

机械冲击对定子线棒绝缘材料的损伤研究

冯 钜¹, 胡 波², 张 跃², 曹韩学³, 陈 君¹, 马素德¹

(1. 西华大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610039; 2. 东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000; 3. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045)

摘 要:机械冲击是破坏定子线棒绝缘材料的一个重要因素,目前对定子线棒绝缘材料受机械冲击损伤的情况还缺乏系统研究。本文通过有限元模拟和实验相结合的方法研究机械冲击对定子线棒绝缘材料的影响。结果表明:绝缘材料在受到机械冲击时,同一冲头结构下,平均等效应力-应变和电气强度在增减之后在一定冲击强度范围内趋于稳定;同一冲击强度下,平均等效应力-应变和电气强度均随冲击头末端面积的增大而增大。平均等效应力-应变和电气强度之间存在的相互关系可用于评估机械冲击造成的定子线棒绝缘损伤。

关键词:定子绝缘;仿真模拟;机械冲击;电气强度

中图分类号:TM215 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)08-0089-05

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.08.014

Mechanical Impact Damage Study on Insulating Material of Stator Bar

FENG Ju¹, HU Bo², ZHANG Yue², CAO Hanxue³, CHEN Jun¹, MA Sude¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, China;

3. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Mechanical impact is an important factor that damages the stator bar insulation material. At present, systematic researches on the damage of stator bar insulation materials by mechanical impact are still lack. In this paper, the effect of mechanical impact on the stator bar insulation material was studied by combining the finite element simulation and experiment. The results show that when the insulating material is subject to mechanical impact, the average equivalent stress-strain and electric strength firstly increase or decrease, and then become stable within a certain impact strength range under the same punch structure. Under the same impact strength, both the average equivalent stress-strain and electric strength increase with the increase of the tip area of punch head. The correlation between the average equivalent stress-strain and the electric strength can be used to evaluate the insulation damage of stator bar caused by mechanical impact.

Key words: stator insulation; simulation; mechanical impact; electric strength

0 引言

大型高压电机运行的可靠性和电力系统的稳定性与安全息息相关,定子线棒是大型电机中的核心部件,其绝缘性能对大型电机运行的可靠性有着

直接的影响^[1-4]。定子线棒在电机装配、运输和运行的过程中有可能受到不同程度的机械损伤^[5-6],机械冲击就是其中的一种,会造成定子线棒绝缘材料产生缺陷,对电机安全运行留下隐患。

目前已有研究针对机械应力对定子线棒绝缘材料的损伤评估方法进行报道,其中机械应力包括机械振动力、电磁振动力和热膨胀系数不同产生的定子线棒内部应力等^[7-10],但是专门对定子线棒绝缘材料受机械冲击损伤的影响研究还鲜见报道。

本文采用实验与仿真模拟相结合的研究方法

收稿日期:2020-09-21 修回日期:2020-11-11

基金项目:四川省科技计划资助项目(2019JDTD0024,2019ZHC0048);教育部春晖计划资助项目(Z2017066)

作者简介:冯钜(1996-),男(汉族),四川广安人,硕士生,主要从事绝缘材料的研究;通信作者:马素德(1976-),男(汉族),山东滨州市人,教授,博士,主要从事功能高分子材料的研究。

对定子线棒绝缘材料受机械冲击损伤的影响进行探究,旨在找出受损因素和绝缘材料电性能的关系,为以后避免和检测这类损伤提供参考。

1 实验方案设计

1.1 实验仪器与方法

采用漆膜冲击器试验仪(QCJ-120B型,天津市静海县科信试验机厂)对试样进行测试,试验仪的冲头可更换,形状和尺寸如图1所示。将质量为2 kg的重锤在设定高度下自由落下并通过不同形状的冲头撞击固定在底座上的试样^[11-12]。

