

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.10.024

斥力机构中固定线圈的环氧板材弯折问题研究

董润鹏, 庄劲武, 武 瑾, 袁志方, 胡鑫凯
(海军工程大学电气工程学院, 武汉 430033)

摘要:文中针对高速电磁机构中固定斥力线圈的环氧板材在通过多次大电流冲击后出现的弯折或开裂这一问题,基于有限元方法,将电磁场与结构力场进行耦合求解,解释了环氧板材的弯折原因,讨论了相关结构尺寸对板材内应力分布的影响规律;根据影响规律对斥力线圈的固定形式进行改进,提出采用圆周约束替代原四角约束,并讨论了在环氧板材下端增加经过径向切割的金属板的可行性。最后,设计两组工程样机,进行了大电流下环氧板材冲击实验及圆周约束形式的机构耐受实验。仿真及实验结果表明:相比于四角固定形式,圆周约束的环氧板材内部应力分布更加均匀,且在相似应力分布下板材的结构尺寸更小。

关键词:电磁斥力机构;多物理场分析;斥力线圈固定;结构优化

Research on Bending of Epoxy Plate for Fixing Coils in Electromagnetic Repulsion Mechanism

DONG Runpeng, ZHUANG Jinwu, WU Jin, YUAN Zhifang, HU Xinkai
(College of Electric Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In this paper, the electromagnetic field and structural field are coupled in frequency domain based on finite element method (FEM) to explain the phenomena that epoxy plate which is fixed coils in high-speed electromagnetic repulsion mechanism will bend or fracture after passing through high current with high frequency several times, besides that the influence of relevant structural dimensions on the stress distribution in epoxy plate is discussed. According to the influence law, the constraint form of coils is improved, and the circular constraint form replace the original four corner constraint proposed, in addition the feasibility of adding radial cutting metal plate to the lower end of epoxy plate is discussed. Finally, two prototypes were designed and the impact test under high current and the mechanism withstand test of new constraint form were carried out. The FEM and experimental results show that the stress distribution in epoxy plate with circular constraint is more uniform compared with corner constraint. Moreover, under similar stress distribution, the structural size of the plate with circular constraint is smaller.

Key words: electromagnetic repulsion mechanism; multi - physical field analysis; fixation of repulsion coil; structural optimization

0 引言

随着舰船电力系统容量等级的不断提升,其对短路保护装置的开断能力提出了更高要求^[1-2]。混合型真空断路器是目前舰船中压电力系统中应用最为广泛的保护装置,电磁斥力机构凭借其快速性和稳定性常作为真空断路器的分闸机构,它可以在2~5 ms内完成相对较长开距,保证短路电流的快速

分断^[3-6]。

斥力机构最早于1969年由Samir Basu和K. D. Srivastava^[7]提出,在20世纪90年代由日本富士电机公司投入工程使用^[8],并作为快速分闸机构逐步在不同电压等级的断路器中应用。对于斥力机构的设计优化,早期的研究将斥力盘等效为多匝线圈并以此建立等效电路方程^[9-14],通过求解方程获得斥力线圈的电流特性及斥力盘的位移特性。随着有限

元软件的普及,大量文献^[15-18]基于二维有限元方法讨论了斥力盘厚度、线圈匝数、气隙对不同行程及电压等级下的斥力机构运动特性的影响规律并提出若干设计原则。

但实验中后发现,当大电流多次通过斥力线圈后,固定线圈的环氧板材常会出现开裂或弯折现象。而对于斥力机构的多物理场研究,研究重点多集中在热场及流场对斥力机构运动特性的影响^[19-23],对于斥力机构中电磁场与结构场的耦合问题的研究仅限于运动过程中斥力盘的振动,目前尚无文献讨论斥力线圈周围环氧板材的约束方式对其应力分布的影响规律。

文中即针对环氧板材弯折问题,通过有限元方法,将电磁场与结构力场进行耦合求解,讨论了在峰值电流时刻,环氧板内的应力分布及最大垂向位移,解释了环氧板材的弯折原因;讨论了影响环氧板弯折的若干因素,并以此为依据提出了一种对约束环氧板材的新结构;最后,通过样机实验验证了有限元方法的准确性及新型约束形式的可行性。

1 高速电磁斥力机构及环氧板材的固定形式

线圈—盘式电磁斥力机构的典型结构,见图1。其中斥力线圈的激励源为电容配合晶闸管组件,电容放电后,基于涡流效应斥力盘中会产生高电磁斥力带动斥力盘、中间轴及触头结构完成分闸运动。

