

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2020.05.009

防核辐射挖掘机视窗的结构设计

刘永霞, 邹树梁*, 符纯明

(南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要:研制防核辐射挖掘机时,其铅玻璃视窗的结构设计是要解决的一个关键问题。通过开展铅玻璃 ZF506 和 ZF6 的 γ 射线辐照和阳光照射的实验,最终确定制作防辐射挖掘机的视窗要用铅玻璃 ZF6。通过查阅文献和实验研究,确定在铅玻璃视窗的外侧增加 6 mm 厚的 K509 玻璃。ZF6 铅玻璃的机械性能实验研究结果说明铅玻璃视窗的安装需要增加减震装置,通过在防核辐射挖掘机上开展实验,验证了铅玻璃视窗结构的可靠性。

关键词:铅玻璃;核辐射;结构设计;挖掘机

中图分类号:TL7 **文献标志码:**A

文章编号:1673-0062(2020)05-0058-04

Structure-design of Anti-radiation Excavator's Window

LIU Yongxia, ZOU Shuliang*, FU Chunming

(School of Mechanical Engineering, University of South China, Hunan, Hengyang 421001, China)

Abstract: For developing the anti-radiation excavator, a key problem is the structure-design of lead glass window on the excavator. Lead glass ZF6 was finally decided to be used for the window of anti-radiation excavator, by making the radiation and sun exposure experiment with lead glass ZF6 and ZF506. After referring books and making experiment research, lead glass K509 5mm thick was added on the outer edge of lead glass window. The mechanical properties experiment result of lead glass ZF6 shows that it is necessary to add the damping device when installing lead glass window. Carrying out experiment on anti-radiation excavator can verify the reliability of lead glass window structure.

key words: lead glass; nuclear radiation; structure-design; excavator

收稿日期:2020-03-30

基金项目:湖南省科技厅重点研发项目(2015GK3030)

作者简介:刘永霞(1978-),女,副教授,博士,主要从事核辐射环境作业装备智能优化设计方法方面的研究。E-mail:281049378@qq.com。*通信作者:邹树梁(1956-),男,教授,博士研究生导师,主要从事核辐射环境作业机器人方面的研究。E-mail:zousl2013@126.com

0 引言

世界电力能源的三大支柱是核电、煤电与水电。据国际原子能机构预测,到2030年,全世界1/4的能源将来自于核能发电,但核电反应堆内经长时间累积往往有放射性强度很高的分裂产物。同时在核工业发展过程中,大量铀矿山和核设施将进入退役期。研制具有辐射屏蔽功能的工程机械,已成为核泄漏和核设施退役处理中亟待解决的问题。

国外主要从机器人和核辐射屏蔽工程机械两个方面对核辐射环境装备进行研究。20世纪80年代,美国、日本等国家就开展了维护核设施机器人的研究。2011年3月11日,在福岛核事故中^[1],人们试图采用三一重工的泵车向反应堆注水冷却,但因缺乏辐射屏蔽装置而最终放弃。美国向福岛派出了4款机器人^[2],但由于核事故处理现场情况复杂,很多故障机器人也无法处理。据报道,在2011年3月15日日本只得派出50死士到福岛核电站内执行冷却工作^[3]。通过日本的核泄漏事故发现,现有的机器人不能满足需求。英国和澳大利亚开发研制了放射性防护挖掘机、全地形 γ 射线探测车和放射粒子探测车,这些在核试验场进行了试验,取得了圆满成功^[4]。目前我国在这方面的研究才刚刚起步,为了避免作业人员直接暴露于核辐射环境,研制具有核辐射屏蔽驾驶舱的挖掘机,对提高我国核设施退役和核泄漏安全处理处置能力具有重要的意义^[5-6]。

屏蔽驾驶舱前视窗的结构设计是研制防核辐射挖掘机需要解决的关键问题之一。

1 防核辐射挖掘机视窗玻璃选型实验

经调研可知,我国核工业的屏蔽视窗主要采用ZF6铅玻璃,且在放射性物质存放侧增加一层K509耐辐照玻璃。但电离辐照导致的着色严重威胁着铅玻璃视窗的使用^[7-9]。因受电离辐照,ZF6铅玻璃会生成色心而导致其透光率下降^[10]。色心的产生和玻璃的内部缺陷有关,玻璃网络结构越密实,内部缺陷越少,越有利于阻止色心的产生,其耐辐照性能就越好。受电离辐照着色的铅玻璃,再受太阳光照射其着色会恢复,铅玻璃电离辐照着色和光照恢复也是一个复杂的过程,有必要对其开展研究^[11]。此外,为了提高铅玻璃的耐辐照性,市场上还生产了添加了氧化铈的铅玻璃

