

配电变压器用非晶合金的研究进展及应用前景

武兰民¹, 程灵², 邱宁¹, 杨富尧², 韩钰², 陈新²

(1. 国家电网有限公司, 北京 100031; 2. 全球能源互联网研究院有限公司, 北京 102209)

摘要:内部原子呈长程无序排列的铁基非晶合金具有低矫顽力、低损耗、高磁导率等优异的软磁性能, 现已广泛应用于平面铁心及立体卷铁心制造。综述了节能配电变压器用新型铁基非晶合金材料的研究进展, 对比分析了国内外 1K101 典型牌号非晶合金与 0.18 mm 厚度规格 18QH065 牌号极低铁损取向硅钢材料的磁性能及磁致伸缩特性。结合非晶合金铁心变压器在农网运行过程中体现的安全性、经济性及环保性特征, 讨论了非晶合金配电变压器面临的挑战及发展方向。

关键词:非晶合金; 配电变压器; 研究进展; 应用前景

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20183568

中图分类号: TG139⁺.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2020)12-0010-04

Research Progress and Application Prospect of Amorphous Alloys for Distribution Transformer

WU Lanmin¹, CHENG Ling², QIU Ning¹, YANG Fuyao², HAN Yu², CHEN Xin²

(1. State Grid Corporation of China Ltd., Beijing 100031, China; 2. Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: The iron base amorphous alloy with long-range disordered arrangement has excellent soft magnetic properties, such as low coercive force, low core loss, high permeability and so on. It has been widely used in the manufacture of plane iron core and triangular volume core. The research progress of amorphous alloy materials used in distribution transformers was reviewed. The electromagnetic properties of 1K101 typical amorphous alloy and 18QH065 grain-oriented silicon steel were analyzed. Considering the characteristics of safety, economy and environmental protection of amorphous alloy transformers operated in rural power grid, the challenges and development directions of amorphous alloy distribution transformers were discussed.

Key words: amorphous alloy; distribution transformer; research progress; application prospect

非晶态合金通常是采用平面流高速连铸工艺, 将熔融合金快速凝固成厚度仅 18~30 μm 的极薄带材。该材料具有超低的结构关联尺寸(长程无序、短程有序)和磁各向异性常数, 软磁性能优异^[1-3], 是一种典型的应用和制备“双绿色”节能材料。其中, 铁基非晶合金具有饱和磁感应强度高、损耗低、磁导率高、晶化温度高、价格相对便宜等优势, 已在高效节能配电变压器领域实现规模化生产和批量应用^[4]。

随着国家政策《配电变压器能效提升计划

(2015-2017 年)》顺利实施, 高效配电变压器在网运行比例显著提高, 2017 年新增量中高效配电变压器占比超过 70%, 其中 S15 型能效一级非晶合金变压器得到广泛应用。然而, 在能效水平全面提升的同时, 非晶合金变压器存在运行噪声大、抗突发短路能力弱、过负荷及过励磁能力不足等问题仍亟待解决^[5-7]。此外, 随着 0.18mm 厚度规格 18QH065 牌号极低损耗磁畴细化取向硅钢的出现, 非晶合金变压器相较于传统硅钢铁心变压器空载损耗低的比较优势被削弱, 因此急需开发新型非晶合金材料及应用技术。

本文主要综述了高效节能配电变压器用非晶合金材料的研究进展, 对比分析了目前 S15 型非晶变压器常用的 1K101 典型牌号非晶合金带材与已小批量生产的 18QH065 极低铁损取向硅钢材料的电磁性能, 结合非晶合金铁心变压器在农网运行过程中体现的安全性、经济性及环保性特征, 探讨了非晶

收稿日期: 2018-11-13

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGRI-WD-71-16-006)

作者简介: 武兰民(1974-), 男, 山西交口人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电网设备质量管理; E-mail: 13651363136@163.com

通讯作者: 程灵(1988-), 男, 湖南娄底人, 高级工程师, 博士生, 主要从事电工磁性材料应用技术研究; 电话: 15011461297;

