

# 氧化镁电缆的绝缘材料特性及载流量评估方法研究

魏燕杰, 刘 英

(西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要:**为研究氧化镁电缆绝缘材料的特性及载流量评估方法,本文首先对氧化镁粉体进行了形貌观测和物相分析,确定其纯度及杂质成分;然后测量了氧化镁粉体的介电及导热性能参数,分析了受潮对材料介电参数的影响;最后提出针对氧化镁绝缘多芯电缆的等效热路模型及载流量简化解析算法,并通过二维数值仿真对解析算法进行了有效性验证。结果表明:干燥氧化镁粉体的体积电阻率在 $10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ 以上,受潮会使其电阻率下降超过1个数量级;在 $10^1 \sim 10^4$  Hz频率范围内,干燥MgO试样的介电常数约为7.9,介质损耗因数约为 $5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$ ,受潮后介质损耗因数明显增大,特别是低频范围增幅明显;干燥MgO试样的电气强度为 $3.5 \sim 4.8 \text{ kV/mm}$ ,不同方法测得的数据有一定分散性;利用简化解析算法可对多芯氧化镁电缆的额定载流量进行准确评估,对于实际工程应用有利。

**关键词:**防火电缆;氧化镁绝缘;材料特性参数;额定载流量

中图分类号:TM215;TM247 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.06.016

## Study on insulating material characteristics of MgO cable and its ampacity evaluation method

WEI Yanjie, LIU Ying

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In order to study the insulating material characteristics of MgO cable and its ampacity evaluation method, in this paper, morphology observation and composition analysis were conducted on MgO powder to determine its purity and inclusions at first. And then the dielectric and thermal characteristic parameters of MgO powder were measured, and the influence of moisture on the dielectric parameters was analyzed. Finally, an equivalent thermal circuit model for MgO insulated multi-core cables and a simplified analytical algorithm for ampacity were proposed, which was validated by a two-dimensional numerical simulation model. The results show that the volume resistivity of dry MgO samples is higher than  $10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ , which can decrease by more than 1 order of magnitude under the effect of moisture. In the frequency range of  $10^1 \sim 10^4$  Hz, the dielectric constant of the dry MgO sample is about 7.9, and the dielectric loss factor is about  $5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$ , which increases significantly after being moisture exposed, especially in the low frequency range. The electric strength of the dry MgO is  $3.5 \sim 4.8 \text{ kV/mm}$ , and the data measured by different methods have a certain degree of dispersion. The rated ampacity of MgO insulated multi-core cable can be evaluated accurately by using the simplified analytical algorithm, which is beneficial to practical engineering applications.

**Key words:** fireproof cables; MgO insulation; material characteristic parameters; rated ampacity

## 0 引言

电线电缆广泛应用于城市建筑当中。在人员密集的住宅或公共场所内,一旦发生火灾,火势将顺着电缆延燃,造成事故扩大,而电缆燃烧产生的烟气毒性很大,威胁人民生命财产安全<sup>[1-2]</sup>,因此在这些应用场合,电缆的阻燃防火性能尤为重要。矿物绝缘电缆(氧化镁电缆)是一种由矿物材料氧化镁粉体作为绝缘的防火电缆<sup>[3]</sup>。相较于普通塑料绝缘电缆,它具有防水、防爆、无烟、无卤、无毒、耐高温、耐腐蚀、机械强度高、使用寿命长等诸多优

点<sup>[4-7]</sup>,被广泛应用于消防供电系统当中。

已有学者针对不同类型氧化镁材料的性能开展了相关研究。J HORNAK等<sup>[8]</sup>对氧化镁纳米颗粒的研究发现,其介电常数和介质损耗因数随着频率的降低和温度的升高均显著增加。W M HAYNES等<sup>[9]</sup>测试表明,烧结氧化镁在 $100^\circ\text{C}$ 时的导热系数为 $36 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ;氧化镁的电阻率与其纯度有关,高纯氧化镁的电阻率可达 $10^{16} \Omega \cdot \text{m}$ 。M R BELKHEDKAR等<sup>[10]</sup>利用化学沉积法制备纳米氧化镁粉体并测试其电阻率,发现当温度从 $373 \text{ K}$ 升高到 $513 \text{ K}$ 时,其电

阻率从  $0.604 \Omega \cdot \text{cm}$  降至  $0.575 \Omega \cdot \text{cm}$ 。A J SLIFKA 等<sup>[11]</sup>测量发现商用烧结多晶氧化镁在温度从 400 K 升高到 1 300 K 时,其导热系数从  $30 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  降至  $8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。上述研究表明,采用不同制备方法获得的氧化镁纳米颗粒或烧结试样,可能为半导体或者绝缘体,其特性存在很大差异。

I O WILSON<sup>[12]</sup>研究了密度、比表面积、杂质含量和热处理对防火电缆用氧化镁粉体紧压试样电导率的影响,发现在氧化镁电缆的灌装紧压密度范围内,其电导率基本不变。除此之外,针对防火电缆用微米级氧化镁粉体绝缘材料的相关研究较少,无设计相关基础数据可查。这可能是由于氧化镁电缆前期使用电压等级不高,输送容量不大,缺乏精密设计的迫切需求;与此同时,粉体材料的相关测试技术不成熟,测试过程复杂且无法获得稳定的结果,限制了相关研究工作的开展。

