

ICS 13.300

CCS C 65

团 体 标 准

T/GDPAWS 41—2026

易燃易爆危险化学品企业灭火机器人性能 测试技术规程

Technical specification for performance testing of fire-fighting robots in
flammable and explosive hazardous chemical enterprises

2026-07-01 发布

2026-07-01 实施

广东省安全生产协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 基本要求	1
5 基本性能测试	3
5.1 避障性能测试	3
5.2 复杂场景通过性能测试	4
5.3 负载能力测试	6
5.4 防水抗浸水性能测试	7
5.5 火源识别能力测试	7
5.6 抗高温性能测试	8
5.7 防倾覆能力测试	9
6 通信与遥控测试	10
6.1 通信测试	10
6.2 遥控测试	11
7 自主作业测试	12
7.1 自主导航能力测试	12
7.2 精准喷射能力测试	13
7.3 续航与稳定性能力测试	15
8 特殊功能测试	16
8.1 清障功能测试	16
8.2 破拆功能测试	17
8.3 阀门开关功能测试	18
8.4 搬运重物功能测试	18
附录 A （资料性）典型易燃易爆危险化学品处置场景说明	20
附录 B （资料性）破拆场景说明	22

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由广州六瑞消防科技有限公司提出。

本文件由广东省安全生产协会团体标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：广州六瑞消防科技有限公司、中山大学、北京理工大学、湖南科技大学、明光浩淼安防科技股份公司、深圳承远航空油料有限公司、山东省青岛市消防救援支队、北京机械设备研究所、湖南中自工业智能研究院有限公司、东莞市水务环境投资控股集团管网有限公司、广东安全技术职业培训学院。

本文件主要起草人：韩瑜、张剑、杜希强、左词立、高峻蛟、陈乐、冯域超、蒋大伟、胡乃荧、黄信阳、沈浩、吴亮红、肖强、姜华、张建军、冯杰、陈杰辉、叶福志、郑辉、黄子斌、李杞容、刘孙权、黎明。

易燃易爆危险化学品企业灭火机器人性能测试技术规程

1 范围

本标准规定了易燃易爆危险化学品企业灭火机器人性能测试的术语和定义、基本要求、基本性能测试、通信与遥控测试、自主作业测试、特殊功能测试。

本标准适用于陆上易燃易爆危险化学品企业的灭火机器人性能测试与评价,不适用海洋石油天然气开采。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件。不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 12642—2013 工业机器人 性能规范及其试验方法

GB/T 38124—2019 服务机器人性能测试方法

XF892.1—2010 消防机器人第1部分:通用技术条件

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

灭火机器人 fire fighting robot

可自主或遥控操作,在危险火灾场景执行灭火、防护、侦察、救援等任务的特种机器人,可适配危险化学品场景的专用灭火、检测、作业模块。

3.2

易燃易爆危险化学品企业 flammable and explosive hazardous chemical enterprises

从事易燃易爆化学品生产、储存、经营等活动,且存在危险化学品火灾、爆炸等风险的企业。

[来源:GB35181—2025,3.8,有修改]

3.3

自主作业 firefighting robot autonomous operation

灭火机器人通过自主导航与智能决策,在火灾现场独立执行灭火、救援、侦察等任务。

4 基本要求

4.1 易燃易爆危险化学品企业宜根据企业风险评估得出的燃爆风险及现有消防装备配置情况综合判断配置相应类型和功能的灭火机器人。

4.2 易燃易爆危险化学品企业应结合生产场景特点、风险等级、典型事故场景(详见附录A),确定灭火机器人的关键技术参数。

4.3 灭火机器人的基本功能、消防作业功能、自保护功能、信息采集功能、通信功能、防爆功能、声光报警功能、消防炮性能等要求及测试方法应参照XF 892.1《消防机器人第1部分：通用技术条件》进行。

4.4 本规程围绕灭火机器人在易燃易爆危险化学品企业特殊场景下的避障性能、复杂场景通过性能、负载能力、防水抗浸水性能、火源识别能力、抗高温性能、防倾覆能力、通信与遥控、自主作业能力、特殊功能等提出了对应的测试方法，可指导测试灭火机器人的各项能力，总体测试项目见表1。

表1 易燃易爆危险化学品企业灭火机器人性能测试项目表

序号	测试大类	细分测试项	主要测试内容
1	基本性能	避障性能	测试灭火机器人在事故现场行进路径上对各类静置障碍物和动态障碍物的规避能力。
2		复杂场景通过性能	测试灭火机器人在危险化学品企业典型燃爆事故环境下的自主通行能力。
3		负载能力	测试灭火机器人负载消防水带的移动及输送消防水的功能。
4		防水抗浸水性能	测试灭火机器人在危险化学品事故现场的防水能力、抗浸水能力。
5		火源识别能力	测试灭火机器人在事故现场主动识别火焰、判断火焰位置及报警的能力。
6		抗高温性能	测试灭火机器人在高温环境下的作业能力及工作稳定性。
7		防倾覆能力	测试灭火机器人在易燃易爆危险化学品事故现场复杂作业条件下的防倾覆能力。
8	通信与遥控	通信	测试灭火机器人在危险化学品火灾场复杂环境下的通信能力。
9		遥控	测试灭火机器人在危险化学品火灾场复杂环境下的遥控作业能力及检测数据传输能力。
10	自主作业	自主导航能力	测试灭火机器人在事故现场区域自主选择最优路径并自主通行的能力。
11		精准喷射能力	测试灭火机器人在危险化学品事故现场自主喷射灭火、自主选择高温设备冷却防护的能力及自我位姿调整能力。
12		续航与稳定性能力	测试以电池为动力源的灭火机器人续航能力。
13	特殊功能	清障功能	测试灭火机器人在事故现场的地面清障能力。
14		破拆功能	测试灭火机器人在危险化学品复杂事故场景下的破拆能力。
15		阀门开关功能	测试灭火机器人开关阀门能力。
16		搬运重物功能	测试灭火机器人对各类重物的抓取、搬运稳定性及作业效率。

