

# 反应堆控制棒驱动机构电机温升试验研究

张智峰<sup>1</sup>, 彭航<sup>1</sup>, 谢细明<sup>2</sup>, 李健<sup>1</sup>, 霍蒙<sup>1</sup>, 贺斌<sup>3</sup>

(1.中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都 610213; 2.中国核动力研究设计院设计所可靠性工程技术研发中心, 成都 610213; 3.西南技术工程研究所, 重庆 400039)

**摘要:** **目的** 研究电机在不同工况下的温升情况, 完成电机散热能力评估, 为电机散热优化和工程通风设计提供参考。**方法** 模拟驱动机构实际运行环境, 在断风条件下进行自然散热温升试验, 获取电机温升最大工作模式, 并在该模式下进行2种风速条件下的通风试验, 获取定子绕组的平衡温度。当定子绕组达到热平衡后, 切断通风, 进行断风试验, 获取最大断风时间。**结果** 电机温升最大时, 工作模式为三相通电, 增大风速可降低定子外壁温度, 提高定子绕组与定子外壁的温差。三相通电工况下, 5 m/s和8 m/s风速下最大断风时间分别为15 min和22 min。**结论** 开展了电机温升试验研究, 获得了典型工况下电机的温升状况, 为电机散热优化和工程通风设计提供了参考。

**关键词:** 控制棒驱动机构; 电机; 温升; 平衡温度; 风速

中图分类号: TL67 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)05-0121-05

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.05.018

## Experimental Research on Motor Temperature Rise of Reactor Control Rod Drive Mechanism

ZHANG Zhi-feng<sup>1</sup>, PENG Hang<sup>1</sup>, XIE Xi-ming<sup>2</sup>, LI Jian<sup>1</sup>, HUO Meng<sup>1</sup>, HE Bin<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Nuclear Reactor System Design Technology of China Nuclear Power Research and Design Institute, Chengdu 610213, China; 2. R & D Center of Reliability Engineering Technology, Design Institute of Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China; 3. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT:** The purpose of this paper is to study the temperature rise of the motor under different working conditions, complete the evaluation of the motor's heat dissipation capacity, and provide a reference for the optimization of motor heat dissipation and engineering ventilation design. This paper simulates the actual operating environment of the driving mechanism, conducts a natural heat dissipation temperature rise test under the cut-off condition, obtains the maximum temperature rise of the motor working mode. In this mode, the ventilation test is carried out at two wind speeds to obtain the equilibrium temperature of the stator winding. When the stator winding reaches thermal equilibrium, cut off the ventilation and perform a cut-off test to obtain the maximum cut-off time. The results show that when the temperature rise of the motor is at its maximum, the working mode is three-phase energization. Increasing the wind speed can reduce the temperature of the outer wall of the stator and increase the temperature difference between the stator winding and the outer wall of the stator. Under the three-phase energization

收稿日期: 2021-04-18; 修订日期: 2021-04-26

Received: 2021-04-18; Revised: 2021-04-26

作者简介: 张智峰(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为核动力总体设计。

**Biography:** ZHANG Zhi-feng (1985—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: general design of nuclear power.

引文格式: 张智峰, 彭航, 谢细明, 等. 反应堆控制棒驱动机构电机温升试验研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(5): 121-125.

ZHANG Zhi-feng, PENG Hang, XIE Xi-ming, et al. Experimental research on motor temperature rise of reactor control rod drive mechanism[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(5): 121-125.

condition, the maximum wind cut-off time at wind speeds of 5 m/s and 8 m/s is 15 min and 22 min, respectively. By carrying out the motor temperature rise test research, the temperature rise of the motor under typical working conditions is obtained, which provides a reference for the optimization of motor heat dissipation and engineering ventilation design.

