

中高压电机磁性槽楔高可靠的安装工艺

赵云¹ 刘志强²

1 大亚湾核电运营管理有限责任公司 广东深圳 518124

2 中广核核电运营有限公司 广东深圳 518124

摘要：中高压电动机定子磁性槽楔的断裂，业界普遍认为是磁性槽楔的机械强度不够所致，因此磁性槽楔生产厂家，在保证较高导磁率的前提下，想尽办法提高磁性槽楔的机械强度。同时，行业内也出台了一些关于磁性槽楔的相关技术条件的标准，对磁性槽楔的弯曲强度、抗剪强度等提出较高的要求。尽管如此，磁性槽楔断裂的故障仍然经常发生，究其原因，关键还在于业内重磁性槽楔的制造性能，轻磁性槽楔的安装工艺。本文作者通过对多个大型电机磁性槽楔断裂的原因分析及维修实践，总结了磁性槽楔改进后的安装工艺，可极大的提升磁性槽楔在电机服役期间的可靠性，降低磁性槽楔松动断裂的风险。

关键词：磁性槽楔；断裂；安装工艺；可靠性

1. 引言

大中型中高压三相异步电动机的线圈均采用外包绝缘成型绕组的制造工艺，定子线圈安装在开口的铁芯槽内，为固定铁芯槽内的线圈，在铁芯槽口安装槽楔用于固定定子线圈，防止线圈在电机运行期间因电磁力及振动产生位移和磨损。

电动机定子槽楔有非磁性槽楔和磁性槽楔之分，非磁性槽楔采用非导磁材料，非导磁材料有接近空气的极低的磁导率，会加剧齿槽磁阻的变化，产生的高次谐波将造成电机的激磁电流增加，转子表面损耗和脉振损耗增加，导致电机温度升高，效率降低，并产生电磁噪声，同时也使异步电动机的转矩曲线发生畸变^[1]。20世纪中期，发达国家相继开发了新系列的电动机，为了改进电机的性能，采用了磁性槽楔代替非磁性槽楔^[2]，国外西门子、阿尔斯通等电机生产企业广泛使用了高效的磁性槽楔；而在国内，湘潭电机厂联合武高所等企业也开发了高性能的磁性槽楔。但近些年，不论电机制造商，还是电机维修企业，都不再积极采用磁性槽楔，主要的原因是可靠性低，容易发生松动、断裂脱落故障，严重的甚至导致定子线圈损坏的严重故障。

2. 磁性槽楔断裂的原因。

磁性槽楔松动脱落的直接原因是磁性槽楔在交变电磁场中受到电磁力的作用，部分磁性槽楔在定子铁芯槽内因振动产生微动摩擦，槽楔与铁芯槽壁的摩擦将磁性槽楔两侧的楔形边磨损后，磁性槽楔从定子铁芯槽突出，高出铁芯槽，

被高速旋转的转子磨擦产生大量黑色粉末，或者被转子通风口剪切断裂、脱落。而其根本原因业界有不同的看法，多数认为磁性槽楔断裂的根本原因是机械强度不够所致，因此很多磁性槽楔制造商想尽办法提高槽楔的机械强度，比如采用玻璃纤维增强措施，很多制造商以其磁性槽楔的机械强度高作为宣传噱头，但这往往是以牺牲导磁率为代价的，比如某款磁性槽楔，采用玻璃布、环氧和铁粉制造的层压磁性槽楔，其在常温下的垂直层向弯曲强度达到 350MPa，即使温度达到 155℃，其强度仍然高达 305MPa，弯曲弹性模量为 10700 MPa (155℃)，抗剪强度 (155℃) 为 4618N/10mm 长，而其热稳定性在 200℃ /24 小时的高温环境，无分层和开裂现象，但该磁性槽楔的导磁率只有环氧树脂和铁粉模压成型磁性槽楔的一半左右。