5 基本性能测试

5.1 避障性能测试

5.1.1 测试目的

测试灭火机器人在事故现场行进路径上对各类静置障碍物和动态障碍物的规避能力。

5.1.2 测试条件

避障性能测试条件如下：

a) 测试场地道路长度不小于100m，宽度不小于3m。

b) 障碍物设置

标准障碍：直径400mm、高1500mm的圆柱体（模拟人体躯干）。

小尺寸障碍：直径300mm球体（模拟小型障碍物）。

大尺寸障碍：600mm×600mm×600mm立方体（模拟装置、建筑的倒塌物）。

动态障碍：遥控移动车（速度0.5-2m/s可调）。

5.1.3 测试流程与步骤

按照图1所示预设行驶路径，开展避障性能测试。步骤如下：

a) 标准障碍物测试

(1) 在灭火机器人行进路径上放置三个直径400mm的圆柱体，距离起点分别为30m、50m、80m。

(2) 启动灭火机器人自主行进模式，记录其感知到障碍物的时间及避障轨迹。

(3) 重复三次实验测试，分析避障动作延迟及路径规划合理性。

b) 小尺寸障碍物测试

(1) 在测试路径上布置三个直径300mm的球体，距离起点分别为30m、50m、80m。

测试灭火机器人对小尺寸障碍的识别能力及避让策略。

(2) 重复三次实验测试，分析避障动作延迟及路径规划合理性。

c) 大尺寸障碍物测试

(1) 在测试路径上布置三个600mm×600mm×600mm立方体，距离起点分别为30m、50m、80m。

(2) 测试灭火机器人对大尺寸障碍的识别能力及避让策略。

(3) 重复三次实验测试，分析避障动作延迟及路径规划合理性。

d) 动态障碍物测试

(1) 在灭火机器人行进路径上，遥控移动车（速度0.5-2m/s可调，车的最大截面尺寸不小于0.5m×0.5m，整车重量不低于500kg）横向切入灭火机器人行进路径。

(2) 测试灭火机器人实时路径重规划能力及紧急制动响应时间。

(3) 重复测试不同切入角度（30°、60°、90°），距起点（30m、50m、80m）。灭火机器人行进速度设定为额定最大行驶速度的50%。

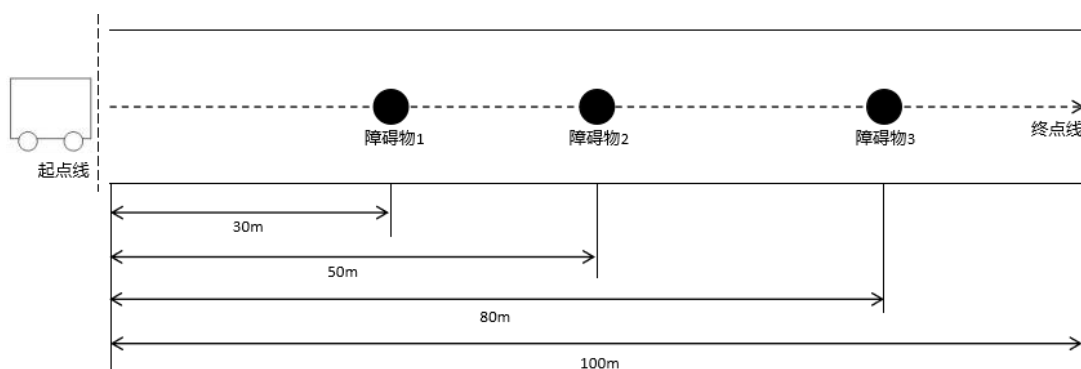
5.1.4 测试结果记录

记录内容包括障碍物碰触情况和通过时间。测试结果记录表见表2。

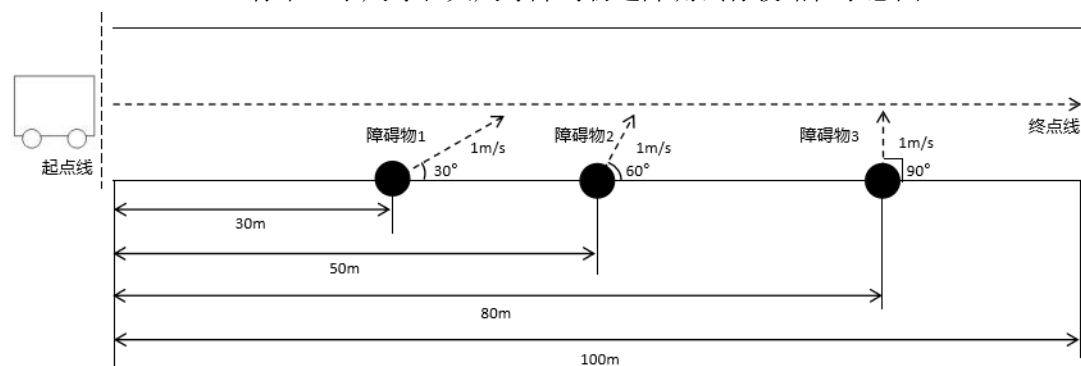
表2 避障性能测试结果记录表

障碍物类型	次序	是否碰触障碍物	通过时间(s)	备注
标准障碍物	1			
	2			
	3			

小尺寸障碍物	1			
	2			
	3			
大尺寸障碍物	1			
	2			
	3			
动态障碍物	1			
	2			
	3			



(a) 标准、小尺寸和大尺寸障碍物避障测试行驶路径示意图



(b) 动态障碍物避障测试行驶路径示意图

图 1 避障性能测试行驶路径示意图

5.2 复杂场景通过性能测试

5.2.1 测试目的

测试灭火机器人在易燃易爆危险化学品企业典型燃爆事故环境下的自主通行能力。

5.2.2 测试条件

复杂场景通过性能测试条件如下：

- a) 测试场地道路长度不小于 200m，宽度不小于 6m。
- b) 在测试路径上分别设置如下路面：

可调节窄道：测试宽度比待测灭火机器人最大外形宽度多400mm，窄道长度是灭火机器人长度的1.5倍。

碎石路面：单个碎石直径200-400mm，高度200-300mm；碎石数量不少于20个，相邻碎石距离不大于500mm，碎石路面长度不低于30m。

积水路面：水坑深度200-300mm，水坑宽度宽于灭火机器人宽度，水坑长度不低于1200mm，进出水坑两端设30-40°斜坡，相邻水坑距离不超过2000mm，路面至少设置5个水坑。

管线阻挡路面：在行进路径上设置不少于4根金属管线或管状凸起物，管径150-300mm，管线横跨路面两端，管线分别与前进方向呈90°、60°、45°、15°，管线强度应满足灭火机器人越过的载荷。

高拥塞空间：在测试环境中设6-8个立式设备（直径不小于800mm）、4-6个支柱（直径不小于50mm）、2-3根空中管线（高度不超过待测灭火机器人高度）、3-4个侧面阀门突出物（高度与机器人高度持平或略低）等。

5.2.3 测试流程与步骤

按照图2所示预设行驶路径，开展复杂场景通过性能测试。步骤如下：

- 启动灭火机器人，待运行稳定后，从测试道路起点开始行进，分别通过上述路面。
- 记录灭火机器人通过不同类型路面的时间。若在某路段卡住停止不前，则该测试不通过。
- 重复3次，取平均值。

5.2.4 测试结果记录

记录内容包括运行稳定性（正常/卡顿/故障）、通过时间、平均时间。测试结果记录表见表3。

表3 复杂场景通过性能测试结果记录表

路面类型	次序	运行稳定性（正常/卡顿/故障）	通过时间（s）	平均时间（s）	备注
窄道	1				
	2				
	3				
碎石路面	1				
	2				
	3				
积水路面	1				
	2				
	3				
管线阻挡路面	1				
	2				
	3				

