

高瓦斯隧道作业机械防爆及自诊断功能的实现和应用

刘 戎¹ 杨春和^{1,2} 姜德义¹ 顾义磊¹

(1 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘 要 针对目前高瓦斯隧道施工机械防爆改装存在的问题, 文章依据《柴油车防爆标准》及相关技术规范设计了一种高瓦斯隧道作业机械智能防爆装置。当隧道中瓦斯浓度达到或者超过规范允许的最高浓度时, 装置控制作业机械熄火、断电并将作业机械闭锁; 当作业机械排气系统温度达到或超过规范规定的最高温度时装置进行喷淋降温, 防止排气系统高温点爆瓦斯。同时, 为增加装置可靠性, 设计了设备故障闭锁、水位异常闭锁以及排气系统温度超限闭锁等三个安全闭锁系统。实践证明, 智能防爆装置具有安装快速、使用简捷、运行安全的特点, 可以达到防爆的作用。

关键词 高瓦斯隧道 防爆装置 自诊断闭锁

中图分类号: U455.3 **文献标识码: A**

1 前 言

目前, 我国的交通基础设施建设正处在一个飞速发展的阶段, 隧道数量增长较快, 同时穿越复杂地质环境的隧道也越来越多。而瓦斯事故的突发性、变化性及其严重后果性也使得瓦斯隧道的管理与其他隧道有所不同。2004年12月6日龙眼睛隧道发生瓦斯爆炸事故, 2005年12月22日董家山隧道发生瓦斯爆炸, 2009年2月16日野三河电站一号隧道发生瓦斯爆炸事故^[1]。可以说, 瓦斯隧道施工的首要安全任务就是要防止瓦斯爆炸事故, 而作业机械是隧道作业中最重要的设备之一, 防爆作业机械可以有效防止因瓦斯浓度突然增加造成的事故^[2]。因此, 其防爆性能的优劣成为隧道施工管理者最关心的一个环节。《铁路瓦斯隧道技术规范》明确规定, 高

瓦斯隧道作业机械必须使用防爆型。所谓高瓦斯隧道是指当全工区的瓦斯涌出量大于 $0.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 时为高瓦斯隧道^[3]。

无轨运输由于具有功效高、速度快、工序相对简单、管理较为方便、灵活, 以及对工作路面要求低等优点^[4], 而在我国隧道施工中被广泛应用。然而, 由于人员技术素质以及一些施工习惯, 在我国的瓦斯隧道施工中仍然存在为此不惜增加成本而放弃采用无轨运输的情况^[5]。归根结底是由于无轨运输作业机械的防爆性低且价格较高造成的。从现在情况来看, 我国现有的防爆柴油机还存在一些防爆单元流道结构不合理^[6]以及尾气排放问题^[7], 同时由于防爆作业机械造价较贵, 因此一些煤矿以及高瓦斯隧道施工单位将市面常见的作业机械进行防爆改装后利

修改稿返回日期: 2015-05-27

作者简介: 刘戎(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事矿业工程、隧道工程领域的研究工作, E-mail: cqu_liurong@163.com.

用。现行技术对机械防爆改装主要分为车辆整车防爆改装和车辆局部防爆改装。整车改装主要依据《GB19845-2005爆炸性环境用工业车辆防爆技术通则》和《MT/T989-2006煤矿用防爆柴油机无轨胶轮车通用技术条件》对使用机械进行改装。整车改装^[8,9]主要包括车辆的热表面、机械火花、机械间隙、静电、动力装置、电气安装、电气设备、离合器、制动器、负载装卸装置、液压系统等方面。这种改装方法较为全面地改装了机械设备。局部改装主要是根据《MT990-2006矿用防爆柴油机通用技术条件》及《MT469-1995煤矿井下用防爆柴油机检验规范》，从车辆的动力系统和电气系统方面进行改装，包括：改装进气系统，防止发动机回火；改装排气系统，消除排气火焰和火花；改装电气系统，安装防暴发电机、防爆启动马达等；改装控制系统，安装发动机冷却水水温检测传感器和排气温度检测传感器。