同时国家标准和行业标准，也针对磁性槽楔的机械强度做了相应的要求，比如《GB/T1303.1 环氧玻璃布层压板》在玻璃布层压磁性槽楔的性能要求中，垂直层向弯曲强度要求 ≥ 340 MPa。而机械行业标准《JB/T10508 中小电机用槽楔技术条件》中垂直层向弯曲强度也要求 ≥ 340 MPa，同时该标准中的磁性槽楔只涉及到引拔型槽楔和环氧玻璃布层压板槽楔，而市面上的环氧和铁粉模压成型的磁性槽楔的机械强度远远达不到上述标准。

某厂一台驱动水泵的三相异步电机，额定电压为 6600V，功率为 4500kW，产地英国，定子采用环氧和铁粉

模压成型的磁性槽楔。该电机为某厂新采购的备件电机，于2005年投运一年以后，解体发现磁性槽楔大面积断裂、脱落，然后用橡皮锤逐一敲击检查，断裂和松动的槽楔共计二十多槽。事发某厂随即联系该电机的英国制造商安排技术人员到厂进行维修，由于检修现场不具备VPI真空压力浸漆条件，经过某厂讨论决定，采用了涂刷环氧树脂作为固化剂的方式对部分断裂和松动的磁性槽楔进行更换，而检查未见松动的磁性槽楔维持原状不做更换处理，更换使用的磁性槽楔备件与原电机磁性槽楔规格相同。

2013年该电机已运行了八年，解体检查再次发生磁性槽楔断裂的故障。经检查确认，八年前在现场维修更换过的原厂磁性槽楔并未断裂，断裂的是当时检查未松动而没有采取更换措施的磁性槽楔。作为原因分析，拆卸了几根该电机上松动的原厂磁性槽楔进行检查，发现其机械强度很低，试验时在离地一米的高度自由落体，该磁性槽楔在地面断裂成几段。尽管如此，八年前现场用环氧树脂维修使用的也是相同规格的磁性槽楔，运行了八年却仍然紧固未见松动，即便进行破坏性拆卸也相当困难。

之后的数年间，该电同型号同规格的四台电动机，先后均发生了不同程度的磁性槽楔断裂的故障，其中一台电动机送到国内电机维修厂进行维修，整机更换了全部定子磁性槽楔，更换所使用的定子槽楔全部使用国产高强度玻璃布层压板磁性槽楔，并经VPI真空压力浸漆固化。然而该电机也仅运行三年后，再次发生定子磁性槽楔断裂的故障，经对断裂的槽楔样品进行分析，其机械强度性能并未发生改变，强度仍然很高。

反思上述案例，我们发现磁性槽楔断裂的根本原因，并不是磁性槽楔的机械强度问题，而关键在于磁性槽楔的安装工艺问题。除了早期国产的钢丝引拔型槽楔因本身的设计、制造问题频繁发生故障，目前已经淘汰外，更多的高机械强度的磁性槽楔断裂，均属此类安装问题。目前国内外的中高压电机均广泛采用VPI真空压力浸漆工艺，经过对大量不同厂家的中高压电动机的定子磁性槽楔端部进行检查，发现定子槽楔（也包括非磁性槽楔）与定子铁芯槽壁之间普遍均有比较大的间隙，这给安装了磁性槽楔的电动机日后的安全运行埋下了隐患。因此，要彻底解决磁性槽楔脱落的问题，必须在安装工艺上进行改进。

3. 磁性槽楔安装工艺的改进

如前所述，要解决磁性槽楔断裂的问题，根本上要改进

安装工艺，即想办法消除磁性槽楔与定子铁芯之间的间隙，使之稳固成为一个整体，从而确保在电机运行期间，磁性槽楔与定子铁芯槽壁之间不产生微动磨损，为此我们从如下几个方面进行改进：