ZF506^[12]。在设计防核辐射挖掘机的屏蔽视窗时,究竟选用哪一种铅玻璃,以及是否采用K509耐辐照玻璃,若采用,其厚度应该怎么确定等一系列问题,需要通过开展实验来解决。

1.1 实验样品

ZF6铅玻璃,密度 4.78 g/cm^3 ,铅当量率: 0.42 mm/mm ,尺寸是 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 60\text{ mm}$,2块。ZF506铅玻璃,密度 3.86 g/cm^3 ,铅当量率: 0.43 mm/mm ,尺寸是 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 60\text{ mm}$,2块。K509耐辐照玻璃,密度 2.54 g/cm^3 ,铅当量率: 0.22 mm/mm ,尺寸是 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 60\text{ mm}$,3块。

1.2 实验目的

研究 γ 射线辐照和阳光照射对三种玻璃透光率的影响,为防核辐射挖掘机视窗玻璃的选择提供依据。

1.3 实验仪器

采用上海仪电物理光学仪器有限公司的WGT-S透光率/雾度测定仪进行测量,该测定仪测量光的波长范围是: $300\text{ nm}\sim 900\text{ nm}$ 。

1.4 实验方法

对ZF506和ZF6两种铅玻璃开展 γ 射线辐照和阳光照射对其透光率影响的实验。在湖南省辐照中心做辐照实验,放射源是活度约 $6.9\times 10^8\text{ Bq}$ 的 ^{60}Co ,ZF6和ZF506铅玻璃样品均放置在同一位置上,用重铬酸银试剂测得该放置位置的剂量率为: 54 Gy/h ,其中两块ZF6铅玻璃的放置时间分别为40 h和160 h,累积剂量分别为2 160 Gy和8 640 Gy,其编号分别为1-40hZF6和1-160hZF6。两块ZF506铅玻璃的放置时间也分别为40 h和160 h,累积剂量分别为2 160 Gy和8 640 Gy,其编号分别为2-40hZF506和2-160hZF506。

对增加铅玻璃视窗耐辐照性能的K509玻璃开展 γ 射线辐照对其透光率影响的实验。K509玻璃放置位置的剂量率为: 235 Gy/h ,放置时间分别为10 h、40 h和100 h,累积剂量分别为2 350 Gy、9 400 Gy和23 500 Gy,其编号分别为3-10hK509、3-40hK509、3-100hK509。

辐照实验完成后立即测量其透光率,然后将实验样品放置室外受阳光照射,光照强度值约为 $100\ 000\text{ lx}$,每照射6 h测量一次实验样品的透光率。

2 实验结果分析

开展不同累积剂量铅玻璃辐照着色和光照恢复效果分析。铅玻璃 1-40hZF6 辐照前透光率为 84.2%, 经过 40 h 的辐照后其透光率为 0.0%。经 100 h 的阳光照射后其透光率为 80.5%。铅玻璃 1-160hZF6 辐照前透光率为 84.7%, 经过 160 h 的辐照后其透光率为 0.0%。经 100 h 的阳光照射后其透光率为 80.8%。铅玻璃 2-40hZF506 辐照前透光率为 77.3%, 经过 40 h 的辐照后其透光率为 44.3%。经 100 h 的阳光照射后其透光率为 73.5%。铅玻璃 2-160hZF506 辐照前透光率为 77.2%, 经过 160 h 的辐照后其透光率为 7.5%。经 100 h 阳光照射后其透光率为 68.0%。

根据实验数据, 绘制 4 块铅玻璃样品受阳光照射后其透光率变化的曲线如图 1 所示, 由图 1 可知在相同的剂量率照射下, 铅玻璃辐照时间越长其透光率也就越小。这是因为铅玻璃吸收 γ 射线的累积剂量越大时, 产生的色心浓度就越高。在接受相同累积剂量的辐照后, ZF506 铅玻璃的透光率比 ZF6 铅玻璃的透光率要高, 说明 ZF506 铅玻璃确实比 ZF6 铅玻璃要耐辐照。辐照着色后的铅玻璃受阳光照射后, 4 块样品的透光率都有所恢复。从图 1 可以看出在阳光照射的前期铅玻璃的透光率恢复的速度较快, 在阳光辐照 54 h 时, 1-40hZF6 铅玻璃的透光率恢复到辐照前的 95.9%, 1-160hZF6 铅玻璃的透光率恢复到辐照前的 93.2%。而从阳光照射 54 h 到 100 h 之间, ZF6 铅玻璃的透光率恢复速度较慢。在阳光辐照 54 h 时, 2-40hZF506 铅玻璃的透光率恢复到辐照前的 94.7%, 2-160hZF506 铅玻璃的透光率恢复到辐照前的 86.8%。从以上分析可知, ZF506 铅玻璃比 ZF6 铅玻璃耐辐照, 但 ZF506 铅玻璃因添加了氧化铈其透光率比 ZF6 铅玻璃要低, 且受光照后两种铅玻璃的透光率都有所恢复, 且 ZF6 铅玻璃的恢复情况更好, 所以通过实验的分析结果, 决定采用 ZF6 铅玻璃制作防辐射挖掘机的视窗。