氧化镁电缆现有电压等级为 500 V 和 750 V,由铜导体、紧压氧化镁粉体绝缘层和铜护套构成,其中紧压氧化镁粉体的密度为  $2.8 \sim 3.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。当应用于易遭受化学腐蚀或工业污染严重的场所时,铜护套外还需挤包一层聚烯烃以进行防腐保护。现有标准 GB/T 13033.1—2007 对氧化镁电缆的结构参数及各项试验要求做出了相关规定<sup>[13]</sup>,JGJ 232—2011 也对氧化镁电缆的敷设条件及运行温度给出了规范性说明<sup>[14]</sup>,当氧化镁电缆敷设于不被人触及的场所时,其允许运行温度可设置为  $105^\circ\text{C}$ 。

近年来,将氧化镁电缆用于更高电压等级、更大传输容量的需求日益增加,而提高运行电压和电流意味着电缆绝缘将承受更高的场强和温度。为了保障线路运行安全,在开展电缆设计之前,必须对氧化镁粉体绝缘的介电及导热性能进行全面测试,获得第一手测量数据,由此确定合理的设计参数。

针对上述需求,本文对防火电缆用氧化镁粉体的电阻率、相对介电常数、介质损耗因数及电气强度等介电性能参数进行测试,对比分析受潮、紧压密度对氧化镁材料各项介电参数的影响。同时测量一定温度范围内氧化镁粉体紧压试样的导热系数,并应用该数据完成典型结构多芯氧化镁电缆允许载流量的设计计算,建立多芯氧化镁电缆的载流量计算方法,以期为工程应用提供理论参考和数据支持。

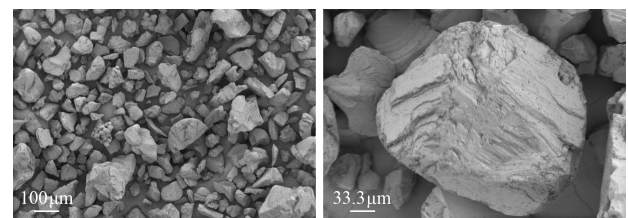
## 1 氧化镁的形貌及成分分析

本文研究对象为防火电缆绝缘用氧化镁粉体

材料,由菱镁矿在  $2\ 300^\circ\text{C}$  的高温下煅烧而成,粉体目数为  $80 \sim 325$ (直径为  $44 \sim 178 \mu\text{m}$ ),桓仁东方红镁业有限公司。不同种类及制备工艺的 MgO 材料其结构形态、纯净度和性能参数均不相同。因此,本文首先对 MgO 材料的形貌及成分进行分析。为了保证待观测 MgO 试样的状态一致性,将 MgO 材料置于温度为  $110^\circ\text{C}$  的烘箱中烘焙 24 h,取出冷却至常温后进行相关试验。

### 1.1 表面形貌观测

采用扫描电子显微镜(VE-9800 型,日本基恩士公司)对氧化镁粉体材料的表面形貌进行观测,具体操作如下:首先用导电胶带将 MgO 固定在样品台上,用吸附球吹拂后,再用高真空离子溅射仪对 MgO 试样进行喷金处理。最后在显微镜下对 MgO 试样进行观察,结果如图 1 所示。



(a)放大 100 倍

(b)放大 300 倍

图 1 不同放大倍数下氧化镁试样的 SEM 形貌图

Fig.1 SEM of MgO sample under two different magnifications

从图 1 可以看出,MgO 颗粒大小、形状不一,直径在几十到近两百微米之间;颗粒表面呈鳞片状,有平行线状条纹。

### 1.2 物相分析

采用 X 射线衍射仪(D8ADVANCEA25 型,德国布鲁克公司)对氧化镁粉体材料进行物相分析, $2\theta$  取  $20^\circ \sim 90^\circ$ ,管电压和电流分别设置为 40 kV 和 40 mA,测试结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,与 MgO 的 JCPDS 标准卡片 PDF#77-2364 对比,MgO 试样的衍射峰与 MgO 晶面指数(111)、(200)、(220)、(311)和(222)的衍射峰吻合,峰窄而尖锐;除此之外未发现其他杂峰,说明该 MgO 粉体材料的结晶度高、纯度较高,杂质较少。

### 1.3 成分分析

为进一步确定该氧化镁粉体材料的纯度及成分,采用 X 射线荧光光谱仪(XRF, Bruker S8 Tiger 型,德国布鲁克公司)对 MgO 试样进行化学分析。MgO 试样为直径为 10 mm、厚度为 1 mm 的圆形试片,由粉体压片机在 4 MPa 压力下压制而成。MgO 试样的 X 射线荧光光谱测试结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,该氧化镁粉体材料的纯度较

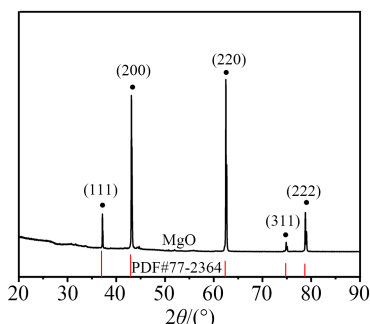


图2 氧化镁试样的XRD衍射图谱

Fig.2 XRD diffraction diagram of MgO sample

表1 MgO试样的X射线荧光光谱测试结果

Tab.1 X-ray fluorescence spectrum results of the

MgO sample							
成分	MgO	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
质量分数/%	91.9	3.49	3.11	0.83	0.33	0.281	0.046

