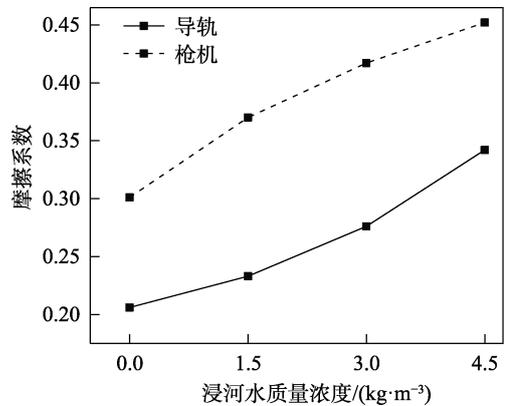


图 4 不同浸河水浓度下导轨和枪机材料的摩擦系数曲线
Fig.4 Friction coefficient curve of guide rail and bolt material at different river water concentrations

增加幅度分别为 23.36%、51.64%、70.90%、85.25%。由图 4 可知，枪机材料的摩擦系数随浸河水浓度的增加而增大。在相同浸河水浓度环境下，导轨材料的摩擦系数均比枪机材料的摩擦系数小，且每种浸河水浓度环境下相差均大于 20%。

为预测不同浸河水浓度下枪机框与导轨、枪机之间的摩擦系数，利用 MATLAB 对试验所得数据进行线性拟合，见图 5。

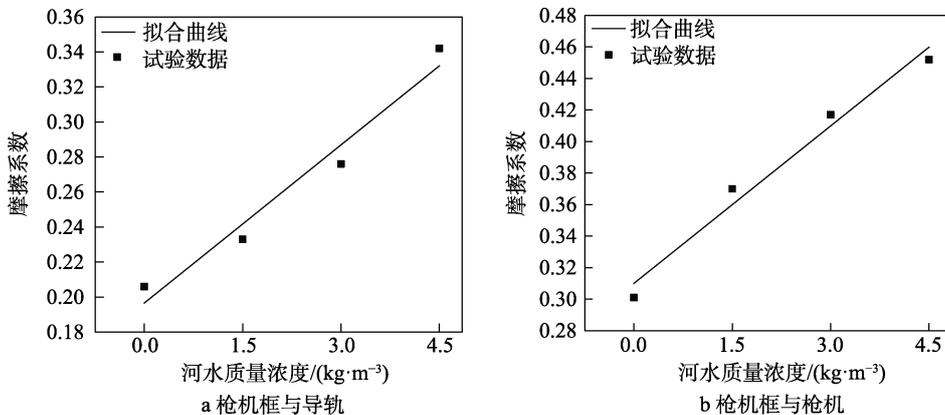


图 5 枪机框与导轨、枪机之间的摩擦系数拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of friction coefficient between bolt carrier and guide rail and bolt:
a) bolt carrier and guide rail, b) bolt carrier and bolt

枪机框与导轨之间的摩擦系数在浸河水环境下的关系式为:

$$y = 0.0301x + 0.1966 \quad (1)$$

式中: y 代表枪机框与导轨之间的摩擦系数; x 代表浸河水浓度。对拟合曲线的优度进行分析, 得到线性相关系数 r 为 0.96, 认为拟合效果较好。

枪机框与枪机之间的摩擦系数在浸河水环境下的关系式为:

$$z = 0.0333x + 0.3100 \quad (2)$$

式中: z 代表枪机框与枪机之间的摩擦系数。对拟合曲线的优度 N 进行分析, 得到线性相关系数 r 为 0.98, 拟合效果也较好。

根据试验结果, 随着浸河水浓度的增长, 枪机、导轨与枪机框材料的摩擦系数均随着河水浓度的增加而增大。相同浸河水浓度环境下, 导轨与枪机框材料的摩擦系数均比枪机与枪机框材料的摩擦系数小, 且相差均大于 20%。