**KEY WORDS:** control rod drive mechanism; motor; temperature rise; equilibrium temperature; wind speed

控制棒驱动机构 (Control Rod Drive Mechanism, CRDM, 以下简称驱动机构) 是反应堆控制系统和保护系统的执行机构, 是影响反应堆运行安全性的关键部件之一<sup>[1-4]</sup>。通过控制棒驱动机构带动控制棒组件在堆芯内上下移动, 实现对反应堆反应性的控制, 从而完成反应堆启动、功率调节、功率维持、正常停堆和安全停堆<sup>[5-6]</sup>。

控制棒驱动机构电机是主要的动力源, 由定子和转子组成。定子由耐高温电磁线绕制在铁芯后, 外套金属壳封装而成, 在电源驱动下提供旋转或保持所需的电磁力, 驱动转子完成旋转、保持等规定动作。定子电磁线圈在电源驱动下会发热, 同时反应堆堆芯的高温也会传递到电磁线圈上。若没有采取合适的冷却措施来控制温升, 则会使电磁线圈温度超过耐温等级, 造成绝缘失效, 甚至定子烧毁, 影响反应堆正常运行<sup>[7-9]</sup>。国内外常采用的冷却方式有水冷和风冷, 其中风冷方式利用空气强迫冷却定子电磁线圈, 具有结构简单和方便维修的优点, 已被普遍应用于控制棒驱动机构的冷却<sup>[10-15]</sup>。

为了更精确地获得控制棒驱动机构电机温升情况, 文中研究了一套试验方法, 模拟电机实际运行环境, 获得了电机在不同工况下的温升情况, 完成了电机散热能力评估, 为电机散热优化和通风设计提供依据。

## 1 试验方案研究

### 1.1 电机工作模式

文中选取某工程用驱动机构作为研究对象, 该驱动机构采用的是交流异步电机, 电机的主要工作模式有两相通电、三相通电和旋转。电机采用风冷散热, 风速为 5 m/s 和 8 m/s, 对应的风量分别为 0.25 m<sup>3</sup>/s 和 0.4 m<sup>3</sup>/s。

### 1.2 温度测量方法

电机温度测试方法通常有电阻法、温度计法、埋置检温计法等<sup>[16-20]</sup>。

1) 电阻法。在一定温度范围内, 电机绕组的阻值随着温度的上升而增大, 两者存在一定的函数关系, 可通过测量电阻来间接获得绕组温度。函数关系如 (1) 式所示。

$$\Delta T = (R_f - R_0)(k + t_0) / R_0 + t_0 - t_f \quad (1)$$

式中:  $R_0$  和  $R_f$  分别为绕组冷态电阻和热态电阻,  $\Omega$ ;  $t_0$  和  $t_f$  分别为绕组冷态环境温度和热态环境温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $k$  为常数, 对铜绕组线通常取 235  $^{\circ}\text{C}$ 。由于测量的是整个绕组电阻, 计算温度为绕组平均温度, 无法反映绕组的局部高温, 因此测量结果不够保守。

2) 温度计法。对电机中不能采用电阻法测量的部位, 可采用温度计法来测量表面温度。温度计有膨胀式温度计、半导体温度计及非埋置式热电偶或电阻温度计。

3) 埋置检温计法。埋置检温计法是将电阻检温计、热电偶或半导体热敏元件埋置于电机内, 连接至外部的二次仪表测量温度。此方法可根据需要测量绕组内部任何位置的温度, 一般需要在绕线阶段将测量元件埋置在绕组线内。

## 1.3 试验研究

1) 自然散热温升试验。在不同工作模式 (两相通电、三相通电和旋转) 及通风条件 (通风、断风) 下, 电机的运行工况共有 6 种。为优化工况数量, 提高试验效率, 在断风条件下对两相通电、三相通电和旋转 3 种工作模式的电机进行自然散热温升试验, 获得定子绕组温升最大工作模式和各种工作模式下的平衡温度。

2) 通风试验。针对自然散热温升试验中找到的电机温升最大工作模式, 开展通风试验, 风速为 5 m/s 和 8 m/s, 获得不同风速下定子绕组的平衡温度。

3) 断风试验。针对电机温升最大工作模式开展断风试验, 在定子绕组达到热平衡后, 切断通风, 获得不同通风量下断风后绕组温度达到安全限值的时间, 即最大断风时间, 为工程通风的安全设计提供输入。