高, MgO质量分数为91.9%。所含杂质成分主要包括 SiO<sub>2</sub>、CaO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 质量分数分别为 3.49%、3.11%、0.83%。

## 2 氧化镁的性能参数测量

### 2.1 绝缘电阻率的测量

#### 2.1.1 采用同轴圆柱两电极的测量结果

针对粉体材料的电阻率测量目前还缺乏专门设备与成熟经验。本研究参考文献[15]设计了一种同轴圆柱形两电极,用于氧化镁粉体的绝缘电阻率测量。该电极结构与氧化镁电缆的铜芯、铜套结构类似,可以模拟氧化镁绝缘在实际电缆中的应用状态。为了体现不同绝缘厚度,本文设计了两套电极,其间隙高度均为200 mm,宽度分别为2 mm和6 mm,后文分别简称为2 mm电极和6 mm电极,其尺寸如表2所示,在灌装氧化镁材料后,即可形成两种厚度的绝缘试样。电极主体为内外两个同轴圆柱导体,均采用红铜制作;两端绝缘封盖,均采用聚四氟乙烯制成。

表2 两个同轴电极的基本尺寸

Tab.2 Dimensions of two coaxial electrodes

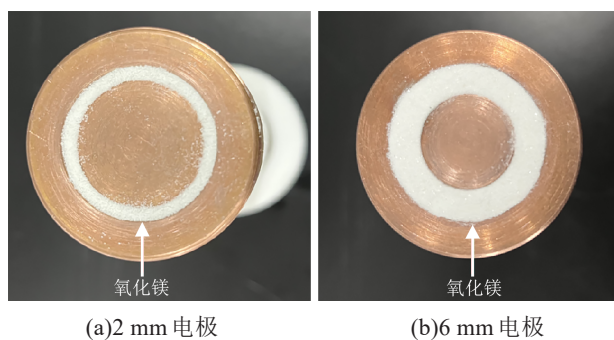
电极名称	电极间隙参数			
	宽度/mm	内径/mm	外径/mm	高度/mm
2 mm 电极	2	25	29	200
6 mm 电极	6	20	32	200

将氧化镁粉体在电极中装配好后,将电极放置于屏蔽装置内,使用高阻计(Keithley 6517B型,美国吉时利公司)测量氧化镁试样的绝缘电阻率。

氧化镁粉体易受潮。为了研究受潮对 MgO 粉

体性能的影响,除前述在温度为110℃的烘箱中烘焙24 h的MgO粉体外(称为干燥试样),另将在温度为50℃、相对湿度为100%的恒温恒湿箱中放置48 h(在24 h时对MgO粉体进行一次搅拌,以实现整体均匀受潮)的MgO粉体作为受潮试样。

将按要求处理好的MgO粉体灌装在同轴圆柱电极中进行测量。灌装前,用酒精对电极进行彻底清洁;灌装过程应尽量快速,并尽量装填密实;当MgO粉体装填至与内外电极端面齐平时,即可盖上盖子并将其拧紧。用电极中灌装的MgO质量除以对应电极间隙的体积,即可得到MgO试样的密度。灌装完成后的电极端面如图3所示。



(a)2 mm 电极

(b)6 mm 电极

图3 试样灌装完成的同轴电极端面

Fig.3 End surfaces of coaxial electrodes with filled samples

常温下在内外两电极间施加1 kV直流电压,测得MgO试样的电阻率如表3所示。从表3可以看出,两个电极中氧化镁试样的灌装密度略有差别,2 mm电极中灌装密度稍高,总体在2.0~2.2 g/cm<sup>3</sup>;常温下MgO粉体材料的电阻率在10<sup>13</sup>~10<sup>14</sup> Ω·m,受潮试样的电阻率相比于干燥试样低1个数量级。

表3 氧化镁试样的绝缘电阻率(同轴电极测量)

Tab.3 The resistivity of MgO samples measured by the coaxial electrodes

电极	样品状态	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	电阻率/(Ω·m)
2 mm 电极	受潮	2.20	2.06×10 <sup>13</sup>
	干燥	2.20	3.94×10 <sup>14</sup>
6 mm 电极	受潮	2.02	1.51×10 <sup>13</sup>
	干燥	2.07	3.01×10 <sup>14</sup>

#### 2.1.2 采用平板三电极的测量结果

采用粉体压片机分别在4 MPa和6 MPa压力下将粉体材料在直径为18 mm的金属环内压制成片状试样,之后组装在三电极系统中进行测量。

在4 MPa及6 MPa压力下压制的MgO试片密度分别为2.43 g/cm<sup>3</sup>和2.56 g/cm<sup>3</sup>,均为10片试样的平均值。采用平板电极测得各试样的电阻率如表4所示。从表4可以看出,压片试样的密度为2.4~

2.6 g/cm<sup>3</sup>,即相比于筒体灌装,压片方式可以提高试样的紧压密度;在该密度范围内,干燥试样的绝缘电阻率约为8×10<sup>12</sup> Ω·m,而受潮试样的电阻率约为1×10<sup>11</sup> Ω·m,受潮后电阻率下降超过1个数量级,绝缘性能变差。

