

矿山安全

# 基于 D-S 证据理论的矿用非电气 点燃风险研究

Research on Non Electrical Ignition Risk in Mining Based on D-S Evidence Theory

李志 (安标国家矿用产品安全标志中心有限公司, 北京 100013)

**摘要:**针对煤矿井下爆炸性环境,因非电气设备热表面、机械火花、热反应等形式的点燃源造成爆炸风险的问题,本文提出了一种基于 D-S 证据理论的多传感器数据融合点燃源抑制方法。利用多传感器采集整个机电系统可能形成点燃源的信息,通过对工况环境和不同点燃源数据特征进行分析和安全评价,实现在含爆炸性物质的煤矿井下环境抑制非电设备点燃源产生,对可能产生的点燃源进行预警和启动适宜的防护措施,确保煤矿井下工况安全。

**关键词:**D-S 证据理论; 非电防爆; 点燃源; 热表面

**中图分类号:** TD85 + 2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)04-0047-04

**Abstract:** Regarding the underground environment containing explosive gases and dust, the risk of explosion in the working environment is caused by ignition sources formed by non electrical explosion-proof equipment such as hot surfaces, mechanical sparks, and thermal reactions. This article proposes a method for suppressing ignition sources of non electric explosion-proof equipment based on D-S evidence theory and multi-sensor data fusion. It uses multiple sensors to collect information about the possible ignition sources that may form in the entire non-electrical system. It analyzes and evaluates the data characteristics formed by the working environment and different ignition sources to suppress the generation of non electric equipment ignition sources in underground environments containing explosive substances. Warning and initiating appropriate protective measures for potential ignition sources. It can ensure the safety of underground working conditions.

**Key words:**D-S evidence theory; non-electrical equipment; ignition source; hot surface

## 1 前言

在新质生产力发展的今天,党和国家不断强化安全底线意识,在矿山领域防止爆炸性事故的发生已成为行业安全生产的首要问题。然而伴随着新技术和智能装备向矿山开采行业的不断引入,虽促进了行业科技进步,提高了生产能效,但也使井下机电系统更为复杂,矿山安全生产面临着挑战更为多样化。

随着矿山智能化建设的推广,机械和电气集合系统使用密度越来越高,在大量的机械运动中经常伴有因摩擦、碰撞等造成的热量传递,如内燃机车、

掘锚用机械设备、大型机器人等设备在运行中普遍存在火花和放热现象,这些在爆炸性环境中是主要的潜在点燃源<sup>[1-2]</sup>。因此,在爆炸性环境下对非电气设备点燃源进行充分的评估,并采取有效的防爆抑制措施十分必要。目前对非电设备点燃源的抑制措施主要是通过单一传感器对设备可能产生热表面的部件和周围爆炸性能环境的气体浓度进行监控,依据各传感器预先设定阈值控制设备通断来实现对点燃风险的抑制。但在现实的机械系统中普遍存在热表面、放热化学反应等点燃源由于内部的能量聚集效应,即使通过阈值控制了设备启停,温度还会继续上升,依然存在很多风险隐患<sup>[3-4]</sup>。

本文采用基于 D-S 证据理论和经典非电气防爆相结合的控制方法,通过多传感器信息融合对整个系统进行点燃源综合评估和风险预警,实现非电气设备在含有爆炸性物质的 I 类煤矿井下环境可靠应用。

[作者简介] 李志(1977—),男,高级工程师,主要从事防爆标准、检测检验方法研究。

[引用格式] 李志. 基于 D-S 证据理论的矿用非电气点燃风险研究[J]. 中国矿山工程,2025,54(4):47-50.

## 2 基于 D-S 证据理论非电防爆点燃源抑制方法研究

### 2.1 风险分析及信息特征的提取

爆炸性环境下非电气设备点燃源风险评估主要通过机械运动产生的火花、放热、静电、爆炸性气体或粉尘的点燃阈值、降温系统的工作状态等多种信息源特征提取,为点燃源风险评估结果提供证据支持。主要点燃工况有以下几种。

