

应用技术

电机绕组用金属铠装矿物绝缘电缆

杨晓晨，于天达，杨方亮

(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)

摘要：目的 研究电机绕组用金属铠装矿物绝缘电缆的特性。**方法** 设计由316L材料外保护套、高纯氧化镁绝缘体和纯铜导线组成的铠装线，采用预制氧化镁瓷柱法，在不高于900℃温度下进行多道次减径处理，完成直径为2.2 mm，长为400 m的铠装线及一相定子绕组的试制，进而研究铠装线的绝缘电阻、击穿电压及热老化性能。**结果** 铠装线在500℃时的绝缘电阻不低于 $1\times10^8\Omega\cdot m$ ，室温和500℃的击穿电压(工频50 Hz)均不低于1.95 kV，铠装线不存在绝缘老化的现象。**结论** 采用的结构设计方法和制备工艺可以试制出具有良好电气和机械性能的铠装线及绕组。

关键词：绕组；铠装电缆；矿物绝缘

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.03.021

中图分类号：TM245⁺.3 文献标识码：A 文章编号：1674-6457(2017)03-0107-04

Metal Armored MI Cable for Motor Winding

YANG Xiao-chen, YU Tian-da, YANG Fang-liang

(Key Laboratory of Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

ABSTRACT: The paper aims to study characteristics of the metal-armored mineral insulated cable (armored cable) for motor winding. The pre-made magnesia porcelain column method was adopted for multi-pass reduction of armored cable composed of 316L material outer protective cover, high purity magnesium oxide insulator and pure copper wire at temperature no higher than 900℃. The trial production of an armored cable with diameter of 2.2 mm and length of 400m and a phase motor winding were completed. The insulation resistance of the armored wire, breakdown voltage and thermal aging performance were studied. The insulation resistance of armored cable at 500℃ was not less than $1\times10^8\Omega\cdot m$; the breakdown voltage (power frequency 50 Hz) at room temperature and 500℃ was not less than 1.95 kV; and the cable had no phenomenon of insulation aging. The structural design method and preparation process can complete trial production of armored cable and winding with good electrical and mechanical properties.

KEY WORDS: winding; armored cable; mineral insulation

矿物绝缘类电缆(Mineral Insulated Cable)简称MI电缆，在19世纪末由瑞士工程师Arnold Francois Borel提出设想，1934年在法国首先生产，随后美国也建成批量生产线。1968年，我国开始研制用于原子能反应堆堆芯测量用的耐热MI电缆，在MI电缆

外增加金属保护套后成为金属铠装的MI电缆。金属铠装MI电缆全部采用无机材料，具有载流量大、耐高温、耐腐蚀等优点，尤其适合用于高温、高压、腐蚀等复杂环境^[1]。

金属铠装MI电缆现已广泛用在配线、加热、探

收稿日期：2017-04-21

基金项目：装备预先研究项目（41601070501,416020304）

作者简介：杨晓晨（1980—），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为核反应堆结构。

测等领域^[2-5]。法国 THERMOCOAX 公司的高温信号电缆、铠装加热器、铠装热电偶等，在我国航空航天及核电设备的仪表系统中有很大的影响力。金属铠装 MI 电缆在电机绕组领域应用较少，特别是国内几乎没有报道。日本在 2002 年报道了在船用核动力内置式驱动机构电机上，采用了氧化镁绝缘的金属铠装电缆，直径为 $\Phi 2.4\text{ mm}$ ^[6]。为了研究金属铠装 MI 电缆在电机领域的应用性，开展了电机绕组用铠装绕组线（简称铠装线）的设计和试制工作，获得了铠装线的电气性能和机械性能，研究工作对金属铠装 MI 电缆在电机领域的应用具有一定的工程指导意义。

1 铠装绕组线设计

1.1 结构设计

铠装线的基本结构见图 1，由芯体（导体）、绝缘层和保护管组成，铠装线外径 $D=d+2h_1+2h_2=2.0\sim2.2\text{ mm}$ 。

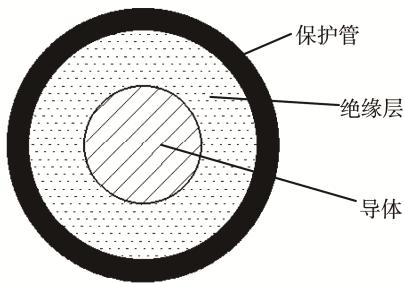


图 1 铠装线结构

Fig.1 Structure diagram of armored cable

通常根据安全载流量设计芯体截面积及直径^[7]。常规铜导线安全载流量选 5 A/mm^2 以上，而金属铠装线允许温升、导热性能远优于传统电缆，其安全载流量在 10 倍以上，即 50 A/mm^2 以上。如最大载流为 10 A，设计要求导芯体直径 $\Phi 0.5\text{ mm}$ 即可，考虑散热，应适当增加芯体直径。

