

文章编号:1671-251X(2019)09-0013-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018120017

煤矿救灾机器人防爆技术研究

郑学召^{1,2}, 闫兴¹, 郭军^{1,2}, 张铎^{1,2}

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 国家矿山救援西安研究中心, 陕西 西安 710054)



扫码移动阅读

摘要:介绍了煤矿救灾机器人防爆技术的概况,阐述了煤矿救灾机器人防爆技术的国内外研究现状及应用情况,指出煤矿救灾机器人防爆技术已取得一定进展,尤其在防爆电动机、防爆外壳及动力电源等方面,但防爆材料应用技术、能源动力技术、本安控制技术、故障诊断与容错控制技术等仍存在问题,需要在加工材料轻量化、动力电源高效化、防爆技术本安化、控制系统智能化等方面不断完善,从而确保煤矿救灾机器人各个构件的防爆技术更加成熟。

关键词:煤矿救灾机器人; 防爆技术; 防爆电动机; 防爆外壳; 动力电源; 本安化

中图分类号:TD77

文献标志码:A

Research on explosion-proof technology for coal mine rescue robot

ZHENG Xuezhao^{1,2}, YAN Xing¹, GUO Jun^{1,2}, ZHANG Duo^{1,2}

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology,

Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Research Center of National Mine Rescue, Xi'an 710054, China)

Abstract: The paper introduced general situation of explosion-proof technology of coal mine rescue robot, and summarized the research status and application of explosion-proof technology of coal mine rescue robot at home and abroad, and pointed out some progress of explosion-proof technology for coal mine rescue robot, especially in explosion-proof motor, explosion-proof shell and power supply. However, there are still problems in explosion-proof material application technology, energy power technology, intrinsic safety control technology, fault diagnosis and fault-tolerant control technology, it needs to be constantly improved in the aspects of processing materials lightweight, power supply efficiency, intrinsic safety of explosion protection technology, intelligent control system, so as to ensure the explosion-proof technology of each component of coal mine rescue robot is more mature.

Key words: coal mine rescue robot; explosion-proof technology; explosion-proof motor; explosion-proof shell; power supply; intrinsic safety

0 引言

2016年,我国已查明的煤炭资源总量为1.3万亿t,预测总量为5.57万亿t,其中53%埋藏在1000m以下,绿色煤炭资源不到5000亿t^[1]。中国工程院《能源发展战略2030~2050》中预测,2050年煤炭占一次能源比重控制在50%以下,但仍

需25亿t~30亿t,煤炭将长期是我国主导能源。我国煤炭资源赋存条件的特殊性决定了煤炭以井工结合机械进行开采^[2]。由于井下环境复杂、监督管理不到位等原因,粉尘爆炸、瓦斯爆炸等煤矿灾害事故时有发生。灾后井下环境具有不确定性,易发生继发性事故,如果投入大量的人力物力到井下实施救援工作,易发生再次伤亡事故。因此,使用机器人

收稿日期:2018-12-10;修回日期:2019-04-05;责任编辑:张强。

基金项目:国家重点研发计划重点专项项目(2018YFC0808201);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JM5009,2018JQ5080)。

作者简介:郑学召(1977—),男,新疆焉耆人,副教授,博士,主要从事矿山安全与应急救援方面的教学与科研工作,E-mail:zhengxuezhao@xust.edu.cn。

引用格式:郑学召,闫兴,郭军,等.煤矿救灾机器人防爆技术研究[J].工矿自动化,2019,45(9):13-17.

ZHENG Xuezhao, YAN Xing, GUO Jun, et al. Research on explosion-proof technology for coal mine rescue robot[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(9): 13-17.