表4 氧化镁试样的绝缘电阻率  
Tab.4 The resistivity of MgO samples

电极	样品状态	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	电阻率/(Ω·m)
平板三电极	干燥	2.43	8.52×10 <sup>12</sup>
	受潮	2.43	1.02×10 <sup>11</sup>
	干燥	2.56	7.57×10 <sup>12</sup>

### 2.1.3 电阻率测量结果分析

将采用同轴两电极和平板三电极系统测得的MgO试样绝缘电阻率数据示于同一个图中,如图4所示。从图4可以看出,两种电极系统测得的MgO试样的电阻率数据具有明显区别,相同状态下(干燥或受潮),平板三电极测得的电阻率数值比同轴两电极测量结果低1.5~2个数量级,目前仍不能确定这是由于试样密度的差异还是电极系统不同导致的结果,需要后续进一步研究。但可以基本确定,不同电极系统测量的电阻率数据不能直接对比,这也和文献中的描述相吻合<sup>[16]</sup>。

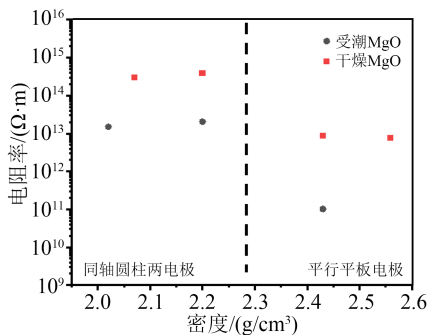


图4 不同电极系统测得的MgO试样绝缘电阻率

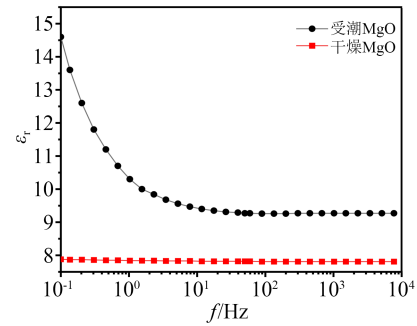
Fig.4 The resistivity data of MgO samples measured by different electrode systems

虽然不同电极测得的电阻率数值有差异,但干燥MgO试样的电阻率均大于10<sup>12</sup> Ω·m数量级,这表明其具有较好的绝缘性能;受潮后MgO试样的电阻率比干燥时均下降超过1个数量级,这是氧化镁粉体与潮气产生水合反应所致<sup>[17]</sup>。说明保持MgO材料的干燥状态对于保持其绝缘性能具有重要意义。

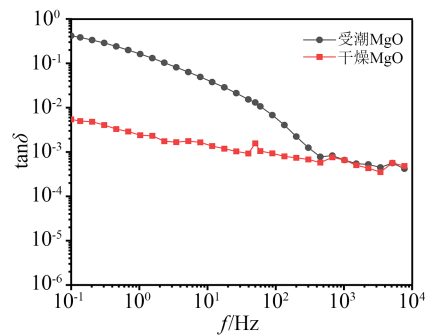
### 2.2 相对介电常数和介质损耗因数的测量

将干燥及受潮的MgO粉体压制直径为10 mm、密度约为2.8 g/cm<sup>3</sup>的薄片试样,并在试样两面进行喷金处理。使用宽频介电和阻抗谱仪(CON-

CEPT 80型,德国Novocontrol公司)对试样进行频谱测量,测试频率范围为0.1~10<sup>4</sup> Hz,温度为25℃,结果如图5所示。



(a)相对介电常数



(b)介质损耗因数

图5 MgO试样的介电频谱

Fig.5 The dielectric frequency spectrum of MgO samples

从图5可以看出,25℃下,干燥MgO试样的介电常数约为7.9,且在10<sup>-1</sup>~10<sup>4</sup> Hz内基本不变;而受潮试样在10~10<sup>4</sup> Hz介电常数基本恒定,约为9.3,但当频率低于10 Hz后,介电常数随频率降低而显著增加,在0.1 Hz时,介电常数增至14.6。两种MgO试样的介质损耗因数在10<sup>-1</sup>~10<sup>4</sup> Hz内均随频率的增加而降低,在500 Hz以上时tanδ数值接近,为10<sup>-4</sup>数量级;但在500 Hz以下时,受潮试样的介质损耗因数随频率减小而增大的速率显著高于干燥试样,在0.1 Hz时受潮试样的介质损耗因数比干燥试样高近2个数量级。受潮导致MgO试样的介电常数和介质损耗因数显著增大,且在低频下更为明显,推测是水分子参与极化的结果。

### 2.3 电气强度的测量

#### 2.3.1 试样制备与试验流程

本研究中尝试采用两种方法开展击穿试验,对氧化镁粉体材料的电气强度进行测量。

##### (1) 压实粉体试样

将干燥MgO粉体置于直径为60 mm的不锈钢器皿中,并采用20 MPa的压力将中部粉体压实为直径50 mm的平整圆片,厚度为1.2~1.4 mm,密度为

2.2~2.5 g/cm<sup>3</sup>。之后,将装有试样的不锈钢器皿放置在铜柱电极上,并将外径为25 mm的不锈钢球电极自然放置于试样表面中心位置。在球-柱电极之间施加交流电压,进行击穿试验。

