

# Study on Waterproof Performance of Electric Motor Insulation Structure

Yongqi Yan Yan Wang Xiaomei Pei

CRRC Yongji Motor Co., Ltd., Yongji, Shanxi, 044502, China

## Abstract

The significance of the waterproof test for the insulation structure of the EMU motor was introduced. The main reasons for the poor waterproofness of the insulation structure were analyzed. The solution to the improvement of the waterproof performance of the typical insulation structure was proposed and verified by the flooding test.

## Keywords

EMU motor; insulation structure; moisture proof; improvement

# 动车电机绝缘结构防水性能研究

闫勇奇 王艳 裴晓梅

中车永济电机有限公司, 中国 · 山西 永济 044502

## 摘要

介绍了动车电机绝缘结构进行防水试验研究的意义, 对绝缘结构防水性差的主要原因进行了分析, 对典型的绝缘结构防水性能的提高提出了解决方案, 并通过浸水试验对改进方案进行了验证。

## 关键词

动车电机; 绝缘结构; 并头防潮; 改进

## 1 引言

动车电机运行速度快、地理位置跨度大, 在运行过程中, 受气候、天气等影响, 长时间运行于潮湿的环境极易造成绝缘表面凝露甚至积水, 恶劣的运行环境对动车电机绝缘的防潮性提出了较高的要求, 一旦绝缘防护不妥, 电机的绝缘性能将急剧下降甚至过早丧失, 因而影响动车车辆的安全运行。以往的定子浸水试验结果说明, 电机定子绕组槽部和端部是连续的整体结构, 其防潮性能优异, 能长时间经受苛刻的浸水试验要求; 动车电机绝缘系统防水性能的关键是要解决异型部位 (如并头连接部位、引接过渡部位) 等薄弱环节的绝缘处理。为此, 在进行标准动车组电机防水绝缘结构试验时, 通过多种试验的对比和不断改进, 使绝缘结构的防水效果得到明显改善。

## 2 机理分析

微观粒子的物质波波函数必须要满足薛定谔方程:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \varphi = (E - E_p) \varphi$$

在金属表面的电子场发射, 水分子进入介质内部, 都是电子的势垒贯穿效应, 即对应一定高度和厚度的势垒贯穿作用。

粒子在如图 1 所示的力场中沿 X 方向运动, 当它遇到有限高度的势垒作用时, 会产生反射和透射。

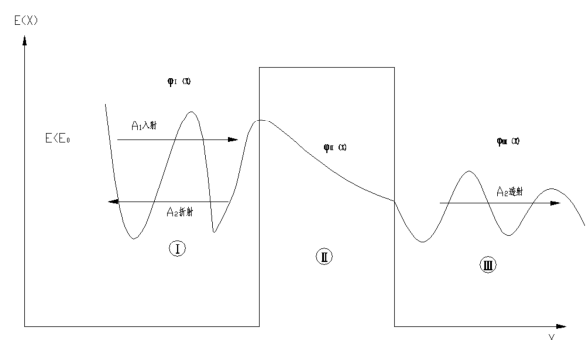


图 1 力场中沿 X 方向运动示意图

从经典力学的观点来看, 当  $E > E_0$  时, 粒子可越过势垒,

而当  $E < E_0$  时，粒子则不能越过势垒。我们将粒子的运动的区域分为 I、II、III 三部分，分别求解各区域的定态方程。

在 I、III 区域内， $E_p = 0$ ，薛定谔定态方程为

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \frac{\alpha^2 \varphi}{\alpha x^2} = E \varphi$$

在 II 区域内， $E_p = E_0$ ，定态方程为

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \frac{\alpha^2 \varphi}{\alpha x^2} = (E - E_0) \varphi$$

$$\text{令 } \beta^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}, \gamma_1^2 = \frac{2m(E - E_0)}{\hbar^2}, \text{ 则在 I、III 区域内}$$

$$\frac{\alpha^2 \varphi}{\alpha x^2} + \beta^2 \varphi = 0$$

II 区内

$$\frac{\alpha^2 \varphi}{\alpha x^2} + \gamma_1^2 \varphi = 0$$

解得

$$\begin{cases} \varphi_1 = A_1 e^{i\beta x} + B_1 e^{-i\beta x} \\ \varphi_2 = A_2 e^{i\gamma_1 x} + B_1 e^{-i\gamma_1 x} \\ \varphi_3 = A_3 e^{i\beta x} + B_3 e^{-i\beta x} \end{cases}$$