2 虚拟样机模型

2.1 模型建立

在进行某小口径步枪的虚拟样机建模过程中, 不需要将所有动作以及零件都考虑进去, 要根据具体的仿真目的和需要, 合理地忽略或者删减不必要的部分, 在达到仿真目的的同时, 尽可能地简化模型。本模型的基本假设^[16-18]: 忽略一些小质量的非重要零件; 不考虑柔性体对运动的影响, 将各部件均看作刚体; 将机匣与地面固定; 忽略弹簧的内耗。

根据步枪的工作原理, 为了简化该步枪的虚拟样机模型, 略去了与自动机运动过程无关的握把、上护盖等其他部件。该模型中共有 22 个部件, 7 个固定副, 92 个刚体碰撞, 7 个平移副, 4 个旋转副。在活塞、击锤、弹头与地面之间添加平移副, 在缓冲器、连发阻铁、不到位保险与下机匣之间添加旋转副, 还有 1 个旋转副是拉壳钩与枪机。

模型的簧力共有 8 个, 包括 5 个压缩弹簧和 3 个扭转弹簧, 其中压缩弹簧包括拉壳钩簧、托弹簧、击锤簧、复进簧以及活塞簧, 扭转弹簧包括不到位保险簧、连发阻铁簧和缓冲簧。弹簧根据其设计的预压力和刚度作用, 主要参数见表 2 和表 3, 其中 k_1 为压缩

表 2 压缩弹簧参数
Tab.2 Compression spring parameters

名称	$k_1/(N \cdot mm^{-1})$	F_1/N
活塞簧	0.544 2	10.0
复进簧	0.211 1	28.4
击锤簧	0.107 2	10.8
拉壳钩簧	21.1	64.9
托弹簧	0.230 0	25.0

表 3 扭转弹簧参数
Tab.3 Torsion spring parameters

名称	$k_2/(N \cdot mm \cdot deg^{-1})$	$F_2/(N \cdot mm)$
不到位保险簧	1.5	20.0
连发阻铁簧	1.628	63.0
缓冲簧	31.13	2 064.0

弹簧刚度, k_2 为扭转弹簧参数, F_1 、 F_2 为预压力。

模型还包括 2 个外力载荷, 即枪膛合力和导气室压力。当某小口径步枪射击时, 2 个外力开始作用。枪膛合力根据内弹道曲线(见图 6)获得, 其公式为^[19]:

$$p_t = \left(1 + \frac{1}{2} \times \frac{\omega}{\omega + 3\varphi_1 m} \right) p \quad (3)$$

$$F_t = S p_t \quad (4)$$

式中: φ_1 为次要功计算系数; ω 为装药量; m 为弹头质量; F_t 为枪膛合力; S 为枪膛横截面积。

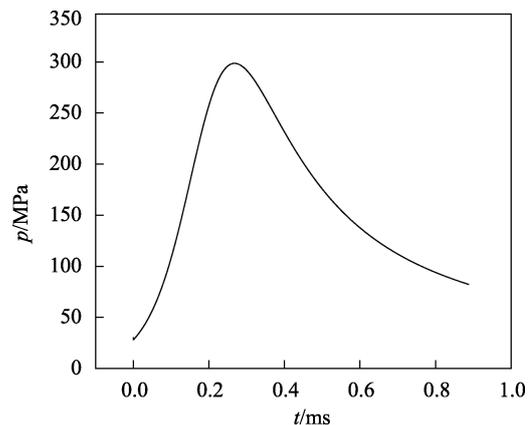


图 6 内弹道压力-时间曲线
Fig.6 Internal ballistic pressure-time curve

气室内火药气体压力的变化规律与膛内火药气体压力有关, 也与导气装置的结构参数有关。对于静力作用式的导气装置, 根据描述气室压力变化规律的布拉文经验公式^[20], 导气室压力为:

$$p_s = p_d e^{-\frac{t}{b}} (1 - e^{-\frac{a t}{b}}) \quad (5)$$

$$F_s = S_h p_s \quad (6)$$

式中: p_s 为气室压力; p_d 为弹头经过导气孔瞬时的膛内平均压力; t 为气室压力工作时间; b 为与膛内压力冲量有关的时间系数; a 为与导气装置结构参数有关的结构系数; F_s 为气室火药燃气作用力; S_h 为活塞面积。通过计算得到此步枪的导气室火药燃气作用力与时间曲线, 见图 7。