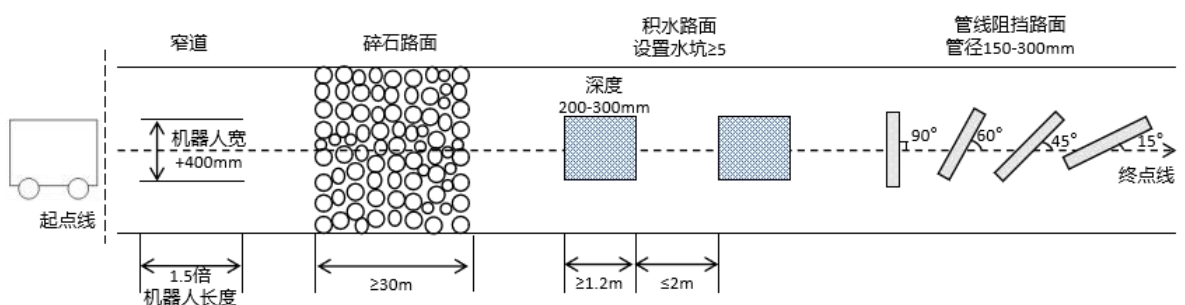


图2 复杂场景通过性能测试行驶路径示意图

5.3 负载能力测试

5.3.1 测试目的

测试灭火机器人负载消防水带的移动及输送消防水的能力。

5.3.2 测试条件

负载能力测试条件如下：

a) 测试场地：道路长度不小于200m，路面净宽不小于6m，道路上至少设2个90°拐弯。测试路面分为常规路面（如水泥地面）和非常规路面（如碎石路面）。

b) 消防水带：根据灭火机器人的额定参数确定消防水带的型号和数量，需准备的消防带数量比额定拖动数量多2条以上。

c) 消火栓：工作压力0.8-1.2MPa。

5.3.3 测试流程与步骤

负载能力测试按下列步骤进行：

a) 启动灭火机器人，达到稳定运行状态后，将灭火机器人布置在测试场地道路起始位置。按灭火机器人的消防带拖拽设计能力，在灭火机器人的接口处连接最大数量的消防带，由消防栓向消防带内充满水。

b) 已连接消防带的灭火机器人在消防道路上直线行驶100m，测试最大行驶速度。

c) 已连接消防带的灭火机器人在消防道路上进行1个90°转弯，共行驶100m，测试最大行驶速度。

d) 已连接消防带的灭火机器人在消防道路上进行2个90°转弯，共行驶100m，测试最大行驶速度。

e) 将所有消防带内的水排除，在消防道路上直线行驶100m，测试最大行驶速度。

f) 将所有消防带内的水排除，灭火机器人在消防道路上进行1个90°转弯，共行驶100m，测试最大行驶速度。

g) 将所有消防带内的水排除，灭火机器人在消防道路上进行2个90°转弯，共行驶100m，测试最大行驶速度。

h) 每一个工况测试结束时，测试灭火机器人自行脱除消防带的能力，记录脱除时间（s）及脱除成功率。

i) 每一种工况测试3次，取平均值。

5.3.4 测试结果记录

记录最大行驶速度和脱除时间。测试结果记录表见表4。

消防水带自行脱除能力的测试方法与合格判定标准，具体为：

a) 测试方法：灭火机器人完成对应工况行驶后，在原地启动水带脱除功能记录从启动脱除指令到水带完全脱离机器人接口的时间。

b) 合格判定标准：单次脱除时间≤10s。脱除后灭火机器人接口无卡滞、无提坏，3次测试均能完成完全脱除为测试通过。

表4 负载能力测试结果记录表

水带状态	次序	水带长度（m）	拐弯数量	最大行驶速度（m/s）	水带脱除时间（s）	备注
充水	1		0			
	2		1			
	3		2			

空载	1		0			
	2		1			
	3		2			

5.4 防水抗浸水性能测试

5.4.1 测试目的

测试灭火机器人在危险化学品事故现场的防水能力、抗浸水能力。

5.4.2 测试条件

防水抗浸水性能测试条件如下：

- a) 采用消防车的水喷淋装置，向待测灭火机器人喷射水喷淋，喷淋水应覆盖灭火机器人的控制、电气元件等部位，保证测试的有效性。
- b) 水池：深度不低于灭火机器人高度，进出水池的两端设斜坡（不超过 30°）。

5.4.3 测试流程与步骤

防水抗浸水性能测试按下列步骤进行：

- a) 将灭火机器人停在试验场地中，采用人工雨淋的方法进行试验，此时降水强度不小于0.12mm/s，持续淋水15min后对灭火机器人的控制装置、电气元件等需要防水的部位进行开盖检查。
- b) 将灭火机器人设置在空水池中，启动灭火机器人，达到稳定工作状态后，持续向水池内注水，直到水淹没灭火机器人顶部最高点，停止注水，静置30min，观察灭火机器人在浸没状态是否能正常工作。
- c) 每个工况重复测试3次。

5.4.4 测试结果记录

记录内容包括静止时间、水渗入情况、工作情况。测试结果记录表见表5。

表5 防水抗浸水性能测试结果记录表

测试类型	次序	静置时间 (min)	水渗入 (是/否)	正常工作 (是/否)	备注
水喷淋	1				
	2				
	3				
水池浸没	1				
	2				
	3				