## 2 试验装置设计

### 2.1 模拟通风装置及测温点设计

模拟的通风装置设计及温度点布置如图 1 所示。

### 2.2 电机温度测点布置

试验中选用工业常用的热电偶测量定子绕组温度与定子外壁温度, 热电偶布置在定子绕组 (见图 2) 和电机外壳上。

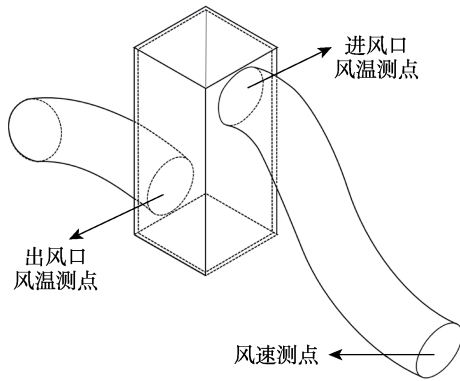


图 1 模拟通风装置设计及温度点布置

Fig.1 Simulation ventilation device design and temperature measuring point arrangement

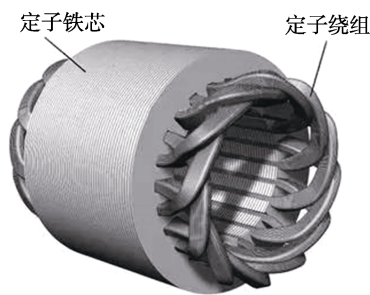


图 2 电机温度测点布置

Fig.2 Arrangement of motor temperature measuring points

### 3 结果及分析

#### 3.1 自然散热温升试验

断风条件下，定子绕组在 60 min 内的温升情况如图 3 所示。旋转与三相通电工况的温升相当，均大于两相通电工况。三相通电工况下，45~60 min 内，定子绕组温度仍保持线性增长，而旋转工况在该时间段内温升速度明显放缓。推断三相通电工况温升实际大于旋转工况，三相通电是电机发热最大的一种工况。

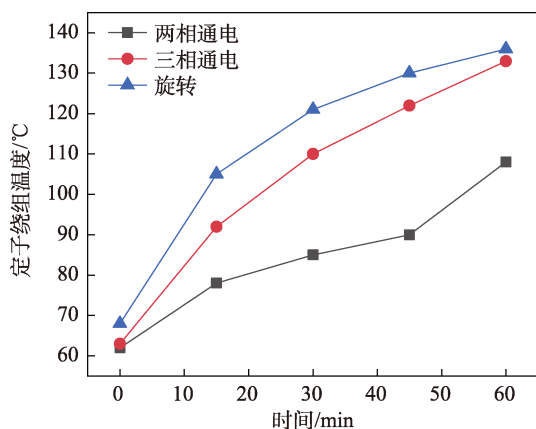


图 3 不同工作模式自然散热温升试验温升曲线

Fig.3 Temperature rise curves of natural heat dissipation temperature rise test under different working modes

断风条件下，两相通电工作模式的定子部件在 285 min 内的温升情况如图 4 所示。电机绕组在 150 °C 即达到平衡，低于工程要求的温度限值（160 °C）。该工作模式下，电机不需通风冷却。三相通电和旋转工作模式下，定子绕组的发热量显著大于两相通电工况，可判断其平衡温度超过温度限值，必须进行通风冷却，因此不再开展三相通电和旋转工作模式下的平衡温度试验。

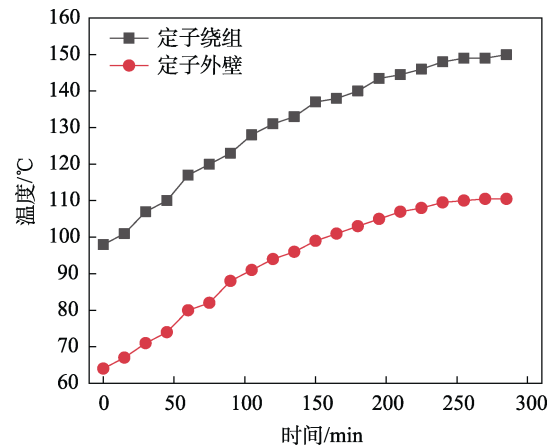


图 4 两相通电断风试验温升曲线

Fig.4 Temperature rise curves of cut-out test under two-phase energized condition

#### 3.2 通风试验

在自然散热温升试验中，得到电机温升最大的工况为三相通电工况。该工况下，对电机进行 5 m/s、8 m/s 风速温升试验，其结果分别如图 5 所示。由图 5a 可以看出，5 m/s 风速下，定子绕组的平衡温度为 150 °C，低于工程要求的温度限值（160 °C）；定子绕组与外壁的最大温差为 80 °C，出口风、入口风的温差为 4~6 °C。由图 5b 可以看出，8 m/s 风速下，定子绕组的平衡温度为 145 °C，低于工程要求的温度限值；定子绕组与外壁的最大温差为 90 °C，出口风、入口风的温差为 4~6 °C。