在井下复杂灾害环境中搜救幸存者,是机器人学中一个新兴且富有挑战性的领域^[3-4]。

目前,国内外关于煤矿救灾机器人在矿难救灾中的应用及井下救灾试验的案例不少,如 2006 年美国西弗吉尼亚某煤矿矿难中使用的 V2 机器人^[5](图 1)配备了导航和监控摄像机、照明设备、大气探测器,具备夜视能力和双向语言通信能力,为救援人员提供了包含视频在内的实时信息及可燃和有毒气体浓度信息。2010 年新西兰某矿矿难中使用的西澳水务机器人^[6]配备了摄像头、灯光及气体检测设备,可以在大型巷道内作业。2016 年俄罗斯某煤矿矿难中使用的“领导者”机器人^[7]配备了摄像头、气体传感器和其他计量设备,可以在偏远、黑暗、烟雾和灰尘的环境下工作。2016 年在我国山西某煤矿进行井下救援试验的 CUMT-V 型煤矿救灾机器人^[8](图 2)配备了摄像头、视音频传输装置、危险气体探测器和物品搭载平台,集环境探测、给养运输、灭火、救运伤员于一体。但在上述应用案例中,由于机器人体积庞大、笨重、遇水易短路等原因导致应用效果并不理想。与之相反,在火灾及地震救援中,消防、地震救灾机器人的成功案例较多,造成这些差异的主要原因是煤矿井下灾后环境特殊,存在瓦斯等易燃、易爆气体,一旦这些气体的含量超限,易发生爆炸事故并可能造成更大的损失。鉴于此,开展煤矿救灾机器人防爆技术研究势在必行。本文总结了煤矿救灾机器人防爆电动机、防爆外壳、动力电源的

发展现状,针对目前煤矿救灾机器人防爆技术存在的难题,提出了解决方案,以期为煤矿救灾机器人防爆技术的研究工作提供参考。

1 防爆技术概述

防爆是指通过一系列的技术手段使电气设备不引起易燃、易爆物质发生爆炸。爆炸产生的 3 个必要条件:一定浓度的爆炸性可燃物、一定的引燃能量、充足的助燃物。只要限制爆炸产生的 3 个必要条件之一,就可以限制爆炸事故的发生。

井下防爆电气设备可采用多种防爆技术,其中,本质安全型防爆技术是最安全的防爆技术,就是将设备内部和暴露于潜在爆炸性环境的连接导线可能产生的电火花或热效应能量限制在不能产生点燃的水平。其他如充油型、浇封型、正压型等防爆技术,都是限制电气设备周围爆炸气体浓度和氧气浓度,以防止爆炸的发生。还有一种防爆技术是隔爆型技术,要求隔爆外壳不会因为进入其内部的气体发生爆炸而损坏,并且不会引起壳体外部的气体或蒸气爆炸。在上述防爆技术中,隔爆型和本质安全型应用最为广泛。爆炸性环境用电气设备防爆类型见表 1,其中,在 0 区工作的电气设备防爆类型是本质安全型(ia 级)和特殊型,这种电气设备最安全,同时也是煤矿井下最需要的。

表 1 爆炸性环境用电气设备防爆类型
Table 1 Explosion-proof type of electrical equipment for explosive environment

危险区域	电气设备防爆类型	标志
0 区	1. 本安型,ia 级	ia
	2. 为 0 区设计的特殊型	s
1 区	1. 适合于 0 区的防爆类型	
	2. 隔爆型	d
	3. 增安型	e
	4. 本安型	i
	5. 浇封型	m
	6. 充油型	o
	7. 正压型	p
	8. 充砂型	q
	9. 气密型	h
	10. 为 1 区设计的特殊型	s
2 区	1. 适合于 0 区或 1 区的防爆类型	
	2. 无火花型	n