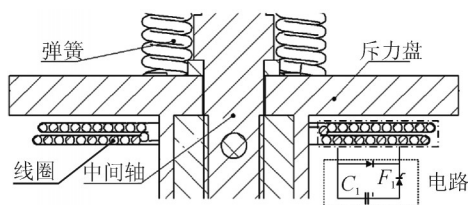


图1 电磁斥力机构

Fig. 1 Electromagnetic repulsion mechanism

铜导线经过双层绕成斥力线圈被环氧胶浇筑在环氧板中,目前对环氧板最为常见的固定方式,见图2^[18],在环氧板四角开孔,通过螺栓配合固定,文[3,16-21]中均采用此方法固定。



图2 斥力线圈及环氧板材的固定

Fig. 2 Fixation of coils and epoxy sheets

2 环氧板材的弯折分析

2.1 有限元模型

基于COMSOL Multi-physics 5.4有限元软件,分析四角固定的环氧板材在洛伦兹力作用下的应力分布,进而探究环氧板材发生形变或弯折的原因。由于计及涡流的三维瞬态仿真计算量巨大,文中通过频率仿真以获得环氧板材在峰值电流及初始放电频率下的应力分布。

通过求解电磁场模块,获得在特定电流下斥力线圈内部的电流密度及磁感应强度并计算此时线圈内的洛伦兹力,其控制方程为式(1)~(4)。将斥力线圈受到的洛伦兹力加载到线圈上,通过对结构力场的求解,获得环氧板材中的应力分布,控制方程为式(5)。

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\sigma \cdot \mathbf{E} = \mathbf{J} \quad (3)$$

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} = \mathbf{F}_l \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{F}_v = 0 \quad (5)$$

式(1)~(5)中: $\mathbf{B}$ 表示磁感应强度; $\mathbf{A}$ 表示矢量磁位; $\mathbf{J}$ 表示电流密度; σ 表示材料电导率; $\mathbf{S}$ 表示应力张量; $\mathbf{F}_v$ 表示作用在环氧板上的力。

环氧板材模型尺寸示意图,见图3,根据实际工程状况,在结构力场的求解中,环氧板材的四角圆周设置为固定约束,洛伦兹力加载于多匝线圈处,环氧板材的其余面为自由端面。

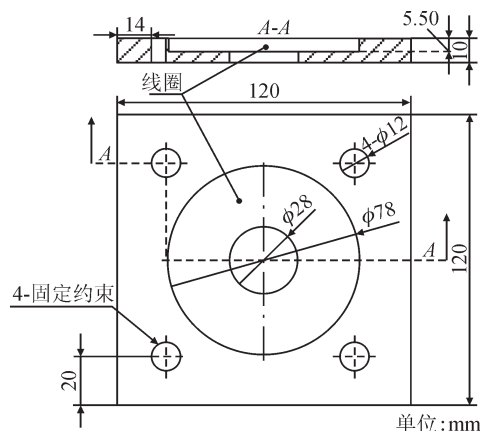


图3 模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the model

图3中所示的线圈位置表示线圈及周围环氧胶尺寸,线圈直径为2mm,环绕的内直径为28mm,采用铜材料,绕制双层线圈,每层10匝,线圈与环氧板材的间隙通过环氧胶连接。工程上环氧板材通过

玻璃纤维布层叠制作,因此除层间抗剪切强度相对薄弱外,其余方向的力学性能优良。分析斥力线圈及环氧胶对环氧板材的压力时,可认为其无层间剪切应力。为方便计算,认为环氧胶和环氧板材为同种材料且各向同性,其泊松比及杨氏模量分别为0.35和3 GPa;铜导线电导率为 5.998×10^7 S/m,泊松比为0.34,杨氏模量为126 GPa。斥力盘选取铝合金,电导率为 2.326×10^7 S/m。

2.2 弯折分析

在斥力线圈上端有金属盘时,基于涡流效应原理斥力盘内部会感应出与多匝线圈内电流方向相反的感应涡流,两者间又会产生方向相反的电磁力,作用于斥力盘上的电磁力会将其向上弹开,作用于斥力线圈上的电磁力将会对固定它的环氧材料向下挤压。而此时斥力盘及斥力线圈受到的最大电磁力有关。