**热表面:**设备机械结构间和与外部的摩擦、碰撞造成接触处发热,如电动滚筒表面、行走机构的制动部件和掘进设备等。

**热气体:**高温废气、气动工具排气,如气动马达、柴油机排气口等。

**机械火花:**物质碰撞运动、机械结合部间因润滑措施失效等产生火花,如盾构机与岩壁,非无火花材质间的碰撞等。

**热反应:**不同物质混合或接触产生化学反应发热,如润滑油脂的氧化、铝粉与酸性气体接触等。

**静电放电:**带电物体靠近导电介质产生放电、固体或液体流动摩擦放电,如可燃液体高速通过管道或过滤装置、皮带传动装置橡胶皮带与轮毂摩擦等<sup>[5-6]</sup>。

因此,通过对以上各类风险信息物理特性、形成因素的分析和数据特征提取,研究出基于 D-S 证据理论和非电防爆抑制原理的点燃源风险评估方法,在煤矿井下 I 类爆炸性环境中识别设备正常工作状态和故障状态机械运动特性,依据相关安全规程和经验数据设定阈值并采取相应的点燃抑制措施或风险预警,实现对非电气设备潜在点燃源的抑制和保障矿山安全生产。

### 2.2 点燃源数据的权值分配和信息融合

采用 D-S 证据理论信息融合处理由多种因素引起的不确定性,首先通过为各传感器赋予权值,对被识别风险源形成基本可信度分配,结合历史经验数据,融合各条证据得出风险趋势和概率,实现对整个煤矿井下机械系统的点燃源风险评估。

信息信度的基础融合法则为

$$m(A) = m_1 \oplus m_2(A) = \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(B_j)} \quad (1)$$

在数据权值赋予上,每组风险源相关性与信息

融合熵成反比,风险源相关性越大,融合熵越小;风险源相关性越小,融合熵越大<sup>[7]</sup>。

### 2.3 基于 D-S 证据理论的非电气设备点燃源风险评估研究

1) 由多传感器对同一目标提供同属性的证据识别

该类点燃源信息融合主要针对机械运动速度或动能与温度和热表面温升速率,散热系统工况与温度和热表面温升速率,炙热气体流量和温度,爆炸性气体浓度和变化速率等风险数据信息。

针对经典工况下散热装置冷却液流速与热表面温升速率,设该路传感器采集数据信息分别为  $t_1$  和  $s_1$ ,识别该目标为  $A_1 (A_1 \in P(\Theta))$  的信任分配为

$$m_1(A_1) = t_1, m_1(\Theta) = 1 - t_1$$

由于  $t_1$  和  $s_1$  均是温度信息同向相关证据,信任分配表达为

$$m_2(A_1) = s_1, m_2(\Theta) = 1 - s_1$$

则  $t_1$  和  $s_1$  识别该路热表面点燃源  $A_1$  的可信度、评价似真度及未知度分别为

$$Bel_1(A_1) = t_1, Pl_1(A_1) = 1, Not_1(A_1) = 1 - t_1$$

$$Bel_2(A_1) = s_1, Pl_2(A_1) = 1, Not_2(A_1) = 1 - s_1$$

由此推出:  $t_1$  和  $s_1$  识别信息的基本信任分配的可信度、似真度和未知度分别为

$$m(A_1) = t_1(1 - s_1) + s_1 = s_1(1 - t_1) + t_1$$

$$m(\Theta) = (1 - t_1)(1 - s_1)$$

$$Bel(A_1) = s_1 + t_1(1 - s_1) = s_1 + s_1(1 - t_1)$$

$$Pl(A_1) = 1, Not(A_1) = (1 - t_1)(1 - s_1)$$

即:  $Bel(A_1) > Bel_1(A_1)$ ,  $Pl(A_1) = Pl(A_i)$ ,  $Not(A_1) < Not_1(A_1) (i \in P(\Theta))$ 。

该方法通过对同一目标(热表面点燃源)的动态采集和对多路传感器数据的信息融合,形成对目标的评价,可以减少不确定性、增加识别可信度、对似真度不造成影响且可减少未知度,实现对点燃源形成的动态变化和趋势变化判断更准确<sup>[8]</sup>。

2) 由多传感器对同一目标  $M$  提供不同属性的证据识别

该类风险源信息融合主要针对采集的异常噪音和热表面温度、爆炸性气体浓度和热表面温度、放热反应物质特性和热表面温升速率等与数据库信息进行对比和融合判断,依据历史经验数据、相关安全规程和技术标准要求设定阈值从各组关联的数据变化识别可能形成点燃源的风险。