三相通电工况下，定子绕组温度与定子绕组-外壁温差、外壁温度间的关系如图 6 所示。在 5 m/s 风速下，随着定子绕组温度的升高，定子绕组与外壁的温差近似呈线性增长，达到热平衡后，两者的温差在 80 °C 以上；风速加大到 8 m/s 后，外壁温度显著降低，但由于绕组温度下降幅度不大，因此绕组与外壁的温差进一步增大至 90 °C 以上。分析认为，定子部件内部聚集的热量不能充分传递到定子外壁，影响了风冷效果，在后续设计中应进行改进。此外，试验过程中，入风口、出风口的温差保持在相对稳定的范围内，并未随外壁温度的升高而明显增加，表明通风对定子外壁的冷却能力已达到饱和。

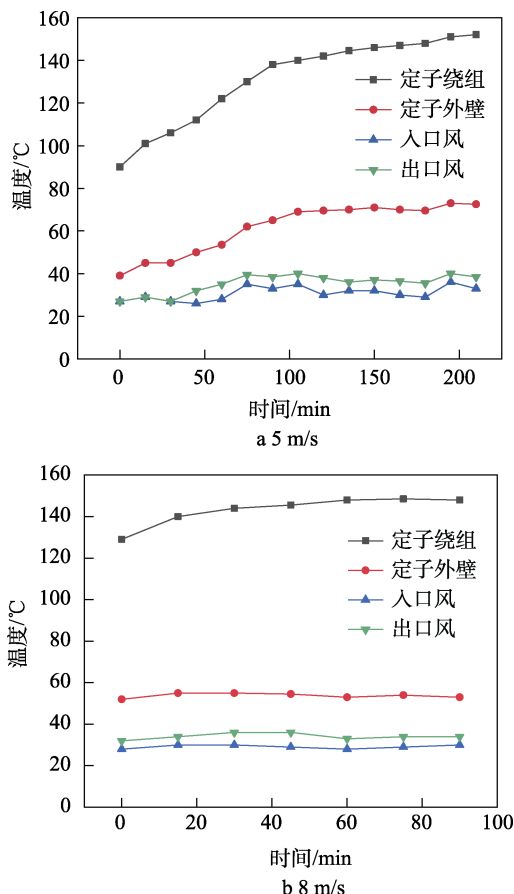


图5 不同风速下三相通电通风试验温升曲线  
Fig.5 Temperature rise curves of ventilation test under three-phase power-on condition at different wind speeds

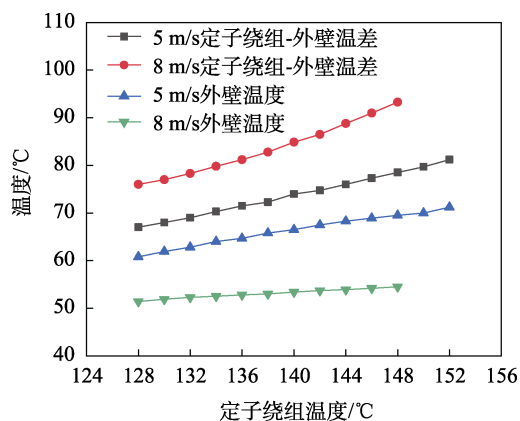


图6 热态三相通电定子绕组-外壁温差、外壁温度拟合曲线  
Fig.6 Fitting curves of stator winding-outer wall temperature difference and outer wall temperature under hot three-phase energization conditions

### 3.3 断风试验

三相通电工况时,分别在 5 m/s 和 8 m/s 2 种风速下对达到热平衡后的定子绕组进行断风试验,结果见表 1。

由表 1 可知,三相通电工况时,电机在 5 m/s 和 8 m/s 2 种风速下的最大断风时间分别为 15 min 和

表 1 三相通电通风后断风试验结果

Tab.1 Results of windbreak test after ventilation in three-phase maintenance mode