通电电流7 kA,频率为2 kHz时,环氧板的应力分布见图4,为方便观察形变趋势,将环氧板材形变量放大5倍。

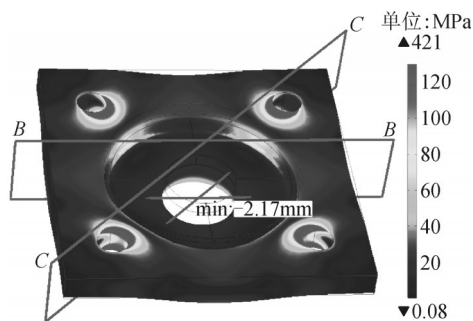


图4 环氧板材的应力分布

Fig. 4 Stress distribution of epoxy plate

由图4中可以看出,斥力线圈下部的环氧板材及板材四边的中心部分向下凹陷,板材内最大应力为421 MPa,最大垂向位移出现在板材最内侧,为2.17 mm。

将板材沿B-B和C-C剖面切割后,沿B-B剖面的斥力盘、斥力线圈的电流密度分布(穿过平面)及板材内的应力分布,见图5;C-C剖面的斥力盘、斥力线圈的洛伦兹力分布(z 方向)和环氧板材内的应力分布见图6。图中线圈及环氧板材的间隙为环氧胶,环氧胶在图中并未显示。

由图5、6可以看出斥力盘中涡流效应及洛伦兹力分布较高的区域;对于环氧板材剖面的应力分布,在B-B剖面,最内侧下端的应力最大,在50 MPa左右,其余部分的应力分布在20~30 MPa之间;在C-C剖面,固定端约束靠近线圈侧的应力最大,在200 MPa以上,并随着 r 方向的向内逐渐减少。固定

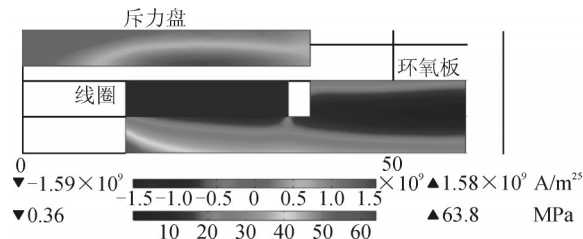


图5 B-B剖面的电流密度及应力分布图

Fig. 5 Current density and von Mises stress of profile B-B

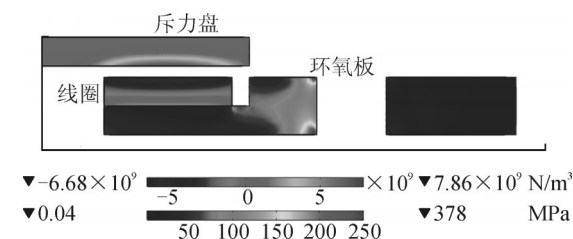


图6 C-C剖面的磁感应强度及电流密度矢量图

Fig. 6 Lorentz fore and von Mises stress of profile C-C

端约束远离斥力线圈一侧的应力较低,在10~20 MPa之间。因此金属盘内的感应涡流与斥力线圈间产生的高电磁力是造成环氧板向下弯折这一现象的原因。

2.3 板材弯折的影响因素

保证线圈间的电磁力不变,即固定斥力线圈和斥力盘参数及激励电流的数值和频率,考虑若干结构条件的改变对包裹斥力线圈的环氧板材应力分布和最大位移的影响。

2.3.1 改变板材外边缘尺寸

改变环氧板材整体结构,将120 mm×120 mm的环氧板材更改为110 mm×130 mm,固定约束约束及中间线圈结构相对于中心无变化,改变板材整体结构后的应力分布图见图7。

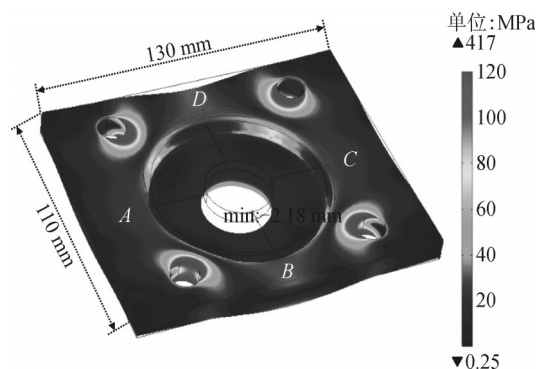


图7 边长不同时环氧板材的应力分布

Fig. 7 Stress distribution of epoxy plate with different side length

由图7可知,边长尺寸改变后,环氧板材内部应力分布及最大垂向位移几乎无变化,但其长边侧(B、D)的应力较短边侧(A、C)的应力更大。

2.3.2 改变固定约束的中心距离

图3中相邻固定约束圆柱的中心距离为80 mm,改变相邻固定约束圆柱的中心距离为70 mm和90 mm后,环氧板材内的最大应力分别为348 MPa和496 MPa,最大垂向位移分别为1.26、3.43 mm。3组模型中环氧板材沿B-B切向的应力分布,见图8。