研制的防核辐射挖掘机的驾驶舱是在挖掘机原有驾驶室的外面增加了一个屏蔽层, 铅玻璃安装在外层驾驶室, 屏蔽驾驶舱对驾驶员有一个全方位的保护。因中国男性的平均身高为 1.7 m 左右, 让一位身高为 1.7 m 左右的观察者坐在将用于改装成防核辐射挖掘机的驾驶室内, 首先确定一个初始的铅玻璃的尺寸和安装位置, 把铅玻璃安装位置之外的部分用不透光的纸遮挡, 使挖斗

在最高、最低、最前等工作位置, 根据这个观察者的观察效果, 不断调整视窗的大小和位置。最终确定能够满足挖掘机作业要求的铅玻璃尺寸。

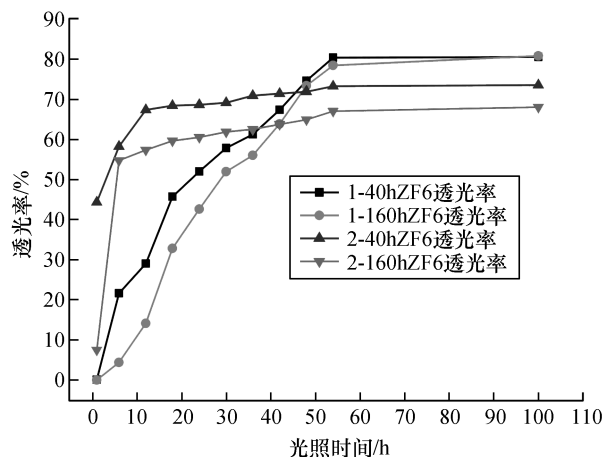


图 1 铅玻璃辐照后阳光照射透光率变化图

Fig. 1 Change of transmittance of sunlight after irradiation of lead glass

挖掘机在作业过程中, 一直处于回转和震动状态, 安装在驾驶舱上的铅玻璃此时受到较大的力和震动, 所以需对驾驶舱玻璃实行减震处理。铅玻璃四周安装有减震橡胶垫, 右侧安装缓冲调节器, 底部安装弹簧减震器。底部弹簧减震器的结构如图 2 所示, 主要由锁紧螺母、调节螺杆、弹簧等零部件组成。

3 屏蔽驾驶舱铅玻璃安装结构可靠性实验验证

铅玻璃视窗结构设计的可靠性还需经过实验的检验, 因为已将以上铅玻璃视窗的设计结构应用到防辐射挖掘机上, 所以可以利用研制出的防核辐射挖掘机做铅玻璃视窗的可靠性实验。选取防辐射挖掘机在颠簸、行走刹车和回转制动三种极限工况进行实验。

1) 在挖掘机作业过程中, 路面颠簸时有发生, 因路面不平整导致屏蔽驾驶舱承受垂直方向的惯性载荷, 外加发动机的振动传递给驾驶舱的加速度, 该工况挖掘机的惯性加速度约为 5 m/s^2 。防辐射挖掘机经过路面颠簸现场实验, 其前视窗铅玻璃完好无损。

2) 挖掘机在行走过程中遇到突发性事故, 需要紧急停车时, 屏蔽驾驶舱受到一个向前的加速度, 此时驾驶舱受到一个较大的惯性力, 经过紧急

停车实验,前视窗铅玻璃并没有被损坏。

3) 挖掘机在回转工况时有两个极限工况:(1) 回转启动和急停时;(2) 挖掘机以最大转速旋转时。挖掘机回转时最大回转速度 11.8 r/min,启动达到最大回转速度 2 s,急停时间 1 s。通过防核辐射挖掘机达到最大转速的启动和急停实验,发现铅玻璃视窗没有受损。