5.5 火源识别能力测试

5.5.1 测试目的

测试灭火机器人在事故现场主动识别火焰、判断火焰位置及报警的能力。

5.5.2 测试条件

火源识别能力测试条件如下：

- a) 测试场地：100m×20m，路面为硬质平整路面。

b) 测试设备

标准火源：1.5m×1.5m 乙醇油盘火，注入的燃料维持持续燃烧时间不低于5min。

小尺寸火源：0.2m×0.2m 乙醇油盘火，注入的燃料维持持续燃烧时间不低于5min。

5.5.3 测试流程与步骤

按照图3预设行驶路径，开展火源识别能力测试。测试期间风力等级不应超2级，即风速应低于3.3m/s。步骤如下：

a) 标准火源测试

点燃1个标准火源，灭火机器人设置到自主行驶和自动识别模式，从100m外向火焰方向移动，通过机载热像仪记录火源定位坐标及输出报警信号时间，重复测试3次。

b) 小尺寸火源测试

点燃1个小尺寸油盘火，灭火机器人从100m外匀速向火焰方向移动，通过机载热像仪记录火源定位坐标及输出报警信号时间，重复测试3次。

5.5.4 测试结果记录

记录内容包括识别距离和报警时间。测试结果记录表见表6。

表6 火源识别能力测试结果记录表

火源类型	次序	识别距离 (m)	报警时间 (s)	备注
标准火源	1			
	2			
	3			
小尺寸火源	1			
	2			
	3			

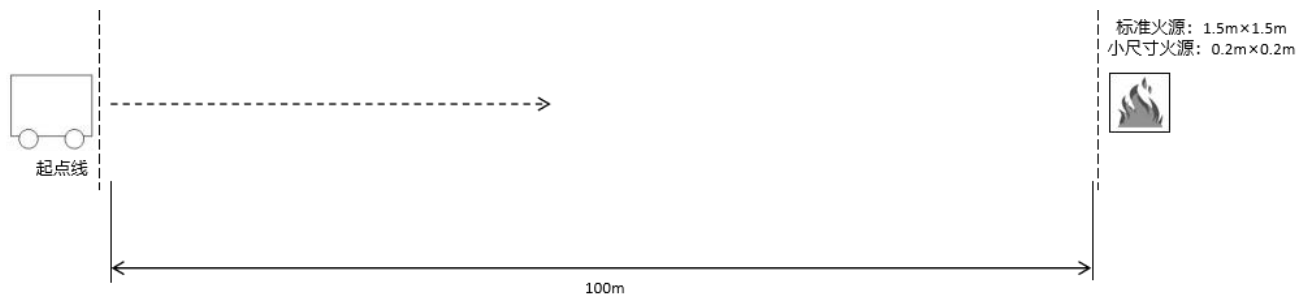


图3 火源识别性能测试行驶路径示意图

5.6 抗高温性能测试

5.6.1 测试目的

测试灭火机器人在高温环境下的作业能力及工作稳定性。

5.6.2 测试条件

采用大型燃烧室，室内在顶部及四周设置不少于10个燃气喷头，每个喷头的燃气流量及压力相同，在室内可创造不同热辐射强度的测试封闭环境，根据待测灭火机器人的额定耐温范围，设定具体实验值。

室内的热辐射强度测试范围在 1.2-30kW/m²。喷头火焰与灭火机器人本体最小距离≥1m，且不得接触灭火机器人本体，避免烧毁灭火机器人。

5.6.3 测试流程与步骤

抗高温性能测试按下列步骤进行：

a) 将待测灭火机器人放置到燃烧室中心区域，在灭火机器人的顶部及四周各设置 3 个热流传感器，用于测试灭火机器人外围的热辐射强度。在机器人本体关键部件（如电机、控制器等）表面加设温度传感器。

b) 根据待测灭火机器人的额定耐温范围，设定燃烧室内的燃气喷头燃烧状态，达到测试条件。

c) 点燃燃气喷头并达到预设的热辐射值后，开始计时。

d) 在测试期间，用遥控装置持续操作灭火机器人，使得灭火机器人处于持续动作状态，通过燃烧室观察窗观察灭火机器人的动作，待灭火机器人停止动作后，停止燃烧，记录测试时间，测试关键部件温度。

e) 重复三次测试，取平均值。

5.6.4 测试结果记录

记录内容包括、热辐射强度、持续工作时间、关键部件温度。测试结果记录表见表 7。

表 7 抗高温性能测试结果记录表

次序	热辐射强度 (kW/m ²)	持续工作时间(min)	关键部件温度 (°C)	备注
1				
2				
3				

5.7 防倾覆能力测试

5.7.1 测试目的

测试灭火机器人在易燃易爆危险化学品事故现场复杂作业条件下的防倾覆能力。

5.7.2 测试条件

防倾覆能力测试条件如下：

a) 机器人静态

参照XF 892.1《消防机器人第1部分：通用技术条件》中8.6.5.1的要求进行设置。

b) 机器人行走

在XF 892.1《消防机器人第1部分：通用技术条件》中8.6.5.1的要求基础上，将倾覆试验装置延长至 20m。

c) 喷射状态

参照XF 892.1《消防机器人第1部分：通用技术条件》中8.6.5.1的要求进行设置。

5.7.3 测试流程与步骤

防倾覆能力测试按下列步骤进行：

a) 机器人静态

参照XF 892.1《消防机器人第1部分：通用技术条件》中8.6.5.1的步骤进行。每种工况测定三次，取平均值。

b) 机器人行走

在XF 892.1《消防机器人第1部分：通用技术条件》中8.6.5.1的测试步骤基础上，控制机器人按照最大行驶速度在测试台行走，通过调整倾斜角度，分别测量行走状态下左、右最大倾覆稳定角。每种工况测定三次，取平均值。

c) 喷射状态

参照XF 892.1《消防机器人第1部分：通用技术条件》中8.6.5.1的步骤进行，连接消防水带，机器人按照消防炮额定流量进行喷射，分别按照最小俯角、最大仰角和仰角30°进行最大摆角摆动喷射，测量不同工况下的左、右最大倾覆稳定角。每种工况测定三次，取平均值。

5.7.4 测试结果记录

记录结果包括左、右最大倾覆稳定角。测试结果记录表见表8和表9。

表8 灭火机器人静态与行走状态防倾覆能力测试结果记录表

测试状态	次序	左最大倾覆稳定角 (°)		右最大倾覆稳定角 (°)		备注
		单次	平均值	单次	平均值	
机器人静态	1					
	2					
	3					
机器人行走	1					
	2					
	3					

表9 灭火机器人喷射状态防倾覆能力测试结果记录表

测试状态	次序	消防炮最小俯角的左最大倾覆稳定角 (°)		消防炮最小俯角的右最大倾覆稳定角 (°)		消防炮最大仰角的左最大倾覆稳定角 (°)		消防炮最大仰角的右最大倾覆稳定角 (°)		消防炮30°仰角的左最大倾覆稳定角 (°)		消防炮30°仰角的右最大倾覆稳定角 (°)		备注
		单次	平均值	单次	平均值	单次	平均值	单次	平均值	单次	平均值	单次	平均值	
喷射状态	1													
	2													
	3													

6 通信与遥控测试

6.1 通信测试

通信试验参照XF 892.1《消防机器人第1部分：通用技术条件》中8.6.7的要求进行测试。

6.2 遥控测试

6.2.1 测试目的

测试灭火机器人在易燃易爆危险化学品火灾场复杂环境下的遥控作业能力及检测数据传输能力。

6.2.2 测试条件

遥控测试条件如下：

a) 开阔空间

选择平坦、无遮挡的露天区域（如空旷操场、专业测试场），场地长度不低于预估最大遥控距离的1.5倍，避免周边存在大功率无线电设备（如基站、雷达、高压输电线）。模拟触发灭火机器人的气体检测信号，作为气体检测仪器的动作信号。

b) 障碍物遮挡

构建易燃易爆化学品企业消防现场复杂环境，每间隔1m设置金属货架（尺寸2m×1m×3m）≥10组作为遮挡障碍物，或在生产装置区（装置区至少包括塔、管线、泵组、换热器等常见设备，且占地面积不小于400m²）测试，形成多径反射环境。模拟触发灭火机器人的气体检测信号，作为气体检测仪器的动作信号。

c) 电磁干扰

在测试区域内开启干扰源（如功率可调的无线电发射器、柴油发电机），设置干扰频率与灭火机器人遥控频率一致或相近。模拟触发灭火机器人的气体检测信号，作为气体检测仪器的动作信号。

6.2.3 测试流程与步骤

遥控测试按下列步骤进行：

a) 开阔空间

（1）开阔空间遥控试验参照XF 892.1《消防机器人第1部分：通用技术条件》中8.6.2的要求进行测试。其中100m测量区间，可调整为灭火机器人标称的最远遥控距离，开展验证性测试。