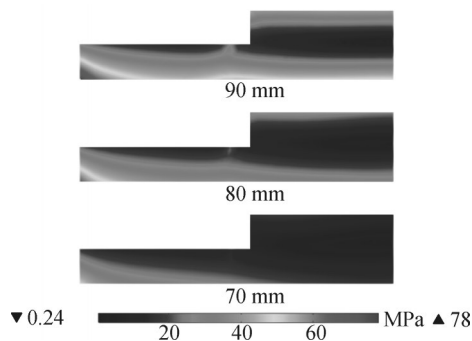


图8 改变约束中心距离的B-B剖面应力分布

Fig. 8 Stress distribution of profile B-B with different constraint center distance

由图8可知,对于四角圆柱方式约束的斥力机构,其固定约束圆柱中心距离越小,环氧板材内部的应力越小,最大位移越小,环氧板材越不易发生弯折。

2.3.3 增加约束数量

将环氧板材中的约束数量从4个,增加为8个,即在板材各边距离中心50 mm处增加一个固定约束端,其余参数保持不变。增加4组约束后,环氧板材内最大应力由417 MPa减少到285 MPa,最大垂向位移由2.17 mm减小到1.12 mm。环氧板材沿C-C切的剖面,见图9。

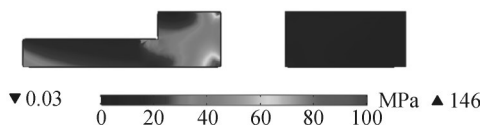


图9 增加约束数量时C-C剖面的应力分布

Fig. 9 Stress distribution of C-C profile with increasing the number of constraints

对比图6、9可知,增加斥力盘的固定约束数量后,C-C剖面的应力降低,其中B-B向剖面的约束端靠近中心一侧的应力大致为20~40 MPa。

综上所述,对于常用的四角固定的斥力线圈固定结构,增加固定端约束数量或将固定约束内移可以有效的减小应力及板材的最大垂向位移。此外,增大环氧板材的厚度自然也会减少环氧板材内的应力。

3 改进方案

根据环氧板材的应力分布与固定端约束的关

系,改变环氧板材的约束形式,并在环氧板材下端增加杨氏模量更高的金属材料,以改善板材内部的分布。

3.1 圆筒固定方式

根据图4、8中环氧板材的应力分布可知,应力集中现象出现在固定端靠近斥力盘一侧,同时增加固定端约束数量却可以降低应力分布。放弃四角圆柱的固定形式,改为环圆周固定,即在工程上变为环氧套筒的形式,其约束形式见图10,即环氧板材外边缘及上部为固定约束。

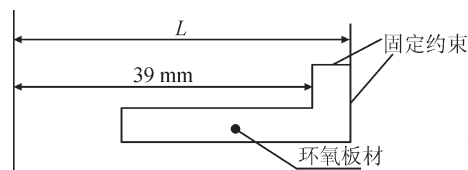


图10 圆周固定约束形式

Fig. 10 Circumferential fixed constraints

采用二维轴对称方式对模型进行有限元分析,环氧板材边缘距中心的距离 L 尺寸分别为41、43、45 mm时,斥力线圈与斥力盘的相对位置及尺寸仍如图3所示,环氧板材的应力分布及最大位移见图11。

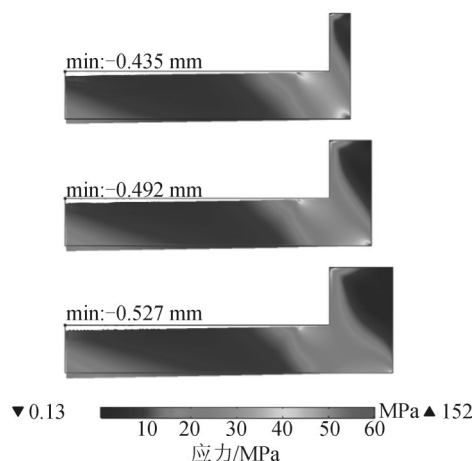


图11 圆周固定的应力分布

Fig. 11 Stress distribution with circumference constraint

由图11看出,采用圆周约束后环氧板材内部的应力分布较为均匀,没有出现大规模的应力集中现象,最大应力出现在环氧板材与斥力线圈外部交界的上端和环氧板材下部的外边缘。随着 L 尺寸的不断增加,环氧板材内部的应力分布有减弱的趋势,但变化量不大,大部分应力处于15~35 MPa之间;3组机构的最大垂向位移均发生在板材的最内侧,数值分别为0.44、0.49、0.53 mm。通过对比图5、6和11中两种固定形式下板材的应力分布可知,对于相同厚度的环氧板10 mm,使用四角固定的板材尺寸为120 mm的正方形,使用圆周固定的板材尺寸的最