由于连发模型的供弹需要存在弹头, 才能保证供弹的可靠性, 因此需要在弹壳与弹头之间建立固定副, 以保证供弹动作的准确。由于抽壳过程中弹头已

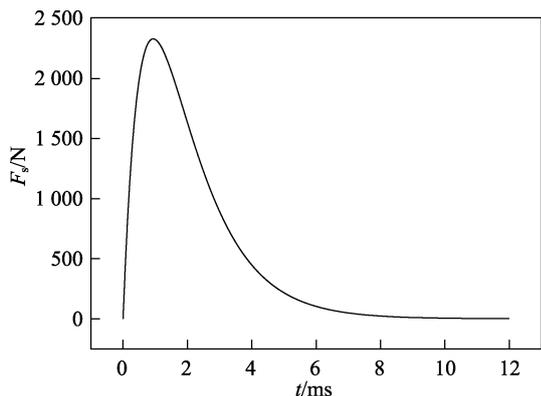


图7 导气室火药燃气作用力-时间曲线
Fig.7 Force-time curve of gunpowder gas action in the gas chamber

经在枪管外,因此弹头和弹壳之间的固定副如何解脱是连发模型的重点。采用的连发方法是:在弹头上建立一个测量弹头质心 X 方向位置的函数,利用 ADAMS 中的传感器,在弹头质心的 X 坐标到达膛内位置时,运用脚本仿真将弹壳和弹头的固定副失效,同时生效弹头与枪管之间的平移副,以此来完成连发动作。建立的某小口径步枪虚拟样机模型共有 35 个自由度,其虚拟样机模型如图 8 所示。



图8 某小口径步枪的虚拟样机模型
Fig.8 A virtual prototype of an automatic rifle

2.2 模型验证

通过对实际射击试验与虚拟样机模型仿真结果进行对比,来验证模型的可信度。选择枪机框的特征点速度以及位移作为虚拟样机模型与试验对比的校对指标,试验与仿真结果对比见图 9 和表 4、5。表 5 中, x 为枪机框最大后坐位移。根据图 9 和表 4、5 可知,试验数据与仿真数据相差不超过 10%,说明建立的虚拟样机模型是相对正确的。

表4 枪机框速度试验与仿真结果对比
Tab.4 Comparison of bolt carrier speed test and simulation result

速度特征点	试验结果/ ($m \cdot s^{-1}$)	仿真结果/ ($m \cdot s^{-1}$)	误差/%
最大后坐速度	8.807	8.890	0.942
后坐到位速度	5.512	5.601	1.615
复进开始速度	2.409	2.286	5.106
复进到位速度	3.970	3.752	5.491

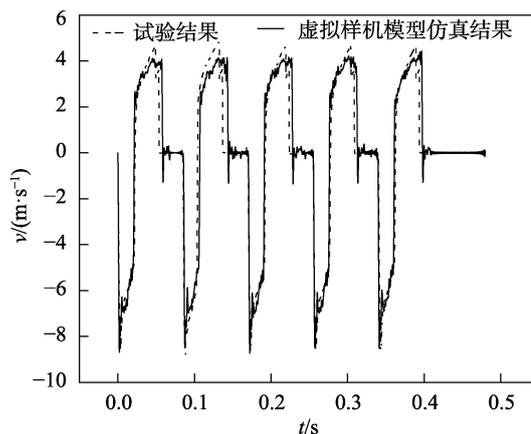


图9 虚拟样机模型与试验的自动机速度时间曲线对比
Fig.9 Comparison of velocity-time curves between virtual prototype model's and test's automatic mechanism