E-mail: chengling1107@126.com

合金配电变压器面临的挑战及未来的发展方向。

1 铁基非晶合金研究进展

非晶合金内部原子呈长程无序排列,没有阻碍磁畴移动的晶界,导致矫顽力及磁滞损耗小;同时,原子无序排列造成的高电阻率及30 μm以下超薄厚度使得非晶合金的涡流损耗也很小。因此,与传统取向硅钢晶态软磁材料相比,非晶合金具有更低的铁心损耗^[8-9]。根据非晶合金成分的不同,目前应用较广的非晶合金主要包括Fe基非晶合金(1K101和1K102)、Co基非晶合金(1K201~1K205)、Fe-Ni基非晶合金(1K501~1K503)以及Co-Ni基非晶合金(1K601和1K601J)。其中,铁基非晶合金具有饱和磁感应强度高、损耗低、晶化温度高、价格相对便宜等优势,目前已广泛应用于输配电领域^[4]。应用于高效配电变压器铁心制造的非晶合金材料需为宽带,主要有142、170及213 mm等3种尺寸的宽度。非晶合金宽带基于平面流铸造技术生产,该技术最早由AlliedSignal公司(后被Honeywell公司兼并)于1979年研发成功,1982年在该公司具备连续生产能力后进入商用阶段。开发的METGLAS 2605系列非晶合金材料具有优良的软磁性能(见表1)^[3],饱和磁感应强度为1.56~1.75 T、矫顽力为2.40~7.96 A/m,代替传统取向硅钢应用于配电变压器铁心制造,空载损耗可降低70%以上,节能效果显著。

表1 铁基非晶合金典型类型及软磁性能

Tab.1 Typical types of Fe-based amorphous alloys and magnetic performance

合金名称	化学成分 (wt%)	饱和磁感应强度 B_s/T	矫顽力 $H_c/(A \cdot m^{-1})$
2605SA1(1K101)	$Fe_{78}B_{13}Si_9$	1.56	2.40
Amomet	$Fe_{78}B_{12}Si_{10}$	1.56	4.77
2605	$Fe_{80}B_{20}$	1.60	6.37
2605SC	$Fe_{81}B_{13.5}Si_{3.5}C_2$	1.61	4.77
2605S3	$Fe_{79}B_{16}Si_5$	1.58	7.96
2605Co	$Fe_{67}Co_{18}B_{14}Si_1$	1.75	3.98

在实验室研究方面,通过优化FeSiB铁基非晶合金成分设计研究进一步提高铁基非晶合金的饱和磁感应强度,已取得重要进展。由于目前1K101低铁损非晶合金的饱和磁感应强度仅为1.56 T,远低于取向硅钢的2.03 T,因此造成非晶合金铁心变压器体积稍大、负载损耗稍高、铜等原材料成本高。为提高 B_s ,需增加基体中Fe含量,而相应Si、B等非晶

化元素含量被降低,这将导致非晶形成能力下降,宽带非晶合金制备难度增大。近年来,Gao等^[9]通过微量控制Cu元素添加量,开发的 $Fe_{75.5}C7Si_{3.3}B_3P_{8.7}Cu_{0.7}$ 合金,其 B_s 可达1.61 T,同时具备高的非晶形成能力;Liu等^[10]采用熔体提纯方法开发出的 $Fe_{81}Mo_1P_{7.5}C_{5.5}B_2Si_3$ 非晶合金, B_s 达1.64 T;Wang等^[11]通过提高Fe含量至83%,并合理调节Si、P、B等元素含量比例,制备出了 B_s 为1.61~1.68 T、矫顽力为2.4~4 A/m的非晶合金。上述研究成果克服了以往发现的高饱和磁感成分体系原材料昂贵、非晶形成能力弱等缺点,有望实现工业化制备。

在工业化规模生产方面,国外日立金属公司于2003年收购Honeywell公司Metglas业务部后,目前生产的2605SA1、2605HB1M牌号非晶合金宽带产品磁性能、工艺性能及批量稳定性已达到世界先进水平,2017年在华销售量超过5万吨。通过数十年的技术攻关,我国先后建成了百吨、千吨及万吨级铁基非晶宽带生产线。2017年,非晶带材产能超过15万吨,生产企业包括安泰科技、青岛云路、中机联供、兆晶股份、中岳非晶等,产品性能取得显著提升,1K101普通型产品磁感 B_8 超过1.5 T,1K102高磁感型产品磁感高于1.6 T、矫顽力低于2.5 A/m,但仍需解决非晶合金带材生产宽度受限、退火脆性、饱和磁感应强度低等技术难题。