2 煤矿救灾机器人防爆技术研究现状

多年来,国内外学者围绕煤矿救灾机器人各个构件的防爆技术进行了深入研究,尤其在防爆电动机、防爆外壳、动力电源等方面取得了许多成果。



图 1 V2 机器人
Fig. 1 V2 robot



图 2 CUMT-V 型煤矿救灾机器人
Fig. 2 CUMT-V coal mine rescue robot

2.1 防爆电动机

在防爆电动机的结构设计方面,国内外许多学者做出了贡献。有关防爆电动机的最早文献是 D. M. Berges 在 1950 年申请的发明专利^[9]。郭长亮^[10]首次设计出了防爆型直线超声电动机,结合超声电动机特殊的工作原理,设计了直线电动机和驱动电源的防爆外壳,在电动机及电源外壳上进行了防爆实验,最终取得防爆合格证书。何惠明^[11]对一体式电动机设计中存在的问题及关键技术进行了深入研究,研制了国内首台矿用隔爆变频一体式电动机,为开发新型矿用隔爆电动机提供了设计依据及理论基础。李建成等^[12]基于流体力学及电动机传热学理论,设计了矿用防爆电动机的水冷结构,可有效平衡电动机发热量,保证电动机安全运行。

在防爆电动机的工艺改进及故障诊断方面,邹建元等^[13]对隔爆电动机的制造工艺进行了研究,提出在防爆电动机制造过程中对隔爆面进行加工、工序传递、储存时,必须保护隔爆面不受损伤,并验证了防爆电动机在恶劣的环境中能安全运行。王岳元等^[14]优化了防爆电动机壳体的铸件工艺,在采用原来 HT250 牌号铸件材料的基础上,进一步提高了铸件本体试样的抗拉强度,并一次性通过了电动机壳体的静压试验,使其满足国家防爆电动机的防爆等级新标准。李伟鑫^[15]通过对音频识别技术研究及改进,研制出了基于音频识别的防爆电动机故障监测系统,并取得了不错的识别性能。王波等^[16]分析了防爆电动机抱轴故障产生的原因和规律,从电动机结构、配件形变、转子质量、轴承游隙、轴承装配和轴承润滑等方面对防爆电动机的抱轴故障进行了分析并提出了相应的对策。

防爆电动机在结构设计、工艺改进及故障诊断等方面取得了很大进展,采用的防爆技术主要是隔爆型、隔爆兼本质安全型,电动机的安全性能得到了极大提高。目前煤矿救灾机器人由于质量大等问题,需要较大的动力,使得其电动机无法完全采用本质安全技术进行防爆设计;并且防爆电动机的故障诊断技术仍存在难题,所以,采用现有防爆电动机的煤矿救灾机器人还不能在 0 级危险区域正常工作。

2.2 防爆外壳

在煤矿救灾机器人防爆外壳设计方面,王长龙等^[17]将静态正压技术引入机器人防爆外壳设计领域,很好地解决了防爆要求和机器人性能之间的矛盾,为煤矿救灾机器人防爆外壳的设计提供了新的思路。李允旺等^[18]在分析国内外煤矿救灾机器人防爆外壳设计现状的基础上,探讨了防爆外壳的设计与加工,对用于煤矿井下灾后环境探测与救援工

作的煤矿机器人进行了防爆设计。巩利萍等^[19]将弹塑性力学理论运用到矿用机器人外壳的初始化设计中,根据分析结果改进结构,再次计算实体应力以检测改进的煤矿机器人外壳结构能否达到强度和刚度要求。安郁熙等^[20]在遵循国家标准且满足防爆外壳安全可靠性的条件下,通过有限元分析,对不同结构的钢材进行了比较,提出了防爆外壳轻薄化的设计理念。韩一鹏^[21]对矿用防爆外壳开孔补强焊接设计方法进行了分析研究,对比说明了整体锻件补强、焊板补强、加固圈补强的结构特点及补强效果,为防爆外壳开孔补强工作提供了参考。

从目前防爆外壳的发展现状来看,防爆外壳的材料主要是钢铁,质量非常大,防爆外壳质量一般占煤矿救灾机器人总质量的 60% 以上,这是机器人总质量大的主要原因之一,使用轻型防爆材料制造防爆外壳,可以减小机器人质量。