第一项为入射波，第二项为反射波， $A_1$  为入射波波幅， $B_1$  为反射波波幅， $A_3$  为透射波波幅， $B_3 = 0$  时无反射，对于具有能量  $E < E_0$  的微观粒子，即使在势垒 II 区域内，波函数也不等于零，因而粒子穿过势垒的几率也不等于零。粒子可由 I 区穿过势垒 II 到达区域 III 中，并且保持在区域 I 时的能量不变。

粒子穿过势垒的透射系数

$$D = \left| \frac{A_3}{A_1} \right|^2$$

反射系数

$$R = \left| \frac{B_1}{A_1} \right|^2 = 1 - D$$

表明一部分透过，一部分反射，无吸收。当  $E < E_0$  时，用  $\gamma_1$  代入得

$$D = D_0 E_e - \frac{\sqrt{2\alpha m(E_0 - E)}}{\hbar}$$

$D_0$  为接近 1 的常数，可见粒子透射系数随势垒的加宽和加高而减少。表 1 给出了电子的透射系数随势垒宽度的变化，可知电子的透射系数随势垒宽度的增加而迅速减小。

表 1 电子的透射系数

$\alpha/\text{\AA}$	1.0	2.0	5.0	10.0
D	0.1	$1.2 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-10}$

综上所述：提高浸水绝缘电阻的重中之重就是要在有限的空间内尽最大可能的提升势垒高度。

### 3 改进前电机定子浸水试验情况

随机抽查一台在产的动车电机，其定子浸漆固化后，冷态绝缘电阻值在  $10\text{G}\Omega$  以上，除接线盒引出线外，将定子以卧式全部浸入水中（浸水状态及绝缘电阻测试原理如图 2），绝缘电阻值瞬间降至  $1\text{G}\Omega$ ，再经过 30min 后，绝缘电阻值下降至  $100\text{M}\Omega$ 。

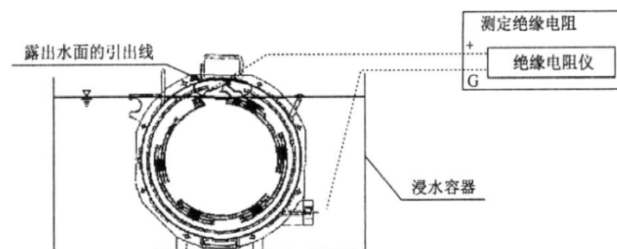


图 2 浸水状态及绝缘电阻测试原理

定子出水后，绝缘电阻迅速回升至  $5\text{G}\Omega$ 。定子翻身使并头端朝上后重新浸水，水面淹至并头端以下，绝缘电阻值经过 3h 后依然维持在  $3\text{G}\Omega$  左右。

定子浸水试验结果说明，电机定子绕组槽部和端部是连续的整体结构，其防潮性能优异，能长时间经受苛刻的浸水试验要求。而电机定子防潮防水结构薄弱的环节为并头和连线部位。为确保电机定子绝缘的防潮性能，公司大力开展交流牵引电机定子并头工艺攻关工作，改进工艺手段和试验研究的方法，有效提高定子并头防潮结构的可靠性，使防潮性能明显改善。<sup>[1]</sup>

### 4 电机定子绝缘防水性能差的主要原因

电机定子并头连线部位绝缘防水性能较差的主要原因有以下几点：

(1) 并头连线焊接时破坏了电磁线本体绝缘。定子绕组引出线实施焊接连线并头时产生的高温会直接导致焊接点附近的导线本体绝缘出现不同程度的烧灼损伤，而对该部位实施的绝缘修复又很难达到原来的防护效果。

(2) 并头连线焊接后异形搭接结构和空间尺寸紧凑导致绝缘包扎难以到位。绕组连线并头焊接后形成了大量的异形搭接结构。其结构形式包括并头  $\Pi$  型阶梯、V 型搭接和导电环连线形成的 T 型搭接结构等。每个并头和连线均为分段包扎, 绝缘包扎和搭接困难, 整体性较差, 很难形成封闭结构, 影响防水性能。