大半径为 90 mm, 此时后者的应力分布仍然远小于前者, 说明无论从板材的使用寿命或整体的尺寸大小而言, 使用圆周固定的效果更优。

3.2 加装金属盘

文[23]中指出, 在斥力盘下端及两侧增加导磁材料可改善磁路进而提高机构工作效率, 因此文中加装的金属材料选取电气用硅钢片, 电导率为 2.5×10^6 S/m, 杨氏模量为 128×10 Pa。仍然采用圆周固定形式, L 为 43 mm。在环氧板材下端加装 3 mm 的金属板材, 不考虑硅钢片之间的绝缘层影响, 电流 7 kA, 频率为 2 kHz 下, 13 mm 的环氧板材与下端放置硅钢片的 10 mm 环氧板材的应力分布见图 12(a), 3 mm 金属板材内的应力分布见图 12(b)。

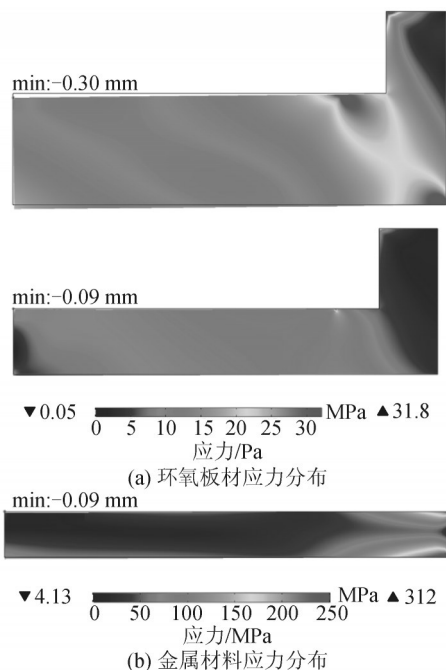


图 12 增加金属板后应力分布

Fig. 12 Stress distribution after increasing metal plate

由图 12 中可以看出, 增加金属板材后, 与 13 mm 厚度环氧板材相比, 10 mm 厚的板材应力降低, 金属板内最大应力在 200~250 MPa; 环氧板材的最大垂向位移由 0.30 mm 减小到 0.09 mm, 可见增加金属板材确实可有效降低环氧板内的应力及其最大垂向位移, 但由于金属材料本身存在电导率, 加装后下端金属板中必然产生感应涡流, 增加金属盘前后斥力盘中的感应涡流(穿过平面方向), 见图 13(a)、13(b)是增加的金属盘内部的涡流。

由图 13 可知, 在 10 mm 环氧板材下端增加金属板后, 斥力盘内部电流密度有所降低; 此时金属板内的最大电流密度约为斥力盘最大电流密度的 1/10。增加金属盘前后, 斥力盘受到的电磁力分别为 31.0、28.3 kN。为抑制涡流效应的产生, 考虑在金属板材

