[变压器]

矿用隔爆型干式非晶合金铁心变压器技术工艺研究

文/天津市特变电工变压器有限公司　朱贞如　陈　杰

介绍了矿用隔爆型干式非晶合金铁心变压器的相关技术工艺，从外形、非晶合金铁心、线圈、器身和壳体等方面进行了详细分析。

矿用隔爆型干式变压器（以下简称“隔爆干变”）应用在有甲烷混合气体和煤尘，且有爆炸危险的矿井中，为井下各种电力设备和各种用电装置提供电源。煤矿的快速发展离不开高性能、高可靠性的隔爆干变作为电力保障。煤炭一直是我国的主要能源，占到一次能源总量的70%以上。几十年来我国的煤炭工业得到了高速发展，经过国家的数次整合、改革，我国现有的几十座大型现代化煤矿都确定了科学的、长期的发展规划，以大型自动化采掘设备的逐步应用作为后盾。近年来，中央和地方把节能减排工作作为调整经济结构、转变发展方式的突破口和重要抓手，各大煤矿也陆续将降低单位原煤产量能耗作为重要课题加以研究。矿用隔爆型干式非晶合金铁心变压器（以下简称非晶隔爆干变）具有良好的节电环保性能，空载损耗比普通硅钢片变压器的空载损耗可降低70%左右。同时，非晶隔爆干变对供电系统无特殊要求，无论是电力使用高峰或是低谷均可以连续节能，对长期处于负荷运行的矿井供电系统尤为重要。通过计算，在寿命周期内，非晶隔爆干变总投资运行成本较常规隔爆干变降低了20%以上，预计未来几年内煤矿会逐渐接受非晶隔爆干变，从而迎来非晶合金隔爆变的时代。

图1　非晶隔爆干变外形图

非晶合金材料简介

非晶态合金主要是以铁（Fe）、钴（Co）、硅（Si）、硼（B）及碳（C）等元素依一定的配比合成,在制造的过程中，采取急速冷却的工艺，使得金属没有明显的晶格界面，形成无规则的非晶态结构，故称其为“非晶合金”。非晶合金材料是一种新型节能材料，是将熔融的合金液体喷在高速转动的滚筒上，以超急冷技术（以每秒百万度的速度降温）制成的非晶合金片，非晶材料生产工艺流程短，具有优异的综合性能，代替坡莫合金、硅钢和铁氧体，比硅钢片损耗约下降70%，在电力系统中应用，显示出效率高、节能等特点。

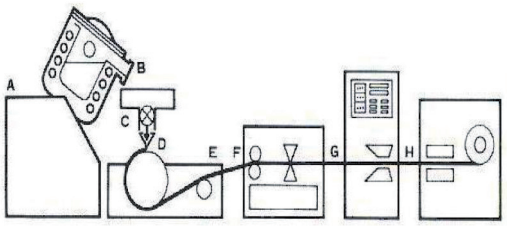

图2　非晶合金带材制造流程

图中，A表示原材料在感应炉内溶解；B表示溶解材料转换至供料部；C表示浇注头控制；D表示溶解薄料高速喷在冷却轮上；E表示喷出料以106℃/s冷却形成非晶合金带；F表示测量合金带的宽度及厚度并反馈给制程控制；G表示引导至穿料单元；H表示收料。

非晶合金没有晶格和晶界存在，因此，其磁化功率小，并具有良好的温度稳定性。由于非晶

合金为无取向材料，故可以采用直接缝，且不分级，使制造铁心的工艺比较简单。非晶合金带材的厚度为0.02~0.03 mm，是硅钢片的1/10左右，因此，其涡流损耗很小。非晶合金电阻率高，是硅钢片的3~6倍，且对机械应力非常敏感，无论是拉应力还是弯曲应力都会影响其磁性能，因此在变压器铁心结构设计时需采取特殊的紧固措施，以减少铁心受力。采用非晶合金材料制成的变压器铁心空载损耗以及空载电流很低，是一种用节能材料制成的双节能产品。非晶合金铁心与硅钢片铁心的性能比较如图3、图4所示。