（2）若点位所有指令均能稳定执行，则延长测量区间10m继续测试；若出现指令延迟、丢包、执行失败等情况，缩短测量区间10m继续测试，最终确定最远遥控距离。

（3）模拟触发灭火机器人的气体检测信号，测试灭火机器人的气体检测能力、视频监控及数据传输情况。在测试结束前，遥控自脱落消防带接头。记录启停响应时间、动作响应的精准度。

（4）重复测试3次。

b) 障碍物遮挡

（1）障碍物遮挡试验参照开阔空间测试进行，灭火机器人与遥控操作人员之间通过设置金属货架或生产装置作为遮挡障碍物。

（2）重复测试3次。

c) 电磁干扰

（1）电磁干扰测试参照开阔空间测试进行，在测试区域内开启电磁干扰源，置干扰频率与灭火机器人遥控频率一致或相近。从低功率到高功率逐步调整干扰源强度，每调整一次干扰功率，重复测试，记录不同干扰强度下的有效遥控距离，判定灭火机器人基本功能（如启动、停止、急停等）是否有效。

（2）重复测试3次。

6.2.4 测试结果记录

记录内容包括最远遥控距离、指令响应延迟、数据传输稳定性（正常/丢包/中断）、气体检测信息。测试结果记录表见表10。

表 10 遥控测试结果记录表

环境条件	次序	最远遥控距离 (m)	响应延迟时间 (s)	数据传输稳定性 (正常/丢包/中断)	气体检测结果 (ppm)	备注
开阔空间	1					
	2					
	3					
障碍物遮挡	1					
	2					
	3					
电磁干扰	1					
	2					
	3					

7 自主作业测试

7.1 自主导航能力测试

7.1.1 测试目的

测试灭火机器人在事故现场区域自主选择最优路径并自主通行的能力。

7.1.2 测试条件

测试起点与终点的路径距离应 $\geq 500\text{m}$ ，路径中应包含直线与路口选择，且可行路径 ≥ 3 条，其中一条路径应设置路障，阻断通行。

7.1.3 测试流程与步骤

按照图4所示示意图，开展自主导航性能测试。步骤如下：

- a) 在测试场地选定起点和终点，将灭火机器人部署到测试场地起点。
- b) 通过灭火机器人上位机界面在可行区域指定终点，灭火机器人自行规划路径，选择最优路径。
- c) 开启自主行进模式，测试灭火机器人是否按规划最优路径行驶，灭火机器人到达终点停止行进后，测量灭火机器人与设置终点的距离，计算定位误差。
- d) 下次测试时，改变终点位置。
- e) 自主导航测试重复 3 次，记录每次轨迹精度、路径规划时间和行驶时间。

7.1.4 测试结果记录

记录内容包括定位误差、路径规划时间、行驶时间。测试结果记录表见表11。

表11 自主导航能力测试结果记录表

次序	定位误差 (m)	路径规划时间 (s)	行驶时间 (min)	备注
1				
2				
3				

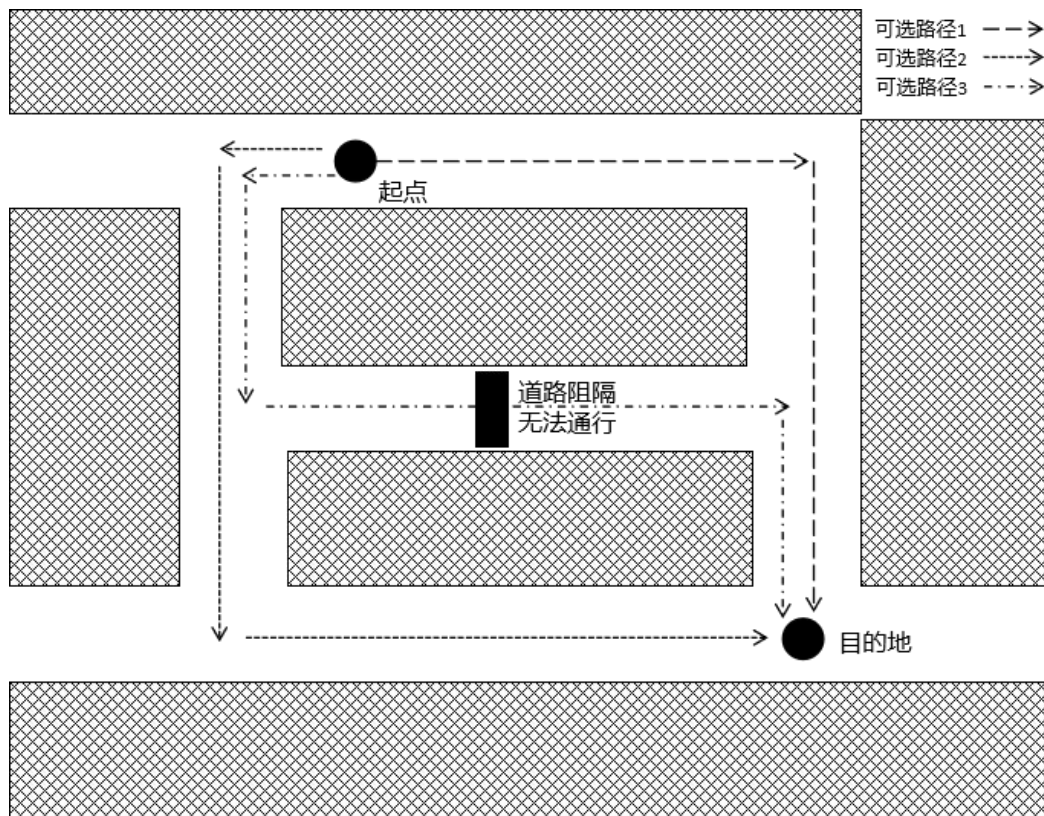


图4 自主导航性能测试示路径示意图

7.2 精准喷射能力测试

7.2.1 测试目的

测试灭火机器人在易燃易爆危险化学品事故现场自主喷射灭火、自主选择高温设备冷却防护的能力及自我位姿调整能力。

7.2.2 测试条件

精准喷射能力测试条件如下：

a) 测试场地：长度不低于120m，宽度不低于10m，场地空旷。

b) 测试设备

灭火：采用3台油盘（ $2.4\text{m} \times 2.4\text{m} \times 0.3\text{m}$ ）作为火源，间隔2m一字排开，每个油盘内盛装200L柴油或汽油，保证自由燃烧时间10min以上。

冷却：以储罐罐壁为模型，选一块 $15\text{m} \times 20\text{m}$ 的长方形钢板（厚度不低于3mm），竖直设置。采用电加热装置加热钢板至 $150 \pm 10^\circ\text{C}$ ，在钢板背面加设3组温度传感器测量温度，3组传感器应布置在射流落点区域的核心位置。也可选择退役的立式储罐为测试对象。