### (2) 压制片状试样

在MgO粉体中添加聚乙烯醇(PVA)溶液,以增强材料的粘合性,压制成直径为18 mm的薄片试样。将试样放入马弗炉中,以1°C/min的升温速率从40°C升温到250°C,并在250°C下保温8 h进行排胶处理,将试样中添加的PVA分解掉。最终获得密度约为2.8 g/cm<sup>3</sup>的试样10片,由于其中一片试样发生了缺损,仅对外形完好的9片试样采用直径为10 mm的球-球电极进行交流击穿试验。

### 2.3.2 结果与讨论

采用球-柱电极对压实MgO粉体试样测试2次电气强度,结果分别为4.2 kV/mm和4.8 kV/mm。采用压制片状试样在球-球电极下测试,获得9个电气强度数据,将其绘制于Weibull分布图中,如图6所示。

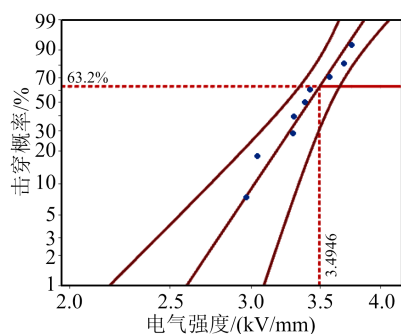


图6 氧化镁片状试样击穿数据的Weibull分布图

Fig.6 The Weibull distribution of breakdown data of MgO plate samples

从图6可以看出,密度约为2.8 g/cm<sup>3</sup>的MgO压片试样的电气强度约为3.5 kV/mm,低于压实粉体试样测得的结果(4.2 kV/mm和4.8 kV/mm)。首先,压实粉体试样的厚度难以准确确定,这势必影响数据;其次,压片试样是否受到PVA的影响,目前尚不确定。从本研究来看,对粉体材料的电气强度准确测量存在较大难度,不同方法测得的数据具有一定分散性,仍需开发更为适用且有效的针对MgO粉体击穿试验的方法及装置。

### 2.4 导热系数的测量

采用激光导热仪(LFA447型,德国耐驰公司)对压制的直径为12.7 mm、密度约为2.8 g/cm<sup>3</sup>的MgO片状试样进行导热系数测量,温度范围为25~280°C,温度间隔为15°C,结果如图7所示,图7中数

据为3个试样测试结果的平均值。从图7可以看出,在25~280°C温度范围内,氧化镁试样的导热系数基本恒定,约为1.28 W/(m·K)。在电缆中应用时MgO粉体的密度为2.8~3.0 g/cm<sup>3</sup>,与本研究中试样密度一致,因此,该导热系数值可直接用于氧化镁电缆的热性能评估。与常用固体绝缘介质如XLPE、PVC、EPDM等相比,MgO材料的导热系数更大,在电缆中作为绝缘使用时,更加有利于电缆散热。

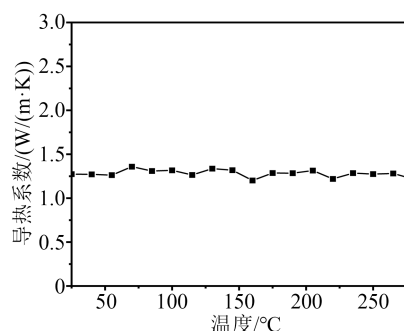


图7 不同温度下氧化镁试样的导热系数

Fig.7 The thermal conductivity of MgO sample under different temperatures

## 3 氧化镁电缆的载流量评估

载流量的准确计算可为运行中负荷的控制提供参考,保证电缆线路的可靠运行,并最大限度发挥其电流输送能力,是反映电缆运行可靠性与经济性的重要参数<sup>[18]</sup>。绝缘材料的导热系数影响电缆载流量<sup>[19]</sup>,氧化镁电缆绝缘层导热系数高、散热好且不具备可燃性,因此氧化镁电缆载流量大且在火灾中具备优异的防火性能,相较传统阻燃防火电缆对保障人们生命财产安全具有更大的优势,期望将其应用于更高电压等级,扩大使用范围,故氧化镁电缆载流量的研究具有重要意义。此外,氧化镁电缆多采用多芯结构,如图8所示,将铜芯置于铜护套内,其间填充氧化镁粉体材料并压紧,线芯之间、线芯与铜护套之间均为氧化镁绝缘。对于这种多芯电缆结构,尚无标准或文献给出适用的载流量评估方法。因此,本文应用在2.4节中实际测量的MgO材料导热系数,对多芯氧化镁电缆开展载流量评估技术研究。

### 3.1 电缆的等效热路

多芯氧化镁电缆的截面如图8所示,其热源主要有导体损耗 $W_c$ 、铜护套损耗 $W_s$ 、以及绝缘介质损耗 $W_d$ 。由于其绝缘结构不规则,电缆的电容、绝缘热阻等难以解析计算。

为了应对这个问题,建立等效单芯简化模型,



图8 氧化镁多芯电缆截面图

Fig.8 Cross-section pictures of multicore MgO cables

其中,等效单个线芯的截面积为多芯电缆中传输电流的多个线芯截面积之和,置于电缆轴心,与铜护套构成同轴结构,中间由MgO绝缘进行填充。以此等效结构计算电缆的电容和绝缘热阻。