(3) 浸漆绝缘处理(浸漆后干燥烘焙前期)未采取有效的绝缘漆防流失措施, 导致原本就十分薄弱的并头连线绝缘内因漆流失过多而形成内空。

(4) 浸漆烘焙后快速冷却引起材料的结构缺陷。绝缘漆中常见的点结构缺陷有弗伦克尔缺陷和肖特基缺陷, 它们是由于原子在热作用下脱离结点位置而产生的, 可称为本征缺陷。实验证明, 空位是有机硅漆中的主要缺陷, 绝缘漆密度随空位浓度增加而下降, 有机硅漆若从高温迅速冷却, 其结构中就会含有高浓度的空位(图3)。结构缺陷的存在对材料的物理性质和化学性质往往产生决定性影响, 由于缺陷的存在是对严格按周期性排列的原子所产生周期性势场的破坏, 因而必定要影响电子的能级分布。<sup>[2]</sup>

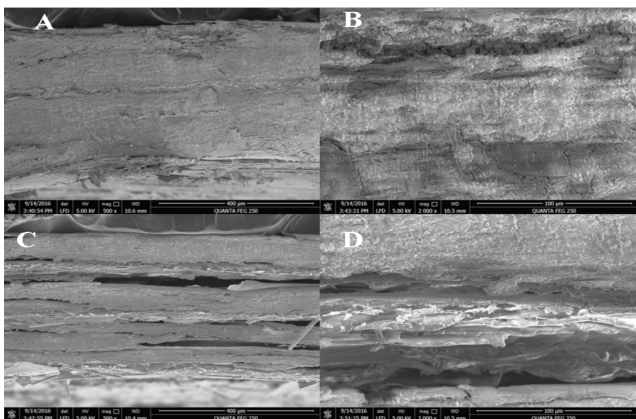


图3 有机硅漆中高浓度空位示意图

- A、浸漆后缓慢冷却线圈剖面图(放大至  $400\mu\text{m}$ )
- B、浸漆后缓慢冷却线圈剖面图(放大至  $100\mu\text{m}$ )
- C、浸漆后快速冷却线圈剖面图(放大至  $400\mu\text{m}$ )
- D、浸漆后快速冷却线圈剖面图(放大至  $100\mu\text{m}$ )

当绝缘漆中有结构缺陷时, 一般来说, 将在禁带中引入附加能级。缺陷能级可分为浅能级和深能级, 浅缺陷能级是指离导带或价带比较近, 即电离能比较小的那些能级, 深缺陷能级则是指离导带比较远即电离能比较大的能级。禁带中的浅能级易于释放电荷(电子或空穴)到导带或价带去, 成

为导电载流子, 故又称这些浅能级为施主或受主能级。而深能级则不易放出电荷, 它们便成为俘获电子或空穴的中心, 所以称之为俘获能级或俘获中心, 又称之为陷阱能级。显然, 禁带中的缺陷能级是定域态能级, 深能级也能成为载流子的复合中心(图4)。

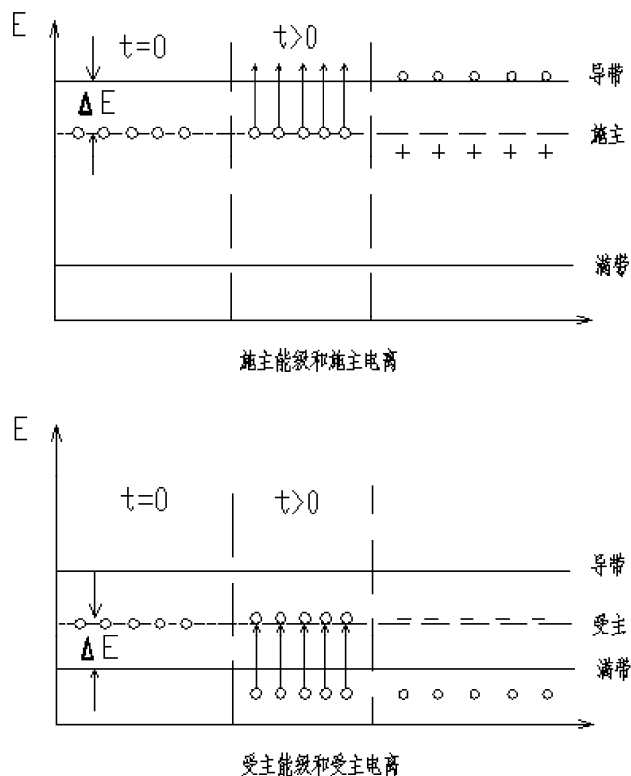


图4 施主、受主能级

综上所述: 电机绝缘结构防水性能差的根本原因为水分子在电场作用下, 越过绝缘材料构成的势垒, 导通电极的一种行为。

## 5 研究改进

(1) 通过对现场 20 台浸水不合格的定子铁心线圈浸水绝缘薄弱点进行查找、统计、分析。发现绝缘薄弱点较多, 其中零环“中性点”占比最大, 其次为线圈鼻部、小并头和“中性点”与小并头位置(图5)。

