

引用本文

朱国庆,张雨蝶,陈凡宝.森林草原风力灭火机发展综述[J].消防科学与技术,2026,45(8):107-114.

Zhu Guoqing, Zhang Yudie, Chen Fanbao. A review of the development of pneumatic fire extinguishers used in forest-grassland firefighting[J]. Fire Science and Technology, 2026, 45(8): 107-114.

森林草原风力灭火机发展综述

朱国庆^{1,2}, 张雨蝶¹, 陈凡宝^{1,3}

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 深地科学与工程云龙湖实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 中国石油大学(华东) 机电工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要:在全球森林草原火灾频发的背景下,风力灭火机凭借其良好的便携性与地形适应性,已成为我国基层森林消防的重要装备,但仍面临复燃难以控制、振动噪声大、续航受限等瓶颈。本文系统梳理了风力灭火机的灭火机理、装备演进及未来发展方向。研究表明,风力灭火的机制可概括为“高速气流移除可燃挥发物、中断热量供应、终止燃烧反应”3个阶段,但其定量化研究存在参数标准不统一、复杂场景下普适性模型缺失等问题,难以为装备优化提供精准支撑。我国风力灭火机的发展历经功能实现、集成拓展和性能优化3个阶段,在机身结构、灭火剂协同以及减振降噪方面取得了一定进展,但在系统集成与技术研发方面仍存在不足。未来技术突破应聚焦电池供能升级、气凝胶等新型高效灭火介质的协同创新,同时补齐定量化研究与工程化应用的薄弱环节。本文旨在为风力灭火技术创新与工程化应用提供技术路径参考,助力提升森林草原火灾防控效能。

关键词:森林草原火灾;风力灭火机制;发展综述;全固态电池供能;气凝胶灭火剂

中图分类号:X932;TQ028.8 **文献标志码:**A **DOI:**10.20168/j.1009-0029.2026.08.0107.08

A review of the development of pneumatic fire extinguishers used in forest-grassland firefighting

Zhu Guoqing¹, Zhang Yudie¹, Chen Fanbao^{1,2}

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China; 2. Yunlong Lake Laboratory of Deep Underground Science and Engineering, Xuzhou Jiangsu 221116 China; 3. College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao Shandong 266580, China)

Abstract: Against the global backdrop of frequent forest-grassland fires, the pneumatic fire extinguishers have emerged as essential equipment for grassroots firefighting in China due to their superior portability and terrain adaptability, although persistent bottlenecks such as the difficulty in controlling reignition, excessive vibration and noise, and limited endurance remain. In this paper, the pneumatic fire extinguishing mechanism, equipment evolution, and future development directions are systematically reviewed. It is demonstrated that the extinguishing process is achieved through three stages comprising the removal of combustible volatiles, heat supply interruption, and combustion reaction termination via high-speed airflow. Nevertheless, quantitative research is currently constrained by inconsistent parameter standards and the absence of universal models for complex scenarios, making it difficult to provide accurate support for equipment optimization. In China, pneumatic fire extinguishers have progressed through phases of functional realization, integrated expansion, and performance op-

基金项目:国家消防救援局科技计划项目(2023XFCX33);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2021ZDPY0218);深圳市重点科技计划项目(ZDCYKXCX20250901094159001);山东省重点研发计划项目(2021CXGC011303)

作者简介:朱国庆,中国矿业大学安全工程学院教授,博士生导师,主要从事森林草原防灭火、建筑火灾防护、消防救援装备以及新型灭火材料等研究,江苏省徐州市铜山区大学路1号,221116, zgq119xz@126.com。

收稿日期:2025-09-01; **修回日期:**2026-04-16

timization, achieving significant advancements in structural design, the synergistic application of fire extinguishing agents, and noise reduction, though system integration and technology development remain insufficient. It is proposed that future technological breakthroughs should prioritize battery power upgrades and synergistic innovation with aerogel fire extinguishing agents, while simultaneously bridging the gaps between quantitative theory and engineering application. This study is intended to provide a theoretical and practical reference for technological innovation and engineering application of pneumatic fire extinguishers, ultimately enhancing the efficiency of forest and grassland fire suppression.