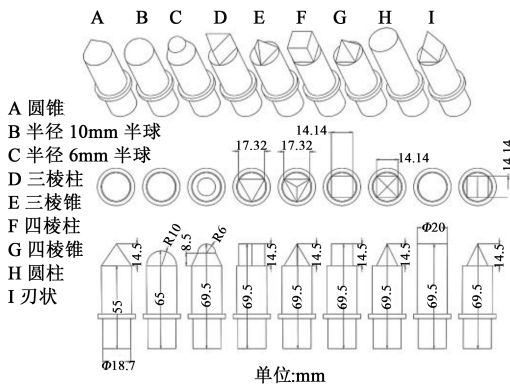


图1 冲头的形状和尺寸图

Fig.1 The shape and size of punch

1.2 试样及其制备方案

试样为改性桐马环氧多胶云母板(型号为DECJ1613),单层尺寸为50 mm×50 mm×1 mm,将6片单层试样夹持并施加15 kg的压力,放入烘箱中在160℃下加热2 h后取出,自然冷却,备用。固化后的6层试样尺寸为50 mm×50 mm×4 mm,胶含量为30%~40%。

1.3 引入缺陷与电性能测试

分别采用半径为6 mm和10 mm的半球、圆柱和圆锥4种冲头,将试样固定在底座上,分别提升落锤至0.3、0.6、0.8、1.0、1.2 m高度后释放,在试样中引入机械缺陷。以同种方式更换四棱锥冲头、四棱柱冲头、刃状冲头、三棱锥冲头和三棱柱冲头再次进行实验。

将上述引入缺陷的试样按照GB/T 1408.1—2016进行击穿电压测试,并将重复5次的实验结果中值作为该批次试样的击穿电压。

2 有限元模拟方法

2.1 有限元模拟软件

软件版本为ANSYS Workbench 2020R1,运用显式动力学模块Explicit Dynamics对不同结构的冲

头和能量冲击后的绝缘材料进行模拟分析^[13-16]。

2.2 冲击模型的建立

为消除偶然因素的影响将撞击模型简化为冲击落锤和绝缘试样^[17]。对试样进行网格划分,在试样模型边长和厚度上分别划分成为40个网格单元数和3个网格单元数,共计4 800个网格单元,24 887个网格节点,对落锤模型进行系统自动网格划分,如图2所示,分别对应圆柱、圆锥、半径为6 mm和10 mm的半球共4种冲头的冲击模型。

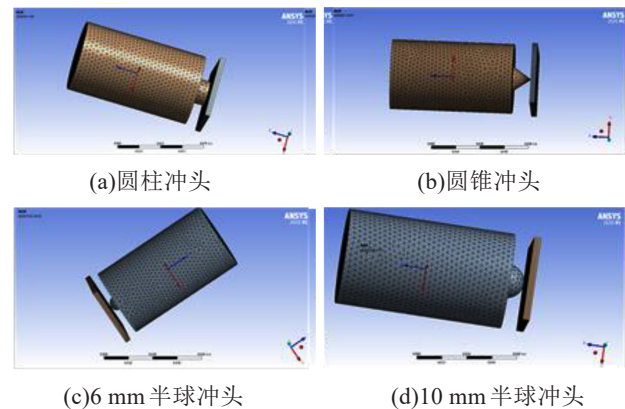


图2 冲击模型

Fig.2 Impact model

2.3 添加约束和解决方法

将落锤的重力势能换算成速度,使得落锤接触试样时,模拟试验中的落锤速度等效于落锤自由体下落撞击试样的速度。把落锤到达试样的位移视作3 mm,下落高度、时间、撞击的速度转化关系如表1所示,求解得出试样的平均等效应力-应变的参数。落锤和绝缘试样板的材料性能如表2所示。

表1 下落高度、时间、撞击的速度转化关系

Tab.1 Transformation relationship between falling height, time, and impact speed

下落高度/m	撞击速度/(m/s)	时间/s
0.3	-2.43	1.24×10^{-3}
0.6	-3.43	8.75×10^{-4}
0.8	-3.96	7.58×10^{-4}
1.0	-4.43	6.78×10^{-4}
1.2	-4.85	6.19×10^{-4}