以导体截面积 25 mm<sup>2</sup> 的多芯电缆为例计算绝缘介质损耗。氧化镁(2.8 g/cm<sup>3</sup>)试样在 25~125℃ 内介电常数和介质损耗因数变化很小,以干燥 MgO 试样 25℃ 下  $\epsilon_r=7.9$ 、 $\tan\delta=1.57\times 10^{-3}$  的测试结果进行估算,获得两芯、三芯和四芯电缆的绝缘介质损耗因数分别为  $6.11\times 10^{-5}$ 、 $7.70\times 10^{-5}$  和  $6.44\times 10^{-5}$ ,比线芯损耗至少低 5 个数量级,对电缆整体热场的影响很小,因此后续计算中将绝缘损耗  $W_d$  忽略不计。

等效后绝缘层热阻变为电缆内所有通流导体和铜护套之间的共有热阻,根据 IEC 60287:2006<sup>[20]</sup> 推荐解析方法,构建多芯电缆的等效热路模型如图 9 所示。图 9 中,  $\theta_c$ 、 $\theta_s$ 、 $\theta_0$  分别为线芯、铜护套以及周围环境温度,  $T_1$ 、 $T_4$  分别为绝缘及周围媒质热阻,  $\lambda_1$  为铜护套损耗与线芯损耗之比,  $W_c$  为线芯损耗,  $n$  为电缆中通流导体数。

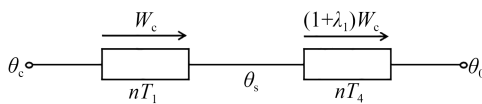


图9 多芯MgO电缆的等效热路模型

Fig.9 Equivalent thermal circuit model of multicore MgO cable

### 3.2 载流量的解析计算方法

等效单芯电缆的绝缘层热阻计算公式为式(1)。

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln\left(\frac{D_i}{D_c}\right) \quad (1)$$

式(1)中:  $\rho_T$  为 MgO 绝缘的热阻系数,根据 2.4 节中测试结果,取 0.78 K·m/W;  $D_i$  和  $D_c$  分别为绝缘的外径和内径,mm。

四芯电缆中正常工作时仅有三根通流导体,故其绝缘热阻如按式(1)进行计算会导致绝缘面积比实际绝缘面积大一个线芯导体截面积,从而导致热

阻偏大,故这里引入修正系数  $k$ ,对四芯电缆的等效绝缘热阻进行修正,如式(2)所示。

$$k = \frac{\pi\left(\frac{D_s}{2}\right)^2 - 4A}{\pi\left(\frac{D_s}{2}\right)^2 - 3A} \quad (2)$$

式(2)中:  $D_s$  为铜护套内径,mm;  $A$  为等效前电缆中单根导体截面积,mm<sup>2</sup>。

四芯电缆绝缘热阻计算公式为式(3)。

$$T_1 = k \frac{\rho_T}{2\pi} \ln\left(\frac{D_i}{D_c}\right) \quad (3)$$

氧化镁电缆通常为空气中敷设,周围媒质热阻采用式(4)计算。

$$T_4 = \frac{1}{\pi D_c h (\Delta\theta_s)^{1/4}} \quad (4)$$

$$h = 0.88 \left( \frac{Z}{D_c^g} + E \right) \quad (5)$$

式(4)~(5)中:  $h$  为散热系数;  $D_c$  为电缆外径,m;  $\Delta\theta_s$  为电缆表面相对于环境的温升,K;  $Z$ 、 $E$ 、 $g$  为常数,此处  $Z=0.21$ ,  $E=3.94$ ,  $g=0.60$ <sup>[21]</sup>。

基于图 9 中的等效热路模型,多芯 MgO 电缆的载流量计算式为式(6)。

$$I = \sqrt{\frac{\theta_c - \theta_0}{nR [T_1 + (1 + \lambda_1)T_4]}} \quad (6)$$

电缆敷设于空气中,护套两端接地,环境温度  $\theta_0 = 30^\circ\text{C}$ 。式(6)中的线芯交流电阻  $R$  以及铜护套损耗系数  $\lambda_1$  均按照 IEC 60287:2006 中的公式进行计算,此处不再赘述。

裸露的氧化镁电缆敷设于不被人触及的场所时,其最高持续工作温度允许值为:铜护套温度 105℃<sup>[22]</sup>。常规电缆载流量评估均以线芯允许最高温度为依据,以护套温度允许值为依据将导致计算变得复杂,过程中需反复迭代;而且,由于氧化镁材料导热系数高,护套与线芯温差小(测算显示不超过 3℃)。因此为了简化计算,以线芯温度允许值  $\theta_c = 105^\circ\text{C}$  进行载流量评估,对于不同截面积的 750 V 多芯氧化镁电缆,结果如表 5 所示。

### 3.3 仿真实验

为了对多芯氧化镁电缆允许载流量的简化解析法计算结果进行验证,利用 Comsol Multiphysics 建立电缆的二维仿真模型,以线芯截面积为 25 mm<sup>2</sup> 的 750 V 多芯电缆(无绝缘外护套)为例,开展热场分析和载流量评估。

基于 GB/T 13033.1—2007<sup>[13]</sup>,确定两芯至四芯电缆的基本结构及热学参数如表 6 所示。

表5 基于等效热路计算的MgO电缆允许载流量

Tab.5 The ampacity results of MgO cables based on the equivalent thermal circuit model