涡流方向进行切割, 见图 14。

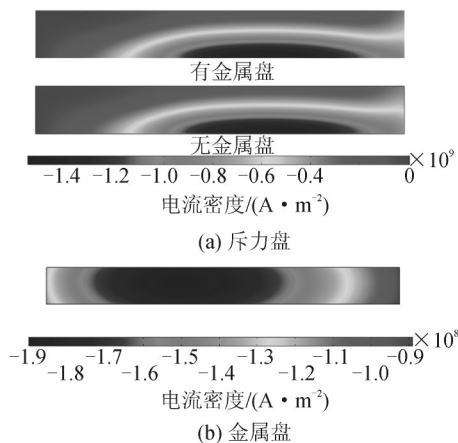


图 13 电流密度分布

Fig. 13 Current density in plate

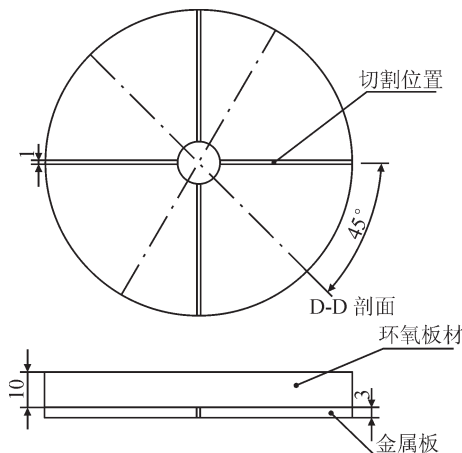


图 14 金属板切割

Fig. 14 Metal plate cutting

经过切割后的金属板材在电流 7 kA, 频率为 2 kHz 下, 应力分布见图 15, D-D 剖面的金属板电流密度分布见图 16。



图 15 增加金属盘后环氧板材应力分布

Fig. 15 Stress distribution of epoxy plate after increasing metal plate

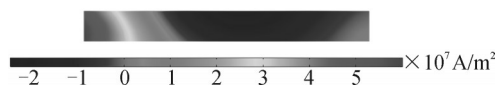


图 16 金属板内电流密度

Fig. 16 Current density in metal plate

对比图 12 及 15 可知, 在金属板增加 4 组切割后, 环氧板材的应力分布几乎无变化。对比图 13(b)

与图16可知,金属盘切割后,其内部的感应涡流仅为之前的十分之一。不同电流下,斥力盘在2D及3D中的电磁力数值仿真结果见表1。

表1 电磁力对比

Table 1 Electromagnetic force contrast

电流/A	电磁力/kN			
	2D	3D 无金属板	3D 有金属板	3D 有切割金属板
5 000	15.4	15.8	14.5	15.8
6 000	22.1	22.8	20.8	22.7
7 000	30.1	31.0	28.3	30.9

根据表2结果可知,由于网格剖分问题,在相同电流下,电磁力的二维与三维有限元结果有微小差异;但对比增加切割前及切割后电磁力可知,经过沿轴向切割的金属板材内的涡流下降明显,斥力盘的电磁力与未增加金属盘时近似。

综上所述,对于峰值电流及较大的斥力机构,在斥力线圈的固定中,可以采用环氧板材下端加装径向切割后金属盘的方式,既保证了机构的快速性,也保证了斥力线圈及周围环氧板材在大电流冲击下的使用寿命。

4 实验

根据有限元结果,制作工程样机,观测在大电流冲击下四角固定的环氧板材的弯折区域,以验证有限元方法及结论的准确性;之后设计圆周固定约束的工程样机并进行寿命试验。

4.1 大电流冲击实验

经过环氧胶固封在环氧板中的斥力线圈及环氧板材,见图17,板材四角开孔配合螺栓固定。

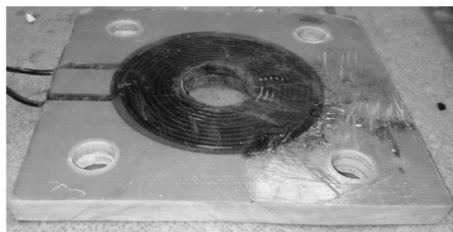


图17 斥力线圈及环氧板材

Fig. 17 Repulsion coil and epoxy plate

采用电容串联晶闸管组件,对斥力线圈进行放电,其峰值电流为12 A,电容放电频率约为1 600 Hz,板材尺寸为130 mm×110 mm,板材厚度10 mm。通过一次较大电流冲击观察环氧板材的弯折趋势,冲击过后环氧板材,见图18。

根据图18可知,环氧板材在长边130 mm侧中间部位,平行于短边110 mm出现裂痕,而在出线端口一侧及其对侧尚未出现裂痕,这与仿真获得的结

果趋势相吻合。说明对于边长不同的环氧板材,在经过多次试验后,长边侧中间位置最易发生弯折。

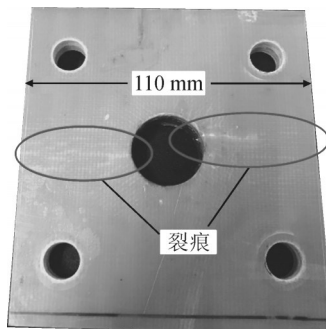


图18 环氧板材的裂痕

Fig. 18 Cracks in epoxy plate

4.2 圆周约束结构样机实验

某型中压舰船用高速电磁斥力机构,其环氧板材整体尺寸为(140×140×20) mm³,激励源采用200 μF电容充电1 500 V时,峰值电流4 500 A,可通过5 000次耐受实验。根据有限元结果,设计圆周约束结构,环桶外边缘直径为115 mm,包裹线圈的环氧板材厚度为15 mm,两组斥力盘的外形尺寸及经过5 000次耐受试验后的圆周形式的机构,见图19。