表5 枪机框位移试验与仿真结果对比
Tab.5 Comparison of bolt carrier displacement test and simulation result

位移	试验结果/mm	仿真结果/mm	误差/%
x	125.7102	124.7028	0.8014

3 浸河水环境对自动机运动的影响分析

通过对不同浸河水浓度下的自动机进行仿真,分析不同浓度下的射频和特征点速度,首先对其最大后坐到位速度进行分析,如图 10 所示。

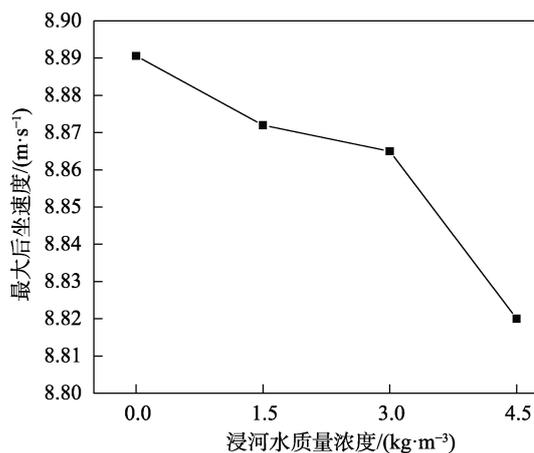


图10 不同浸河水浓度下自动机的最大后坐速度
Fig.10 Maximum recoil speed of bolt carrier under different river concentration

通过在 0、1.5、3.0、4.5 kg/m^3 的浸河水质量浓度下进行 5 连发仿真,每一组的后坐最大速度取平均值,其后坐最大速度分别为 8.89、8.87、8.86、8.82 m/s ,对比其正常条件下的仿真结果,相差均不超过 1%,相差较小。由于自动机的后坐最大速度主要与膛内燃压力有关,因此自动机的后坐最大速度与浸河水浓度

无关。

不同浸河水浓度下的各个特征点速度和射击频率如图 11 所示。其后坐到位速度相对于正常条件下的降低幅度分别为 4.7%、6.7%、7.0%、8.9%；复进开始速度对于正常条件下的降低幅度分别为 2.1%、5.3%、13.8%、16.6%；复进到位速度相对于正常条件下的降低幅度分别为 2.3%、5.4%、11.7%、16.9%；射击频率相对于正常条件下的降低幅度分别为 4.4%、7.5%、10.5%、13.2%。由此可以判断, 各个

特征点速度均随着浸河水浓度的增加而降低, 射击频率也随着浸河水浓度的增加而降低, 其中后坐到位速度的降低幅度最小, 复进到位速度的降低幅度最大。其原因是在自动步枪进行浸河水时, 其导轨、枪机框及枪机的表面都会有河水进入, 以至于增大了自动机的摩擦系数, 使自动机与导轨在碰撞过程中的能量损失增加; 而在自动机运动过程中, 复进过程比后坐过程多走了半个循环的位移, 因此复进到位速度的降低幅度最大。