目前已有多座高瓦斯隧道^[10-12]采用上述局部防爆改装方法。但是经过一段时间的运行后发现：改装后的机械工效大幅降低，动力大幅下降；改装后的防暴发电机及防爆启动器使用寿命短，往往每3个月就要全部更换一次；改装后排气管道抗疲劳性能差，时常出现开裂现象；防爆设备工作中整机温度提高。由此导致故障频繁、损害严重。

防爆机械改装的目的是防止作业机械在施工中引起瓦斯爆炸而造成事故。瓦斯爆炸必备的三个条件：一是瓦斯浓度在爆炸界限内，一般为5%~16%；二是混合气体中氧的浓度不低于12%；三是足够能量的火源，温度不低于650℃。在隧道施工中，作业机械产生的电火花、排气火花、机械火花以及机械的高温都足以引起瓦斯的爆炸。现行的防爆改装是避免火花出现并将机械高温部分温度降低到安全值以下，消除引起爆炸的足够能量火源的条件。但是，作业机械在施工生产过程中始终不可避免地存在火花产生，例如作业机械与岩体碰撞产生的火花，制动产热等等。这些都很有可能造成瓦斯爆炸，且通过整体改装与局部改装是无法避免的。因此，对作业机械在生产过程中产生火花的部位逐一检测，逐一排查是不可能的。即使能够逐一排查，防爆改装设备也会因此而变得笨重和昂贵。根据以上现场施工经验及防爆改装存在的缺陷，结合爆炸的三个必要条件，本文设计了一种防爆装置，可以控制作业机械在任何情况下都不会给施工环境提供瓦斯燃烧爆炸的必要条件。

2 智能防爆装置原理及结构

2.1 智能防爆装置原理

对于瓦斯防爆来说，就是要控制爆炸的三个必要条件。而三个必要条件都排除是不必要，也是不可行的，因此本文设计一种智能防爆装置^[3,13-15]，其防爆原理为：确保三个必要条件任意时候不能同时存在。根据《煤矿安全规程》的要求，本防爆装置在瓦斯爆炸浓度最小值的基础上增加了10倍的安全系数。在瓦斯浓度低于0.5%时，认为未达到瓦斯浓度爆炸界限这一必要条件，作业机械可正常使用；当瓦斯浓度高于或等于0.5%时，作业机械被强制停止作业并闭锁，避免由作业机械产生的任何火花，排除爆炸条件中有足够能量的火源这一条件，使得爆炸无法发生。

同时，为使作业机械迅速降温，在作业机械排气系统上安装降温喷淋装置。智能防爆装置自动检测作业机械尾气管温度，当温度过高时对尾气管进行喷淋降温直至温度低于70℃。再者，当作业机械被智能防爆装置控制强制停止作业时强制执行降温喷淋工作。

在系统设计时，设定瓦斯报警浓度为0.3%，此时防爆设备开始声光报警。驾乘人员听到或者看到报警后，应该立刻停止作业，并通知相关人员核查现场实际情况，查明原因后再进行作业。当瓦斯浓度达到0.5%后，防爆设备发出指令给断电装置和熄火装置，断电装置控制作业电路使之断电，熄火装置控制作业机械使之熄火。系统报警浓度与熄火断电浓度均可调节，使之可以适用于煤矿各处以及瓦斯隧道等多种工作区域。

2.2 防爆装置结构

智能防爆装置由低浓度甲烷传感器、车载式防爆控制装置、遥控器、甲烷探头、排气系统温度传感器、水箱水位传感器以及降温喷淋装置组成。装置结构如图1所示。

低浓度甲烷传感器用于检测作业机械附近的瓦斯浓度并显示瓦斯浓度数值，同时兼有声光报警功能。装置所配备的遥控器用于调节低浓度甲烷传感器的满度、调零、报警点、断电点等。同时低浓度甲烷传感器配备了甲烷探头，增加对周边环境甲烷的敏感度。