截面积/mm <sup>2</sup>	载流量/A		
	两芯	三芯	四芯
1	26	22	22
1.5	33	27	28
2.5	43	36	37
4	58	48	50
6	73	61	63
10	101	85	87
16	134	113	117
25	178	150	155

表6 多芯MgO电缆的结构及热学参数

Tab.6 Structural and thermal parameters of the multicore MgO cables

电缆类型	结构名称	厚度/mm	内径/mm	外径/mm	导热系数/(W/(m·K))
两芯	铜导体	—	—	5.64	400
	绝缘层	1.30	—	15.4	1.28
	铜护套	0.85	15.40	17.1	400
三芯	铜导体	—	—	5.64	400
	绝缘层	1.30	—	16.46	1.28
	铜护套	0.87	16.46	18.2	400
四芯	铜导体	—	—	5.64	400
	绝缘层	1.30	—	18.24	1.28
	铜护套	0.93	18.24	20.1	400

在热场模型中,电缆是唯一热源,其发热来自于导体焦耳损耗、绝缘介质损耗和铜护套损耗;散热过程包含热传导、热对流和热辐射。有、无热源区域的导热控制方程分别如式(7)和式(8)所示<sup>[23-24]</sup>。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y^2} + q_v = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y^2} = 0 \quad (8)$$

式(7)~(8)中: $T$ 为热场中 $(x,y)$ 点的温度,K; $q_v$ 为体积发热率,W/m<sup>3</sup>。

传热问题有以下3类常见的边界条件:第一类边界条件是恒温边界条件,边界上温度值为已知量;第二类边界条件是绝热边界条件,边界上的热流密度值为已知量;第三类边界条件已知量为周围流体的温度值和物体表面与周围流体间的表面传热系数,这里用电缆与空气的接触面用来表征求解域外热对流对温度分布的影响,可表示为式(9)。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_n - T_w) \quad (9)$$

式(9)中: $\lambda$ 为导热系数,W/(m·K); $h$ 为换热系数,W/(m<sup>2</sup>·K); $T_n$ 为电缆表面温度,K; $T_w$ 为周围环境(空气)温度,K。

此外,电缆表面与外界环境间还发生辐射换热,属于辐射边界条件,可表示为式(10)。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon \sigma (T_n^4 - T_w^4) \quad (10)$$

式(10)中: $\varepsilon$ 为物体表面热辐射系数; $\sigma$ 为斯特藩-玻尔兹曼常量,其值为 $5.67 \times 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>·K)。

电缆表面热辐射系数取 $0.65^{[25]}$ ,电缆与周围空气的换热系数取 $10$  W/(m<sup>2</sup>·K)<sup>[26]</sup>,在环境温度为 $30^\circ\text{C}$ 条件下,当线芯温度达到 $105^\circ\text{C}$ 时,其负载电流即为额定允许载流量。

在额定负载下线芯温度达到 $105^\circ\text{C}$ 时两芯、三芯及四芯电缆的热场分布如图10所示,各电缆的允许载流量如表7所示,表中同时列出了对应解析解进行比较。

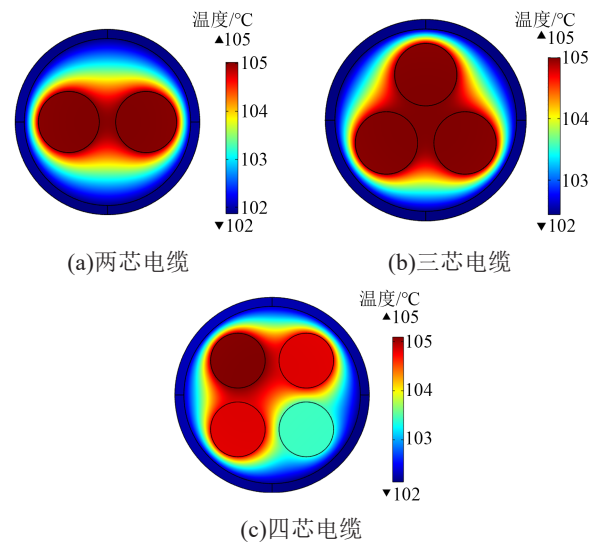


图10 多芯氧化镁电缆满载运行时的热场分布  
Fig.10 Thermal field distribution of the multicore MgO cables with full load

表7 电缆载流量的解析法与数值法结果对比

Tab.7 Comparison of cable ampacity results obtained by analytical and numerical method

电缆类型	允许载流量/A		偏差/%
	解析法	数值法	
两芯	178.4	182.3	2.14
三芯	150.0	154.4	2.85
四芯	155.4	162.0	4.07

从表7可以看出,均以线芯允许温度 $105^\circ\text{C}$ 为依据,解析法与数值法给出的电缆载流量计算结果接近,相对偏差不超过5%,说明文中所建立的简化等

效解析算法可为多芯 MgO 电缆提供较为准确的载流量评估结果。以线芯允许温度为 105℃ 代替护套允许温度为 105℃ 进行设计, 结果略偏于保守, 这对于电缆的安全运行是有利的。

此外, 利用仿真模型还对铜护套允许温度为 105℃ 的电缆允许载流量进行了计算, 获得两芯、三芯、四芯氧化镁电缆的计算结果分别为 185.8、156.8、164.7 A, 与表 7 中简化解析法所得结果的偏差分别为 4.15%、4.53%、5.98%, 均未超过 6%。

