

文章编号:1671-251X(2019)12-0045-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018100034

矿用激光甲烷传感器工作稳定性加速试验

王小松^{1,2}

(1. 中煤科工集团常州研究院有限公司, 江苏 常州 213015;
2. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏 常州 213015)



扫码移动阅读

摘要:针对现有传感器工作稳定性试验方法需将传感器连续运行和测试180 d、效率较低的问题,分析了矿用激光甲烷传感器工作稳定性加速试验的可行性;通过摸底试验分析得出温度是影响激光甲烷传感器长期测量误差稳定性的主要因素;根据激光甲烷传感器各部件及整机的温度极限,确定加速试验温度为75℃;使用阿列纽斯方程建立工作稳定性加速试验模型,并计算出加速因子为8.718 34;结合恒定失效率假设下失效率与平均无故障时间的验证试验方案,得出激光甲烷传感器工作稳定性加速试验方法,该方法可将试验时间从180 d缩短为12 d。结合第三方检测机构的检测结果,通过实验验证了加速试验方法的可行性。该加速试验方法可大幅提升检验工作效率,为制定激光甲烷传感器行业标准试验方法提供理论支撑。

关键词:激光甲烷传感器;工作稳定性;加速试验;温度极限;平均无故障时间;可调谐二极管激光吸收光谱法

中图分类号:TD712.55 文献标志码:A

Accelerated test of working stability of mine-used laser methane sensor

WANG Xiaosong^{1,2}

(1. CCTEG Changzhou Research Institute, Changzhou 213015, China;
2. Tiandi (Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

Abstract: In view of problem that existing sensor working stability test method requires continuous operation and testing of sensor for 180 days with low efficiency, feasibility of accelerated test of working stability of mine-used laser methane sensor is analyzed; it is found out by thorough test that temperature is the main factor affecting long-term measurement error stability of laser methane sensor; accelerated test temperature was determined to be 75℃ according to temperature limits of laser methane sensor components and the whole machine; the Arrhenius equation is used to establish an accelerated test model of work stability, and acceleration factor is calculated to be 8.718 34; combining verification test scheme of failure rate and the mean time between failures under the assumption of constant failure rate, an accelerated test method for working stability of laser methane sensor is obtained, which can shorten the test time from 180 d to 12 d. The feasibility of the accelerated test method is verified by experiments in combination with the test results of third-party testing agencies. The proposed accelerated test method can greatly improve the efficiency of inspection work and provide theoretical support for the development of industry standard test methods for laser methane sensor.

Key words: laser methane sensor; working stability; accelerated test; temperature limit; mean time between failures; TDLAS

收稿日期:2018-10-18;修回日期:2019-11-12;责任编辑:胡娟。
作者简介:王小松(1984—),男,重庆人,高级工程师,现主要从事矿用产品检测检验及相关行业标准起草工作,E-mail:wangxiosong_001@163.com。
引用格式:王小松. 矿用激光甲烷传感器工作稳定性加速试验[J]. 工矿自动化,2019,45(12):45-49.
WANG Xiaosong. Accelerated test of working stability of mine-used laser methane sensor[J]. Industry and Mine Automation,2019,45(12):45-49.

0 引言

激光甲烷传感器采用 TDLAS(Tunable Diode-Laser Absorption Spectroscopy,可调谐二极管激光吸收光谱法)探测甲烷气体浓度,具有敏感元件寿命长、灵敏度高、性能稳定等优点,近年已被广泛应用于煤矿井下^[1-4]。激光甲烷传感器工作稳定性是指在规定的条件和时间,传感器的零点、标定点和报警点保持在允许变化范围内的性能^[5-7]。AQ 6211—2008《煤矿用非色散红外甲烷传感器》^[8]等行业标准给出了传感器工作稳定性试验的具体方法,按该方法,传感器需在实验室条件下连续运行和测试 180 d。

电子设备可靠性加速试验基于产品故障物理分析结果来确定产品的加速试验条件和加速因子,通过对产品施加高于正常水平的应力,在较短时间内评估产品可靠性水平^[9]。矿用激光甲烷传感器在安全标志检验过程中需要经受交变湿热试验、工作温度试验、振动试验、冲击试验等一系列高强度试验,具备进行加速试验的条件。因此,本文通过针对性的长周期摸底试验,找出影响传感器测量误差的因