排气系统温度传感器安装于作业机械尾气管上，检测排气系统温度。水箱用于承载冷却水。水

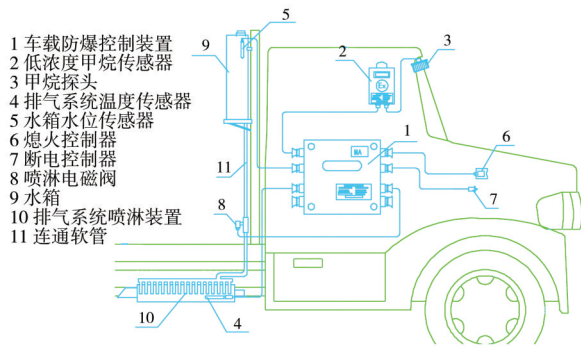
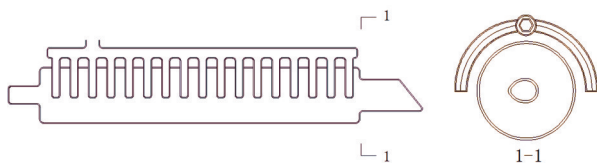


图1 智能防爆装置结构

Fig.1 Structure of the intelligent explosion-proof device

位传感器安装于水箱内,检测水箱水位。降温喷淋装置与水箱连接,安装于排气系统上部,由电磁阀控制。降温喷淋装置呈半圆环爪形,这样设计目的是在增加喷淋面积的同时不会将排气系统遮盖而导致排气系统无法散热。排气管设计如图2所示。



注: 1-1 为排气管的截面图,伸出的喷嘴其喷嘴向中间和两边喷射冷却水,以保证排气管所有部位全部能够被冷却。

图2 排气管喷淋设计

Fig.2 Design of the sprinkler system for the air exhaust pipe

车载式防爆控制装置能够连续地自动接收低浓度甲烷传感器所传输的甲烷浓度信号,当环境甲烷浓度超过预设的断电浓度时,发出断电和熄火信号,使得作业机械被强迫停止运行。这里的预设值是0.5%,即当瓦斯浓度达到0.5%时作业机械即会停止工作。同时连续接收排气系统温度信号,当温度超过设定值时控制喷淋电磁阀打开并对排气系统进行喷淋降温。以上装置全部是隔爆兼本质安全型。

本套防爆设备的断电控制器连接作业机械电路,直接控制作业机械电路的联通与否,在甲烷浓度超过预设值时直接断开作业机械电路。根据作业机械的不同熄火方式,熄火装置直接安装在作业机械的熄火控制器上,当甲烷浓度超过预设值时控制作业机械熄火并闭锁。

2.3 甲烷浓度超限闭锁

甲烷浓度超限闭锁是指,当防爆装置检测到空气中瓦斯浓度达到0.5%并控制作业机械熄火后,在空气中瓦斯浓度低于0.3%之前作业机械闭锁无法启动。此闭锁功能可有效地避免作业机械熄火后,司机为逃出隧道而重新启动作业机械的错误行为。隧道中甲烷浓度超过0.5%,防爆设备控制作业机械熄火后,此时作业机械处在一个随时可能爆炸的环境当中,如果立刻重新启动作业机械很有可能点爆空气当中的甲烷气体,因此驾乘人员应当立刻离开作业机械,跑步逃出隧道。与此同时隧道的所有工作应该立即停止,人员撤离,加强通风,待相关人员确定现场情况后再进行下一步工作。

3 系统可靠性

隧道作业机械是由人和机器共同组成,因此系统的安全性是由人与机器共同决定。隧道施工管理者为追求最大经济效益、赶超工程进度而忽视安全的情况时而有之。这些因素都会增加人为操作失误的概率。为了降低人为误操作的概率,本方案中设计有三个闭锁系统。三个闭锁系统均是微机防误闭锁,这些闭锁系统增加了系统的安全性与可靠性,同时也有效地阻止了人为“故意”破坏防爆设备的事件发生以及防止设备失效却无人知晓的事件发生。