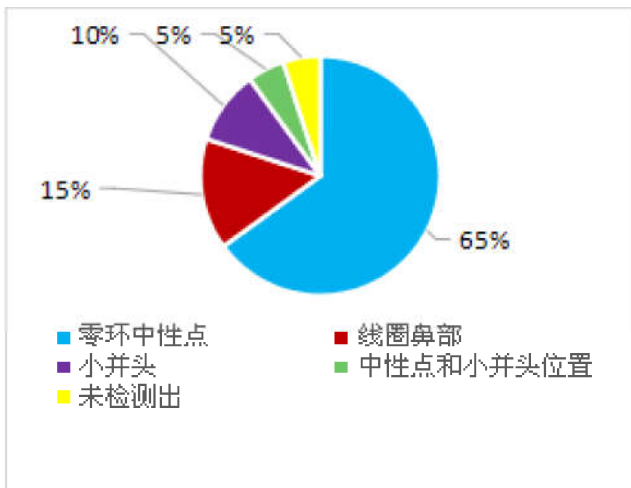


图5 绝缘薄弱点研究结果示意图

(2) 通过以上数据判断,因小并头及其它绝缘搭接位置的云母带搭接较少,薄膜搭接过多,这不利于绝缘浸渍后绝缘漆与绝缘材料的粘接,造成搭接位置出现毛细通道。所以在后续方案中将并头亚胺薄膜退后5mm,并在连线间垫云母,然后根据工艺要求进行绝缘包扎。

(3) 在“中性点”位置由于焊接位置空间紧张,整形后容易发生张开变形导致绝缘偏移、松散(图6),包扎空间狭小受限,绝缘包扎困难,很难将该位置包扎服帖;在包扎后容易在“中性点”位置产生“三角”漏包区域。所以“中性点”位置成为了浸水薄弱点的重灾区。焊后在两连线间垫云母带和亚胺薄膜,分别包扎,包扎完成后,将“中性点”进行一次预整形(图6),将其整形到位,包扎完成后对“中性点”进行整体绝缘包扎,包扎完成后进行二次整形以满足图纸尺寸,避免绝缘包扎完成后整形造成绝缘偏移、松散。

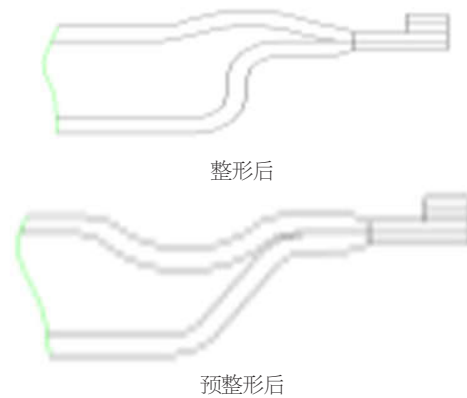


图5 整形示意图

(4) 严格执行预设定的VPI(真空压力浸漆)浸漆工艺参数,最大限度地对绝缘深层进行填充;选用旋转烘焙工艺,以减少绝缘漆的流失,保证绝缘漆膜的厚度。

(5) 针对绝缘漆烘焙后存在冷热冲击现象,在工件烘焙时间达到要求后,工件随炉冷却,当烘箱温度与环境温差到一定要求后再执行后续作业。根据本要求共验证30台电机,浸水3h,绝缘电阻均大于 $2G\Omega$ 。

## 6 结语

通过对动车组电机定子防潮结构的工艺改进和优化攻关,有效改善了电机的防潮性能,确保电机在潮湿环境中运行的安全性和可靠性。

## 参考文献

- [1] (美) 格里菲思. 量子力学概论 [M]. 机械工业出版社, 2006.
- [2] 钟力生, 李盛涛, 宋传骧, 等. 工程电介质物理与介电现象 [M]. 西安交通大学出版社, 2013.