2.3 动力电源

1994 年,马紫峰等^[22]在总结电动汽车研究状况的基础上,认为电动汽车动力电源的能量难以满足动力需求,很难向市场推广。于是他们提出推广电动车的关键是研究和开发高性能、低成本的动力电源。进入 21 世纪后,动力电源技术得到了迅速的发展和应用。赵峰^[23]针对普通动力电池难以满足煤矿救灾机器人所需大电流放电的情况,设计了动力电池和超级电容混合的动力电源,弥补了电池单独供电时电流输出有限的缺点,并增强了机器人的越障性能。鲁怀敏等^[24]对比了磷酸铁锂电池、超级电容以及磷酸铁锂电池并联超级电容的混合电源的性能,认为磷酸铁锂电池更适合作为煤矿救灾机器人的动力电源。

基于以上分析可看出,煤矿救灾机器人动力要求在不断变化,伴随对大功率电池实用性、安全性的深入研究,低压大容量电池在煤矿救灾机器人中的应用将成为一种趋势。

3 煤矿救灾机器人防爆技术难题及解决方案

3.1 技术难题

从以上煤矿救灾机器人防爆技术的研究现状可看出,煤矿救灾机器人的防爆技术取得了很大进展,但仍然存在诸多技术难题,主要表现如下:

(1) 防爆材料应用技术难题。目前煤矿救灾机器人的防爆性能是通过防爆外壳实现的,防爆外壳主要由钢铁制成,质量非常大。更大的机器人本体质量需要使用更大的驱动电动机、驱动电路、更重的电池。如此沉重的机器人在井下作业,一旦出现故障,就很难再出矿井。

(2) 能源动力技术难题。在使用有线供电的情况下,低功率煤矿救灾机器人的尺寸可大可小,但是采用有线供电存在导线压降,谐波对地下电网设备控制有一定的干扰性,从而限制了机器人的作业距离。采用电池供电可以摆脱有线供电,经济方便,但是电池的性能限制了机器人在井下的作业时间。功率较大的煤矿救灾机器人需要高品质的动力电池来增强其可靠性。

(3) 本安技术难题。目前煤矿救灾机器人防爆技术以隔爆兼本质安全型技术应用最广,没有实现完全意义上的本质安全,在救灾过程中仍然存在安全隐患。采用本质安全型技术的设备功率较小,通常小于 18 W,运用在目前的煤矿救灾机器人上满足不了动力需求。

(4) 故障诊断与容错控制技术难题。目前,故障诊断与容错技术已经取得一系列的研究成果,特别是在航空航天系统、核电站系统有许多成功应用,但在煤矿救灾机器人防爆技术方面的研究成果却非常有限^[25],鲜有见到有关理论的报道及实际产品。

3.2 解决方案

(1) 加工材料轻便化。采用轻质防爆材料,如碳纤维、玻璃钢、导电塑料^[26]等,这些材料必须符合 GB 3836.1—2010《爆炸性环境 第 1 部分:设备通用要求》对于表面静电方面的规定^[27];壳体可采用坚固、紧凑、质量轻的一体化结构,利于机器人的轻量化。

(2) 动力电源高效化。目前,煤矿救灾机器人的电源主要是锂电池,但由于物理和化学性质的限制,使得机器人体积与质量较大。另外,锂电池的充电速度有限,不利于快速循环利用。具有体积小、容量大、充电快等特性的新型动力源,如纳米电池^[28]、石墨烯电池^[29]等的发展,将直接影响煤矿救灾机器人未来的设计方向。

(3) 防爆技术本安化。根据本质安全型防爆技术的特点,设计出功率较小的煤矿救灾机器人,例如小型的蜘蛛型、蛇形、土拨鼠型、昆虫型等功率较小的仿生机器人。一方面,这些机器人体积小、运动速度快、地形适应能力强;另一方面,机器人功率小,可以用本质安全型防爆技术对其进行设计,可避免在救援工作中产生电火花或热效应,降低救援的安全隐患。