3 结果与分析

3.1 冲击强度

根据能量守恒,由落锤的重力势能估算冲击能

表2 落锤和绝缘试样的材料性能

Tab.2 Properties of drop weight and insulation sample

材料	密度/(kg/m ³)	杨氏模量/GPa	泊松比
冲头材料	7.90×10 ³	210	0.300
绝缘材料	1.80×10 ³	126	0.340

注:冲头材料采用的合金钢由深圳圣诺光电公司提供,绝缘材料试样及参数由东方电机有限公司提供。

量,再由式(1)计算冲击强度。

$$a_k = \frac{mgh}{1000 \times l \times d} \quad (1)$$

式(1)中: a_k 为冲击强度,单位为kJ/m²; m 为落锤质量(约2 kg); g 为重力加速度,取9.81 m/s²; h 为落锤下落高度,单位为m; l 为试样边长,单位为m; d 为试样厚度,单位为m。计算结果如表3所示,结果取小数点后一位数字。

表3 落锤高度与冲击强度的转换

Tab.3 Conversion between drop height and impact strength

落锤高度/m	冲击强度/(kJ/m ²)
0.3	29.4
0.6	58.8
0.8	78.4
1.0	98.0
1.2	117.6

3.2 冲头结构-冲击强度对平均等效应力的影响

由ANSYS Workbench仿真软件通过有限元模拟方法计算绝缘试样在不同冲头结构和冲击强度冲击下的平均等效应力,作出其与冲头结构-冲击强度的关系图,如图3所示。

冲头结构和冲击强度共同决定平均等效应力。从图3可以看出,在相同的冲击强度下,冲头末端与绝缘试样的接触面积越大($S_{圆柱} > S_{半径10mm半球冲头} > S_{半径6mm半球冲头} > S_{圆锥冲头}$),绝缘试样受到的平均等效应力越大;对比同种冲头结构不同冲击强度下的平均等效应力,圆柱冲头在冲击强度29.4~58.8 kJ/m²范围内从1.53×10³ MPa增长到1.89×10³ MPa,冲击强度达到58.8 kJ/m²之后在一个较小的平均等效应力范围内趋于稳定;半径为6 mm的半球冲头、半径为10 mm的半球冲头和圆锥冲头在冲击强度达到

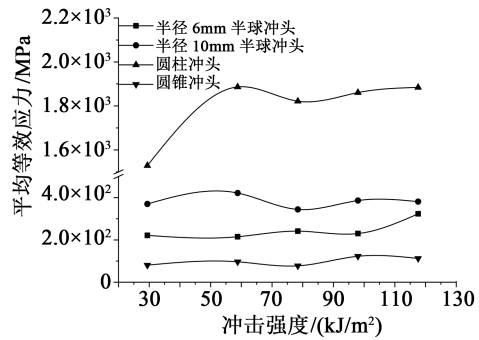


图3 冲头结构-冲击强度-平均等效应力的关系

Fig.3 The relationship among punch structure, impact strength, average equivalent stress

29.4 kJ/m²之后在一定平均等效应力范围内趋于稳定。综上所述,在冲击强度为29.4~117.6 kJ/m²范围内冲头结构对平均等效应力的影响较大。

3.3 冲头结构-冲击强度对平均等效应变的影响

采用ANSYS Workbench仿真软件通过有限元模拟方法计算获得在不同冲头结构和冲击强度下绝缘试样的平均等效应变,并绘制了其于冲头结构-冲击强度之间的关系,如图4所示。

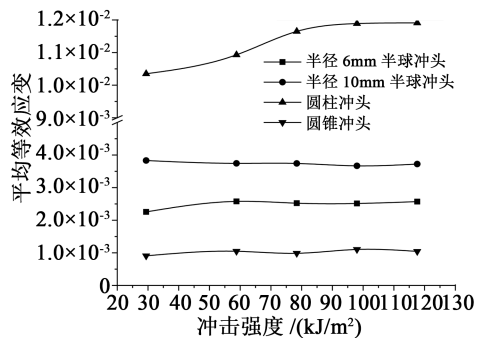


图4 冲头结构-冲击强度-平均等效应变的关系

Fig.4 The relationship among punch structure, impact strength, average equivalent strain