7.2.3 测试流程与步骤

按照图5所示预设行驶路径，开展精准喷射性能测试。步骤如下：

a) 灭火测试

(1) 灭火机器人具备自主选位及调节站位能力，将3台油盘放置在灭火机器人前向水平距离100m的火源探测范围内；若灭火机器人不具备自主站位及选位能力，应根据该灭火机器人的有效射程，将3台油盘放置在灭火机器人前向的有效范围内，保证射流落点可落入油盘。

- (2) 灭火机器人连接好灭火介质供给装备。
- (3) 点燃3台油盘。
- (4) 启动目标检测与自主喷射模式，观察灭火机器人是否具备依次扑灭3台油盘火的能力，记录各个动作响应时间、射流中心落入油盘中心的时间、完全灭火时间。
- (5) 重复3次测试。

b) 冷却测试

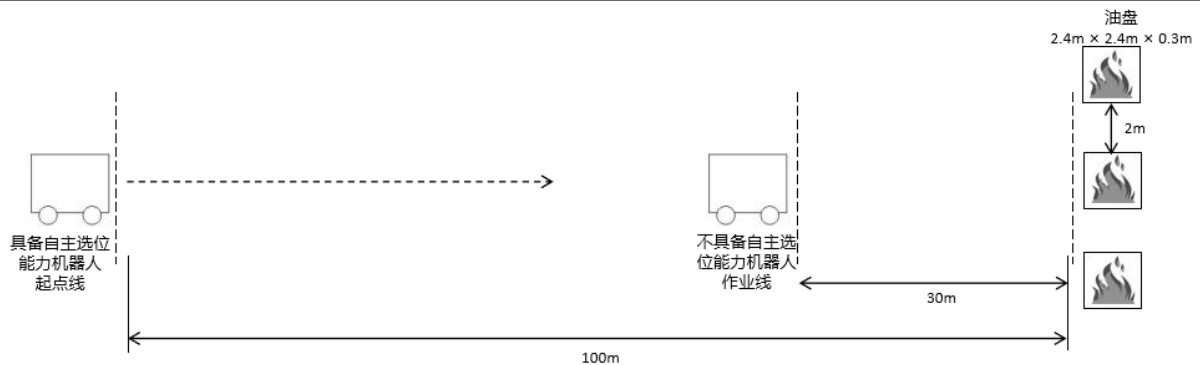
- (1) 灭火机器人具备自主选位及调节站位能力，储罐或钢板放置在灭火机器人前向水平距离100m的火源探测范围内；若灭火机器人不具备自主站位及选位能力，应根据该灭火机器人的有效射程，将3台油盘放置在灭火机器人前向的有效范围内，保证射流可喷射至罐壁。
- (2) 灭火机器人连接好消防水供给装备。
- (3) 通过电加热装置加热储罐或钢板至 $150\pm 10^{\circ}\text{C}$ 后维持。
- (4) 启动自主行进、目标检测与自主喷射模式，待水流喷射至储罐或钢板上后，关闭电加热装置。观察灭火机器人是否具备自主选择高温壁面、自主喷射、自动摆头降温的能力。测试消防炮的直流模式、雾化模式、开花模式等。
- (5) 记录各个动作响应时间及降至常温时间。
- (6) 重复3次测试。

7.2.4 测试结果记录

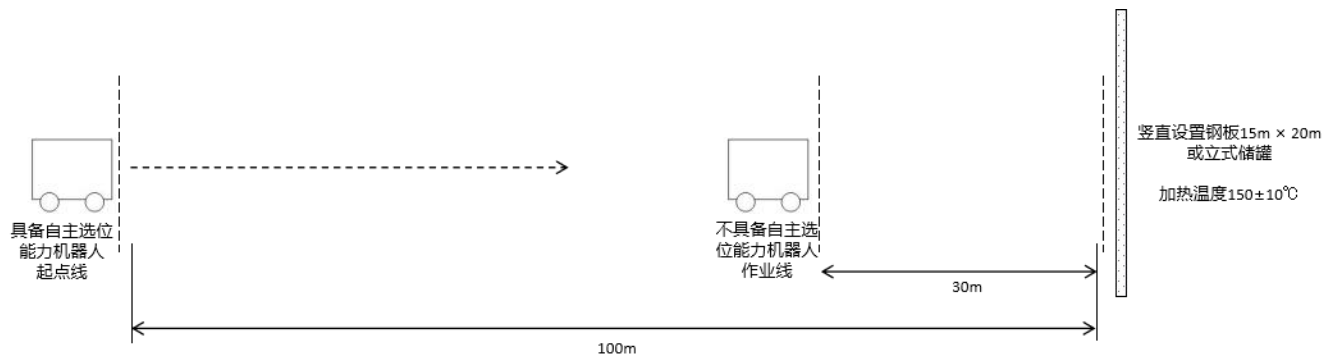
记录内容包括响应时间、灭火时间、降温时间。测试结果记录表见表 12。

表 12 精准喷射能力测试结果记录表

测试类型	次序	响应时间 (s)	灭火时间 (s)	降温时间 (s)	备注
精准灭火	1			/	
	2			/	
	3			/	
冷却防护	1		/		
	2		/		
	3		/		



(a) 灭火性能测试



(b) 冷却性能测试

图 5 精准喷射性能测试行驶路径示意图

7.3 续航与稳定性能力测试

7.3.1 测试目的

针对以电池为动力源的灭火机器人进行续航能力测试。

7.3.2 测试条件

续航与稳定性能力测试条件如下：

- 测试场地为 200m×8m，混凝土地面。
- 消防水带数根。
- 测试环境温度温度为 $25\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，模拟常温作业场景。

7.3.3 测试流程与步骤

续航与稳定性能力测试按下列步骤进行：

a) 将灭火机器人电池充满电，处于待机状态。灭火机器人行驶速度设定为额定最大行驶速度的 80%。机械臂持续动作测试需明确动作循环周期（单次循环包含举升、旋转、抓取、收回 4 个动作，单次循环时间 $\leq 30\text{s}$ ）。续航测试终止条件为灭火机器人行驶速度低于额定最大速度的 50%，或出现低压报警、核心功能失效。

b) 在空载情况（无消防水带）下，灭火机器人沿测试场地循环运动，直到自动停止工作，记录灭火机器人持续工作时间。

c) 在连接额定数量满水消防水带的情况下，灭火机器人沿测试场地循环运动，直到自动停止工作，记录灭火机器人持续工作时间。

d) 针对设置机械臂的灭火机器人，进行机械臂持续动作测试，重复循环指令动作，测试指定动作的稳定性及耐久性。

f) 上述工况，重复测试 3 次。

7.3.4 测试结果记录

记录内容包括持续工作时间，动作稳定性（正常/卡顿/故障）。测试结果记录表见表 13。

表 13 续航与稳定性能力测试结果记录表

测试类型	次序	持续工作时间 (min)	动作稳定性 (正常/卡顿/故障)	备注
空载行驶	1			
	2			

	3			
拖拽消防带行驶	1			
	2			
	3			
机械臂持续动作	1			
	2			
	3			

8 特殊功能测试

针对灭火机器人的特殊附属功能开展测试。

8.1 清障功能测试

8.1.1 测试目的

测试灭火机器人在事故现场的地面清障能力。

8.1.2 测试条件

清障功能测试条件如下：

- a) 测试场地：50m×50m，水泥或混凝土地面。
- b) 障碍物：

设备金属碎块(体积0.4-0.8m³,重量100-150kg,形状为正方体、长方体等),金属管线(管径300-500mm,长度4-8m),地面零散杂物(单个杂物体积在0.2-0.4m³,形状为球形、正方体、长方体、圆柱形等,设置30-50个杂物对象,堆积在集中区域。)