Key words: forest-grassland fire; pneumatic fire extinguishing mechanism; development review; all-solid-state battery power supply; aerogel fire extinguishing agent

在气候异常与人类活动双重影响下,全球森林草原火灾呈现高发态势^[1-3]。联合国环境规划署报告显示,到21世纪末,类似澳大利亚2019—2020年夏季或2020年北极大火的野火事件频次可能增加31%~57%^[4]。此类火灾不仅会造成生态破坏和人员伤亡,还会对全球生态环境与经济安全构成严重威胁。2025年,美国全国共报告野火77 850起,过火面积超过206.39亿m²^[5]。我国森林草原火灾风险亦呈上升趋势,国家对此高度重视,出台了多项相关法律法规并建立了先进的林火监测体系,使森林草原消防部门能迅速发现并扑灭早期火灾,避免造成更大损失^[6]。

在基层灭火实战中,尤其是在我国西南林区等道路稀疏、地形复杂的区域,大型灭火装备难以进入火场,而空中灭火方法成本较高且受环境条件限制,效果相对有限。风力灭火机因其便携性与较强的灭火能力,成为森林草原消防部门的常用灭火装备,在原生林火、次生林火及采伐迹地火等场景中均有成功应用案例^[7]。然而,现有装备仍存在复燃防控能力弱、地下火扑救效率低、噪声与振动明显以及续航受限等问题,亟须通过技术优化突破瓶颈^[8-9]。本文基于现有研究,系统梳理风力灭火机的灭火机制、发展现状与未来方向,为森林草原消防装备研制与创新提供参考,以推动森林草原防灭火技术进步。

1 风力灭火机制

风力灭火机制是优化灭火设备设计、提升灭火效能的核心基础。但现有研究多偏向工程应用,系统性定量研究相对较少。早期研究已建立了一定物理基础,如董广生等^[10]提出,提供理论空气需求量7.93倍的气流即可熄灭火焰,并确定了熄灭常规林火的最小灭火流速为30 m/s。徐滨^[11]从理化角度总结了破坏燃烧、降温及控制供氧三大机理,发现距风力灭火机风口1 m处,气流每秒可带走约167.9 kJ热量。在实证与建模方面,周尧振^[12]发现风力灭火效率取决于风机手的行走速度,其对低强度火的灭火速度可达50 m/min;Chen D W^[13]基于能量平衡原理

建立了高速气流灭火方程,分析了气流对燃料表面温度分布和火焰区域能量传递的影响;黄志军^[14]则基于碳微粒建模假设,构建了风力灭火的理论模型。

综上所述,现有研究表明,高速气流通过干预可燃物、氧气、温度三大燃烧要素实现灭火,并积累了部分关键定量参数。但其量化研究仍存在以下问题:参数标准不统一,不同试验条件导致核心数据难以横向对比;复杂场景定量数据缺失,在特殊火型与复杂地形下的关键指标未形成量化模型;多参数协同影响机制研究不足,难以支撑装备的精准优化设计;缺乏系统性整合,尚未形成统一的评价体系等。

为清晰阐释风力灭火过程,本文基于可燃物浓度与温度耦合视角,将风力灭火机制归纳为以下几个阶段,如图1所示。挥发物移除,高速气流迅速吹离燃烧产生的可燃气体,直接降低气相反应区的可燃物浓度;热量供应中断,气相反应受阻导致固体燃烧区热量输入不稳定,温度持续下降;反应终止,当温度降至燃点以下时,热解反应停止,火焰熄灭。高速气流引入的氧气可能在短期内增强固相燃烧,但持续的对流散热作用最终会抑制固相反应,从而实现灭火。

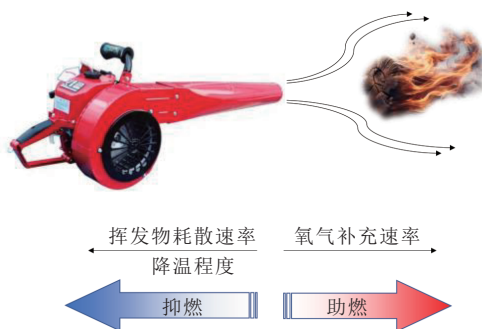


图1 风力灭火机制

Fig. 1 Pneumatic fire extinguishing mechanism

2 风力灭火机的发展

风力灭火机是我国针对特定林情与地形独创的森林灭火装备^[15]。根据其机动方式与功能定位,主要发展为便携式与履带式2种类型。便携式风力灭火机以其轻便、易操作等特点,已成为我国基层森林消

防的主力装备^[16];履带式风力灭火机则是在此基础上,为提升复杂地形通过能力与作业安全性而发展形成的智能化、平台化装备。

国内外风力灭火装备的演进呈现出不同的路径分化。基于不同的消防理念与工业背景,国外通常将风力作为辅助清理手段,主要集成于大型消防车或航空平台中^[17-22],因此缺乏针对便携式风力灭火装备的系统性研究;但其在离心式与轴流式风机的气动设计及计算流体力学(CFD)优化方面积累深厚^[23-29],

为我国风力灭火机部件优化及风机性能提升提供了重要技术借鉴。相较之下,国内针对山高林密、大型装备难以进入的林区,已独立发展出了一套以便携式装备为核心的风力灭火技术体系,并衍生出履带式风机,形成了独特的技术生态。