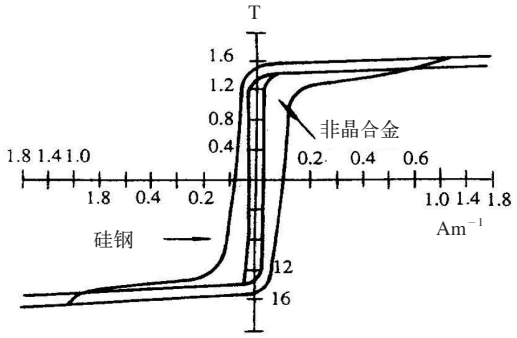

图3　非晶合金与硅钢片磁滞曲线

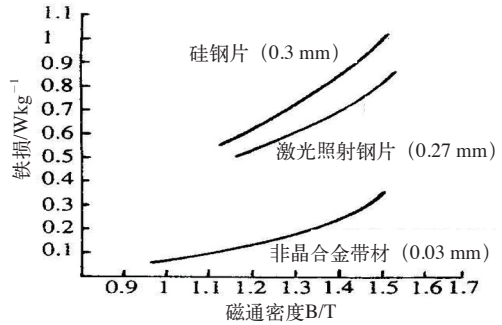

图4　非晶合金与硅钢片的铁损

非晶隔爆干变的铁心结构

目前，隔爆变一般采用硅钢片制成的铁心，空载损耗大，造成很大的电能浪费。近年来非晶合金材料作为变压器铁心已经在常规变压器上得到了广泛应用，但由于煤矿井下变压器使用环境恶劣，隔爆变在井下移动过程中很难保证不受到较大的冲击，这就给非晶合金材料的应用带来了一定的限制，另一方面，采用非晶合金铁心后，由于非晶合金材料的强度问题，如果铁心结构处理不好，势必影响非晶隔爆变抗突发短路的性能。

非晶隔爆移变铁心采用非晶合金材料，基本结构为三相五柱式，3个中柱上套装高低压线圈，两侧旁柱为磁流通路径。采用该结构后，显著降低了产品的高度，适应了煤矿井下特殊的工作环境。单框非晶铁心表面采用2 mm的树脂进行封涂，形成硬性结构，进一步减小铁心的受力，使其免受外力的影响；铁心上下面覆盖多层隔音材料，在非晶隔爆变运行过程中起到减震的作用，有效地保护铁心，并且降低噪声。铁心装配搭接完后，在铁心搭接处涂一层硅胶材料，增强了紧固度，进一步达到降低噪声的目的，同时，由于非晶合金铁心材料很薄很脆，如果处理不好很容易产生碎片，涂上硅胶材料，硅胶凝固后将接茬处的铁心固化为一体，避免了线圈的绝缘受到铁心碎片的影响。

图5　非晶合金铁心

非晶隔爆移变的线圈结构

高低压线圈采用共绕结构，低压线圈绕制完成并固化后，在低压线圈上固定气道条、绝缘筒，之后直接在其上绕制高压线圈。这样就保证了线圈的绝缘强度和机械强度的同时，方便操作。高压采用D型接法，把谐波对电网的污染降到最小，从而保证电网的供电质量。产品线圈的绝缘浸渍采用“VPI”真空压力浸渍技术，保证产品绝缘强度，提高生产效率。低压线圈采用箔材绕制，高压线圈为圆筒式绕组和连续式绕组，增大了线圈的抗短路能力和可靠性。由于受非晶合金材料的行业限制，非晶合金铁心截面为矩形，因此，非晶隔爆变的高、低压线圈均加工成圆角矩形，从而提高了导线的利用率。与采用多级圆形截面铁心相比，可节省铁心及电磁线材料，并提高隔爆壳体的填充率。非晶隔爆变不以非晶合金铁心为主支承机构，线圈的压紧自成体系，以减少线圈和器身对铁心的压力。调整线圈模具及生产工艺，并在低压线圈内壁放置绝缘筒以增加线圈强度。产品线圈为矩形结构，和以往的线圈形状不一致，在绕制过程中对于短轴辐向尺寸较难控制。通过工艺攻关，研制了分体式线圈模具，同时增设了张紧装置、专用放线架和线圈轴向压紧脱模工装等。通过实际操作验证，上述工艺方法能很好地保证矩形线圈的辐向尺寸。

非晶隔爆移变的器身结构

由于非晶合金材料的强度较低，地面使用的非晶合金干式变压器或者非晶合金油浸式变压器安装后不再移动，一定程度上可以缓解非晶合金铁心的受力，而非晶隔爆移变在煤矿井下所处位置往往不平整，并且需要经常移动，为了解决这个技术难点，通过多次现场调研和软件模拟，调整了铁心和夹件、线圈之间的支撑结构，改善了铁心的受力情况，从而保证了产品的各项性能。