8.1.3 测试流程与步骤

清障功能测试按下列步骤进行：

- a) 将灭火机器人设为自主工作模式，放置到测试场地。
- b) 在灭火机器人前进方向的30m处，分别设置上述障碍物。
- c) 启动灭火机器人进行清障测试，记录清障时间、轨迹选择合理性、残留物品数量。
- d) 重复测试3次。

8.1.4 测试结果记录

记录内容包括清障时间、残留物品量、轨迹合理性。测试结果记录表见表14。

表14 清障功能测试结果记录表

障碍物	次序	清障时间(min)	残留物品数量(个)	轨迹合理性(是/否)	备注
设备金属碎块	1				
	2				
	3				
金属管线	1				
	2				

障碍物	次序	清障时间(min)	残留物品数量 (个)	轨迹合理性 (是/否)	备注
	3				
零散杂物	1				
	2				
	3				

8.2 破拆功能测试

8.2.1 测试目的

测试灭火机器人在危险化学品复杂事故场景下（参见附录 B）的破拆能力。

8.2.2 测试条件

根据待测灭火机器人的破拆类型和破拆能力，设置测试对象如下：

a) 设备壁板：模拟易燃易爆危险化学品储罐、反应釜残骸壁板，采用 Q235 钢板，厚度为 4mm，尺寸 1.0m×0.8m，垂直安装在支架上。

b) 混凝土砌块：模拟现场坍塌墙体碎片，采用 C30 混凝土浇筑，单块尺寸 0.6m×0.4m×0.3m，放置在水平地面上。

8.2.3 测试流程与步骤

破拆功能测试按下列步骤进行：

a) 设备壁板破拆测试

(1) 将灭火机器人启动，达到稳定工作状态。

(2) 测试人员遥控灭火机器人进行壁板击穿作业，击穿孔径 $\geq 100\text{mm}$ ，记录灭火机器人的破拆动作精准度和破拆时间，考察破拆机械臂的动作强度、灵活性等。

(3) 每个工况重复 3 次测试。

b) 混凝土砌块破拆测试

(1) 启动灭火机器人，达到稳定工作状态。

(2) 测试人员遥控灭火机器人进行混凝土破碎作业，破碎后最大块体尺寸 $\leq 50\text{mm}\times 50\text{mm}\times 50\text{mm}$ ，记录灭火机器人的破拆动作精准度和破拆时间，考察破拆机械臂的动作强度、灵活性等。

(3) 每个工况重复 3 次测试。

8.2.4 测试结果记录

记录内容包括破拆时间和破拆结果。测试结果记录表见表 15。

表 15 破拆功能测试结果记录表

破拆类型	次序	破拆时间 (min)	破拆结果 (是/否)	备注
设备壁板	1			
	2			
	3			
混凝土砌块	1			
	2			
	3			

8.3 阀门开关功能测试

8.3.1 测试目的

测试灭火机器人开关阀门能力。

8.3.2 测试条件

设置 DN50~DN350 阀门台架，阀体中心离地 1m，在阀门手轮/阀杆位置安装动态力矩测试仪。

8.3.3 测试流程与步骤

阀门开关功能测试按下列步骤进行：

- a) 测试人员根据灭火机器人额定能力设置阀门台架，选定合适阀门规格。
- b) 启动灭火机器人，达到稳定工作状态。
- c) 测试人员遥控灭火机器人依次执行阀门全关和全开动作，过程中力矩仪实时采集数据，记录关闭峰值力矩、开启峰值力矩、稳定工作力矩。
- d) 人工确认阀门开、关程度。
- e) 灭火机器人输出启闭力矩 \geq 阀门额定启闭力矩，且动作平稳、无打滑、无脱夹、启闭到位，判定合格；力矩不足、启闭不到位、打滑脱夹、卡顿异常，判定不合格。
- f) 每个工况重复 3 次测试。

8.3.4 测试结果记录

记录内容包括阀门类型、阀门尺寸、关闭峰值力矩、开启峰值力矩、稳定工作力矩、阀门开关情况。测试结果记录表见表 16。

表 16 阀门开关功能测试结果记录

阀门类型（闸阀、蝶阀、球阀等）	阀门尺寸（DN50~DN350）	次序	关闭峰值力矩（Nm）	开启峰值力矩（Nm）	稳定工作力矩（Nm）	阀门开关情况	备注
		1					
		2					
		3					

8.4 搬运重物功能测试

8.4.1 测试目的

测试灭火机器人对各类重物的抓取、搬运稳定性及作业效率。

8.4.2 测试条件

搬运重物功能测试条件如下：

- a) 测试场地：50m×50m，水泥或混凝土地面；设置 1 个 10m×10m 的安全放置区域，放置区域与重物初始位置距离 \geq 20m。
- b) 测试设备
 - 危险化学品桶：200L 标准桶（装载清水模拟危险化学品）
 - 托盘：标准塑料托盘（尺寸 1.2m×1.0m），配重块单块 25kg

8.4.3 测试流程与步骤

搬运重物测试按下列步骤进行：

a) 危险化学品桶搬运测试

(1) 启动灭火机器人，切换至额定操作模式，将灭火机器人部署在距离危险化学品桶初始位置 5m 处。

(2) 控制灭火机器人自主（或遥控）行进至危险化学品桶旁，调整姿态，使抓取装置对准桶身，启动抓取动作，记录从灭火机器人到达指定位置至完成抓取，桶身离开地面 $\geq 100\text{mm}$ ，保持稳定无晃动的时间（即抓取时间）。

(3) 抓取完成后，控制灭火机器人平稳行进至安全放置区域，全程保持重物稳定，不得出现倾斜、晃动、坠落等情况，记录从抓取完成至到达放置区域指定位置的时间（即搬运时间）。

(4) 调整灭火机器人姿态，将危险化学品桶缓慢放置指定位置，确保桶身垂直、无倾斜、无滑动，完成放置后记录放置时间。

(5) 重复测试 3 次。

b) 装载托盘搬运测试

(1) 启动灭火机器人，切换至额定操作模式，将灭火机器人部署在距离装载托盘（根据灭火机器人额定托举能力设定配重块数量）初始位置 5m 处。

(2) 控制灭火机器人自主（或遥控）行进至托盘旁，调整姿态，使抓取装置对准托盘，启动抓取动作（夹具夹紧托盘或机械臂托举托盘），确保托盘平稳离开地面 $\geq 100\text{mm}$ ，袋装物品无掉落，记录抓取时间。