素,结合恒定失效率假设下失效率与平均无故障时间的验证试验方案^[10],将矿用激光甲烷传感器工作稳定性超限作为失效条件进行加速试验方法研究。

1 摸底试验分析

激光甲烷传感器的稳定性决定因素可以归纳为激光器件和光探测器件的稳定度、气室结构的可靠性、温度补偿效率、气压补偿效率^[11]、整机结构可靠性。对于传感器的整体稳定性而言,这 5 个因素相互牵连、互相影响^[12]。为了解和掌握激光甲烷传感器及其激光组件与其他类型甲烷传感器的长时间稳定性,笔者所在团队拟定了一套试验方案(周期为 445 d),将不同企业的各类型传感器分别置于交变湿热环境与实验室环境 2 种条件下,长期通电工作,并对测量误差进行对比,详细方案及数据结果见文献^[12]。

以测量 2.0%CH₄ 为例,实验室条件下的长周期试验曲线如图 1 所示。其中“TD 红外”“TD 催化”“TD 激光”“DL 激光”“SD 激光”表示某厂家生产的某类传感器,每种传感器取 2 个样机进行试验。

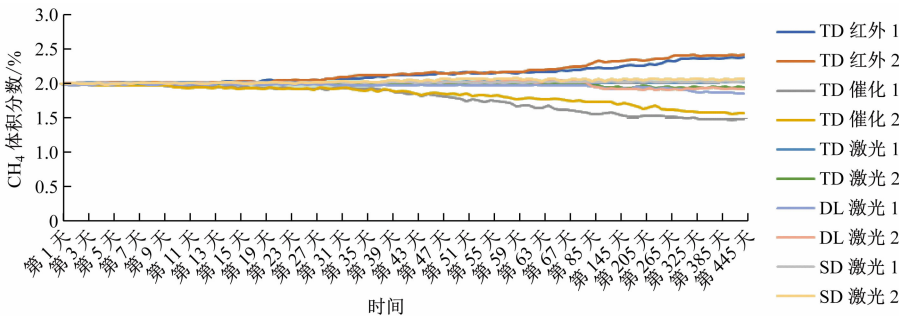


图 1 实验室条件下 2.0%CH₄ 长周期试验曲线

Fig. 1 Long cycle test curve of 2.0% CH₄ under laboratory conditions

交变湿热条件下 2.0%CH₄ 长周期试验曲线如图 2 所示。其中 5 种激光甲烷传感器测量值陡降为零,这是因为传感器整机耐潮湿性能失效,导致传感器无法正常工作。测试表明,传感器中的激光组件

仍可正常工作。从出现整机失效前的 63 d 试验数据来看,各厂商提供的样机测量误差均大于同时期实验室条件下相应样机的测量误差。

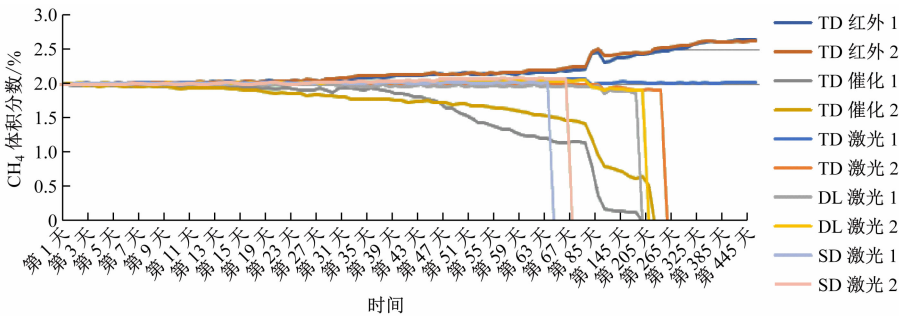


图 2 交变湿热条件下 2.0%CH₄ 长周期试验曲线

Fig. 2 Long cycle test curve of 2.0% CH₄ under alternating hot and humid conditions