绝缘层厚度 h_1 是影响绕组线绝缘电阻和耐压强度的主要因素。绕组线绝缘电阻与绝缘层厚度的关系为： $R_i=G\rho_i/2\pi$ ，其中 ρ_i 为绝缘电阻系数($\Omega\cdot\text{cm}$)， G 为几何因素， $G=\ln D_i/D_c$ ， D_i 为绝缘层外径， D_c 为芯体的外径。如采用氧化镁粉作为绝缘材料，那么其体积电阻率可选取为 $1.8\times10^{14}\Omega\cdot\text{cm}$ ，同时还应考虑拉制后氧化镁密度的变化，再根据绕组线绝缘电阻的要求，即可计算得到绝缘层的厚度^[8]。

铠装线经过绕制成定子绕组，要有一定的弯曲性能，因此套管不宜太厚，一般套管壁厚设计为 0.1~1 mm。较为重要的是，在某些腐蚀环境下或高压场合，应根据套管材料的腐蚀速率或许用应力等^[9]，对套管的设计壁厚进行校核。通常铠装线工作压力越高、寿命要求越高，外套管壁厚 h_2 也会相应增加。

1.2 材料选择

芯体选用高纯无氧铜，外套管材料可选不锈钢或镍基合金。绝缘材料的选择很关键， MgO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 是常见的无机绝缘材料，经试验比较发现，500 °C 时 MgO 的绝缘电阻比 Al_2O_3 、 SiO_2 分别高出 1 和 1.5 个数量级，故选择高纯 MgO 作为绝缘材料。此外 MgO 还具有足够的抗中子和 γ 射线辐照能力，使铠装线的应用领域更广^[10-11]。

2 铠装线试制

2.1 工艺路线

铠装电缆试制采用预制氧化镁瓷柱法，即将与预制好的 MgO 柱形绝缘体、套管、导体总装在一起，经过多次拉拔到所需要的线径。采用预制氧化镁瓷柱法可明显提高导体同轴度、绝缘层的致密度和均匀性，从而实现超长铠装线的制备^[12-13]。

2.2 关键工艺

要精确控制铠装线成品尺寸，首先需控制 MgO 瓷柱的尺寸。 MgO 瓷柱生产工艺采用干压成形法^[12]，优点是瓷柱结构尺寸易控制，生产效率高。 MgO 瓷柱干压成形法的生产工艺流程为 MgO 粉→除杂→加入粘接剂→混料→压制成型→高温烧结→成品。

MgO 粉表面积和杂质含量是影响绝缘材料电阻率的主要因素。在 900 °C 下， MgO 电阻率随表面积的增大而减小。杂质主要集中在颗粒边界上，会显著降低绝缘材料电阻率，因此选择电熔 MgO 以控制纯度，并筛选粒径分布较大的 MgO 颗粒^[14]。

在合理的温度下通过增加减径道次，可以控制铠装线加工过程中的非均匀变形^[15]。热处理温度的确定主要考虑套管、导体和绝缘层三者材料的物理化学性能。铠装线外套管为 316L，芯体为高纯无氧铜，在可实现导线表面优良拉制性能的前提下，尽量降低热处理温度，温度不超过 850 °C 为宜。热处理还要考虑水蒸气与 MgO 的相互作用，300 °C 时，已经能够除去物理吸附水分，而结晶水 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的分解温度在 395 °C，但到了 900 °C 时，化学吸附羟基将持续存在，影响 MgO 表面导电性，同时高温解吸后，结晶水的复原很缓慢。因此，铠装线热处理采取连续热处理方式，热处理温度不高于 900 °C，将吸附水对绝缘电阻的影响降至最小。

2.3 性能研究

铠装线样品直径为 $\Phi 2.19\sim\Phi 2.20\text{ mm}$ ，符合目标值，总长达到 400 m。样品截面形貌见图 2，组装体经拉拔减径后，保护管壁厚均匀， MgO 绝缘体致密，无空洞，芯体截面有轻微的六边形变形。

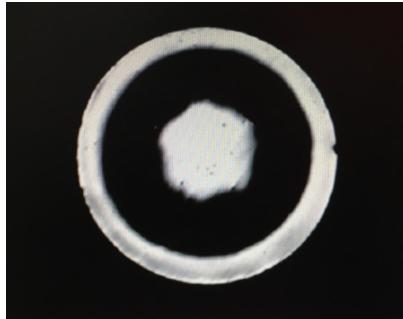


图 2 铠装线样品截面形貌

Fig.2 Cross-sectional morphology of armored cable samples

铠装线的绝缘电阻和击穿电压分别实验参考 GB/T 3048.5 和 GB/T 4974.5 的规定进行。铠装线室温电阻大于 $1 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$, 500 °C 时绝缘电阻大于 $1 \times 10^8 \Omega \cdot \text{m}$, 在工频 50 Hz 下, 室温和 500 °C 击穿电压均不低于 1.95 kV, 表现出了良好的电气性能。实验过程中, 都是端头闪络造成击穿, 表明线的端部绝缘薄弱, 应特殊保护^[16]。将铠装线在 10 mm 直径圆棒上反复弯曲 180°, 循环 5 次后检查弯曲部位的外观, 以及测试室温绝缘电阻和击穿电压, 与弯曲前相比均未发生明显变化, 表现出良好的机械性能。