3.1 设备故障闭锁

设备故障闭锁是指当智能防爆装置中任何一部分或者是连接的线缆发生损坏时,装置闭锁车辆无法启动。此闭锁功能防止防爆设备在失效状态下进入隧道施工,避免在瓦斯浓度达到爆炸浓度时,由于防爆设备失效而无法作用于作业机械,从而导致事故发生的情况。此闭锁功能也能有效地防止人为对防爆设备的故意损坏,保证防爆设备的有效性和实用性,使作业机械时刻处在防爆设备的监控下。

3.2 水位异常闭锁

水位异常闭锁是指,当水箱水位低于设定值时,作业机械闭锁无法启动。降温喷淋对于排气系统是否可以迅速降温起到了决定性作用,如果在作业机械停止工作后,排气系统不能及时地降低温度,很有可能成为点爆甲烷的高温源。因此水箱是否有水以及水量是否足够就显得极为重要。水位传感器检测水箱水量并将信号传递到车载式防爆控制装置,水量不足时,闭锁作业机械,使之不能启动。这样可以有效地避免作业机械在水箱水量不足无法及时冷却

排气系统的情况下进入施工隧道。该闭锁功能使水箱冷却功能能够真正起到作用,而不会成为一个摆设。

3.3 排气系统温度超限闭锁

排气系统温度超限闭锁是指,当排气系统温度高于设定值时,作业机械闭锁,并且无法人为启动。柴油车工作中尾气排放可能会达到 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ ^[16],为防止瓦斯隐患,在瓦斯工区洞内施工的机械应注意防止热源^[17]。当降温喷淋无法及时将排气系统温度降低到设定值时,排气系统的高温将会成为安全隐患,因此,及时降低排气系统温度尤为重要。在降温喷淋无法及时将排气系统温度降低到设定值时,排

气系统温度超限闭锁将作业机械进行闭锁,断绝作业机械热源,直至排气系统温度降低至设定值以下,作业机械解锁,这时方可重新启动作业机械继续工作。

车载式防爆控制装置采用可靠性高、抗干扰能力强的PLC,低浓度甲烷传感器采用不受背景气影响的“非散射红外”技术。这些都增加了整个系统的可靠性与稳定性。在以上基础上增加上述三个闭锁系统,一方面提高了可靠性和稳定性,另一方面使得防爆装置拥有自诊断系统增加安全性。防爆装置闭锁工作原理如图3所示。

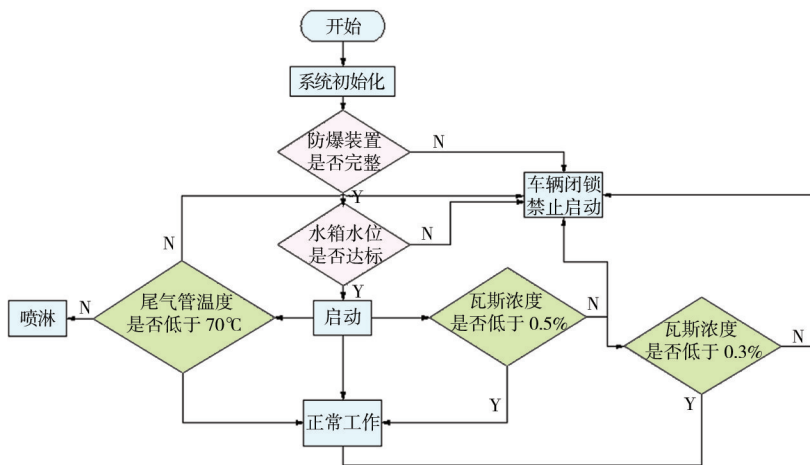


图3 防爆装置闭锁工作示意

Fig.3 Shutting principle of the explosion-proof device

4 工程应用

智能防爆装置的研制要求其在满足《铁路瓦斯隧道技术规范》及相关规范的要求下实现性能与经济上的最优化。因此,应用于工程现场才能最大地体现其价值与功效,也最能检验其各方面性能。到目前为止,智能防爆装置已在都汶公路龙溪山连接道隧道、成简快速道龙泉驿隧道、渝广高速公路华蓥山隧道、321国道玉蟾山隧道等高瓦斯隧道的施工中得到成功应用。以渝广高速华蓥山高瓦斯隧道为例,共安装25台,安装完成以来所有设备未发生任何故障。经过上述几座隧道的使用与检验,发现其具有安装速度较快、使用方法简便、不会对作业机械产生负作用、拆卸简便等优点,同时也没有出现局部改装后车辆动力损失等现象。作业机械结束工程后也可自行将其拆除,不会对作业机械产生任何不良