从图 1 和图 2 可看出:① 交变湿热条件下误差 大于实验室条件下的误差。② 交变湿热条件下,激

光甲烷传感器受湿度影响较小。③ 交变湿热条件下,虽出现外壳耐潮湿能力失效的样本,但其激光组件仍能正常工作。

综上可以判断,温度是影响激光甲烷传感器长期测量误差稳定性的主要因素。

2 加速试验方法设计

2.1 加速应力水平的确定

将工作稳定性加速试验所需的加速应力类型确定为温度,进而展开确定加速应力量值的研究。

影响加速应力水平的因素有应力适用范围、产品应力极限、其他因素。其他因素与保持试验应力精度的能力(如温度试验箱的温控精度)有关,如果采用经过校准的精度较高的试验设备,可以消除该因素的影响。产品的应力极限是本文研究的重点之一。产品的温度应力极限取决于所采用的各器件的极限温度下限。矿用激光甲烷传感器作为电子产品,其核心器件(激光器、光探测器)及电阻、电感、电容等的温度极限均高于 100 ℃,但由于存在大量集成电路,工作温度极限通常只能达到 85 ℃。

研究 TDLAS 浓度检测模块的工作原理发现,激光器的工作温度直接影响其发射波长,进而影响传感器整机的检测精度。传感器制造商通常会对激光器进行额外的温度补偿。加速试验可选择恒定温度加速、序进应力加速、循环序进应力减速等方案。考虑到试验成本和目前行业检测能力,本文选择恒定温度加速方案。

为了保证加速试验结果的有效性,需要留出一定估算裕度。因此,选择 75 ℃作为加速试验温度。

2.2 加速因子的确定

根据阿列纽斯(Arrhenius)方程^[13],产品的稳定性特征满足如下模型:

$$\xi = N \exp(E/KT) \tag{1}$$

式中: ξ 为待研究的稳定性特征; N 为大于 0 的常数; E 为激活能,eV,其值与材料有关,取值范围为 0~1 eV,本文取 0.5 eV; K 为玻尔兹曼常数,取 8.617×10^{-5} eV/K; T 为绝对温度,K。

产品在加速试验温度 T_i 条件下的加速因子 A_F 为

$$A_F = \frac{\exp(E/KT_u)}{\exp(E/KT_i)} = \exp\left(\frac{E}{K}\left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_i}\right)\right) \tag{2}$$

式中 T_u 为产品正常使用温度。

考虑到《煤矿安全规程》规定煤矿井下最高作业温度为 34 ℃,取 35 ℃参与计算,即 $T_u=308$ K。将各参数值代入式(2),计算出加速因子 A_F 为 8.718 34,取 8.7 参与后续计算。

2.3 加速试验方法

国内外大量试验和统计数据表明,电子产品的失效率曲线满足浴盆曲线特征^[14]。矿用激光甲烷传感器通过型式试验并设计定型,剔除早期失效产品后,其寿命分布进入偶然失效期,失效率为常数,满足恒定失效率假设的条件。

矿用激光甲烷传感器的误差在 180 d 之内不超出规定范围,即工作稳定性不下降。本文以此作为可靠性加速试验的故障条件,结合温度加速条件和水平,使用 GB 5080.7—1986《设备可靠性试验 恒定失效率假设下的失效率与平均无故障时间的验证试验方案》中的定时(定数)结尾验证试验法设计具体试验方法。

工作稳定性试验时间指标 180 d 应当视同为平均无故障时间^[10],即 $m_1=180$ d。设拒收概率 $\alpha=10\%$,接收概率 $\beta=10\%$,鉴别比 $D_m=m_0/m_1=5(m_0$ 为预期总体试验时间),根据文献[10]中的表 12 可知,应选取“5:4”试验方案。

取 10 台样机进行试验。结合试验方案和加速因子得出预期总体试验时间为

$$m_0 \Big|_d = \frac{1.1D_m m_1}{10A_F} = \frac{1.1 \times 5 \times 180}{10 \times 8.7} \approx 12 \tag{3}$$

10 台样机总关联截尾失效数 $\gamma=3$,即整个试验过程允许出现少于 3 次测量误差超限。出现误差超限后,应通过维修/重新标校使传感器恢复到正常误差范围,继续进行试验。维修/标校所用时间不应计入试验周期。