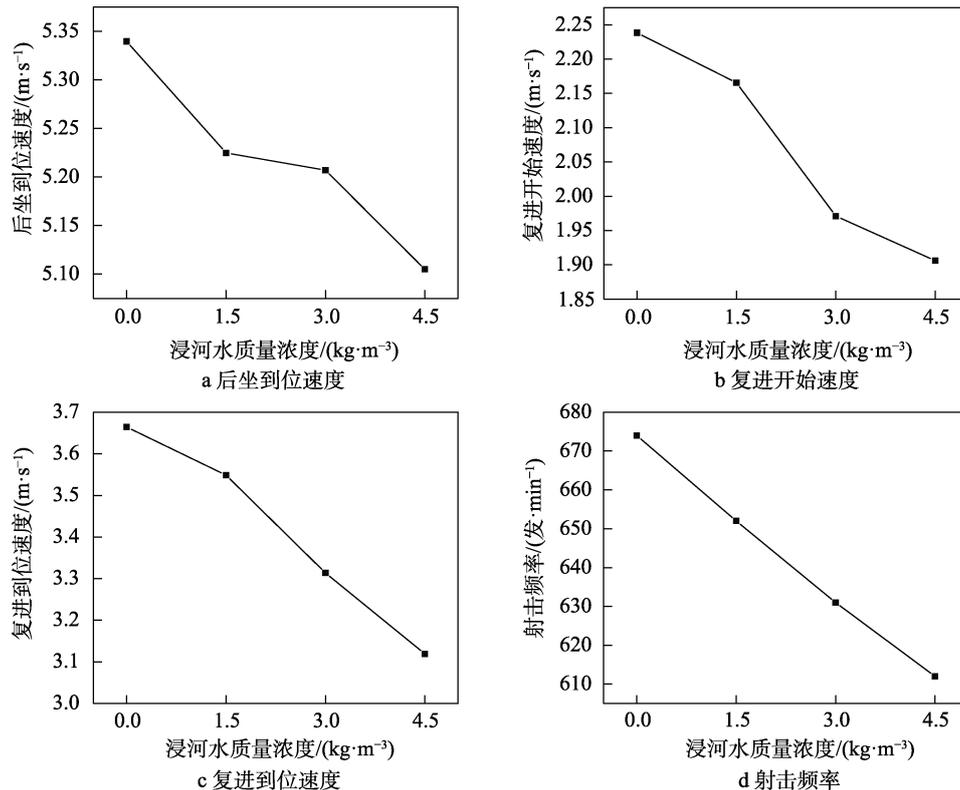


图 11 不同浸河水浓度下自动机特征点速度和射击频率

Fig.11 Automatic mechanism characteristic point velocity and RF under different river concentrations: a) recoil in place speed; b) recovery start speed; c) recovery in place speed; d) RF

由仿真结果可知, 自动机的后坐最大速度随着浸河水浓度的增加变化不大, 而后坐到位速度、复进开始速度以及复进到位速度都会随着浸河水浓度的增加而降低, 但降低幅度不大。后坐到位速度的降低幅度最小, 复进到位速度的降低幅度最大, 自动机的射频也随着浸河水浓度的增加而降低。

在浸河水环境下, 缓冲器与击锤的撞击力随着河水浓度的增加而减小, 如图 12 所示。在 0、1.5、3.0、4.5 kg/m³ 下, 撞击力分别为 2 527、2 463、2 267、2 106 N。这是由于河水增大了枪机框与导轨、枪机之间的摩擦系数, 增大了自动机运动过程的摩擦力, 导致自动机碰撞前后的速度均降低, 减小了碰撞能量, 碰撞力也随之减小。

以枪机框从速度为 0 和后坐到位速度计算后坐

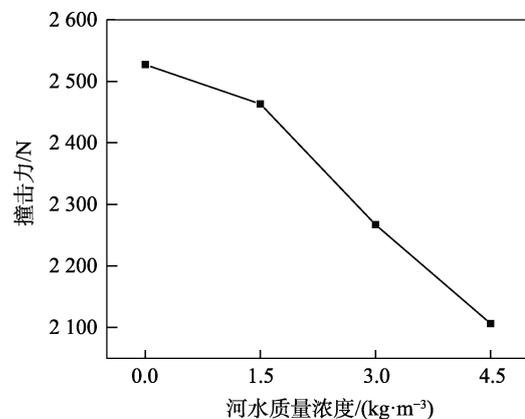


图 12 不同河水浓度下的缓冲器与击锤撞击力

Fig.12 The impact force of buffer and hammer under different river water concentrations