## 4 结论

(1) 密度为 2.0~2.6 g/cm<sup>3</sup> 的干燥氧化镁粉体的绝缘电阻率为  $8 \times 10^{12} \sim 4 \times 10^{14} \Omega \cdot m$ , 受潮后下降超过 1 个数量级; 0.1~10<sup>4</sup> Hz 范围内干燥氧化镁粉体的介电常数约为 7.9, 受潮后增大至 9.3~14.6; 介质损耗因数为  $5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$ , 受潮后显著增大, 0.1 Hz 下增大近 2 个数量级。

(2) 紧压氧化镁粉体的工频电气强度为 3.5~4.8 kV/mm, 不同方法测得的数值有一定偏差。

(3) 25~280℃ 范围内紧压氧化镁粉体的导热系数约为 1.28 W/(m·K), 可用于氧化镁电缆的热性能分析。

(4) 基于等效单芯结构、以线芯允许温度替代护套允许温度推导的解析方法可用于多芯氧化镁电缆的额定载流量计算, 误差不超过 6%, 满足工程应用需求。

## 参考文献:

- [1] 张佳庆, 范明豪, 李伟, 等. 防火电缆燃烧和毒性气体释放特性研究[J]. 绝缘材料, 2016, 49(8): 72-77.
- [2] 关键, 虞鑫海. 无卤阻燃电缆料的研究现状[J]. 绝缘材料, 2014, 47(3): 1-3.
- [3] 高永强. 矿物绝缘电缆的应用及思考[J]. 智能建筑与智慧城市, 2021(5): 118-120.
- [4] 黄通. 矿物绝缘电缆施工技术[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(22): 68-70.
- [5] 于峰. 矿物绝缘电缆施工方法探讨[J]. 建筑电气, 2018, 37(8): 44-49.
- [6] 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.
- [7] 蒋仁章, 范涛, 田鸣. B1 级柔性矿物绝缘防火电缆的设计[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2018(6): 18-22.
- [8] HORNAK J, TRNKA P, KADLEC P, et al. Magnesium oxide nanoparticles: Dielectric properties, surface functionalization and improvement of epoxy-based composites insulating properties[J]. Nanomaterials, 2018, 8(6): 381-397.
- [9] HAYNES W M, LIDE D R, BRUNO T J. CRC handbook of

chemistry and physics[M]. London: CRC Press, 2016.

- [10] BELKHEDKAR M R, SALODKAR R V, SAVE G P, et al. Structural and electrical properties of magnesium oxide nanoparticles synthesized by chemical co-precipitation method[J]. International Journal of Researches in Biosciences, Agriculture & Technology, 2015(2): 92-96.
- [11] SLIFKA A J, FILLA B J, PHELPS J M. Thermal conductivity of magnesium oxide from absolute, steady-state measurements[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 1998, 103(4): 357-363.
- [12] WILSON I O. Magnesium oxide as a high-temperature insulant [J]. IEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews), 1981, 128(3): 159-164.
- [13] 全国电线电缆标准化技术委员会. 额定电压 750V 及以下矿物绝缘电缆及终端 第 1 部分 电缆: GB/T 13033.1—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部公告. 矿物绝缘电缆敷设规程: JGJ 232—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [15] FETTERLEY G H. High temperature resistivity measurements on compressed granular refractory materials[J]. Transactions of The Electrochemical Society, 1943, 83(1): 191-204.
- [16] 邱昌容, 曹晓珑. 电气绝缘测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [17] 李茹. 氧化镁粉体的制备与改性及其绝缘性能[D]. 内蒙古: 内蒙古工业大学, 2013.
- [18] 李红发, 程绍兵, 王金城, 等. 回填低热阻材料对排管敷设电缆载流量的提升研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(3): 84-92.
- [19] 李进, 王义方, 孔晓晓, 等. 电动汽车用高导热车载线温度场分布与载流量分析[J]. 绝缘材料, 2021, 54(2): 68-74.
- [20] International Electrotechnical Commission. Electric cables - calculation of the current rating - Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses-General: IEC 60287-1-1:2014[S]. Geneva: IEC, 2014.
- [21] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [22] 赵德鱼. 矿物绝缘电缆的结构特性及敷设应用[J]. 消费电子, 2021(8): 64, 66.
- [23] 李萌, 牛胜锁, 刘玉芹, 等. 基于多场耦合模型的海底电缆载流量和温度场计算研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(8): 12-16, 23.
- [24] 陈向荣, 王启隆, 于竞哲, 等. 10kV 交流 XLPE 电缆在不同直流拓扑结构和敷设方式下的直流载流量仿真研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(11): 4044-4054.
- [25] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [26] 李昭红. 高压直流 XLPE 绝缘电缆中间接头电热耦合仿真研究和稳态载流量计算[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.

收稿日期: 2023-06-16; 修回日期: 2023-06-28。

作者简介: 魏燕杰(1998-), 女(汉族), 山东聊城人, 硕士生, 主要从事电缆绝缘材料性能分析及载流量计算的研究工作; 刘英(1976-), 女(汉族), 四川资阳人, 教授, 主要从事绝缘结构设计及性能测试、电缆工程计算及状态评估等方面的研究。