2.1 便携式风力灭火机

我国便携式风力灭火机的研发历经初步发展、多功能集成以及基于数值模拟的性能深度优化3个阶段,如表1和图2所示。

表1 便携式风力灭火机发展历程

Table 1 Development history of portable pneumatic fire extinguisher

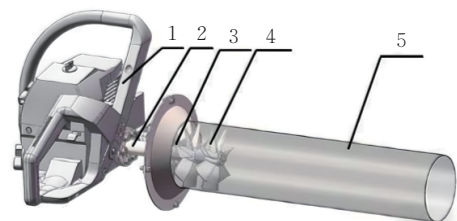
发展阶段	时间范围	核心特征	代表机型/技术	主要成果
初步发展	1979—1990年	改装探索与工程化应用	油锯改装样机、CF2-20手提式、CF2-16、6MF30-A、6SB-C背挎式	开启了技术探索,实现了基本灭火功能,并初步改善了人机工效 ^[30-31]
多功能集成	1990—2010年	技术体系固化与多场景适配	喷水、喷粉、弥雾集成机型、背负式机型	确立了手提与背负两种形态,实现规模化普及与主力应用 ^[32-34]
性能深度优化	2010年—至今	聚焦短板突破与效能协同优化	CFD数值模拟、多目标优化模型、空气引射方案、同轴双级叶轮轴流式灭火机	提升风机核心气动性能,实现设备轻量化,增强灭火效能与防复燃能力 ^[35-41]



图2 风力灭火机演变及其缺点

Fig. 2 Evolution and limitations of pneumatic fire extinguishers

在装备规模化普及之后,振动噪声大、复燃风险高以及粗枝树干火扑救效率低等短板逐渐凸显。这使得风力灭火机研究逐渐聚焦于优化机身结构、提高灭火效能,CFD数值模拟成为优化风力灭火机的重要方法。辛喆等^[42]基于CFD与多目标优化理论构建的优化模型,使风机出口全压提升近24%;李林书^[43]提出的空气引射方案,提高了有效灭火距离和面积;梁宇等^[44]设计的同轴双级叶轮轴流式灭火机如图3所示,在确保性能输出的前提下,大幅提升了设备的便携性。



1—二冲程汽油机;2—风机体总成;3—第一级叶轮;
4—第二级叶轮;5—风筒总成。

图3 轴流式风力灭火机结构图

Fig. 3 Structure of an axial pneumatic fire extinguisher

针对单一风力灭火不彻底、易复燃等问题,研究者进一步探索了多介质协同灭火路径。蒋梅胜^[45]提出的喷粉方案虚拟模拟结果显示,当干粉颗粒喷出速度为41.24 m/s时,可缩短灭火时间且无复燃异常现象;姚斌^[35]基于6MF-30型风力灭火机提出的风-水协同方案如图4所示,通过合理优化转速与喷头参数,可大幅减少灭火时间和用水量,并能有效降低助燃、复燃风险;徐婷婷^[46]结合沙漠草原环境提出的风-沙协同灭火方案,可将沙粒抛撒距离提升10.76%~23.38%,有效灭火距离增加14.67%,其风-沙协同试验方案如图5所示。

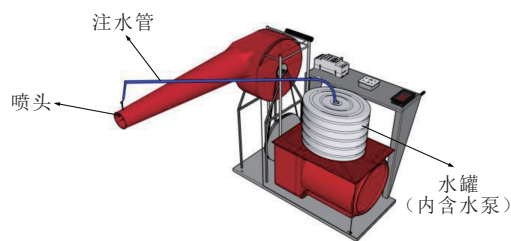


图4 风-水协同试验方案

Fig. 4 Experimental scheme for wind-water synergistic fire extinguishing

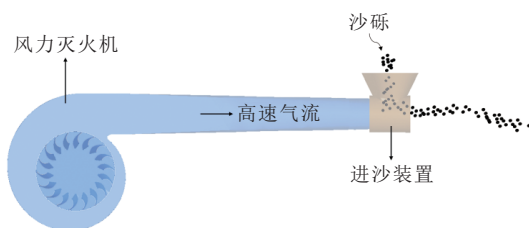


图5 风-沙协同试验方案

Fig. 5 Experimental scheme for wind-sand synergistic fire extinguishing

综上所述,我国便携式风力灭火机的优化路径已实现从单一参数向多目标协同和结构创新的跨越,气动效率、出口风速及有效灭火距离等关键指标均获得了一定突破。集成粉、水、沙等灭火介质改善了传统纯风力灭火的灭火效能,但未能充分兼顾振动噪声控制、环境适应性等影响实战效能与人机安全的平衡问题。同时,由于现有方案往往局限于特定火灾场景,缺乏对不同灭火介质协同策略的跨场景效能对比,导致装备在提升灭火性能的同时,仍面临结构复杂化、装备质量增加及多场景适用性受限等工程化应用瓶颈。