过程中枪机框的动能变化,以枪机框复进开始速度和复进到位速度计算复进过程中枪机框的动能变化。动能变化 ΔE 越小,后坐或复进过程中的能量损耗越大。不同浸河水浓度环境下自动机的动能变化见图 13。由图 13 可知,枪机框后坐和复进过程的动能变化均随着浸河水浓度的增加而减小。在河水质量浓度为 0、1.5、3.0、4.5 kg/m^3 下,后坐过程动能变化的降低幅

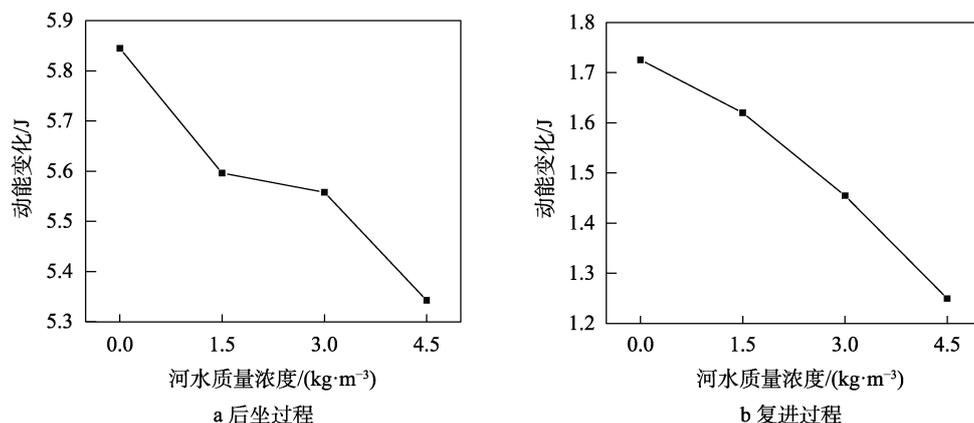


图 13 不同河水浓度下自动机能量损耗情况

Fig.13 Energy loss of automatic mechanisms under different river concentrations: a) recoil process; b) recovery process

以 $0.1 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的增量来增加河水质量浓度,利用得到的摩擦系数与浸河水浓度的公式,计算浸河水浓度增大后的摩擦系数,并将其代入到虚拟样机模型中,观察自动机的运动情况。当浸河水质量浓度增加到 $20.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时,其自动机运动出现后坐不到位现象,此时枪机框与枪机的摩擦系数为 0.9760 ,枪机框与导轨之间的摩擦系数为 0.7986 。当浸河水质量浓度增加到 $20.7 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时,枪机框与枪机的摩擦系数已经达到 1.0 ,此时自动机仍然可以在复进簧的作用下复进到位。由此可以判断枪机框与导轨、枪机之间的摩擦系数不能影响自动机的复进到位动作。

4 结论

1) 枪机、导轨与枪机框之间的摩擦系数随着浸河水浓度的增加而增大。在相同浸河水浓度环境下,导轨的摩擦系数均比枪机的摩擦系数小,且每种浸河水浓度的环境下相差均大于 20% 。得到了浸河水浓度与 2 种摩擦系数的关系式。

2) 自动机的后坐最大速度在 4 种不同浓度的浸河水环境下,相差小于 1% ,自动机的后坐最大速度与浸河水浓度无关。自动机的后坐到位速度、复进开始速度、复进到位速度以及射频都会随着浸河水浓度的增加而降低,但总体降低幅度不大,各个特征点速度以及射击频率的降低幅度都小于 20% 。其中,后坐到位速度在不同浸河水浓度环境下的降低幅度最小,其降低幅度小于 10% ;复进到位速度在不同河水浓度的浸河水环境下的降低幅度最大,为 16.9% 。随着浸

