高导电性能铝合金在新型电力金具制造中的应用研究

张园梦 张鹏扬
中国电建集团河南电力器材有限公司，河南 漯河 462300

[摘要]电力金具一直以铸铁、低碳钢为主，铁磁性造成的磁滞、涡流损耗在输电线路损耗中不能忽略，金具导电能力差又使接触电阻和温升问题在大容量电网工况下更加严重。用高导电铝合金代替传统的铁磁材料，并且保证载流和承载的功能，是金具制造技术发展的一个重要方向。文中从材料选择、典型金具制造和节能效益评价三个方面进行论述，对铝镁硅系高导电铝合金导电率与力学性能的匹配逻辑进行梳理，分析悬垂线夹、耐张线夹和连接金具在铸造、锻造和压接工艺下的性能特点，用损耗试验数据和检测指标来讨论制造质量控制和全寿命周期经济性。从分析可知，铝合金金具的节能效益主要是由于磁损耗通道被消除，而不是由于材料电阻率的变化；制造过程中导电率控制、接触面状况和热处理制度共同影响着该收益能否实现。

[关键词]高导电铝合金；电力金具；导电率；电力损耗；制造工艺
DOI：10.33142/hst.v9i9.20642 中图分类号：TM283.2 文献标识码：A

Research on the Application of High Conductivity Aluminum Alloy in the Manufacturing of New Power Hardware

ZHANG Yuanmeng, ZHANG Pengyang
PowerChina He'nan Electric Power Equipment Co., Ltd., Luohe, He'nan, 462300, China

Abstract: Electric power fittings have always been mainly made of cast iron and low-carbon steel. The hysteresis and eddy current losses caused by ferromagnetism cannot be ignored in transmission line losses. The poor conductivity of fittings also makes contact resistance and temperature rise problems more serious in high-capacity power grid conditions. Replacing traditional ferromagnetic materials with highly conductive aluminum alloys while ensuring current carrying and load-bearing functions is an important direction for the development of hardware manufacturing technology. The article discusses the matching logic between the conductivity and mechanical properties of aluminum magnesium silicon high conductivity aluminum alloys from three aspects: material selection, typical hardware manufacturing, and energy-saving benefit evaluation. It analyzes the performance characteristics of suspension clamps, tension clamps, and connecting hardware under casting, forging, and crimping processes, and discusses manufacturing quality control and full life cycle economy using loss test data and detection indicators. From the analysis, it can be concluded that the energy-saving benefits of aluminum alloy fittings are mainly due to the elimination of magnetic loss channels, rather than changes in material resistivity; The conductivity control, contact surface condition, and heat treatment system during the manufacturing process collectively affect whether this benefit can be achieved.

Keywords: high conductivity aluminum alloy; electric power fittings; conductivity; power loss; manufacturing process

引言

输电线路中的电力金具具有支撑、固定、连接、保护导线的作用，其材料的选择长期以来一直受到“强度优先”的工程惯性影响，可锻铸铁、热镀锌钢因此成为了悬垂线夹、耐张线夹以及各种连接件的标准材质。但是铁磁材料在交变电流磁场中产生的磁滞损耗和涡流损耗并不因为金具体积小而忽略；随着线路电流密度增大、金具结构紧凑化，这部分损耗及由此引起的局部温升已经由原来的“可接受的背景量”变成需要主动控制的变量。同时，铝合金由于具有无磁性、密度小、导电性好的本征特性而被用于金具的制造中，高导电铝合金的合金化及热处理控制技术也越来越完善。但是问题并没有因为“以铝代铁”这个方向性的判断而自动得到解决，导电率的提高常常伴随着强度的降低，铸造和成形工艺对析出状态的扰动又使得

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

材料在零件层面的实际性能与实验室数据有偏差。本文试图在不夸大某一个材料指标的基础上，对高导电铝合金从材料选择、金具制造到节能效益实现的全过程进行梳理，回答“哪些环节真正决定了替代效果”这一制造导向的问题。