振动与噪音是便携式风力灭火机的固有短板。我国自1988年制定相关测定方法后,一系列研究逐步揭示了振动噪声的危害及其与风机结构的相关性,并为优化提供了依据。现有研究主要形成4类技术路径:材料优化,王林杰等^[47]提出采用塑料作为前把手主材,周琪涵等^[48]建议搭配改良橡胶把套与减振手套,通过阻断振动传递,降低危害,还能一定程度上减轻人体负担;结构减振,付琮等^[49]、王石等^[50]基于浮阀减振原理,在把手处增设的减振装置可使高频区振动加速度降低32%;噪声控制,陈晓璇^[40]通过气动分析发现,噪声主要源于涡舌与叶轮,提出增加导流器的降噪方案;完善测试方法,余光宇等^[51]研究表明,草地场景的耳旁噪声测量结果更接近真实值,但需增加试验次数,以提升数据稳定性。

由以上可知,现有研究通过实测明确振动噪声的危害与特性规律,各类技术路径实现了局部改善。但这些研究整体未从动力-风机协同设计源头进行低振、低噪重构,未形成系统性、普适性的解决方案。未来研究需聚焦气动与机械噪声控制、系统性减振设计以及人机工程学系统优化。

2.2 履带式风力灭火机

为突破便携式风力灭火机在振动、负荷与安全方面的局限,履带式风力灭火机应运而生。其核心思路是将动力、行走与灭火系统集成于履带底盘,使人机分离,从根本上改善操作体验并拓展装备能力边界。其发展历程经历了从基础功能实现、局部创新到系统集成与智能化的演进过程。

初期样机侧重于基础行走与灭火功能的实现。常春媛^[52]基于复杂适应系统理论,率先完成了履带式风力灭火机的集成设计与样机试制,验证了履带底盘承载风机系统进行移动灭火的可行性,标志着该技术路径的起步。随后的研究通过增加功能来提升装备的安全性与灭火效能。经风明^[53]在行走与灭火功能基础上,为履带式风力灭火机集成了遥控操作系统,实现了人机分离,大幅提高了高危火场环境下人员的安全性。杨存亮^[54]从增强灭火能力的角度出发,设计

了自走式双风机系统,通过结构优化与双风道设计,推动履带式风力灭火机从可移动向高效灭火的方向进化。近年来,该领域研究进一步向系统集成与深度性能优化发展。王成^[55]通过融合空气引流技术与履带式自走结构,研制出自走引流式风力灭火机,通过仿真与试验对比,验证了该设备具有良好的系统性能和较高的灭火效能。

现有研究借助履带底盘、遥控技术及风机优化,解决了人员负载和作业风险问题,并提升了装备的作业能力,但成果多停留在原理样机与受控环境测试阶段。设备的机械可靠性、环境适应性和持续作业能力等均未在真实林火场景中得到充分验证;同时,缺乏对大规模应用的成本控制、维护便利性及综合效能评估等方面的深入研究。因此,履带式风力灭火机要真正形成实战能力,亟须开展野外实战测试与真实场景下的迭代优化。

3 风力灭火的发展方向

3.1 优化供能方式

以上研究中的风力灭火机均采用汽油机供能,该供能方式的设备质量大,汽油机振动和噪音干扰大,运行时汽油机过热会导致叶轮转速及出口风速下降,影响灭火效能。汽油作为易燃液体,火场补给时存在泄漏、助燃风险。随着电池技术发展,采用高能量密度电池替代汽油机供能,有望解决振动、噪音和热效应引起的性能衰减问题。

锂电池作为成熟的新能源供能方案,可大幅减少振动与噪音,降低操作人员体力消耗与健康风险^[56-57]。由于能量密度约束,存在提升续航能力则导致质量超标、控制质量则造成续航不足的固有矛盾,且火场下存在热失控隐患,无法同时平衡减重、续航与安全性的矛盾。

武佳雄等^[58]认为全固态电池在安全性、能量密度及环境适应性方面优于传统锂电池。现有研究表明固态电池具有良好的热稳定性和电化学稳定性,能有效降低泄漏、起火及爆炸风险,更适配复杂火场场景^[59];成组后有效能量密度可达400 Wh/kg,能减轻设备质量^[60];振动干扰小,可稳定输出气流且延长设备寿命,还能根据火势动态调整输出功率,依托周边电力设施即可充电,补给成本低于汽油,如图6所示。

为明确全固态电池方案的综合作业效能,以我国基层消防救援队伍通用的3.2 kW额定功率便携式机型为基准,对核心供能方案进行定量对比,如表2所示。

由表2可见,在满足相同常规作业续航能力的前提下,全固态电池机型整机作业质量较燃油机型降低

约11%，有效解决了轻量化与续航能力难以兼得的问题，同时兼顾减振降噪与火场安全性。随着全固态电池不断发展，轻量化的优势会更加明显。未来可从提升全固态电池能量密度、开发模块化快速换电系统和构建火场适配的电池热管理体系等方面推进，以期突破续航受限的难题。