度分别为 9.1% 、 13.0% 、 13.6% 、 16.9% ;复进过程动能变化的降低幅度分别为 4.9% 、 10.7% 、 19.8% 、 31.1% 。随着河水浓度的增加,其动能下降幅度也相应地越来越大。由此表明,浸河水环境使自动机运动时的能量损耗增加,且随着河水浓度的升高,其降低幅度越大,自动机在后坐和复进过程中的能量损耗就越大。

河水浓度的增加,自动机的能量损耗也越大。

3) 自动机的缓冲器与击锤的碰撞力也随浸河水浓度的增加而降低。当浸河水质量浓度到达 $20 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时,自动机出现后坐不到位故障,此时枪机框与枪机的摩擦系数为 0.9760 ,枪机框与导轨之间的摩擦系数为 0.7986 。枪机框与导轨、枪机之间的摩擦系数不能影响自动机的复进到位动作。

4) 建立了某自动步枪的浸河水环境下的仿真模型,对不同浓度的摩擦系数进行了拟合。利用虚拟样机模型可以对浸河水环境下自动机出现的故障进行分析和不同的故障进行预测,也可将建立模型的方法运用到枪械处于不同环境时了解其自动机运动特性,与枪械环境试验技术相结合,为研制浸河水环境下的枪械提供了新的方法,也为枪械设计提供参考和依据。

参考文献:

- [1] 邱年生,张光沛.特种环境条件下的新 9 mm 手枪可靠性分析[J].四川兵工学报,2003,24(4):22-24.
QIU Nian-sheng, ZHANG Guang-pei. Reliability Analysis of The New 9mm Pistol Under Special Environmental Conditions[J]. Sichuan Ordnance Journal, 2003, 24(4): 22-24.
- [2] 张小石,王宪升,喻翔,等.某自动步枪机构动力学仿真分析[J].机械工程与自动化,2021(4):64-66.
ZHANG Xiao-shi, WANG Xian-sheng, YU Xiang, et al. Dynamics Simulation Analysis of Automatic Rifle Mechanism[J]. Mechanical Engineering & Automation,