1 高导电铝合金材料选择与金具性能要求

1.1 新型电力金具的功能与服役要求

电力金具的服役条件是机械负荷和电气负荷同时存在，并且两者在长时间内相互影响。悬垂线夹要在保证不损伤导线的前提下，给导线提供足够的握力来承受垂直载荷和风振，耐张线夹要将导线全部张力传到杆塔上，连接金具在螺栓预紧力和热循环反复作用下保持接触面的稳定。电气上金具要给电流提供低阻的通道，在额定电流和短时过载工况下把温升控制在允许范围之内。按照有关技术规范，耐张线夹的握力不应小于导线额定拉断力的 95%，温升试验要求在额定电流 1.1 倍下运行到热平衡时金具表面温升不超过被连接导体的温升。这就意味着材料的选择不能只看导电率一个指标，而要在强度、塑性、耐热性和导电性之间找到可以制造和复现的平衡点。

1.2 高导电铝合金材料体系与选材依据

适于电力金具的高导电铝合金并不是纯度越高越好，在 6xxx 系 Al-Mg-Si 合金的基础上通过 Mg、Si 配比和杂质控制来调节析出行为和电子散射之间的竞争。1350 纯铝虽可达到 61%-62% IACS 的导电水平，但抗拉强度仅 60-100MPa，难以独立承担承载功能；6201 合金在 T6 状态下抗拉强度可达 240-300MPa，导电率则回落至 52%-54% IACS；6101 合金居于两者之间，典型导电率为 55%-57% IACS，T6 态抗拉强度约 150-200MPa。这一组对比所呈现出来的规律十分明显，强度的取得依靠的是 Mg_2Si 析出相的弥散分布，而固溶态残留的溶质原子却是电子散射的主要来源，导电率的回升必须要有析出充分完成才行[1]。金具选材的本质就是根据零件中载流截面和承载截面的相对权重，在 6101 和 6201 之间以及热处理状态上做出选择，而不是追求某一种牌号的普适最优。

1.3 导电率与力学性能的匹配分析

导电率和强度之间存在着倒置的关系，在 Al-Mg-Si 系中表现得最为明显，但是其可调范围并不小。时效处理温度和时间的关系决定着溶质原子由固溶态到析出态的变化量，欠时效时强度还没有完全形成，基体中仍然存在过饱和溶质，导电率低；过时效时析出相变粗，导电率提高但是强度降低。6101 合金的定位就是在这样的权衡中偏向于导电一侧，即相对于 6201 来说，它具有较低的强度但更高的导电率，因此更适合做载流功能优先的金具本体。稀土微合金化和杂质元素（Fe、Ti 等）的严格控制又提供了一种折中的方法，即净化基体来减小散射中心，细化析出相来补偿强度损失。制造者所追求的不是一条材料性能曲线，而是工艺窗口，即在工艺窗口内，导电率可以达到设计要求，同时强度和塑性也可以满足握力和压接变形的要求。

2 典型新型电力金具的制造与应用

2.1 悬垂线夹的制造与性能分析

悬垂线夹对导线的作用力主要是径向夹持，本体结构一般不承受导线的全部张力，给铝合金的应用留有较大的性能余量。制造路线以重力铸造和锻造为主，铸造路线适合形状复杂的船体、压板，锻造路线在高强度、组织致密性要求高的防磨耐热型线夹中更优。铝合金线夹本体采用金属模重力挤压一次成型，配合非导磁紧固件，在消除磁滞和涡流损耗的同时得到比铸铁件更好的表面质量和尺寸一致性。性能控制的重点是握力和接触电阻的平衡，铸造缺陷（缩松、气孔）不但会减小有效承载截面，还会在接触面下方形成导电通道的局部中断，在低电流工况下不会产生大的温升，但在接近额定电流时温升迅速上升。锻造件在这一方面更加可靠，但是成本和后续加工量的增加要经过结构和工艺的协同来决定。

2.2 耐张线夹的制造与性能分析

耐张线夹承受导线全部张力，铝合金在这里所要面对的力学门槛比悬垂线夹高得多。液压压接是目前主要的工艺，铝管在压接后与导线铝股之间以摩擦和金属间接触为基础形成连接，握力由压接变形量、材料硬度匹配、接触面状态决定。压接质量主要看铝合金管在变形之后，接触压力是否能均匀地传到所有的铝股层上，而不是只在表面形成机械锁紧[2]。高导电铝合金在这一环节的作用是双面的，它既使压接工艺得以顺利进行，又使接管段的电阻热降低，但是强度不够会导致压接后铝管回弹，长期接触压力下降，热循环下的接触电阻漂移反而会抵消材料导电率的初始优势。因此耐张线夹用高导电铝合金的选材要设在导电率和抗应力松弛能力之间有更严格的要求，热处理制度的稳定性比牌号本身更有工程意义。