从图4可以看出,在相同的冲击强度下,冲头末端与绝缘试样的接触面积越大,绝缘试样受到的平均等效应变越大;在同种冲头结构下,圆柱冲头在冲击强度为29.4~98.0 kJ/m²范围内平均等效应变从1.035×10⁻²增加到1.189×10⁻²,在冲击强度达到98.0 kJ/m²之后在一个较小平均等效应变范围内趋于稳定,其他3种冲头结构在冲击强度达到29.4 kJ/m²之后在一定等效应变范围内达到稳定。对比图3可知,平均等效应力和平均等效应变的变化规律具有相互对应的关系。

3.4 冲头结构-冲击强度对电气强度的影响

通过对绝缘试样引入缺陷,然后对绝缘试样施

加电压以测试每个试样的击穿电压,将击穿电压转换为电气强度,绘制出其与冲头结构-冲击强度的关系,如图5所示。从图5可以看出,4种冲头冲击后的试样电气强度在冲击强度达到 58.8 kJ/m^2 之前呈下降趋势,冲击强度达到 58.8 kJ/m^2 之后,电气强度均保持在一个较稳定的水平。以上结果表明,冲击强度达到 58.8 kJ/m^2 之前,冲击强度对试样电气性能的影响程度较大。在结构上,冲头的端部与绝缘试样之间的接触面积越大,对绝缘试样电性能的影响越小。

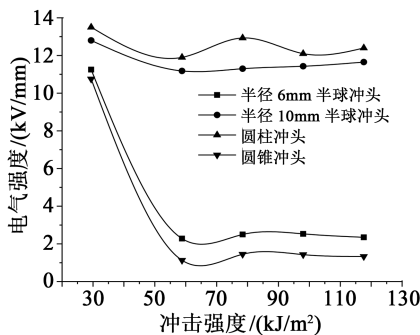


图5 冲头结构-冲击强度-电气强度的关系

Fig.5 The relationship among punch structure, impact strength, electric strength

3.5 平均等效应力-应变对电气强度的影响

在测试上述4种冲头的基础上,再分析5种冲头(四棱锥冲头、四棱柱冲头、刃状冲头、三棱锥冲头和三棱柱冲头)的影响。图6绘制了平均等效应力-电气强度和平均等效应变-电气强度相对应的点。使用指数函数模型Exp2Mod2拟合这些点以计算两条曲线。

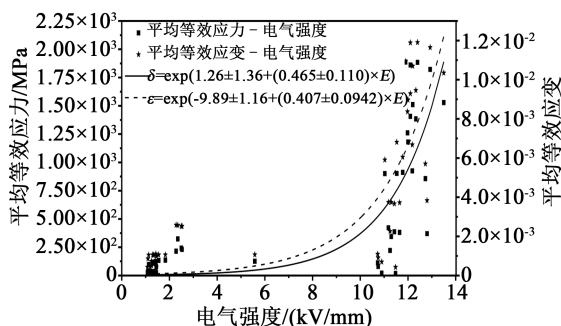


图6 平均等效应力(δ)-应变(ϵ)-电气强度(E)的关系

Fig.6 The relationship among average equivalent stress (δ), strain (ϵ), electric strength (E)

借助Origin2018软件^[18-19]中的函数模型(式(2))对图6中的点进行非线性拟合,得到两条曲线方程如式(3)~(4)所示。

$$Y = \exp(a + b \times X) \quad (2)$$

$$\delta = \exp(1.26 \pm 1.36 + (0.465 \pm 0.110) \times E) \quad (3)$$

$$\epsilon = \exp(-9.89 \pm 1.16 + (0.407 \pm 0.0942) \times E) \quad (4)$$

式(2)~(4)中: Y 为因变量; a 和 b 为待求常数; δ 为平均等效应力; ϵ 为平均等效应变; E 为电气强度。拟合优度 R^2 为0.976,说明拟合效果良好。