风速/(m·s <sup>-1</sup> )	时间/min	定子绕组/°C	定子外壁/°C
5	0	152	65
	10	157	80
	15	160	82
8	0	147	45
	10	153	65
	20	158	70
	22	160	75

22 min。8 m/s 风速下,定子绕组和定子外壁的温度相比于 5 m/s 风速下都更低。因此 8 m/s 风速下,定子绕组的温度上升到工程要求的温度限值(160 °C)所花的时间更长,即 8 m/s 风速对应的最大断风时间更长。

## 4 结论

1) 研究了一套驱动机构电机温升试验方案,通过自然散热温升试验,获得了定子绕组各种模式的温升状况及平衡温度。在电机温升最大工作模式下,进行了不同风速条件下的通风试验。当定子绕组在通风试验中达到热平衡后,切断通风,进行断风试验。试验获得了典型工况下电机的温升状况,为电机散热优化和工程通风设计提供了参考。

2) 断风条件下,电机温升最大的工作模式为三相通电。断风条件下,两相通电时,定子绕组的平衡温度为 150 °C,低于工程要求温度限值(160 °C),该工况下不需通风冷却。

3) 三相通电工况下,增大风量可降低定子外壁温度,提高定子绕组与定子外壁的温差。

4) 三相通电工况下,5 m/s 和 8 m/s 风速下的最大断风时间分别为 15 min 和 22 min。

### 参考文献:

[1] 马仓,薄涵亮,姜胜耀,等.控制棒可移动线圈电磁驱动机构线圈刚度实验[J].原子能科学技术,2006(2):177-179.  
MA Cang, BO Han-liang, JIANG Sheng-yao, et al. Rigidity experiment on coil-moveable electromagnetic drive mechanism for reactor control rod[J]. Atomic energy science and technology, 2006(2): 177-179.

[2] 谢细明,彭航,张倬,等.核反应堆控制棒驱动机构动作部件状态检测研究[J].核动力工程,2019,40(2):90-94.  
XIE Xi-ming, PENG Hang, ZHANG Zhuo, et al. Study on monitoring of action assembly of control rod drive mechanism in nuclear power reactors[J]. Nuclear power