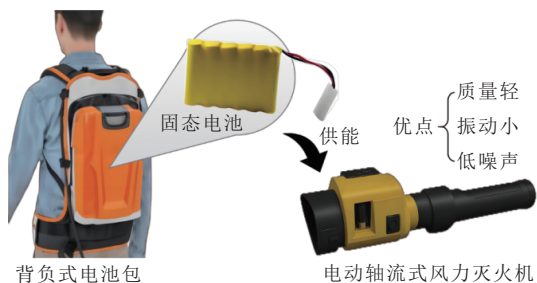


图6 全固态电池供能示意图

Fig. 6 Schematic diagram of all-solid-state battery power supply

表2 3.2 kW 便携式风力灭火器供能方案核心参数对比

Table 2 Comparison of core parameters of power supply schemes for a 3.2 kW portable pneumatic fire extinguishers

供能方案	风机净质量/kg	1 h 常规负荷续航所需燃料/电池质量/kg	作业时整机质量/kg	满负荷全开续航时长/min
二冲程燃油机	9.5	1.0	10.5	36
全固态电池	4.2	5.3	9.5	36

注：燃油机型参数参考行业主流 6MF-30 型风力灭火器出厂标称值、GB/T 10280—2008《林业机械 便携式风力灭火器》^[61]及公开实测数据；全固态电池参数参考已实现中试量产的技术指标，单体电芯能量密度 500 Wh/kg，成组效率 80%，能量测算预留 10% 的系统损耗冗余；常规负荷状态下为 60% 额定功率

3.2 优化灭火介质

灭火介质的协同使用能够在一定程度上提高风力灭火机的灭火效能。传统方案在灭火效能、成本或适用性上均存在明显短板。风-水方案成本低，但受制于水源与设备质量；风-粉方案效率高，但成本与环境代价大；风-沙方案成本低，但效能有限且受制于地形。

气凝胶灭火剂是一种由水、气凝胶粉末、渗透剂、阻燃剂以及其他添加剂组成的液体灭火剂，以受热后发泡的方式灭火^[62]，能在可燃物表面形成抗烧泡沫阻燃层，实现快速降温 and 氧气隔离^[63-64]。其与风力灭火机高速气流协同喷射，灭火效率、复燃防控能力均显著优于水、干粉灭火剂，可有效解决传统风力灭火易复燃的难题。对于便携式机型，利用高速气流负压引射气凝胶灭火剂，可实现气流灭明火、气凝胶灭火剂冷却阻燃同步作业；针对履带式机型，采用大容量气凝胶灭火剂储料系统配合双风道设计，主风筒灭明火，辅风筒同步喷洒气凝胶，形成阻燃隔离带，适用于

大面积火场作业。未来可从优化气凝胶灭火剂配方和风-气凝胶协同参数等方面入手，生产专用于森林草原火灾的气凝胶灭火剂，并将其广泛应用于风力灭火机。

4 结论与挑战

本文系统梳理了森林草原风力灭火机的灭火机制、装备演进历程，针对当前存在的复燃难控、振动噪声大、续航受限三大技术瓶颈，分析了现有技术的进展与短板，明确了未来技术的突破方向，结论如下。

1) 现有研究明确了风力灭火通过高速气流，经历“移除挥发物、中断热量供应、终止燃烧反应”3 个阶段实现灭火，并形成了定性理论框架；采用气凝胶灭火剂与便携式、履带式风力灭火机的协同集成方案，可有效解决复燃难以控制的问题，但有关统一标准参数的量化研究和复杂火场普适模型的构建仍有待完善。

2) 我国便携式风力灭火机经历了多阶段发展，通过气动优化、多介质协同实现了灭火效能提升；履带式机型实现了人机分离与功能集成，大幅提升了高危火场作业的安全性。针对振动噪声大的问题，现有优化方案虽取得一定改善，但基于动力-风机协同设计的一体化低振、低噪技术仍有待深入研究。

3) 全固态电池驱动、气凝胶灭火剂协同有望突破三大瓶颈。全固态电池供能方案在保持与燃油机相同作业续航的前提下，降低了整体装备质量，同时可解决振动噪声与续航受限的核心痛点。气凝胶灭火剂可与两类机型实现适配，有望解决复燃难以控制问题。

针对上述问题，未来风力灭火机技术需围绕三大核心痛点开展系统性突破：完善风力灭火量化研究体系，开发气凝胶灭火剂与风力灭火机的多场景适配协同技术；开展动力-风机一体化低振低噪设计，形成普适性优化方案；推进全固态电池的工程化应用，开发适用于野外环境的模块化供能系统。研究成本更低的全固态电池和气凝胶灭火剂、优化火场适配性参数以及发展更成熟的协同集成技术，可全面提升风力灭火机的全场景灭火效能。

参考文献：

- [1] Gibbs H K, Ruesch A S, Achard F, et al. Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(38):16732-16737.
- [2] Laurance W F, Sayer J, Cassman K G. Agricultural expansion and its impacts on tropical nature[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2014, 29(2):107-116.