将矿用激光甲烷传感器误差稳定性作为故障条件,基于恒定失效率假设下的工作稳定性加速试验方法:取 10 台样机进行检验,将样机全部置于 (75 ± 3) ℃的温度试验箱中,连续运行 12 d,每天测试其测量误差,测量误差超限次数不大于 2,即可判定传感器工作稳定性达 180 d。

另外,可能存在工作极限温度低于 75 ℃的产品,开展加速试验时,可将试验温度适当调低。例如,设置加速试验温度为 55 ℃,根据式(2)和式(3)可得出试验周期为 32 d。

3 实验验证

分别委托 2 家第三方检测机构在实验室环境中对“SD 激光”和“DL 激光”传感器进行 180 d 工作稳定性测试,结果均为“合格”。

选用 10 台“SD 激光”传感器全新样机,使用工作稳定性加速试验方法开展实验验证工作,样机最高极限工作温度为 85 ℃,试验温度定为 75 ℃。实

验前,使用 2.01%CH₄ 标准气样,在 75 ℃ 条件下全部标校为 2.01%输出。实验过程中,每天测试每台样机的测量误差,保持 75 ℃ 条件连续工作 12 d,共测得 120 个数据,具体见表 1。

表 1 “SD 激光”传感器样机实验数据
Table 1 Experimental data of "SD laser" sensor prototype

时间	CH ₄ 体积分数/%									
	样机 1	样机 2	样机 3	样机 4	样机 5	样机 6	样机 7	样机 8	样机 9	样机 10
第 1 天	2.03	2.01	2.01	2.02	2.01	2.01	2.01	2.01	2.02	2.01
第 2 天	2.04	2.01	2.02	2.02	2.01	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02
第 3 天	2.04	2.02	2.02	2.02	2.01	2.02	2.01	2.02	2.02	2.01
第 4 天	2.03	2.02	2.03	2.03	2.01	2.03	2.02	2.02	2.03	2.02
第 5 天	2.04	2.02	2.04	2.04	2.02	2.02	2.02	2.03	2.03	2.02
第 6 天	2.04	2.03	2.04	2.04	2.02	2.02	2.04	2.03	2.03	2.02
第 7 天	2.06	2.03	2.07	2.04	2.04	2.04	2.04	2.03	2.04	2.04
第 8 天	2.06	2.02	2.07	2.06	2.04	2.03	2.04	2.03	2.05	2.04
第 9 天	2.06	2.03	2.06	2.06	2.04	2.03	2.04	2.03	2.04	2.04
第 10 天	2.08	2.04	2.08	2.06	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.06
第 11 天	2.10	2.04	2.11	2.08	2.06	2.04	2.04	2.04	2.04	2.06
第 12 天	2.10	2.06	2.11	2.08	2.06	2.06	2.06	2.04	2.05	2.06

从表 1 可看出,传感器最大误差值为 0.10%CH₄,小于 0.12%CH₄(真值的±6%),未超出误差限,即γ=0。根据工作稳定性加速试验方法结果判定原则可得:该种激光甲烷传感器的误差在 180 d 之内不会超出规定范围。该结果与第三方检测机构的检测结果一致,证明所提加速试验方法是可行的。

4 结论

(1) 通过交变湿热试验和实验室试验对比分析,得出影响激光甲烷传感器工作稳定性的主要因素是温度。

(2) 根据激光甲烷传感器各部件及整机的温度极限,确定加速试验温度为 75 ℃。使用阿列纽斯方程建立工作稳定性加速试验模型,并计算出加速因子为 8.718 34。

(3) 结合恒定失效率假设下的失效率与平均无故障时间的验证试验方法,得出工作稳定性加速试验方法:取 10 台样机进行检验,将样机全部置于(75±3) ℃ 的温度试验箱中,连续运行 12 d,每天测试其测量误差,测量误差超限次数不大于 2,即可判定传感器工作稳定性达 180 d。

(4) 结合第三方检测机构的检测结果,通过实验验证了加速试验方法的可行性。

参考文献(References):

[1] 聂伟,阚瑞峰,杨晨光,等.可调谐二极管激光吸收光谱技术的应用研究进展[J].中国激光,2018,45(9):