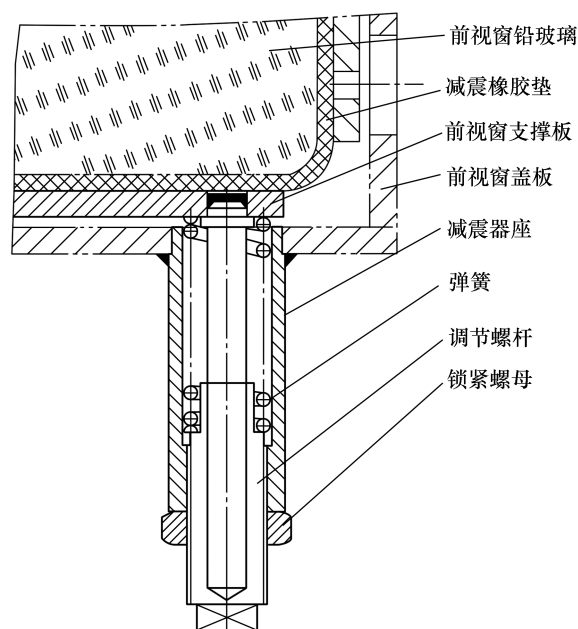


图2 弹簧减震器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the spring shock absorber

4 结 论

通过研究 ZF6 和 ZF506 铅玻璃 γ 射线辐照和阳光照射对其透光率的影响,发现辐照前 ZF6 铅玻璃比 ZF506 铅玻璃的透光率高,辐照过程中 ZF506 铅玻璃比 ZF6 铅玻璃的透光率高,阳光照射后 ZF6 铅玻璃比 ZF506 铅玻璃的透光率高,而防核辐射挖掘机方便进行室外阳光照射,所以综合考虑各种因素,最终选定 ZF6 铅玻璃制作防辐射挖掘机的视窗。因铅玻璃的压缩强度和抗冲击韧性均低于普通玻璃,所以要在铅玻璃视窗的安装结构上加设减震装置。通过设计计算在铅玻璃的安装结构上增加了 4 个弹簧减震器,并通过防核辐射挖掘机在颠簸、行走刹车、回转制动三种极限工况进行实验,验证了铅玻璃视窗结构的可靠性。

参考文献:

- [1] BOGUE R. Robots in the nuclear industry: A review of technologies and applications[J]. Industrial robot, 2011, 38(2): 113-118.
- [2] KAWATSUMA S, FUKUSHIMA M, OKADA T. Emergency response by robots to Fukushima-Daiichi accident: Summary and lessons learned[J]. Industrial robot: An international journal, 2012, 39(5): 428-435.
- [3] NAGATANI K, KIRIBAYASHI S, OKADA Y. Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plants using mobile rescue robots[J]. Journal of field robotics, 2013, 30(1): 44-63.
- [4] KIM C, YUN S, PARK K. Sensing system design and torque analysis of a haptic operated climbing robot[C]//Proceeding of the IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 1845-1848.
- [5] 刘永霞, 邹树梁. 核辐射环境作业挖掘机的研制[J]. 机械设计与制造, 2016(3): 265-268.
- [6] 李杨, 邱长军, 陈桂荣, 邹树梁, 李林生. 防辐射挖掘机驾驶舱视场铅玻璃减震设计及有限元分析[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2015, 29(1): 60-63; 83.
- [7] MIR A H, MONNET I, TOULEMONDE M, et al. Mono and sequential ion irradiation induced damage formation and damage recovery in oxide glasses: Stopping power dependence of the mechanical properties[J]. Journal of nuclear materials, 2016, 469(2): 244-250.
- [8] CHEN L, YUAN W, NAN S, et al. Study of modifications in the mechanical properties of sodium aluminoborosilicate glass induced by heavy ions and electrons[J]. Nuclear instruments and methods in physics research section B: Beam interactions with materials and atoms, 2016, 370(3): 42-48.
- [9] 张晓阳, 彭海波, 刘枫飞, 等. 多种重离子辐照对硼硅酸盐玻璃机械性能的影响[J]. 无机材料学报, 2019, 34(7): 741-747.
- [10] GAC A L, BOIZOT B, JÉGOU C, et al. Aluminosilicate glasses structure under electron irradiation: An EPR study[J]. Nuclear instruments and methods in physics research section B: Beam interactions with materials and atoms, 2017, 407(2): 203-209.
- [11] 刘永霞, 邹树梁, 匡雅. γ 射线辐照和阳光照射对 ZF6 铅玻璃透光率的影响[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(12): 2293-2298.
- [12] 杜继实, 吴洁华, 赵丽丽, 等. 玻璃空间电离辐照着色研究[J]. 无机材料学报, 2012, 27(4): 411-416.