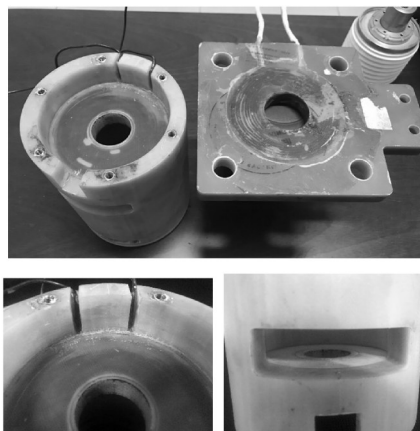


图19 样机示意图

Fig. 19 Schematic diagram of prototype

图19中,环氧板材边缘尽量紧贴线圈;在环氧筒上垂直开口,通过挖槽进行线圈的出入线,下端并未加装金属板材;经过5 000次耐受试验后环氧板材并未发生明显变形,而斥力盘的体积仅为原体积的40%。

5 结论

文中针对舰用中压高速电磁斥力机构,其包裹斥力线圈的环氧板材在大电流下易发生弯折这一现象,通过多物理场耦合仿真及样机实验,对环氧板材的弯折原因及影响因素进行讨论,并设计改进方案,得出以下结论:

1)当激励电流的数值较大时,斥力盘内的感应涡流与斥力线圈间产生的高电磁力是造成固定斥力线圈的环氧板向下弯折的原因。

2)对于四角固定的环氧板材,增加固定约束数量或减小固定约束中心距离可有效减小环氧板内的应力分布。

3)相比于四角固定形式,圆周固定约束的环氧板材内部应力分布更加均匀,且在相似应力分布下,板材的尺寸更小。

4)当斥力线圈中需要通过大电流时,可以在环氧板材下端增加低电导率高杨氏模量的金属薄板,但金属薄板需要在径向开槽以降低涡流损耗。

参考文献:

- [1] FRANCK C M. HVDC circuit breakers: a review identifying future research needs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 998-1007.
- [2] LIU L, ZHUANG J, WANG C, et al. A hybrid DC vacuum circuit breaker for medium voltage: Principle and first measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(5):2096-2101.
- [3] WEN W, HUANG Y, AL-DWEIKAT M, et al. Research on operating mechanism for ultra fast 40.5 kV vacuum switches[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(6): 2553-2560.
- [4] LILJESTRAND L, BACKMAN M, JONSSON L, et al. DC vacuum circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 2017(1):100-104.
- [5] 徐国顺, 杨成, 江壮贤. 4 kV/400 A 真空直流断路器关断电路设计[J]. 海军工程大学学报, 2016(30): 1-3, XU Guoshun, YANG Cheng, JIANG Zhuangxian. Commentating circuit of 4kV/400A vacuum DC circuit breaker[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2013, 24(6):1-5.
- [6] 武瑾, 庄劲武, 庄永华. 电磁斥力机构运动特性的试验研究[J]. 海军工程大学学报, 2013, 24(6): 1-5. WU Jin, ZHUANG Jinwu, ZHUANG Yonghua. Experimental study on motion characteristic of electromagnetic repulsion mechanism[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2013, 24(6): 1-5.
- [7] BASU S, SRIVASTAVA K D. Electromagnetic forces on a metal disk in an alternating magnetic field[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969(8): 1281-1285.
- [8] TAKEUCHI T, KOYAMA K, TSUKIMA M. Electromagnetic analysis coupled with motion for high-speed circuit breakers of eddy current repulsion using the tableau approach[J]. Electrical Engineering in Japan, 2005, 152(4): 8-16.
- [9] LI W, JEONG Y W, KOH C S. An adaptive equivalent circuit modeling method for the eddy current-driven electro-mechanical system[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(6): 1859-1862.
- [10] PHAM M T, REN Z, LI W, et al. Optimal design of a thomson coil actuator utilizing a mixed-integer-discrete-continuous variables global optimization algorithm[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10):4163-4166.
- [11] LI W, REN Z Y, JEONG Y W, et al. Optimal shape design of a thomson-coil actuator utilizing generalized topology optimization based on equivalent circuit method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5):1246-1249.
- [12] LIM D K, WOO D K, KIM I W, et al. Characteristic analysis and design of a thomson coil actuator using an analytic method and a numerical method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(12): 5749-5755.
- [13] 黄瑜珑, 张祖安, 温伟杰, 等. 高压直流断路器中电磁斥力快速驱动器研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3171-3178. HUANG Yulong, ZHUANG Zu'an, WEN Weijie, et al. Research on an ultrafast driver for HVDC circuit breaker with electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Technology, 2014, 40(10): 3171-3178.
- [14] 武瑾, 庄劲武, 王晨, 等. 电磁斥力机构数学模型的简化与求解[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 175-182. WU Jin, ZHUANG Jingwu, WANG Chen, et al. Simplification and solution of the mathematical model to electromagnetic repulsion mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 175-182.
- [15] PUUMALA V, KETTUNEN L. Electromagnetic design of ultrafast electromechanical switches[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1104-1109.
- [16] 江壮贤, 庄劲武, 王晨, 等. 基于电磁斥力原理的高速触头机构仿真分析与设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 172-177. JIANG Zhuangxian, ZHUANG Jingwu, WANG Chen, et al. Simulation analysis and design of a high-speed contact mechanism based on electro-magnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 172-177.
- [17] PENG C, HUANG A, HUSAIN I, et al. Drive circuits for ultra-fast and reliable actuation of thomson coil actuators used in hybrid AC and DC circuit breakers[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition. [S.l.]:IEEE, 2016: 2927-2934.
- [18] BISSAL A, MAGNUSSON J, ENGDAHL G. Electric to mechanical energy conversion of linear ultrafast electromechanical actuators based on stroke requirements[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4): 3059-