- [3] Zhang X M, Long T F, He G J, et al. Rapid generation of global forest cover map using Landsat based on the forest ecological zones[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2020, 14(2):1.
- [4] Purcell L, Boulter S, Moura L C, et al. Wildfires under climate change: a burning issue [R]. New York: OCHA, 2022.
- [5] National fire situation report[R]. Canadian Interagency Forest Fire Centre, 2025.
- [6] 国务院发布. 森林草原防灭火条例[M]. 北京: 应急管理出版社, 2025.
- [7] 白夜. 森林灭火技战术的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2002. Bai Y. Study on the technique and tactics of extinguishing forest fire[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2002.
- [8] 余威, 陆强. 我国森林灭火技术装备应用现状与发展趋势[J]. *消防科学与技术*, 2022, 41(3):421-424. Yu W, Lu Q. Application status and development trend of forest fire extinguishing technology in China[J]. *Fire Science and Technology*, 2022, 41(3):421-424.
- [9] 白夜. 森林消防合成灭火技术及紧急避险措施研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008. Bai Y. Study on compound suppression technique and emergency safety measure in forest fire fighting[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [10] 董广生, 王淑娟, 高昌海, 等. 高速气流灭火能量的研究[J]. *林业科技*, 1994, 19(3):25-27. Dong G S, Wang S F, Gao C H, et al. Study on fire extinguishing energy of high-speed airflow[J]. *Forestry Science & Technology*, 1994, 19(3):25-27.
- [11] 徐滨. 风力灭火机灭火机理的探讨[J]. *森林防火*, 1994, 12(2):13-15. Xu B. Discussion on fire extinguishing mechanism of wind fire extinguisher[J]. *Forest Fire Prevention*, 1994, 12(2):13-15.
- [12] 周尧振. HFM-37型风力灭火机灭火试验研究[J]. *林业机械与木工设备*, 1999, 27(4):11. Zhou Y Z. Experimental study on fire extinguishing of HFM-37 wind fire extinguisher[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 1999, 27(4):11.
- [13] Chen D W. Fire-extinguishing mechanism and energy procedure by high velocity airflow[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1996, 7(3):27-33.
- [14] 黄志军. 高速气流灭火机理及其能量的研究[J]. *中国林业*, 2009, (2):38.
- [15] 陈凡宝. 风力灭火机高速射流与木材燃烧耦合机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024. Chen F B. Study on coupling mechanism between high-speed jet of pneumatic extinguishers and wood combustion[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.
- [16] 魏茂洲, 王克印. 森林灭火装备的现状与展望[J]. *林业机械与木工设备*, 2006, 34(7):11-14. Wei M Z, Wang K Y. The usage state and the prospect of forest fire extinguish equipments[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2006, 34(7):11-14.
- [17] Shan Y L, Chen X, Yin S N, et al. Study on the limit of moisture content of the sub-surface fires converted to the surface fires in the boreal forests of China[J]. *Fire*, 2023, 6(9):364.
- [18] Nizhelskiy M S, Kazeev K S, Vilkova V V, et al. Effect of smoke caused by fires on the enzymatic activity of forest soils in the north Caucasus (Russian federation) [J]. *Soil Systems*, 2023, 7(3):77.
- [19] Viegas C, Chehreh B, Andrade J, et al. Tethered UAV with combined multi-rotor and water jet propulsion for forest fire fighting [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2022, 104(2):21.
- [20] Eftekharian E, Ghodrat M, He Y P, et al. Numerical analysis of wind velocity effects on fire-wind enhancement[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2019, 80:108471.1-108471.16.
- [21] Meng L, O'Hehir J, Gao J, et al. A theoretical framework for improved fire suppression by linking management models with smart early fire detection and suppression technologies[J]. *Journal of Forestry Research*, 2024, 35(1):86.
- [22] Pinales A, Valles D. Autonomous embedded system vehicle design on environmental, mapping and human detection data acquisition for firefighting situations[C]//2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON), 2018:194-198.
- [23] Spasić Ž, Jovanović M, Bogdanović-Jovanović J, et al. Numerical investigation of the influence of the doubly curved blade profiles on the reversible axial fan characteristics[J]. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 2020, 18(1):57.
- [24] Ghodrat M, Shakeriaski F, Nelson D J, et al. Existing improvements in simulation of fire-wind interaction and its effects on structures[J]. *Fire*, 2021, 4(2):27.
- [25] Heinrich M, Schwarze R. Genetic optimization of the volute of a centrifugal compressor[C]//12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and thermodynamics, 2017.
- [26] Madhwesh N, Karanth K V, Sharma N Y. Investigations into the flow behavior in a nonparallel shrouded diffuser of a centrifugal fan for augmented performance[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2018, 140(8):081103.
- [27] Karanth K V, Sharma N Y. CFD analysis on the effect of radial gap on impeller-diffuser flow interaction as well as on the flow characteristics of a centrifugal fan[J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2009, 2009:293508.
- [28] Younsi M, Bakir F, Kouidri S, et al. Influence of impeller geometry on the unsteady flow in a centrifugal fan: Numerical and experimental analyses[J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2007, 2007:53-62.
- [29] Petit O, Nilsson H. Numerical investigations of unsteady flow in a centrifugal pump with a vaned diffuser[J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2013, 2013:961580.
- [30] 闫鹏, 赵彦飞, 马玉春. 中国森林防灭火的发展历程与成效[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2023, 18(1):71-78. Yan P, Zhao Y F, Ma Y C. Development process and achievements of forest fire prevention and suppression in China[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2023, 18(1):71-78.