(4) 控制系统智能化。煤矿救灾机器人在井下实施救援任务,在平缓、上坡及下坡地段,可根据动力需求自主调整电动机功率输出,使电源能量高效利用。机器人行进中一旦受到外界强压力,造成电动机、动力电源、电路等出现故障,出现失爆状况时,

机器人能够自动切断电源供给。

4 结论

(1) 煤矿救灾机器人防爆技术已取得一定进展,尤其表现在防爆电动机、防爆外壳及动力电源等方面。但防爆材料应用技术、能源动力技术、本安技术、故障诊断与容错控制技术等仍需不断完善。

(2) 随着加工材料向轻便化、动力电源向高效化、防爆技术向本安化、控制系统向智能化的发展,煤矿救灾机器人各个构件的防爆技术将会更加成熟,为早日实现煤矿救灾机器人代替人工下井成功救援奠定基础。

参考文献(References):

- [1] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 2017,42(1):1-7.
YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2017,42(1):1-7.
- [2] 由韶泽,朱华,赵勇,等. 煤矿救灾机器人研究现状及发展方向[J]. 工矿自动化,2017,43(4):14-18.
YOU Shaoze, ZHU Hua, ZHAO Yong, et al. Research status of coal mine rescue robot and its development direction [J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(4):14-18.
- [3] 钱善华,葛世荣,王永胜,等. 救灾机器人的研究现状与煤矿救灾的应用[J]. 机器人,2006,28(3):350-354.
QIAN Shanhua, GE Shirong, WANG Yongsheng, et al. Research status of the disaster rescue robot and its applications to the mine rescue[J]. Robot, 2006, 28(3):350-354.
- [4] 刘晨. 灾难现场中人体检测[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
- [5] 朱斌,雷利伟,贾瑞清. 煤矿探测救援机器人研究现状及其应用[J]. 机电产品开发与创新,2013,26(6):14-16.
ZHU Bin, LEI Liwei, JIA Ruiqing. Application and current research status of coal mine detection & rescue robot [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2013, 26(6):14-16.
- [6] BOOKER J. Robot broken in Pike River Mine[EB/OL]. (2010-11-23) [2018-02-10]. http://www.nzherald.co.nz/nz/news/article.cfm?c_id=1&objectid=10689488.
- [7] 王勇,李允旺,田鹏,等. 煤矿救灾机器人发展历程分析及展望[J]. 矿山机械,2018,46(5):1-10.
WANG Yong, LI Yunwang, TIAN Peng, et al.