9-29.
NIE Wei, KAN Ruifeng, YANG Chenguang, et al. Research progress on the application of tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 9-29.
[2] 庞涛,王煜,夏滑,等.基于 TDLAS 技术的全量程激光甲烷传感器[J].光子学报,2016,45(9):104-110.
PANG Tao, WANG Yu, XIA Hua, et al. Full scale methane sensor based on TDLAS technology[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(9): 104-110.
[3] 王尧.基于 TDLAS 的全量程激光 CH₄ 检测气室设计与研究[J].煤矿机械,2018,39(10):22-24.
WANG Yao. Study and design of full-range laser CH₄ detection gas chamber based on TDLAS technology [J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(10): 22-24.
[4] 刘永强.基于 TDLAS 的分布式激光甲烷监控系统研究[J].矿冶,2018,27(4):50-54.
LIU Yongqiang. Research on distributed laser methane monitoring system based on TDLAS [J]. Mining and Metallurgy, 2018, 27(4): 50-54.
[5] 孙继平. AQ 1029—2017《煤矿安全监控系统及检测仪器使用管理规范》(报批稿)[J]. 工矿自动化, 2017, 43(6): 87-94.
SUN Jiping. AQ 1029—2017 Use and Management Specification of Coal Mine Safety Monitoring System and Testing Instrument (draft for approval) [J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(6): 87-94.
[6] 赵华玮.激光甲烷传感器在煤矿工作面的应用研究[J].煤炭技术,2016,35(8):164-165.

ZHAO Huawei. Research and application of laser methane sensor in coal mine working face[J]. Coal Technology,2016,35(8):164-165.

[7] 金光贤,孟辉,贾光辉. 激光甲烷传感器在瓦斯抽放管道在线监测的应用[J]. 山东煤炭科技,2018(11):55-57.

JIN Guangxian, MENG Hui, JIA Guanghui. Application of laser methane sensor in on-line monitoring of gas drainage pipeline[J]. Shandong Coal Science and Technology,2018(11):55-57.

[8] AQ 6211—2008 煤矿用非色散红外甲烷传感器[S]. AQ 6211—2008 Non-dispersive infrared methane sensor for coal mines[S].

[9] 杜鑫,曾晨晖. 电子设备的可靠性加速试验[C]//探索 创新 交流(第4集)——第四届中国航空学会青年科技论坛文集. 北京:航空工业出版社,2010.

DU Xin,ZENG Chenhui. Reliability accelerated test for electronic equipments [C]//Exploration Innovation Communication (Episode 4)-The 4th China Aviation Society Youth Science and Technology Forum Collection. Beijing: Aviation Industry Press, 2010.

[10] GB/T 5080.7—1986 设备可靠性试验 恒定失效率假设下的失效率与平均无故障时间的验证试验方案[S].

GB/T 5080.7-1986 Equipment reliability testing compliance test plans for failure rate and mean time between failures assuming constant failure rate[S].

[11] 常琳. 基于压力补偿的煤矿用激光甲烷传感器[J]. 煤矿安全,2016,47(6):126-128.

CHANG Lin. Laser methane sensor for coal mine based on pressure compensation[J]. Safety in Coal Mines,2016,47(6):126-128.

[12] 孟积渐. 矿用激光甲烷传感器工作稳定性试验研究[J]. 煤炭与化工,2018,41(6):92-95.

MENG Jijian. Study on working stability test of laser methane sensor for coal mine[J]. Coal and Chemical Industry,2018,41(6):92-95.

[13] 郑俊钦. 恒定失效率假设下的电子产品可靠性验证试验[J]. 海峡科学,2015(4):38-40.

ZHENG Junqin. Reliability verification test of electronic products under the assumption of constant failure rate[J]. Strait Science,2015(4):38-40.

[14] 向刚,苗静,邱丰. 航天电子产品贮存期评估方法研究[J]. 电子测量技术,2017,40(1):1-5.

XIANG Gang, MIAO Jing, QIU Feng. Research on evaluating the storage period of aerospace electronics products [J]. Electronic Measurement Technology, 2017,40(1):1-5.