3.1 磁性槽楔安装工艺之粘合固化问题

在出现定子绕组VPI真空压力浸漆工艺之前，磁性槽楔的安装是采用环氧树脂和固化剂混合作为粘合剂，这种方式随着VPI真空压力浸漆工艺的广泛应用目前已经淘汰，主要的问题是不适应VPI真空压力浸漆工艺流程，这种工艺安装的槽楔不能承受高温，在VPI真空压力浸漆工艺后的高温烘焙下环氧树脂容易发生龟裂。因此这种安装工艺一般在不具备VPI条件的情况下进行局部槽楔维修时采用，当下的制造和维修企业一般均不再采用这种安装方式。

由于目前的电机制造和电机维修普遍采用VPI真空压力浸漆工艺，因此传统的槽楔安装工艺也必须进行相应的调整。在VPI真空压力浸漆工艺下的槽楔安装，安装过程中不再刷涂环氧粘合剂，直接采用填充材料安装磁性槽楔，然后经过VPI真空压力浸漆、烘干后整体进行固化。这种方式的优点是效率高，粘合剂渗透性更好，缺点是磁性槽楔与铁芯槽的配合尺寸偏差较大，以及VPI真空压力浸漆用环氧漆浓度较稀，当填充材料不够饱满时，导致槽楔与铁芯、线圈之间的缝隙较大，漆量难以滞留，导致VPI浸漆工艺后，最终槽楔与铁芯、线圈之间的固定存在较大的间隙，槽楔固定强度不够，为日后长期运行中受交变电磁应力导致槽楔产生机械磨损埋下隐患。因此，当前定子绕组VPI真空压力浸漆工艺下，磁性槽楔安装最关键的工艺是槽楔与铁芯槽的尺寸配合，以及填充材料的选用。

3.2 磁性槽楔安装工艺之尺寸配合问题

根据我们的观察，很多电机尤其是国产电机或者槽楔维修后的电机，槽楔与铁芯之间的尺寸配合比较宽松，存在较大的间隙，比较大的能达到1mm，而这些间隙是无法用填充材料进行填充。该问题产生的原因，一是铁芯槽尺寸测量的困难，尤其是槽楔维修时，铁芯燕尾槽的角度难以准确测量；二是槽楔的加工精度不够，最终加工完成槽楔尺寸与设计尺寸有偏差；三是同一台电机的定子铁芯燕尾槽的尺寸因公差原因不尽相同，且部分槽口还存在轻微的变形；四是定子绕组安装在铁芯槽内，绕组顶部并非为平面，而是呈半圆弧形。上述原因共同作用下，导致磁性槽楔和铁芯槽之间的配合尺寸难以达到精确，最终导致槽楔与铁芯之间无法实

现紧密配合。

对于故障磁性槽楔的更换，我们进行了大量的试验，采用以下方法可以解决槽楔与定子铁芯之间的配合问题：

1) 彻底清理定子铁芯槽内的残余环氧树脂，部分铁芯槽口变形的，要进行整形修正。

2) 对铁芯槽尺寸初步测量后，加工少量的样品槽楔，通过反复“试验安装—再加工—再试验安装”的方式确定磁性槽楔的最终尺寸。

3) 由于磁性槽楔的硬度较高，最终加工的槽楔在铁芯槽口安装时形变量较小，因此安装过程尺寸的轻微正偏差就会导致安装困难，这时可采用砂纸打磨的方式进行局部修正。

4) 对于槽楔与线圈边之间的圆弧间隙，必须采用填充材料进行填塞，优先采用玻璃纤维细绳进行填充，然后再安装槽楔。

通过以上措施的综合应用，最终能保证磁性槽楔与铁芯槽口之间的缝隙小于 0.2mm，这个间隙能保证 VPI 浸渍漆的滞留量，可以很好的填充槽楔与铁芯槽口的间隙。

3.3 磁性槽楔安装工艺之垫条的选用

电机制造或维修企业，在磁性槽楔与定子线棒之间的垫条材料的选用各不相同，一般的以垫 0.2mm 左右环氧玻璃布垫条居多，部分企业采用玻璃丝带或者防电晕半导体垫条。这些填充材料的选用各有各的优缺点。从提高可靠性的目的出发，我们通过多个方案的试验，验证了各种填充材料固化后的可靠性。