2 非晶合金与取向硅钢性能对比

2.1 材料与测试方法

上海置信电气公司随机抽取不同厂家生产的S15型配电变压器常用1K101牌号非晶合金带材,制成环形样品并按推荐的热处理制度退火,样品尺寸(外径×内径×高)为:230 mm×200 mm×30 mm。采用国标GB/T 19346.1-2017^[12]《非晶纳米晶合金测试方法第1部分:环形试样交流磁性能》测量环形样品铁损,磁密取0.3~1.35 T,间隔为0.1 T,采用GB/T 19345.1-2017^[13]《非晶纳米晶合金第1部分:铁基非晶软磁合金带材》中推荐的单片法测量样品磁感应强度。

收集由某钢铁公司生产的18QH065及30QG120牌号高磁取向硅钢,样品尺寸为500 mm×500 mm,采用GB/T 13789-2008^[14]《用单片测试仪测量电工钢片(带)磁性能的方法》规定的方法测量取向硅钢的磁性能。采用IEC/TR 62581-2010^[15]《Methods of

measurement of the magneto- striction characteristics by means of single sheet and Epstein test specimens》推荐方法测量两种软磁材料的磁致伸缩系数。

2.2 测量结果对比分析

当磁密为 1.35 T (接近非晶合金配电变压器磁密设计值)时,两种 1K101 非晶合金的铁损分别为 0.205、0.245 W/kg,传统取向硅钢 30QG120 牌号样品的铁损为 0.611 W/kg,约为非晶合金的 2.7 倍。随着 0.18 mm 薄规格 18QG065 磁畴细化高磁感取向硅钢的推出,铁损大幅降低,其铁损 P_{1.35} 较 30QG120 取向硅钢低 68.8%,为 0.362 W/kg,比非晶合金铁损高约 61%。这表明,随着高性能取向硅钢(18QG065)技术的进步,工频下非晶合金的低损耗优势在减小。因此,这也倒逼在非晶领域开发新型非晶合金材料及应用技术。

1K101-1 及 1K101-2 非晶合金的磁感 B₈ 分别为 1.548、1.532 T,而 30QG120 和 18QG065 取向硅钢的磁感 B₈ 高达 1.901、1.923 T,整体上较非晶合金高约 24%。非晶及硅钢的饱和磁感应强度由材料的化学成分决定,前者为 1.56 T,后者为 2.03 T。与此同时,磁密为 1.35 T 时,30QG120 和 18QG065 取向硅钢的磁致伸缩系数 λ_{pp} 分别为 0.289×10^{-6} 、 0.230×10^{-6} ,而两种非晶合金的 λ_{pp} 值比取向硅钢大约 10 倍。非晶合金相对较低的磁感应强度是造成配电变压器体积偏大的原因,而高于取向硅钢一个数量级的磁致伸缩系数导致非晶合金变压器噪声显著增大。但通过优化铁心结构设计,非晶配电变压器测试噪声均能达到国家相关标准。

3 非晶合金铁心变压器应用现状及前景

3.1 非晶合金变压器应用现状

与传统硅钢变压器相比,非晶合金铁心变压器具有明显更低的空载损耗及空载电流,在负载率为 15%~30%时效率高(具体还与变压器容量和功率因素等有关),且全寿命周期(服役寿命按 30 年计算)成本 LCC 低^[16-18],因此在负载率较低的农网中进行了广泛应用。截止 2017 年底,我国高效配电变压器在网运行比例的提高超过 14%,当年,国家电网公司招标采购的配电变压器中高效非晶变压器数量占比超过 50%。

3.2 非晶合金变压器铁心结构

非晶合金铁心结构主要包括三相三柱式铁心、

四框五柱式平面铁心、立体卷铁心等。其中,三相三柱式铁心(Yyn0)属于早期产品结构,铁心中存在易漏磁的三角区,且接线组别生产工艺不成熟。四框五柱式平面铁心是目前市场上常见结构之一,铁心中两旁轭可供磁通中高次谐波或零序分量流通,奇次谐波相互抵消,降低漏抗压降并改善电流质量;同时采用 Dyn11 高低压绕组形式可降低不平衡电流对电压的影响。立体卷铁心具有损耗低、噪声小、三相磁路平衡等特点,应用实践表明,采用该结构生产的非晶合金变压器优势明显,相关团体标准《三相油浸式非晶合金立体铁心配电变压器技术参数和要求》即将发布。