2.3 连接金具的制造与性能分析

连接金具主要采用螺栓连接、接触传导的形式，其性能瓶颈一般不是材料本身的电阻率，而是接触面。铝合金表面在空气中很快形成一层氧化膜，该氧化膜的电阻远远大于基体，螺栓预紧力分布不均或者运行中预紧力松弛，都会使实际接触面积远小于名义接触面积，接触电阻因此

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

成为温升的主要原因。通过结构优化来增加有效接触面的数量，并改善压力分布，可以使得连接金具的接触电阻大大降低，这种方法的效果一般比仅仅提高材料的导电率要直接得多。从制造角度来说，接触面的平整度、清洁度以及镀层的选择都会影响到初始接触电阻的高低，而铝合金抗蠕变性能的不同又决定了这个水平在热循环中可以保持多久。连接金具的设计逻辑因此更接近于接触工程而不是材料替换，高导电铝合金提供了较低的基体电阻下限，但是如果接触界面的退化速率不能得到控制，那么这个下限在运行中很快就会失去意义。

2.4 工程环境适应性与应用验证

铝合金金具的工程适应性要从腐蚀和热两个方面同铸铁件做对比。铝表面自然形成的氧化膜在中性大气环境中具有较好的耐蚀性，但是沿海盐雾或者工业污染条件下，铝合金和钢质螺栓、导线钢芯之间的电偶腐蚀是不可避免的；电位差驱动的电偶电流会加快铝侧的局部溶解，接触电阻随之增大。铝合金材质轻、可完全回收，不需要热镀锌就能得到天然的耐腐蚀性，导电性和耐腐蚀性带来的线路损耗降低和使用寿命延长可达铸铁件的数倍。热方面，铝合金的导热系数比铸铁高，利于接触面的热量扩散，但是热膨胀系数大，螺栓连接的预紧力在温度变化时容易出现松弛现象。应用验证不能只用初始性能来衡量，而应该考察接触电阻和握力在热循环和腐蚀耦合条件下变化的轨迹。

3 制造质量评价与节能效益分析

3.1 制造质量检测与评价方法

高导电铝合金金具质量评定要创建起可以执行的检测系列，该系列包含导电性能、力学性能和接触性能这三个方面。导电率检测采用涡流法（GB/T 12966），用于生产线快速筛选，直流四探针法（GB/T 3048.2）为仲裁方法；接触电阻要按照规定接触压力和表面状态进行测量，用同长度导体的电阻作为参照基准。相关检测规范规定接触电阻不大于同等长度导线的 1.1 倍，温升试验判定阈值一般取 Δ T 不大于 50K。对耐张线夹、连接金具在压接或者螺栓紧固之后要进行抽样破坏性检验，保证压接深度、接触面贴合率、握力三者之间的一致性[3]。制造质量评价的关键并不在于单个指标是否合格，而在于导电率、接触电阻和力学性能之间的一致性，如果三者由不同的工艺环节分别“达标”而在零件上不能共存，那么评价体系本身就没有反映出制造的真实状态。

3.2 金具电力损耗分析与对比

金具电力损耗由铁磁材料的磁滞、涡流损耗和电阻率无关的独立通道组成，这就是铝合金代替的节能逻辑。对铸铁和铝合金金具进行能耗对比试验和三维涡流场有限元仿真一致得出结论，铸铁金具的能耗比铝合金金具高得多，原因是铸铁的磁导率较高，在交变磁场中产生了很大的涡流损耗；用低磁或者无磁材料阻断闭合磁通回路，就可以使金具的能耗大幅度降低。表 1 给出了典型的悬垂线夹在三种电流工况下能耗试验的数据，从图中可以看出两种材料的损耗量级不同。