铁心的顶部和底部分别设有上夹件和下夹件，上夹件和下夹件之间通过位于铁心侧壁的侧夹件连接，在铁心、线圈、上夹件、下夹件以及侧夹件之间均设有绝缘层。夹件采用框架式结构，铁心接缝置于下夹件内，下夹件高出铁心下铁轭，变压器器身装配完成后，将下夹件两端封口作为模具灌注树脂，使树脂与铁心合为一体。采用此结构使铁心不再有外露的非晶合金材料，结构更加稳固，最大程度地减少铁心的受力，更适宜煤矿井下恶劣的工况，抗突发短路能力强，使用寿命长等优点。

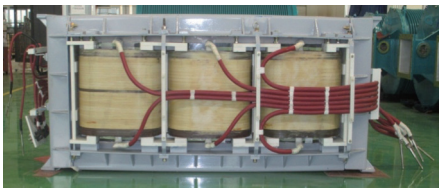

图6　非晶隔爆移变器身结构

非晶隔爆移变的壳体结构

隔爆变必须要保证隔爆性能。要保证产品的隔爆性能，就要实现两点，一是内部发生爆炸时不要有火花传到壳体外部；二是隔爆壳体必须能经受住内部爆炸产生的冲击。第一点的实现主要依靠法兰连接处的隔爆面，第二点要求壳体有足够的强度。隔爆面的处理在此不再赘述，本文所述非晶隔爆干变采用椭圆形截面外壳结构，利用Solidworks等软件对壳体的每个细节进行强度校核，并根据校核的结果通过改善壳体内部纵向加强筋的排布、对端盖薄弱部位进行加强等措施，使产品结构设计更加合理。筒形壳体辐向强度较高，但由于箱壁薄，抗碰撞能力较差。隔爆变压器产品在装卸过程以及煤矿井下运行过程中难免受到侧面碰撞，侧面波纹很容易变形甚至破损，导致壳体失去隔爆性能。因此在壳体两侧加装了保护杠式防碰撞保护装置，可以很好地保护壳体，避免了外力的冲击，使产品更加安全。

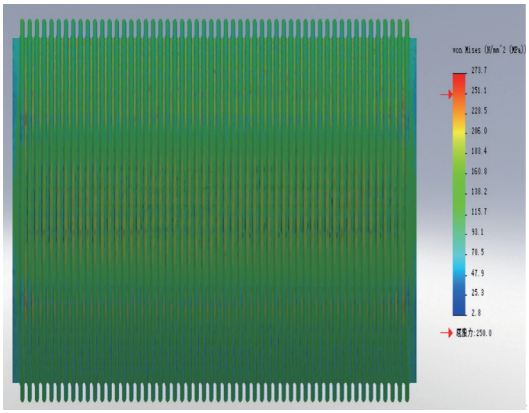

图7　波纹管应力分布

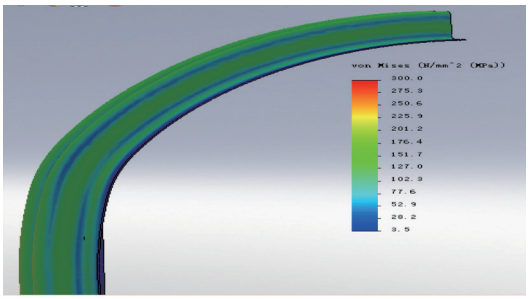

图8　波纹管截面应力分布

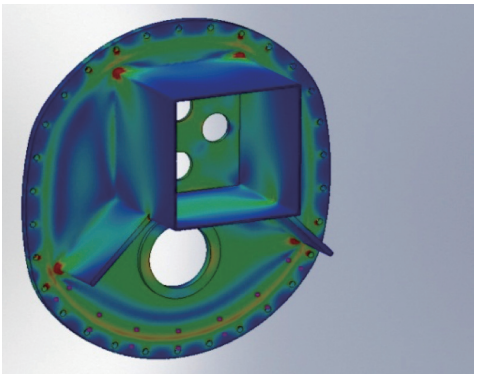

图9　端盖应力分布

结束语

近年来，国家在保护环境、节能减排、追求可持续发展方面加大了宣传和投入，煤炭开采作为一个耗能大户，所承担的压力将会越来越大。非晶隔爆干变不仅运行时节能效果明显，而且在产品本身的制造环节中降低了大量能耗，每年可节省大量发电燃料，减少对大气的污染。伴随着一系列保障措施的顺利开展，节能减排已经成为我国一项持续开展的长期工作，节能的产品与产业会越来越受到国家的鼓励与支持，非晶隔爆干变也将在矿井中得到广泛应用。**EA**

（收稿日期：2016.09.20）

（编辑：刘群点）