3.3 非晶合金变压器运行可靠性

非晶合金变压器运行可靠性与变压器制造水平及运行维护水平直接相关。在发挥其节能降耗优势的同时,出现有一定的故障率。资料显示^[19-20],某省电力公司 2010~2013 年间投运的非晶合金变压器中有 48 台存在缺陷或故障。故障类型主要包括运行噪音超标、匝间短路、低压接地、渗漏油、导电管故障、壳体锈蚀等。

分析故障原因,噪音超标主要与铁心结构类型、变压器制造工艺、过励磁条件下非晶合金铁心易变现、铁心材料磁致伸缩系数大等因素有关;匝间短路容易发生在矩形绕组受力不均匀的拐角处,且该处位置电场强度较高;当绕组绕制过程中存在绝缘缺陷或装配过程中产生的非晶碎片未清理干净,运行时由于器身震动部分非晶碎片从铁心或其他位置滑落部分进入油道,将导线漆膜割破,从而造成匝间短路故障;当变压器的低压绕组较长且无固定措施时,受铁心震动影响,引出线偏移后易与夹件接触,引发低压接地故障;变压器渗漏油、壳体锈蚀等情况的出现与中低端变压器市场壁垒不高、部分厂家追逐利益而不注重产品质量有关。

与此同时,抗突发短路能力是评估变压器运行可靠性的重要指标,目前非晶合金变压器存在抗突发短路能力弱的特点^[5]。在兼顾成本的前提下,可以从以下方面采取措施加强:在低压线圈内部安置绝缘硬筒,低压绕组采用铜箔绕制,层间绝缘采用棱格上胶绝缘纸与铜箔热固化一体成型;高压绕组采用多层滚筒式结构,并提高绕组的紧度,铜绕组确保优良的耐油性及绝缘性;适当提高变压器的短路阻抗,降低短路电流倍数;采用合理的夹件夹紧结构,确保

器身受力均匀而紧实,同时铁心不受力。

3.4 非晶合金变压器应用前景

从配电变压器行业发展趋势看,未来将继续以能效提升、节能降耗为主要发展方向,非晶合金变压器以其低损耗特征在低负载领域保持良好的应用前景。随着 FA30S12、FA25S08、FA20S06 等高性能非晶带材及立体卷铁心相关新型生产工艺的开发,非晶合金变压器的生产效率、空载损耗、噪音等指标进一步实现提升^[21-23]。如置信电气最近开发的新一代 SBH17 型非晶合金配电变压器,空载损耗及负载损耗较 SBH15 均下降 10%,带动了变压器行业技术进步。

与此同时,随着取向硅钢研发及生产技术水平快速提升,18QH065 牌号取向硅钢($P_{1.7}=0.625\text{ W/kg}$, $B_8=1.923\text{ T}$)已实现小批量生产,铁损不断接近非晶合金带材水平,且具有高磁感、高机械强度、高叠装系数、低磁致伸缩等优势,对非晶合金变压器构成挑战。某变压器公司采用 18QH065 取向硅钢制造的配电变压器空载损耗与 S15 型非晶变压器相当,而负载损耗比 S15 型非晶变压器低约 11%,且由于铁心磁密设计约为 1.56T,变压器体积与现有 S13 型硅钢配电变压器相当。

综上,随着高性能非晶合金(以高饱和磁感、高韧性等为发展方向)及薄规格取向硅钢(以极低铁损为发展方向)制造技术的不断进步,未来非晶变压器和硅钢变压器将长期保持竞争共存关系;并在不同的应用领域发挥各自优势,对比如图 1 所示,定量比较需全面考虑材料牌号、负载率、变压器容量、功率因素、价格等商务因素。最后,控制非晶合金变压器生产成本、强化监控产品质量、提高运行维护水平等,对于推动高效节能非晶合金变压器健康持续发