- 3067.
- [19] VILCHIS-RODRIGUEZ D S, SHUTTLEWORTH R, BARNES M. Experimental validation of a finite element 2D axial thomson coil model with inductance and resistance compensation[C]//13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission.[S.l.]: IET, 2017: 123-154.
- [20] BISSAL A, MAGNUSSON J, SALINAS E, et al. Multi-physics modeling and experimental verification of ultra-fast electro-mechanical actuators[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015, 49(1): 51-59.
- [21] 周煜韬, 戚连锁, 庄劲武, 等. 考虑弹性变形的电磁斥力机构运动特性分析及实验[J]. 中国电机工程学报, 2016 (s1): 206-212.
- ZHOU Yutao, QI Liansuo, ZHUANG Jingwu, et al. Analysis and Experimentation of motion characteristics in electro-magnetic repulsion mechanism considering the elastic deformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016(s1): 206-212.
- [22] VILCHIS-RODRIGUEZ D S, SHUTTLEWORTH R, BARNES M. Modelling thomson coils with axis-symmetric problems: practical accuracy considerations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(2): 629-639.
- [23] PENG C, HUSAIN I, HUANG A Q. Evaluation of design variables in Thompson coil based operating mechanisms for ultra-fast opening in hybrid AC and DC circuit breakers[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). [S.l.]: IEEE, 2015: 2325-2332.
- 董润鹏(1990—), 男, 博士研究生, 研究方向为电磁场有限元及高速开关(E-mail: dongrp@outlook.com)。
- 庄劲武(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统自动化与安全运行等。
- 武 瑾(1984—), 女, 博士, 主要从事混合型限流熔断器设计及开关电弧介质恢复理论研究。
- 袁志方(1987—), 男, 博士, 研究方向为混合型限流熔断器、开关电弧介质恢复等。
- 胡鑫凯(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事电磁操动机构的研究。

(上接第146页)

- LU Yanhui, RONG Mingzhe, HAN Guohui, et al. Research on the influencing factors of motion characteristics of high speed electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 29-34.
- [19] 江壮贤, 庄劲武, 王 晨, 等. 基于电磁斥力原理的高速触头机构仿真分析与设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26 (8): 172-177.
- JIANG Zhuangxian, ZHUANG Jinwu, WANG Chen, et al. Simulation analysis and design of a high speed mechanical contact base on electro-magnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26 (8): 172-177.
- [20] 田 阳, 田 宇, 李志兵, 等. 高速机械开关单元多场耦合仿真优化设计[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 127-128.
- TIAN Yang, TIAN Yu, LI Zhibing, et al. Multi-field coupling simulation optimization of high-speed mechanical switch Unit[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 127-128.
- [21] ZHANG L C, YANG K, LIU Z Y, et al. Influence of design parameters on electro-magnetic repulsion mechanism performance[C]//27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Suzhou: IEEE, 2016: 1-4.
- [22] 田 鹏. 一种永磁保持式新型高速斥力机构的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- TIAN Peng. Research on a new permanent magnet repulsion mechanism with permanent magnet retaining[D]. Dalian University of Technology, 2011.
- [23] JIAN Z, ZHUANG J, WANG C, et al. Simulation analysis and design of a high speed mechanical contact base on electro-magnetic repulsion mechanism[C]//International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Beijing: IEEE, 2011: 1-5.
- [24] 齐关秋. 基于强迫过零技术直流开断的动态因素研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- QI Guanqiu. Research on dynamic factors of DC interruption based on forced zero crossing technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [25] 郑占锋. 基于换流技术的快速直流真空开关理论与应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- ZHENG Zhanfeng. Research on theory and application of fast DC vacuum switch based on commutation technology [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- 阮绵晖(1967—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统及其自动化工作(E-mail: xwg898581@126.com)。