- nal of Subtropical Resources and Environment, 2023, 18(1):71-78.
- [31] 宋兴关, 马丽心, 王立民. 6SB-C型风力灭火机的研制[J]. 林业机械与木工设备, 2002, 30(3):22-23.
Song X G, Ma L X, Wang L M. Development of 6SB-C wind fire extinguisher[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2002, 30(3):22-23.
- [32] 张绍全, 俞国胜. 便携式风力灭火机的研究与发展[J]. 林业机械与木工设备, 2012, 40(6):8-10, 23.
Zhang S Q, Yu G S. Research and development of portable pneumatic extinguishers[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2012, 40(6):8-10, 23.
- [33] Wang L, Li W, Chen J. Ergonomic evaluation of the operating characteristics of the 6MF-30 portable pneumatic extinguisher [J]. Applied Ergonomics, 2015, 51:39-43.
- [34] 铁润生, 周喜红. 背负式风力灭火机:CN01212956.9[P]. 2001-11-21.
- [35] 姚斌. 基于6MF-30型风力灭火机的风-水协同灭火有效性研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2022.
Yao B. Study on the Effectiveness of Airflow-Water Synergistic Fire Extinguishing Based on 6MF-30 Pneumatic Fire Extinguisher[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [36] 宋向群, 沈天耀, 傅汉章. 风力灭火机出口后端流场的计算[J]. 力学与实践, 1992, 14(1):35-37.
Song X Q, Shen T Y, Fu H Z. Calculation of turbulent flow field behind the outlet of wind fire extinguisher[J]. Mechanics in Engineering, 1992, 14(1):35-37.
- [37] 褚双磊, 俞国胜. 轴流式风力灭火机的研究初探[J]. 林业机械与木工设备, 2007, 35(4):24-26.
Chu S L, Yu G S. The preliminary discussion about the research of the axial-flow pneumatic extinguisher[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2007, 35(4):24-26.
- [38] 方墨. 基于CFD方法的轴流式风力灭火机叶轮性能模拟研究[D]. 北京:北京林业大学, 2010.
Fang M. Simulation research on inner flow field of axial fan for the axial-flow pneumatic extinguisher[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [39] 张绍全. 对旋式轴流风力灭火机的气动设计与性能研究[D]. 北京:北京林业大学, 2012.
Zhang S Q. Design and study on aerodynamic performance of counter-rotating axial-flow pneumatic fire extinguisher[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [40] 陈晓璇. 6MF-30便携式风力灭火机风机的气动噪声研究[D]. 北京:北京林业大学, 2017.
Chen X X. Aerodynamic noise analysis of 6MF-30 portable pneumatic extinguisher fan[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.
- [41] 马文凯. 便携式风力灭火机手传振动特性的分析方法和实验研究[D]. 北京:北京林业大学, 2020.
Ma W K. Analysis method and experimental research on hand-transmitted vibration characteristics of portable pneumatic[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [42] 辛喆, 王顺喜, 李钊婧, 等. 基于CFD的6MF-30型风力灭火机多目标优化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22):39-44.
Xin Z, Wang S X, Li Z J, et al. Multi-objective optimization of 6MF-30 pneumatic extinguishers based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22):39-44.
- [43] 李林书. 空气引射风力灭火机的研究及其性能影响因素分析[D]. 北京:中国农业大学, 2014.
Li L S. Research on air Ejecting pneumatic extinguisher and performance analysis of influencing factors[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [44] 梁宇, 陈忠加, 袁湘月, 等. 轴流式风力灭火机设计及仿真[J]. 林业和草原机械, 2021, 2(6):45-51.
Liang Y, Chen Z J, Yuan X Y, et al. Design and simulation analysis of axial-flow pneumatic extinguisher[J]. Forestry and Grassland Machinery, 2021, 2(6):45-51.
- [45] 蒋梅胜. 喷粉式草原风力灭火机的研究[D]. 北京:中国农业大学, 2016.
Jiang M S. The research of the dusting pneumatic fire extinguisher using on grassland[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016.
- [46] 徐婷婷. 风-沙灭火机灭火性能的优化与研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2023.
Xu T T. Optimization and research on fire extinguishing performance of airflow-sand fire extinguishers[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [47] 王林杰, 李文彬, 周琪涵, 等. 便携式风力灭火机的人机工程学评价[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(2):148-152.
Wang L J, Li W B, Zhou Q H, et al. Ergonomics evaluation of portable pneumatic extinguisher[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(2):148-152.
- [48] 周琪涵, 李文彬, 王林杰, 等. 便携式风力灭火机振动及其沿人体手臂传递特性研究[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(6):120-125.
Zhou Q H, Li W B, Wang L J, et al. Experimental research on the pneumatic extinguishers based on vibration characteristics and vibration transmission along human arm[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(6):120-125.
- [49] 付琼, 张明远, 王石, 等. 手持式风力灭火机把手减振设计的实验研究[J]. 林业科技, 2022, 47(2):28-30.
Fu Q, Zhang M Y, Wang S, et al. Experimental study on vibration reduction design of hand-held wind extinguisher handle[J]. Forestry Science & Technology, 2022, 47(2):28-30.
- [50] 王石, 张明远, 余光宇, 等. 一种基于浮阀减振原理的风力灭火机减振装置[J]. 林业机械与木工设备, 2022, 50(6):22-24.
Wang S, Zhang M Y, She G Y, et al. A damping device of pneumatic fire extinguisher based on the damping principle of floating valves[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2022, 50(6):22-24.
- [51] 余光宇, 李全罡, 孙浩才, 等. 场地及测量次数对风力灭火机耳