- Analysis and prospect on development course of colliery rescue robots [J]. Mining & Processing Equipment, 2018, 46(5):1-10.
- [8] 葛世荣,朱华. 危险环境下救援机器人技术发展现状与趋势[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5):1-8.
- GE Shirong, ZHU Hua. Technical development status and tendency of rescue robot in dangerous environment[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5):1-8.
- [9] 毛杨明. 煤矿井下探测机器人防爆电机与动力电源研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2015.
- [10] 郭长亮. 防爆型直线超声电机的研究[D]. 郑州:郑州大学, 2012.
- [11] 何惠明. 隔爆变频一体式电机关键技术研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2012.
- [12] 李建成,王富春. 矿用隔爆型电机的水冷结构设计与温升计算[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(11):89-94.
- LI Jiancheng, WANG Fuchun. Design of water-cooled structure and calculation of temperature rise of mine explosion-proof motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(11):89-94.
- [13] 邹建元,谢华丽. 隔爆电机的制造工艺研究[J]. 技术与市场, 2013, 20(6):59-60.
- ZOU Jianyuan, XIE Huali. Study on manufacturing process of explosion-proof motor [J]. Technology and Market, 2013, 20(6):59-60.
- [14] 王岳元,钱佳征. 防爆电机壳体铸件浇铸工艺优化[J]. 上海大中型电机, 2013(4):12-13.
- WANG Yueyuan, QIAN Jiazheng. Optimization of casting process for explosion-proof motor shell casting[J]. Shanghai Medium and Large Electrical Machines, 2013(4):12-13.
- [15] 李伟鑫. 基于音频识别的防爆电机故障监测研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2015.
- [16] 王波,关鹤. 隔爆型电机抱轴故障原因分析及对策[J]. 电气防爆, 2016(1):33-36.
- WANG Bo, GUAN He. Reason analysis and measurement of shaft holding in explosion proof motor[J]. Electric Explosion Protection, 2016(1):33-36.
- [17] 王长龙,李学威,徐方,等. 静态正压防爆技术在矿井搜救机器人中的应用[J]. 煤炭工程, 2009, 41(11):96-98.
- WANG Changlong, LI Xuwei, XU Fang, et al. Application of static positive pressure explosion protection technology in mine search and rescue robot [J]. Coal Engineering, 2009, 41(11):96-98.
- [18] 李允旺,葛世荣,朱华,等. 煤矿救灾机器人隔爆壳体的设计与加工[J]. 煤矿机械, 2009, 30(2):104-106.
- LI Yunwang, GE Shirong, ZHU Hua, et al. Design and manufacture of flameproof enclosure of coal mine rescue robot[J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(2):104-106.
- [19] 巩利萍,宋志安,刘泽勇. 矿用隔爆型圆筒外壳的设计方法[J]. 煤矿机械, 2009, 30(1):30-33.
- GONG Liping, SONG Zhi'an, LIU Zeyong. Design method on mine cylinder explosion-resistant enclosure [J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(1):30-33.
- [20] 安郁熙,王程程,崔焕鹏. 矿用隔爆型电气设备防爆壳体的轻薄化设计[J]. 煤矿机电, 2016(1):38-40.
- AN Yuxi, WANG Chengcheng, CUI Huanpeng. Design of thinner and lighter explosion proof housing for coal mine flameproof electrical equipment [J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2016(1):38-40.
- [21] 韩一鹏. 矿用隔爆壳体开孔补强设计强度研究[J]. 电气防爆, 2017(1):9-12.
- HAN Yipeng. A brief analysis on study of enhanced design in flameproof enclosure openings [J]. Electric Explosion Protection, 2017(1):9-12.
- [22] 马紫峰,林维明. 电动汽车动力电源研究现状与展望[J]. 电源技术, 1994(3):39-42.
- MA Zifeng, LIN Weiming. Present and future of electric vehicle power sources [J]. Chinese Journal of Power Sources, 1994(3):39-42.
- [23] 赵峰. 煤矿环境探测机器人混合动力电源研究[J]. 煤矿机械, 2011, 32(12):60-62.
- ZHAO Feng. Research on mixed power source of mine detect robot [J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(12):60-62.
- [24] 鲁怀敏,方海峰,蔡李花,等. 煤矿救灾机器人动力电源研究[J]. 工矿自动化, 2013, 39(7):38-42.
- LU Huaimin, FANG Haifeng, CAI Lihua, et al. Research of power supply of coal mine rescue robot [J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39(7):38-42.
- [25] 朱大奇,胡震. 水下机器人故障诊断与容错控制技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2012:24-32.
- [26] 刘艳丽,井元良,石海平,等. 导电塑料在航天领域的应用展望[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(6):676-681.
- LIU Yanli, JING Yuanliang, SHI Haiping, et al. Applications of conductive plastic in aerospace field [J]. Spacecraft Environmental Engineering, 2014, 31(6):676-681.
- [27] GB 3836.1—2010 爆炸性环境 第1部分:设备通用要求[S].
- [28] 王志杰. 二维分级纳米碳材料的制备及其在锂电池中的应用[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2017.
- [29] 轩中. "快速充电"石墨烯电池横空出世[J]. 互联网周刊, 2018(22):16-17.
- XUAN Zhong. "Fast charging" graphene battery turned out [J]. China Internet Week, 2018(22):16-17.