展具有重要意义。

4 结语

(1) 配电变压器用铁基非晶合金具有低矫顽力、极低铁损、高磁导率等优势,其采用的平面流铸造技术流程短且节能环保,呈现了典型的应用和制备双节能特征。但面临薄规格取向硅钢技术的不断进步,其存在的带材规格少、饱和磁感应强度偏低、退火脆性等技术问题得到凸显。

(2) 未来非晶变压器和硅钢变压器将长期保持竞争共存关系,并在不同的应用领域发挥各自优势。高性能非晶合金带材、0.20mm 及以下薄规格低损耗取向硅钢、配变新型生产工艺等将是研发重点,以满足我国配电变压器能效提升、节能降耗的发展需要。

参考文献:

- [1] 蒋发伦. 节能变压器用非晶合金的改性研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(22): 116-118.
- [2] 周少雄, 陈文智. 非晶态合金材料的发展现状及在配电变压器中的应用[J]. 新材料产业, 2010(3): 39-43.
- [3] 姚可夫, 施凌翔, 陈双琴, 等. 铁基软磁非晶/纳米晶合金研究进展及应用前景[J]. 物理学报, 2018, 67(1): 1-7.
- [4] 王金丽, 盛万兴, 杨红磊, 等. 非晶合金配电变压器的技术性能分析[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 32-37.
- [5] 吴鹏, 陆云才, 陈铭明, 等. 江苏电网非晶合金变压器综合评估[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(3): 1-5.
- [6] 孙林, 王梦云, 翟向向, 等. 我国电力变压器发展现状及趋势[J]. 电力设备, 2003, 4(4): 78-81.
- [7] 胡贤德, 吴环红, 张弘, 等. 10 kV 配电变压器和箱式变电站升压改造至 20 kV 电压等级的研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(12): 118-126.
- [8] 张卫国. 非晶合金变压器铁心技术及发展前景[J]. 新材料产业, 2011(7): 6-9.
- [9] Gao J, Li H, Jiao Z, et al. Effects of nanocrystal formation on the soft magnetic properties of Fe-based bulk metallic glasses [J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(5): 20-25.
- [10] Liu F, Yao K F, Ding H. Fe-based glassy alloys with high iron content and high saturation magnetization [J]. Intermetallics, 2011, 19(11): 1674-1677.
- [11] Wang A, Zhao C, Men H, et al. Fe-based amorphous alloys for wide ribbon production with high B_s and outstanding amorphous forming ability [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 630: 209-213.
- [12] 非晶纳米晶合金测试方法 第 1 部分: 环形试样交流磁性能: GB/T 19346.1-2017[S].

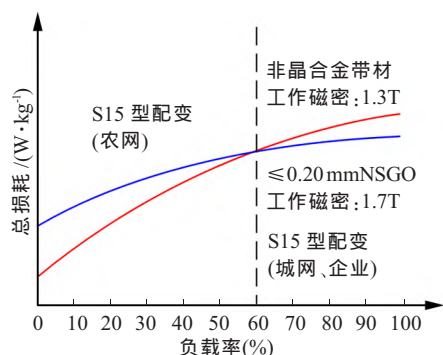



图 1 非晶合金变压器和薄规格硅钢变压器应用优势对比
Fig.1 Comparison of application advantages of amorphous alloy transformer and thin gauge silicon steel transformer

(下转第 20 页)