- 旁噪声测试结果的影响[J]. 林业机械与木工设备, 2023, 51(5): 62-65, 73.
- She G Y, Li Q G, Sun H C, et al. The influence of site and measurement times on the test results of earside noise of wind extinguishers[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2023, 51(5):62-65, 73.
- [52] 常春媛. 基于CAS理论的林火扑救仿真和履带式风力灭火机研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- Chang C Y. Research of simulation on forest firefighting based on CAS theory and crawler-type pneumatic extinguisher[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [53] 经凤明. 履带式遥控风力灭火机结构设计与样机实验[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
- Jing F M. Prototype experiment and structure design of crawler-style remote control wind fire extinguisher[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.
- [54] 杨存亮. 自走式双风机风力灭火装备的设计与研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.
- Yang C L. Design and research of self-propelled dual fan wind fire extinguishing equipment[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020.
- [55] 王成. 自走引流式森林风力灭火机的设计与研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
- Wang C. Design and research of self-propelled drainage forest wind fire extinguisher[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.
- [56] 杨娟, 刘媛, 梁焰彭, 等. 航空锂电池热失控防护与结构轻量化分析[J]. 工程科学学报, 2025, 47(11):2331-2342.
- Yang J, Liu Y, Liang Y P, et al. Thermal runaway protection and structural lightweighting of aviation lithium batteries[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(11):2331-2342.
- [57] 徐志勇, 爻金荣. 一种环保型锂电轴流风灭火器及其使用方法: CN202111094228.8[P]. 2021-12-21.
- [58] 武佳雄, 王曦, 徐平红, 等. 车用固态锂电池研究进展及产业化应用[J]. 电源技术, 2021, 45(3):402-405.
- Wu J X, Wang X, Xu P H, et al. Research progress of solid state Li-ion batteries for EV and industrial applications[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(3):402-405.
- [59] 郭春丽, 唐圣凯, 崔煜, 等. 全固态电池安全性研究进展与展望[J]. 汽车安全与节能学报, 2025, 16(5):657-678.
- Guo C L, Tang S K, Cui Y, et al. Research progress and prospect on safety of all-solid-state batteries[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2025, 16(5):657-678.
- [60] 祁晓玲. 全固态电池产业化之路仍存挑战[N]. 中国工业报, 2025-11-24(009).
- [61] GB/T 10280—2008 林业机械 便携式风力灭火机[S].
- GB/T 10280—2008 Forestry machinery Portable pneumatic fire extinguisher[S].
- [62] T/COS 014—2023 二氧化硅基气凝胶灭火剂[S].
- T/COS 014—2023 Fire extinguishing agent based on silica aerogels[S].
- [63] 刘春晓. 新型纳米孔径气凝胶灭火剂的制备及灭火有效性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.
- Liu C X. Preparation of a new nanopore size aerogel fire extinguishing agent and its fire extinguishing effectiveness[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.
- [64] 何路, 付江锋, 孙蓉, 等. 气凝胶灭火剂防控锂电池热失控效能研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(5):153-160.
- He L, Fu J F, Sun R, et al. Research on effectiveness of aerogel fire extinguishing agents in preventing thermal runaway of lithium batteries[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(5):153-160.

(责任编辑: 彭燕华)