从图6可以看出,试样的电气强度随着平均等效应力和应变的增加而增加。当达到一定值时,试样的电气强度趋于相对稳定的水平。平均等效应力和应变分别为 $9.34 \times 10^2 \text{ MPa}$ 和 6.98×10^{-3} 时,电气强度为 12 kV/mm 。冲击强度范围在 $29.4 \sim 117.6 \text{ kJ/m}^2$ 之间,绝缘材料的平均等效应力-应变和电气强度可以通过公式(3)和(4)相互估算。

4 结论

(1)定子线棒绝缘材料与冲头接触面积和冲击强度大小决定了其受机械冲击时物理结构和电气性能的变化规律。

(2)按照本文中得到的两条曲线方程式(3)和式(4)可以有效地对定子线棒绝缘受到的机械冲击损伤进行评估,对实际中电机的寿命评估和安全稳定运行的后续研究有着一定的参考价值。

(3)在定子线棒正常工作中,应避免尖锐物或者受到较大冲击,建议定期对定子线棒的状态进行安全性评估。

参考文献:

- [1] 郝长金. 基于介电响应法的发电机主绝缘状态评估技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.
- [2] 乔雪. 大型交流电机定子换位线棒附加损耗的解析计算方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
- [3] STONE G C. Condition monitoring and diagnostics of motor and stator windings - A review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2013,20(6):2073-2080.
- [4] 高波,郝长金,尹小兵,等. 温度对发电机主绝缘频域介电响应的影响研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(3):915-922.
- [5] 邵永斌. 大型发电机定子绕组常见故障的分析及处理[J]. 大电机技术,2014(6):27-31.
- [6] 唐鹏程. 潘口电站定子嵌线工艺[J]. 水利水电快报,2012,33(9):31-33.
- [7] CASTRO L C, OSLINGER J L, TAYLOR N, et al. Dielectric and physico-chemical properties of epoxy-mica insulation during thermoelectric aging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,22(6):3107-3117.
- [8] 凌翠平,韦在风. 定子线圈制作中的绝缘损伤问题解决[J]. 电机与控制应用,2014(5):65-67.

- [9] 杨姗姗. 高压电机定子绕组主绝缘击穿原因分析[J]. 防爆电机, 2015,50(6):41-43.
- [10] FERNANDO M A, NARANPANAWA W M, RATHNAYAKE R M, et al. Condition assessment of stator insulation during drying, wetting and electrical ageing[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2013,20(6):2081-2090.
- [11] 虞莹莹. 漆膜耐冲击性测定方法的探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量,2007,27(8):25-26.
- [12] 刘振作. 漆膜耐冲击性实验技术现状[J]. 涂料与应用,2003,43(1):3-5,19.
- [13] 李范春. ANSYS Workbench 设计建模与虚拟仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2011.
- [14] VIJAYAKUMAR R, RAMESH C, BOOBESH R, et al. Investigation on automobile wheel rim aluminium 6061 and 6066 Al-loys using ANSYS WORKBENCH[J]. Materials Today: Proceedings,2020,33(2),3155-3159.
- [15] 吕建国,康士廷. ANSYS Workbench 14 有限元分析自学手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2013.
- [16] WU Z, WANG Y. Strength finite element analysis of whole caving hydraulic support based on ANSYS workbench[J]. Coal Mine Machinery,2009,30(9):106-108.
- [17] MUHAMMAD A, SHANONO I H. Simulation of a car crash using ANSYS[C]//2019 15th International Conference on Electronics, Computer and Computation. Abuja, Nigeria: IEEE,2020.
- [18] 张凤兰. 用 Origin 寻求经验公式[J]. 延边大学学报(自然科学版),2005,31(3):188-189.
- [19] MOBERLY J G, BERNARDS M T, WAYNANT K V. Key features and updates for Origin 2018[J]. Journal of Cheminformatics,2018,10(1):5.