通常绝缘电阻是评价 MI 电缆耐温能力的关键指标。实验分别在 550 °C 进行, 通过定期测量铠装线的绝缘电阻, 评判其耐温能力。实验结果见图 3, 绝缘电阻随老化时间增加并不降低, 反而呈上升趋势, 表明铠装线可以长期工作在这一温度下。理论上铠装线不存在老化机理。由于 MgO 易吸潮, 300 °C 时已经能够除去物理吸附水分。而结晶水 Mg(OH)_2 的分解温度在 395 °C, 随着老化时间的增加, 结晶水不断分解, 电阻率随之升高。在某一时刻, 结晶水分解达到平衡, 绝缘电阻趋于平衡。

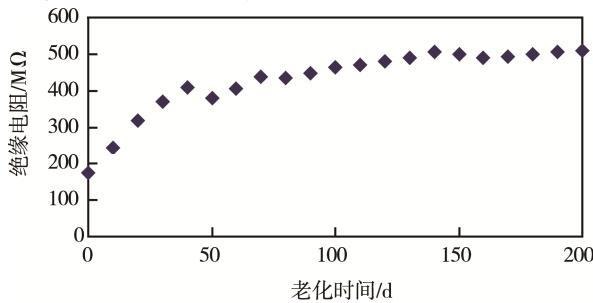


图 3 铠装线绝缘电阻随老化时间变化曲线

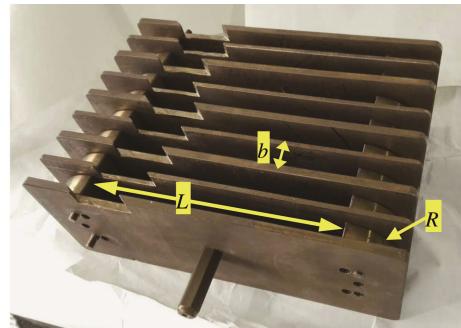
Fig.3 Curve of insulation resistance of armored cable with aging time

3 绕组试制研究

3.1 模具设计

电机的定子绕组需要在模具上绕制完成。合理设计模具是保证电机绕组质量的关键因素。研究采用半

圆形绕线模(见图 4a), 模具中的 R , L , b 尺寸分别根据定子绕组端部半径, 绕组直线段长度以及中心层匝的宽度来确定。



a 绕线模具



b 一相定子绕组

图 4 铠装线绕制
Fig.4 Winding and embedding

3.2 绕制与定型脱模

铠装线保护壳为不锈钢材料, 绕制后有一定的弹性, 成品形状难以保持。通过高温退火, 去除应力使绕组定型。为了避免高温氧化, 绕组连同模具一起在真空炉 500 °C 下退火 1 h, 然后从模具上取下绕组, 依次嵌入线槽。绕制后的一相定子绕组见图 4b, 其在室温和 500 °C 的绝缘电阻均不低于 1000 MΩ, 室温 1 kV/50 Hz 耐电压实验的漏电流约 23 mA, 500 °C 的 0.5 kV/50 Hz 耐电压实验的漏电流达到 100 mA, 结果表明, 铠装线制成的定子绕组具有良好的电气性能, 在高温下的绝缘电阻明显高于普通电缆, 漏电流处于可以接受的水平。

4 结论

- 1) 采用氧化镁瓷柱法, 控制粉末纯度和粒径, 在不超过 900 °C 下连续多道次拉拔, 获得了 2.2 mm 铠装线。

- 2) 室温和 500 °C 下, 铠装线均具有较高的绝缘电阻和击穿电压。

- 3) 铠装线不存在传统电缆的老化机理, 实验验证了其绝缘电阻随老化时间的增加而增加, 并趋于稳定。此类铠装线的寿命更取决于机械性能和耐腐蚀性能。

4) 铠装线经过 5 d 圆棒弯绕验证, 仍能保持原有的电气性能, 表现出了良好的机械性能。成品定子绕组需通过专用模具绕制, 经退火去应力处理后, 其绝缘性能良好。

参考文献:

- [1] 陈建中, 陈肇文. 矿物绝缘电缆的选用[J]. 建筑电气, 2014(9): 57—58.
CHEN Jian-zhong, CHEN Zhao-wen. Selection of Mineral Insulated Cable[J]. Building Electricity, 2014(9): 57—58.
- [2] 杜毅威. 矿物绝缘电缆在建筑工程中的应用[J]. 建筑电气, 2010, 29(4): 44—47.
DU Yi-wei. Application of Mineral Insulated Cables in Construction Engineering[J]. Building Electricity, 2010, 29(4): 44—47.
- [3] 曾力, 张睿, 任立永, 等. 钴自给能中子探测器的测量及补偿原理分析[J]. 自动化仪表, 2015, 36(11): 97—100.
ZENG Li, ZHANG Rui, REN Li-yong, et al. Measurement and Compensation Principle Analysis for Cobalt Self-powered Neutron Detector[J]. Process Automation Instrumentation, 2015, 36(11): 97—100.
- [4] 张贵勤. 高热流密度电加热元件[J]. 核动力工程, 1989(6): 51—55.
ZHANG Gui-qin. Electrical Heat Elements with High Heat Flux[J]. Nuclear Power Engineering, 1989(6): 51—55.
- [5] 庄猛, 刘冠军. 加热电缆的种类及应用[J]. 电线电缆, 2002(5): 14—16.
ZHUANG Meng, LIU Guan-jun. Category and Application of Heating Cables[J]. Elect Wire & Cable, 2002(5): 14—16.
- [6] ISHIDA Toshihisa, IMAYOSHI Shou, YORITSUNE Tsutomu, et al. Development of In-Vessel Type Control Rod Drive Mechanism for Marine Reactor[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2001, 38(7): 557—570.
- [7] 冯海廷. 通电导线截面积的估算方法[J]. 石家庄职业技术学院学报, 2016, 28(4): 71—73.
FENG Hai-ting. The Method of Estimation of Sectional Areas of Electrical Wires[J]. Journal of Shijiazhuang Vocational Technology Institute, 2016, 28(4): 71—73.
- [8] 苏景顺. 计算绝缘电阻的几种方法[J]. 河北建筑工程学院学报, 2012, 30(3): 90—92.
- [9] SU Jing-shun. Several Ways to Calculate the Value of Insulation Resistance[J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2012, 30(3): 90—92.
- [10] TAKEUCHI T, NAKANO H, UEHARA T, et al. Effect of Dissolved Gas on Mechanical Property of Sheath Material of Mineral Insulated Cables Under High Temperature and Pressure Water[J]. Nuclear Materials & Energy, 2016.
- [11] 张丽芹, 邱建文, 王江波, 等. 核电站仪表组件和材料的耐辐照性能[J]. 仪器仪表用户, 2016, 23(2): 65—67.
ZHANG Li-qin, QIU Jian-wen, WANG Jiang-bo, et al. Radiation Resistance of Components and Material of Instruments in Nuclear Power Station[J]. Instrumentation, 2016, 23(2): 65—67.
- [12] BENDER S E, CHERNOV V M, DEMENKOV P V, et al. Electrophysical Processes in MI-cables during Pulsed Irradiation at BARS-6 Fission Reactor[J]. Plasma Devices & Operations, 2003, 11(3): 185—191.
- [13] 唐崇健, 蔡如明, 陈大勇. 矿物绝缘电缆的生产工艺[J]. 电线电缆, 2006(5): 12—18.
TANG Chong-jian, CAI Ru-ming, CHEN Da-yong. The Manufacturing Process for Mineral Insulated Cables[J]. Electric Wire & Cable, 2006(5): 12—18.
- [14] 冯成, 王国权, 吴士杰, 等. 矿物绝缘电缆的生产与应用[J]. 智能建筑与城市信息, 2016(10): 76—78.
FENG Cheng, WANG Guo-quan, WU Shi-jie, et al. Manufacturing and Application of Mineral Insulated Cable[J]. Intelligent Building & City Information, 2016(10): 76—78.
- [15] 高心魁. 大结晶电熔 MgO 的研制 [J]. 耐火材料, 1991(5): 286—290.
GAO Xin-kui. Preparation of Fused Large Grains Magnesite[J]. Refractories, 1991(5): 286—290.
- [16] 肖琳, 张立新, 徐丽艳, 等. 专用 K 型铠装热电偶制作工艺的研究[J]. 功能材料, 2005, 36(11): 1725—1727.
XIAO Lin, ZHANG Li-xin, XU Li-yan, et al. The Production Research for Specified Armoured K-type Thermocouple[J]. Journal of Functional Materials, 2005, 36(11): 1725—1727.
- [17] 肖健松, 林先环, 王章吉. 矿物绝缘电缆应用技术分析 [J]. 机电工程技术, 2005, 34(8): 70—71.
XIAO Jian-song, LIN Xian-huan, WANG Zhang-ji. Application Technology Analysis of Mineral Insulated Cables[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2005, 34(8): 70—71.