影响。

5 改装费用及成本

在文献[10]中可以知道南大梁华蓥山隧道作业机械防爆改装的费用在每台15万左右,相比较智能防爆装置的安装费可以节约50%以上。从改装时间上来看,智能防爆装置改装大约只是局部改装方法所用时间的三分之一。加之其在使用过程中凸显的良好性能以及后期维护的简便性,为隧道的安全施工以及按期完工提供了有力的保障。因此有理由认为智能防爆装置在性能与经济两个方面都优于其他两种改装方法。

6 结语

局部改装方法繁琐,同时也给所改车辆造成了一定程度上的破坏。智能防爆装置安装快速、使用

简捷、运行安全。经过使用发现其有效地避免了局部防爆改装所遇到的问题,三个闭锁系统的自检功能设计消除了人机系统的人为误操作以及机器自身损坏导致事故的可能性,在增加稳定性与安全性的

同时也使得其拥有更高的实用价值与现场价值。通过现场的实践证明智能防爆装置完全可以达到防爆的作用。

参考文献

References

- [1] 韩明. 隧道瓦斯灾害危险性评价研究[D]. 长沙:中南大学, 2012.
HAN Ming. Study on Risk Evaluation of Tunnel Gas Disaster[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [2] 赵钰. 铁路瓦斯隧道施工控制技术[J]. 现代隧道技术, 2014, 51 (2): 167-171.
ZHAO Yu. A Study of the Technology for Railway Gas Tunnel Construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51 (2): 167-171.
- [3] 中华人民共和国行业标准. 铁路瓦斯隧道技术规范:TB10120-2002, J160-2002 [S]. 北京:中国铁道出版社, 2002.
Industrial Standard of the People's Republic of China. Technical Code for Railway Tunnel with Gas: TB10120-2002, J160-2002 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.
- [4] 雷升祥. 对单线长隧道无轨运输施工的再思考[J]. 世界隧道, 1998, (2): 61-63.
LEI Shengxiang. Review on the Construction of Long Single-Track Tunnel with Tyre Transportation[J]. World Tunnelling, 1998, (2): 61-63.
- [5] 余红军, 王维高, 万德才. 高瓦斯隧道施工安全风险控制措施[J]. 现代隧道技术, 2013, 50 (4): 56-62.
YU Hongjun, WANG Weigao, WAN Decai. Countermeasures Against Construction Risks in Gas-Rich Tunnels[J]. Modern Tunneling Technology, 2013, 50 (4): 56-62.
- [6] 魏勇刚, 孟国营. 柴油机进气防爆单元的计算流体动力学分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34 (10): 1420-1423.
WEI Yonggang, MENG Guoying. CFD Simulation of the Flameproof Unit in the Diesel Engine's Inlet System[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34 (10): 1420-1423.
- [7] 王桂梅, 刘殿辉, 宋德玉, 张平格, 杨富贵. 矿用防爆柴油机炭烟排放预测模型[J]. 煤炭学报, 2001, 26 (2): 182-185.
WANG Guimei, LIU Dianhui, SONG Deyu, ZHANG Pingge, YANG Fugui. Prediction Model for Exhaust Soot of Mine Explosion-proof Diesel Engine[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26 (2): 182-185.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 爆炸性环境用工业车辆防爆技术通则:GB19845-2005 [S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2005.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC. General Rules of Explosion-proof Techniques of Industrial Trucks for Explosive Atmospheres: GB19845-2005 [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, 2005.
- [9] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 矿用防爆柴油机无轨胶轮车通用技术条件:MT/T989-2006 [S]. 北京:煤炭工业出版社, 2006.
National Development and Reform Commission. The General Technical Condition of the Flameproof Diesel Vehicle with the Rubber Wheels for the Mine: MT/T989-2006 [S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2006.
- [10] 王学武, 刘静, 王小敏. 南大梁高速公路华莹山高瓦斯隧道施工机械车辆防爆改装技术应用研究[J]. 现代隧道技术, 2013, 50 (4): 197-202.
WANG Xuewu, LIU Jing, WANG Xiaomin. On the Application of Explosion-Proof Modification Technology for Construction Machinery and Vehicles for the Gas-Rich Huayingshan Tunnel on the Nanchong-Dazhu-Liangping Expressway[J]. Modern Tunneling Technology, 2013, 50 (4): 197-202.
- [11] 杜文, 伍军, 王勇. 双线铁路瓦斯长隧道快速施工设备配套及防爆改装探索[J]. 现代隧道技术, 2011, 48 (2): 164-177.
DU Wen, WU Jun, WANG Yong. Outfit and Explosion-proof Remold of Construction Equipment for a Double-track Railway Tunnel with Gases[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48 (2): 164-177.
- [12] 谢衍光, 许志忠, 张博. 都汶公路高瓦斯隧道作业机械配置及防爆改装技术[J]. 现代隧道技术, 2009, 46 (4): 76-81.