设传感器  $S_1$  识别目标  $M$  为  $B_1$ , 传感器  $t_1$  识别目

标  $M$  为  $B_2 (B_1, B_2 \in P(\Theta), B_1 \cap B_2 \neq \Phi)$ 。通过采集多目标信息,融合得出  $S_1$  和  $t_1$  目标的评价,其可信度、似真度和未知度分别表述为

$$m(B_1) = \frac{s_1(1-t_1)}{1-s_1t_1}, m(B_2) = \frac{t_1(1-s_1)}{1-s_1t_1},$$

$$m(\Theta) = \frac{(1-t_1)(1-s_1)}{1-s_1t_1}, Bel(B_1) = \frac{s_1(1-t_1)}{1-s_1t_1},$$

$$Bel(B_2) = \frac{t_1(1-s_1)}{1-s_1t_1}, Pl(B_1) = \frac{(1-s_2)}{1-s_1s_2},$$

$$Pl(B_2) = \frac{(1-s_1)}{1-s_1t_1},$$

$$Not(B_1) = Not(B_2) = \frac{(1-t_1)(1-s_1)}{1-s_1t_1}.$$

即:  $Bel(B_1) < Bel_1(B_1), Pl(B_1) < Pl_1(B_1), Pl(B_2) < Pl_2(B_2), Bel(B_2) < Bel_2(B_2), Not(B_1) < Not_1(B_1), Not(B_2) < Not_2(B_2)$

即通过 D-S 证据理论融合异常噪音和热表面温度、爆炸性气体浓度和热表面温度、放热反应物质特

性和温升速率等关联信息,得出的 I 类煤矿井下环境的点燃源风险评估和抑制措施,可信度和似真度得到提高,从而有效降低各单传感器导致对同一风险源目标评价的不确定性<sup>[9-10]</sup>。

### 3 非电防爆点燃源抑制系统方案结果分析

以基于 D-S 证据理论的非电防爆点燃源抑制系统的掘进机部件为例,模拟在 I 类煤矿井下爆炸性环境,正常掘进工况、掘进设备故障状态和因维护保养不当、润滑不良时对部分潜在点燃源风险的评估和点燃源形成的识别。掘进机潜在点燃源风险评估见表 1<sup>[11]</sup>。依据该评估分析,预设相关信息采集装置,把采集的数据作为信息融合的输入,经过 D-S 证据理论信息融合分别从多源信息的有效性及其融合算法的有效性测试该非电防爆点燃源抑制系统的功能。

表 1 在煤矿井下 I 类爆炸性环境下掘进装置点燃源风险评估

序号	潜在点燃源	正常运行状态	预期故障状态	形成原因分析
1	掘进截割机构	摩擦热	√	正常工况下,截割表面与巷道岩壁摩擦、碰撞
		机械火花		
2		摩擦热		√ 降温系统内、外喷雾流量不足或停止
		机械火花		
3		√		正常运行时,减速器齿轮和传动机构间机械作用发热
4			√	齿轮缺少润滑油导致摩擦阻力增加,减速器憋卡、发热
5		√		正常运行时,部件间摩擦发热
6	行走机构	摩擦热	√	正常运行时,减速器齿轮和传动机构间机械作用发热
		热表面		
7			√	齿轮缺少润滑油导致摩擦阻力增加,减速器憋卡、发热
8	装载机构	摩擦热机械火花	√	正常运行时,星轮、铲板与掘进巷道岩壁碰撞、摩擦
10			√	正常运行时,泵内部摩擦发热
11	液压传动系统	热液体	√	故障时,泵内部磨损或容积效率下降需要更高的转速维持输出等导致异常发热

依据 GB/T 3836. 28—2021 中的点燃危险评定方法<sup>[12]</sup>,通过模拟与点燃源形成相关温度、行走机构运行参数、设备维护参数和温升速率,预设采集准确度下单独进行点燃源评估,其识别点燃源的融合熵分别为  $H(Y/A_1) = 0.189, H(Y/B_1) = 0.241, H(Y/C_1) = 0.375, H(Y/D_1) = 0.343$ 。其中  $A_1, B_1, C_1, D_1$  分别代表掘进机行走机构单一通道的输入信息,主要有:速度、减速器齿轮的润滑状态、热表面的温度和温升速率等;  $Y$  代表在爆炸性环境下形成的