- engineering, 2019, 40(2): 90-94.
- [3] 吴小飞, 杨晓晨, 聂常华, 等. 可动电磁型控制棒驱动线圈可靠性增长试验及改进研究[J]. 核动力工程, 2019, 40(3): 130-133.  
WU Xiao-fei, YANG Xiao-chen, NIE Chang-hua, et al. Reliability growth test and improvement of electromagnetic movable coil control rod drive line[J]. Nuclear power engineering, 2019, 40(3): 130-133.
- [4] 丁宗华, 刘刚. 核电厂控制棒驱动机构工作线圈温度场分析[J]. 机械研究与应用, 2013, 26(2): 99-101.  
DING Zong-hua, LIU Gang. Temperature field analysis of CRDM work coils[J]. Mechanical research & application, 2013, 26(2): 99-101.
- [5] 张继革, 吴元强, 王敏稚. 控制棒新型电磁驱动机构性能实验研究[J]. 核动力工程, 2001, 22(4): 365-369.  
ZHANG Ji-ge, WU Yuan-qiang, WANG Min-zhi. Experimental study on property of a new electromagnet drive for reactor control rod[J]. Nuclear power engineering, 2001, 22(4): 365-369.
- [6] 张志强, 李维, 付国忠, 等. 基于自然对流的堆顶局部热点分析及设计优化[J]. 科技创新, 2020(34): 54-57.  
ZHANG Zhi-qiang, LI Wei, FU Guo-zhong, et al. Analysis and design optimization of local hot spots on the top of reactor based on natural convection[J]. Scientific and technological innovation information, 2020(34): 54-57.
- [7] 邹鹏, 王建军, 葛增芳, 等. 控制棒驱动机构自然循环冷却方式的可行性研究[J]. 核技术, 2014, 37(3): 73-77.  
ZOU Peng, WANG Jian-jun, GE Zeng-fang, et al. Feasibility research of CRDM natural circulation cooling[J]. Nuclear techniques, 2014, 37(3): 73-77.
- [8] 郑茂溪, 李跃忠, 冉小兵. 控制棒驱动机构通风散热数值分析[J]. 核动力工程, 2014, 35(3): 69-72.  
ZHENG Mao-xi, LI Yue-zhong, RAN Xiao-bing. Numerical simulation on ventilation heat transfer of control rod drive mechanism[J]. Nuclear power engineering, 2014, 35(3): 69-72.
- [9] 田雪莲, 戎晓虹, 卓文彬, 等. 模块式小型堆控制棒驱动机构风冷性能热态试验[J]. 核动力工程, 2017, 38(4): 60-63.  
TIAN Xue-lian, RONG Xiao-hong, ZHUO Wen-bin, et al. Test of air cooling characteristics of control rod drive mechanism for ACP100[J]. Nuclear power engineering, 2017, 38(4): 60-63.
- [10] 彭航, 许厚明, 李红鹰, 等. 600 MW 核电站控制棒驱动机构原理样机风冷试验[J]. 核动力工程, 2000, 21(3): 1-4.  
PENG Hang, XU Hou-ming, LI Hong-ying, et al. Air cooling test of control rod drive mechanism principle sample on 600 MW NPP[J]. Nuclear power engineering, 2000, 21(3): 1-4.
- [11] 朱龙兴. 控制棒驱动机构常温通风均匀性试验研究[J]. 核动力工程, 1987(4): 37-42.  
ZHU Long-xing. A test research on ventilative well-distributivity under normal temperature for a control rod drive mechanism[J]. Nuclear power engineering, 1987(4): 37-42.
- [12] 翁娜, 沈秋平, 郝国锋. 第三代核电站控制棒驱动机构冷却系统风机设计[J]. 电力建设, 2014, 35(6): 122-126.  
WENG Na, SHEN Qiu-ping, HAO Guo-feng. Fan design of cooling system for control rod drive mechanism in generation III nuclear power plant[J]. Electric power construction, 2014, 35(6): 122-126.
- [13] 周肖佳, 王丰, 刘刚, 等. 控制棒驱动机构传热机理与隔热套性能研究[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(12): 2245-2250.  
ZHOU Xiao-jia, WANG Feng, LIU Gang, et al. Heat transfer mechanism and thermal sleeve performance of control rod drive mechanism[J]. Atomic energy science and technology, 2015, 49(12): 2245-2250.
- [14] 杨晓晨, 杨方亮, 陈西南, 等. 反应堆控制棒驱动机构电机冷却水流动分析[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(3): 109-112.  
YANG Xiao-chen, YANG Fang-liang, CHEN Xi-nan, et al. Analysis on motor coolant of reactor control rod drive mechanism[J]. Machine design and manufacturing engineering, 2017, 46(3): 109-112.
- [15] 于浩, 张明, 冯少东, 等. CAP1000 一体化堆顶组件风冷系统流场分析[J]. 核技术, 2013, 36(4): 122-125.  
YU Hao, ZHANG Ming, FENG Shao-dong, et al. CAP1000 integrated head package airflow system fluid field analysis[J]. Nuclear techniques, 2013, 36(4): 122-125.
- [16] GB 755—2000, 旋转电机 定额和性能[S].  
GB 755—2000, Rotating electrical machines-Rating and performance[S].
- [17] 曲永珊. 带电测温法与埋置检温计法的比较[J]. 中小型电机技术情报, 1980(2): 44-48.  
QU Yong-shan. Comparison of live temperature measurement method and embedded thermometer method[J]. Technical information of small and medium-sized motors, 1980(2): 44-48.
- [18] 邹建平. 冷凝风机电机温升测试分析[J]. 科技传播, 2012(12): 68-69.  
ZOU Jian-ping. Test and analysis of temperature rise of condensing fan motor[J]. Public communication of science & technology, 2012(12): 68-69.
- [19] 马秋菊, 李宇波. 美国 UL 674 标准对防爆电机温度试验的有关要求[J]. 电气防爆, 2002(3): 21-24.  
MA Qiu-ju, LI Yu-bo. Requirements of temperature test on ex motor in UL 674[J]. Electric explosion protection, 2002(3): 21-24.
- [20] 李吉贵. 美国安全标准对防爆电机温度测试要求[J]. 防爆电机, 2017, 52(1): 31-35.  
LI Ji-gui. Temperature measurement requirements of explosion-proof motor in American safety standards[J]. Explosion-proof electric machine, 2017, 52(1): 31-35.