试验选材：填充材料选用了环氧玻璃布纤维板、玻璃丝带、防电晕半导体垫条、膨胀纤维垫条；粘合剂分两种，一种是常温下的树脂与固化剂混合粘合剂，另一种是 VPI 真空压力浸渍适用的环氧树脂漆，通过 VPI 真空压力浸渍和烘培工艺^[3]。

试验方法：用上述垫条材料和粘合剂的不同搭配对试验槽楔进行固定，然后采用 120℃温度、16 小时的烘培，烘培后采用着色剂检测槽楔与铁芯槽之间的微裂纹情况，最后对试验槽楔进行破坏性拆解，目视检查各种方案固化的可靠性情况。

根据对多个维修方案的最终试验评价结果，采用膨胀纤维材料和 VPI 真空压力浸漆的组合方案，粘合性能最好，玻璃丝带和 VPI 真空浸漆次之，而传统采用的环氧玻璃布垫条和 VPI 真空浸漆的效果最差。值得一提的是常温环氧

树脂和固化剂混合的粘合剂在 120℃温度烘培下容易发生龟裂，可能跟固化剂的选用有关。另外，我们对膨胀纤维材料的膨胀性能进行了试验，在常温下膨胀材料的厚度为 1.0mm，在 120℃的温度烘培后，厚度膨胀为 2.0mm，膨胀纤维材料能给槽楔提供较好的预紧力，因此磁性槽楔的填充材料以采用膨胀纤维材料配合 VPI 真空压力浸漆效果为最佳。

3.4 磁性槽楔安装工艺之 VPI 真空压力浸漆工艺的改进

尽管进行上述工艺的改进，磁性槽楔与铁芯端部往往还是有较大的间隙，常规的 VPI 真空压力浸漆之后，这些间隙处环氧漆的滞留量依然不足，尤其是定子铁芯两端口附近的磁性槽楔，因此需要采用二次 VPI 真空压力浸漆过程。

为保证定子铁芯端部的槽楔与铁芯之间的漆量饱满，第二次 VPI 真空压力浸漆工艺在滴漆后，进入烘箱烘培前，将电机在烘培方向上调转 180°，使得烘培过程中残漆流向定子槽楔另一端部，从而保证定子两端端部槽楔与铁芯之间的漆量饱满。该方法也有一个缺点，若电机采用立式体位滴漆和烘培，定子铁芯通风孔内会滞留少量的环氧漆，影响定子绕组散热，导致维修后温升偏高，为避免这一缺点最好采用卧式滴漆然后立式烘培的方法。

3.5 结束语

经过上述工艺的改进后，磁性槽楔与铁芯、定子线棒固化成为一个整体，在长期的冷热应力、交变磁场应力的作用下，避免了槽楔与铁芯槽壁之间产生微动摩擦，极大的增强了磁性槽楔的可靠性，文中所述某厂四台长期运转的 4500kW 大型电动机，采用该工艺更换磁性槽楔后，最长的已运行 10 年，目前检查状况良好，再未出现磁性槽楔松动的故障。

参考文献：

[1] 李军丽,胡春雷.磁性槽楔在电机节能技术中的应用[J].中小型电机,2005,(02):57-59.

[2] 赵勇,杨怀海,王丽丽.磁性槽楔在电机磁场的受力分析[J].机械管理开发,2009,24(05):45-46.

[3] 朱巍.磁性槽楔在电机节能技术中的应用研究 [J].山东工业技术,2016,(13):205.

作者简介：

赵云 (1975 年 12 月 -)，男，汉，四川广元，高级技师，中等专科，高压电气设备运维及可靠性管理

刘志强 (1972 年 6 月 -)，男，汉，吉林镇赉，高级技师，大学专科，高压电气设备运维及可靠性管理