- 2021(4): 64-66.
- [3] 满孝杰, 郝秀平, 焦健. 基于 ADAMS 的某链式机枪自动机动力学仿真研究[J]. 机械设计与制造工程, 2021, 50(1): 25-28.
MAN Xiao-jie, HAO Xiu-ping, JIAO Jian. Dynamic Simulation of a Chain Machine Gun Automata Based on ADAMS[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2021, 50(1): 25-28.
- [4] 杨正科. 枪械定型试验中的环境模拟试验[J]. 轻兵器, 1996(5): 21.
YANG Zheng-ke. Environmental Simulation Tests in Gun Stereotyping Tests[J]. Small Arms, 1996(5): 21.
- [5] 张俊斌, 马力. 枪械环境适应性试验可靠性评定方法的研究[J]. 轻兵器, 1998(2): 15-18.
ZHANG Jun-bin, MA Li. Research on Reliability Evaluation Methods for Environmental Adaptability Tests of Firearms[J]. Small Arms, 1998(2): 15-18.
- [6] 宫鹏涵, 周克栋, 康小勇, 等. 某自动步枪发射动力学仿真[J]. 弹道学报, 2014, 26(1): 94-97.
GONG Peng-han, ZHOU Ke-dong, KANG Xiao-yong, et al. Simulation of Launch Dynamics of a Rifle[J]. Journal of Ballistics, 2014, 26(1): 94-97.
- [7] 张小石, 王宪升, 喻翔. 某自动步枪连发动力学仿真分析[J]. 中国设备工程, 2022(3): 117-118.
ZHANG Xiao-shi, WANG Xian-sheng, YU Xiang. Study on Virtual Prototype Technology of Automatic Weapon Based on Dynamic Simulation Software-ADAMS [J]. China Plant Engineering, 2022(3): 117-118.
- [8] 贾智宏, 葛藤, 周克栋. 基于 ADAMS 的自动武器虚拟样机研究[J]. 系统仿真学报, 2008(3): 648-650.
JIA zhi-hong, GE teng, ZHOU ke-dong. Dynamics Simulation Analysis of Automatic Rifle Mechanism[J]. Journal of System Simulation, 2008(3): 648-650.
- [9] 邹衍, 徐诚, 张克. 5.8mm/7.62mm 模块化步枪运动特性匹配分析[J]. 兵工学报, 2015, 36(7): 1356-1362.
ZOU Yan, XU Cheng, ZHANG Ke. Analysis of Kinetic Characteristic Matching of 5.8mm /7.62mm Modularized Rifles[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(7): 1356-1362.
- [10] 邹衍. 小口径模块化枪族工作特性分析与研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
ZOU Yan. Analysis and Study of Working Characteristics of Small Caliber Modular Gun Family[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [11] 邹衍, 徐诚, 罗少敏, 等. 自动步枪刚性抛壳可靠性分析与设计方法研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(2): 209-217.
ZOU Yan, XU Cheng, LUO Shao-min, et al. Study of Rigid Ejection Reliability Analysis and Design Method of Automatic Rifle[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(2): 209-217.
- [12] 史亦超, 王永娟. 某新型自动发射系统动力学仿真研究[J]. 兵工自动化, 2016, 35(8): 25-32.
SHI Yi-chao, WANG Yong-juan. Dynamic Simulation of a New Automatic Launcher System[J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 35(8): 25-32.
- [13] 张秀华, 杨臻, 罗浩然, 等. 复杂环境下手枪参数匹配仿真分析[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(11): 40-43.
ZHANG Xiu-hua, YANG Zhen, LUO Hao-ran, et al. Simulation Analysis and Parameters Matching of Pistol under Complex Environment[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(11): 40-43.
- [14] 冯文浩, 方峻. 考虑环境温度和连续射弹量的某机枪抽壳故障仿真预测[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(5): 94-99.
FENG Wen-hao, FANG Jun. Simulation Prediction of a Machine Gun Shell Failure Considering Ambient Temperature and Continuous Projectile Volume[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(5): 94-99.
- [15] 袁克斌, 方峻. 考虑环境因素影响下某机枪抛壳可靠性分析[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(4): 80-85.
YUAN Ke-bin, FANG Jun. Reliability Analysis of a Machine Gun Cartridge Case Ejection Considering Environmental Factors[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(4): 80-85.
- [16] 王裕安, 徐万和, 薄玉成. 自动武器构造[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1994: 1-2.
WANG Yu-an, XU Wan-he, BO Yu-cheng. Automatic Weapon Construction[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 1994: 1-2.
- [17] 徐礼, 毛保全, 王传有, 等. 某自动榴弹发射器刚柔耦合发射动力学仿真[J]. 弹道学报, 2011, 23(4): 84-89.
XU Li, MAO Bao-quan, WANG Chuan-you, et al. Simulation on Rigid-Flexible Coupling Launch Dynamics of Automatic Grenade Launcher[J]. Journal of Ballistics, 2011, 23(4): 84-89.
- [18] 张本军, 王瑞林, 袁恒芝, 等. 某型步枪虚拟样机建模及仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(19): 6122-6125.
ZHANG Ben-jun, WANG Rui-lin, YUAN Heng-zhi, et al. Virtual Prototype Modeling and Simulation Analysis of Rifle[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(19): 6122-6125.
- [19] 化斌斌, 王瑞林, 王宇建, 等. 转管机枪枪膛合力在虚拟样机中的施加方法研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2015, 36(4): 9-12.
HUA Bin-bin, WANG Rui-lin, WANG Yu-jian, et al. Loading Method of Gatling Gun Breech Force in Virtual Prototype[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2015, 36(4): 9-12.
- [20] 徐诚, 王亚平. 火炮与自动武器动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 77-80.
XU Cheng, WANG Ya-ping. Dynamics of Gun and Automatic Weapon[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2006: 77-80.

责任编辑: 刘世忠