- XIE Xianguang, XU Zhizhong, ZHANG Bo. Equipment Allocation and Anti-blasting Modification in Gas Tunnels on Du-Wen Expressway[J]. Modern Tunnelling Technology, 2009, 46 (4): 76-81.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 爆炸性环境第一部分:设备通用要求:GB3836.1-2010 [S]. 北京:国家质量监督检验检疫总局, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC. Explosive Atmospheres Part 1: Equipment-General Requirements: GB3836.1-2010 [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, 2011.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 爆炸性环境第二部分:由隔爆外壳“d”保护的的设备:GB3836.2-2010 [S]. 北京:国家质量监督检验检疫总局, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC. Explosive Atmospheres Part 2: Equipment Protection by Flameproof Enclosures ‘d’: GB3836.2-2010 [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, 2011.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 爆炸性环境第四部分:爆炸性环境 第4部分:由本质安全“i”保护的的设备:GB3836.4-2010 [S]. 北京:国家质量监督检验检疫总局, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC. Explosive Atmospheres Part 4: Equipment Protection by Intrinsic Safety ‘i’: GB3836.4-2010 [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, 2011.
- [16] 孙长海. 工程机械防爆技术的研究及其方案设计[D]. 南京:南京航空航天大学, 2009.
- SUN Changhai. Research on Anti-Explosion Technology and Scheme Designing Based on Wheel Loader[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [17] 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院. 公路瓦斯隧道设计与施工技术指南[M]. 北京:人民交通出版社, 2011.
- Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute. Design and Construction Technology Manual for Highway Gas Tunnel[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.

Implementation and Application of Explosion Proofing and the Self-Diagnosis Function for Construction Machinery in Gas-Rich Tunnels

LIU Rong¹ YANG Chunhe^{1,2} JIANG Deyi¹ GU Yilei¹

(1 State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044; 2 Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

Abstract Based on the anti-explosion standards and technical criterion for diesel vehicles, an intelligent explosion-proof device for construction machinery used in gas-rich tunnels was designed to address the problems with modification of construction machinery. The device forces the vehicle to flameout, turn off and lock when the tunnel gas concentration is at or above the allowed maximum concentration. To prevent gas explosions, the device begins to spray when the temperature of the exhaust system is at or above the allowed maximum temperature. Three shutting systems for equipment failure, abnormal water level and exceeding the maximum temperature were designed for the air exhaust system to improve device reliability. Practice indicates that the intelligent explosion-proof device is characterized by rapid installation, easy use and safe operation.

Keywords Gas-rich tunnel; Explosion-proof device; Self-diagnosis and shutting