(3) 抓取完成后，控制灭火机器人平稳行进至安全放置区域，避免托盘倾斜、袋装物品掉落，记录搬运时间。

(4) 调整灭火机器人姿态，将托盘缓慢放置指定位置，确保托盘水平、无滑动，配重块无掉落、无移位，记录放置时间。

(5) 重复测试 3 次。

8.4.4 测试结果记录

记录内容包括抓取时间、搬运时间、放置时间、配重重量。测试结果记录表见表 17。

表 17 搬运重物功能测试结果记录表

搬运物品	次序	抓取时间(s)	搬运时间(s)	放置时间(s)	配重重量(kg)	备注
危险化学品桶	1					
	2					
	3					
装载托盘	1					
	2					
	3					

附录 A

(资料性)

典型易燃易爆危险化学品处置场景说明

表 A.1 典型易燃易爆危险化学品处置场景说明

序号	场景类型	场景描述	主要风险点	备注
1	易燃易爆危险化学品储罐区火灾场景	主要涉及汽油、柴油、乙醇、甲醇等易燃液体储罐，或液化石油气、天然气等可燃气体储罐，周边设有防护堤、消防管网及阀门井，火灾时伴随高温、浓烟，可能出现储罐泄漏、沸溢、喷溅。	储罐爆炸、火势蔓延、人员灼伤、有毒有害气体泄漏	含立式、卧式储罐场景，适用于存储类易燃易爆危险化学品企业
2	易燃易爆危险化学品生产装置区火灾场景	涉及反应釜、精馏塔、管线、泵阀等生产设备，设备密集，管线纵横交错，地面多为混凝土或碎石路面，可能存在设备倒塌、管线断裂，火灾多为局部起火蔓延至整体。	设备爆炸、有毒介质泄漏、火势隐蔽蔓延、机器人行进受阻	适用于化工生产类企业，涵盖间歇式、连续式生产装置
3	易燃易爆危险化学品仓库火灾场景	单层仓库，货架密集，存放易燃固体、液体、氧化剂等危险化学品，包装形式为桶装、袋装，火灾时伴随浓烟、阴燃，可能出现货架倒塌。	火势隐蔽蔓延、有毒烟气积聚、货架倒塌掩埋、二次复燃	含普通仓库、防爆仓库场景，不适用于露天堆场
4	易燃易爆危险化学品装卸区火灾场景	铁路、公路装卸站台，设有装卸鹤管、泵组、阀门、计量设备，地面为混凝土路面，可能有积水、油污，装卸过程中易发生危险化学品泄漏起火，火势多集中在鹤管、罐体接口处。	泄漏扩散、火势快速蔓延、爆炸风险、人员中毒灼伤	适用于陆上易燃易爆危险化学品装卸作业区域，含桶装、罐装装卸

5	易燃易爆危险化学品事故泄漏扩散场景	储罐、管线、设备破裂导致危险化学品（易燃、有毒）泄漏，可能形成积液，未起火但存在燃爆、中毒风险。	泄漏扩散、燃爆隐患、人员中毒、设备腐蚀	含易燃、有毒危险化学品泄漏，不含放射性危险化学品
6	易燃易爆危险化学品爆炸后现场场景	易燃易爆危险化学品储罐、装置爆炸后，现场设备倒塌、管线断裂、杂物散落（金属碎块、设备残骸），地面布满碎石、积水，可能有残留火源、有毒气体泄漏，通道堵塞严重。	二次爆炸、残留火源复燃、人员掩埋、有毒气体中毒	适用于各类易燃易爆危险化学品爆炸后的处置场景
7	易燃易爆危险化学品罐区阀门操作场景	储罐区阀门井、阀门组，设有各类阀门，周边可能有积水、管线遮挡，事故时需快速开关阀门切断介质供应。	阀门操作失误、介质泄漏加剧、人员接触有毒介质	涵盖储罐区、装置区各类常用规格阀门
8	易燃易爆危险化学品重物搬运场景	事故现场有倾倒的易燃易爆危险化学品桶、托盘（装载袋装危险化学品），需搬运至安全区域。	重物坠落、危险化学品泄漏、搬运过程中灭火机器人倾倒	含危险化学品桶、装载托盘等常见重物类型

附录 B

(资料性)

破拆场景说明

表 B.1 破拆场景说明

序号	典型事故场景	现场主要破拆障碍物	破拆目的	备注
1	易燃易爆危险化学品储罐爆炸坍塌场景	储罐残骸壁板、罐体支架、断裂管线	清除储罐残骸，开辟救援通道，切断泄漏管线	场景常见于石油、化工储罐区事故
2	易燃易爆危险化学品仓库坍塌场景	坍塌墙体碎片、断裂梁柱、货架残骸	清除坍塌墙体及货架，搜救被困人员，转移危险化学品	场景常见于固体、液体危险化学品仓库事故
3	易燃易爆危险化学品反应釜爆炸场景	反应釜壁板、搅拌装置残骸、连接管线	破拆反应釜残骸，清除有毒有害介质泄漏隐患，开辟作业通道	场景常见于装置区事故
4	易燃易爆危险化学品运输车辆碰撞泄漏场景	车辆残骸、罐体破裂壁板、管线碎片	破拆车辆残骸，清理泄漏罐体，切断泄漏源	场景常见于危险化学品公路运输事故

参考文献

- [1]戴航,许凯,刘金龙,等. 灭火机器人水带智能对接系统的设计研究 [J]. 消防科学与技术, 2026, 45 (S1): 86-93.
- [2]栾东雪,景少雷,姚志广. 厂区巡检灭火机器人的设计与实现 [J]. 无线互联科技, 2025, 22 (19): 18-21.
- [3]刘庆. 基于视觉的灭火机器人火场感知研究[D]. 中国矿业大学, 2024.
- [4]沙敏,孔誉颖,洪钰栋,等. 灭火机器人远程操作控制台设计 [J]. 科技与创新, 2023, (24): 11-14.
- [5]尹海阳,龙小玉,肖飒,等. 灭火机器人的发展现状及展望综述 [J]. 今日消防, 2023, 8 (1): 16-18+24.
- [6]姜元波. 灭火机器人喷射灭火定位及其控制技术研究[D]. 沈阳理工大学, 2023.
- [7]李晓贤,侯健,王奔,等. 灭火机器人控制系统的设计与研究 [J]. 电子产品世界, 2021, 28 (12): 55-58+63.
- [8]乔俊福,郭晋秦,李永伟. 基于激光导航的灭火机器人定位系统设计 [J]. 激光杂志, 2019, 40 (12): 94-97.
- [9]温卫敏. 一种最优路径规划的灭火机器人系统设计 [J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2018, 31 (3): 21-28.
-