- [22] Ordys A W, Clarke D W. A state-space description for GPC controllers [J]. International Journal of Systems Science, 1993,24(9):1727-1744.
- [23] Hofmeister W, Griffith M. Solidification in direct metal deposition by LENS processing[J]. JOM,2001,53(9):30-34.
- [24] Wang L, Felicelli S D, Craig J E. Thermal modeling and experimental validation in the LENSTM process [J]. Rare Metals,2007(S1):153-156.
- [25] Yu J, Lin X, Wang J, et al. Mechanics and energy analysis on molten pool spreading during laser solid forming [J]. Applied Surface Science,2010,256(14):4612-4620.
- [26] Hu D, Kovacevic R. Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2003,43(1):51-60.
- [27] Lei J B, Wang Z, Liu L F. Design of forming shape measurement system for laser molten pool in laser fabricating [J]. Applied Mechanics & Materials,2010,37-38:327-330.
- [28] Hu D, Kovacevic R. Modelling and measuring the thermal behavior of the molten pool in closed-loop controlled laser-based additive manufacturing [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture,2003,217(4):441-452.
- [29] Wang L. Research on the real-time detection and control for the width of laser cladding bead[D]. Hunan:Hunan University, 2011.
- [30] Gockel J, Fox J, Beuth J, et al. Integrated melt pool and microstructure control for Ti-6Al-4V thin wall additive manufacturing [J]. Materials Science & Technology,2015,31(8):912-916.
- [31] Ding Y, Warton J, Kovacevic R. Development of sensing and control system for robotized laser-based direct metal addition system[J]. Additive Manufacturing,2016,10:24-35.
- [32] Miyagi M, Tsukamoto T, Kawanaka H. Adaptive shape control of laser-deposited metal structures by adjusting weld pool size[J]. Journal of Laser Applications,2014,26(3):1-7.
- [33] Hofman J T, Pathiraj B, Dijk J V, et al. A camera based feedback control strategy for the laser cladding process [J]. Journal of Materials Processing Technology,2012,212(11):2455-2462.
- [34] Heralić A, Christiansson A K, Hurtig K, et al. Control design for automation of robotized laser metal-wire deposition [J]. IFAC Proceedings Volumes,2008,41(2):14785-14791.
- [35] Arias J L, Montealegre M A, Vidal F, et al. Real-time laser cladding control with variable spot size[J]. Laser 3D Manufacturing,2014,8970(3):395-406.
- [36] 陈殿炳. 激光熔覆池图像检测试验研究[D]. 上海:上海交通大学,2015.
- [37] Yang Y X. Real-time detection and closed-loop control of the deposition height in the process of CO₂ laser additive manufacturing [D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2016.
- [38] Fathi A, Durali M, Toyserkani E, et al. Control of the clad height in laser powder deposition process using a PID controller [C]//ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition,2006:619-624.
- [39] Zeinali M, Khajepour A, Zeinali M, et al. Height control in laser cladding using adaptive sliding mode technique:Theory and experiment [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering,2010,132(4):575-590.
- [40] Song L, Bagavath S V, Dutta B, et al. Control of melt pool temperature and deposition height during direct metal deposition process [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2012,58(1/2/3/4):247-256.
- [41] Heralić A, Christiansson A K, Ottosson M, et al. Increased stability in laser metal wire deposition through feedback from optical measurements [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2010,48(4):478-485. 

(上接第 13 页)

- [13] 非晶纳米晶合金 第 1 部分: 铁基非晶软磁合金带材:GB/T 19345.1-2017 [S].
- [14] 用单片测试仪测量电工钢片(带)磁性能的方法:GB/T 13789-2008 [S].
- [15] Methods of measurement of the magnetostriction characteristics by means of single sheet and Epstein test specimens:IEC/TR 62581-2010 [S].
- [16] 罗晓初,李乐,魏志连,等. 全寿命周期成本理论在配电变压器改造投资决策中的应用[J]. 电网技术,2011,35(2):207-211.
- [17] 郑鑫,严彪. 非晶合金铁心配电变压器的发展及应用[J]. 上海有色金属,2011,32(2):95-98.
- [18] 田建伟,赵跃进,陈海红,等. 我国高效节能配电变压器的生命周期成本分析[J]. 中国能源,2014,36(2):36-40.
- [19] 李学斌,于在明,韩洪刚. 非晶合金变压器典型故障原因分析[J]. 东北电力技术,2014(5):31-34.
- [20] 关银环. 非晶合金变压器噪声研究[J]. 电工电气,2015(1):51-53.
- [21] 李彦斌,陈文智,张占全. 变压器装配工艺对非晶合金铁心性能的影响[J]. 变压器,2017(7):41-45.
- [22] 梁礼明,曾游飞,赖仲蓉,等. 一种改进的非晶合金变压器空载损耗计算[J]. 科学技术与工程,2018,18(5):224-228.
- [23] 田潇阳,马光,陈新,等. 非晶合金变压器铁心性能对比的试验研究[J]. 变压器,2017(4):64-68. 