表 1　为铸铁和铝合金悬垂线夹金具能耗对比表，单位为 W

试品材质	工况①（280 A）	工况②（375 A）	工况③（500 A）
铸铁	5.04	10.00	17.50
铝合金	0.23	0	0

表 1 中反映出来的规律值得重视，铸铁金具的能耗随着电流增大呈近似二次方增长，而铝合金金具在 375A 以上工况下已经低到可以分辨的程度。这说明在负荷不断增大的情况下，材料替换的节能边际收益并不是线性的，而是随着电流密度增大而越加明显。但是也存在着铝合金金具的损耗，涡流损耗仍然存在，并且和自身电阻成反比，所以高导电铝合金的意义是把这种残余损耗进一步压低，而不是消除。

3.3 制造工艺与结构参数优化建议

损耗对比所显示出来的节能潜力能否在大批量的产品上实现，要看制造工艺对于材料状态的保持能力。铸造路线中熔体净化、变质处理决定杂质元素对导电率的损害程度，固溶—时效制度的温度均匀性决定析出状态在零件不同壁厚处的分布是否一致；锻造和压接路线中变形量和变形温度的匹配影响位错密度和析出动力学的竞争关系，过大的冷变形在提高强度的同时引入的晶格畸变会散射电子，使导电率偏离设计值。从结构参数上来说，在保证握力和机械强度的基础上，增大船体与压条之间的有效接触面积，改善接触压力的空间分布，可以在不改变材料牌号的情况下减小接触电阻分量。保留铁磁材料船体，用低磁或者无磁材料代替与导线直接接触的压条或者护套，同样得到了仿真和试验的支持，对于存量金具的渐进式改造有现实的借鉴意义。

3.4 经济性与节能效益评估

高导电铝合金金具的经济性不能用单价来衡量。铝合金的密度是铸铁的三分之一，同等结构下材料用量和运输安装成本都大大降低，免热镀锌天然耐蚀性减少了表面处理环节的能耗和污染，更重要的是，在运行阶段持续产生节能效益[4]。以 500kV 双回线路年运行 3500h 为计算基础，用节能铝合金线夹代替铸铁金具，每百公里每年可以减少

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

电磁损耗和电晕损耗电量约 84.2 万 kWh，按照上网电价折算年节省电费约 32 万元，相对于每百公里约 50.5 万元的增量成本，投资回收期在两年左右。回收周期是在不考虑轻量化安装成本节约、耐蚀寿命延长的保守估计中得到的。经济性评价的边界条件，电价水平、负荷曲线、线路长度和金具数量等各不相同，在不同的工程中差别很大，全寿命周期分析不能把某一个算例的结果直接套用。

4 结语

高导电铝合金在新型电力金具制造中所具有的价值，并不是因为它的导电率数字比某个标准值好，而是因为它同时关闭了铁磁损耗这条和电阻率无关的损耗通道，并且用可制造的强度水平保持了金具的承载和接触功能。从材料的选择到悬垂线夹、耐张线夹和连接金具的制造，再到质量检测和损耗评价，贯穿始终的制约因素就是同一个，即导电率的提高和强度的保持之间存在一个析出状态的竞争，以及在制造过程中对这个状态的保持能力。表 1 中量级差别表明节能潜力是存在的，但是 3.1 和 3.3 的讨论也说明，如果接触界面的退化或者热处理的不均匀使得零件层面的导电率偏离设计值，那么这个潜力就会停留在试验数据上。对于制造环节来说，“选用高导电铝合金”这个命题固然重要，但更重要的是要建立一个能够控制导电率、接触电阻和力学性能在零件尺度上一致性的能力，使材料层面的节能逻辑在全寿命周期内得到稳定的实现。

[参考文献]

[1]黄应敏,邹科敏,许翠珊,等.高导电性能铝合金在新型电力金具制造中的应用研究[J].合成材料老化与应用,2021,50(4):53-57.

[2]刘冠,许莉莉,朱红标.高导电率铝合金导线及其制备研究[J].化学工程与装备,2024(11):8-10.

[3]刘建伟,赵枫,郝艳勇.国内钢芯耐热铝合金导线的研究和应用[J].电气时代,2016(12):73-77.

[4]刘宇,田崇军,陈静,等.高导电率耐热铝合金线制造工艺关键技术研究[J].光纤与电缆及其应用技术,2026(2):23-26.

作者简介：张园梦（1998—），女，河南周口人，助理工程师，许昌学院电气工程及其自动化专业毕业，现就职于中国电建集团河南电力器材有限公司，从事电力金具设计及制造工作。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.