点燃源;  $H$  是信息融合后的熵。从以上融合结果可以分析出热表面是非电气防爆设在爆炸性环境中最主要的点燃源。而该评价结论中最主要的不确定因素有传感器的精度、响应速度和温度参数本身特性决定的数据采集的滞后性和温升的非线性<sup>[13]</sup>。

而通过这 4 种目标信息依据 D-S 证据理论和点燃危险评定,对关联度高的信息两两进行融合<sup>[14-15]</sup>。分别为:温度与速度的融合熵为  $H(Y/A_1 \cdot C_1) = 0.131$ 、温度和温升速率融合熵为  $H(Y/C_1 \cdot$

$D_1) = 0.089$ 、设备维护状态与温度融合熵为  $H(Y/B_1 \cdot C_1) = 0.149$ 、设备维护状态与温升速度融合熵为  $H(Y/B_1 \cdot D_1) = 0.113$ 。

通过模拟运行对比分析,多信息识别相较于与单一信息识别结果,相关度较大的信息进行融合可以有效降低系统识别的不确定度,并通过风险趋势预判解决了因信息采集滞后性和不规则变化导致判定延迟的问题。因此通过该方法对煤矿井下 I 类爆炸性环境的非电设备进行点燃源评估,可以有效提高设备运行的稳定性和安全性。

## 4 结论

通过对煤矿井下 I 类爆炸性环境中非电防爆设备点燃源的评估和实例数据分析,本文提出一种基于 D-S 证据理论的矿用非电防爆设备点燃源抑制方法,对在煤矿井下 I 类爆炸性环境中使用的矿山机电系统中与点燃源相关的信息和经验数据进行连续性融合处理、点燃源辨识,提取涉及风险评估及预警的特征信息,实现在爆炸性环境下对非电设备点燃源的有效抑制。为更多先进技术和智能装备在矿山开采行业的可靠应用提供验证方法和安全保障。

### [参考文献]

- [1] 蒋漳河,刘柏清,梁峻,等. 防爆起重机非电气点燃危险辨识及评定[J]. 重工特种设备安全,2020,36(7): 78-82.
- [2] 郦杭川. 非电气设备防爆技术简介及应用初探[J]. 自动化仪表,2017,38(5):76-80.
- [3] 徐建平. 工业危险点燃源及其防爆技术概论[J]. 石油化工自动化,2003,4:96-101.
- [4] 尚志奎. 防爆基础理论和设计流程[J]. 防爆电机,2018,53(3):30-32.
- [5] 迈克尔·贝尔,寇晓光. 防爆非电气设备的点燃危险评定方法[J]. 电气防爆,2007,53(4):22-27.
- [6] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 爆炸性环境 第28部分:爆炸性环境用非电气设备基本方法和要求:GB/T 3836.28—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.10.
- [7] 康健,谷云彪,李一兵. 基于 D-S 证据理论的多传感器信息融合算法[J]. 中国惯性技术学报,2012,20(6):670-673.
- [8] 段亮,宋春元,刘超,等. 基于机器学习的高速列车轴承温度状态识别[J]. 吉林大学学报(工学版),2022,52(1):53-62.
- [9] 郭创新,彭明伟,刘毅. 多数据源信息融合的电网故障诊断新方法[J]. 中国电机学报,2009(31):1-7.
- [10] 张化光. 智能控制基础理论及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005:103-110.
- [11] 李博. 煤矿用悬臂式掘进机点燃源辨识与防爆评定[J]. 电气开关,2023(6):11-14.
- [12] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 爆炸性环境 第29部分:爆炸性环境用非电气设备 结构安全型“c”、控制点燃源型“b”、液浸型“k”:GB/T 3836.29—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.10.
- [13] 徐留明,吴金文,于磊磊. 基于自适应模糊算法的电气设备温度控制技术[J]. 浙江水利水电学院学报,2021,33(1):74-78.
- [14] 李昊. 基于 D-S 证据理论信息融合的电力设备故障诊断研究[J]. 现代工业经济和信息化,2024,246(12):280-282.
- [15] 康健,谷云彪,李一兵. 基于 DS 证据理论的多传感器信息融合算法[J]. 中国惯性技术学报,2012,20(6):670-673.