● 今日铸造 Today Foundry ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.02.023

表面处理对金具耐磨特性影响研究

牛海军[1],司佳钧[1],朱宽军[1],周立宪[1],刘胜春[1],朱小强[2],史小龙[2]
(1. 中国电力科学研究院有限公司,北京 102488; 2. 江苏天南电力器材有限公司,江苏 如皋 226500)

摘　要:借助现代材料表征手段,通过研究渗铝钢、镀锌钢及金具黑件在不同摩擦磨损环境下的失重率、磨损形貌、表面硬度和磨损产物,揭示渗铝金具的耐磨机理。结果表明,随着载荷增加,渗铝钢失重量的增加率明显低于镀锌铝和金具黑件;3 种试样磨损形貌分别呈现出剥落状、剥落状与撕裂状混合及纯撕裂状;热浸铝试样扩散退火后表面硬度达到 640 HV,渗铝层厚度约为 150 μm;渗铝钢表面磨损后硬度随加载力的增加,同时渗铝钢镀层内有大量的铁、铝及其氧化物分别以 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 的形式存在,从而使得渗铝钢的耐磨性优于其他二者。

关键词:渗铝金具;摩擦磨损;力学性能;微观组织
中图分类号: TG174　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)02-0225-04

Effect of Surface Treatment on Wear Resistance of Steel Fittings

NIU Haijun[1], SI Jiajun[1], ZHU Kuanjun[1], ZHOU Lixian[1], LIU Shengchun[1], ZHU Xiaoqiang[2], SHI Xiaolong[2]
(1. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 102488, China; 2. Jiangsu Tiannan Power Equipment Co., Ltd., Rugao 226500, China)

Abstract: The weight loss rate, wearing morphology, surface hardness of the aluminized steel, galvanized aluminum and fitting under the different friction and wear conditions were studied to reveal the wear resistance mechanism of the aluminized fitting. The results show that the weight loss rate of aluminized steel is significantly lower than that of galvanized aluminum and fittings with the increase of loading force. The wear morphologies of the three samples are spalling, a small amount of spalling and a large number of tearing, and tearing, respectively. The surface hardness of the hot dipped aluminum specimen, with an aluminizing layer of 150 μm, reach 640 HV, and the surface hardness of the aluminized steel decrease with the increase of the loading force. There are a large number of irons, aluminum and their oxides in the form of Fe_2O_3 and Al_2O_3 in the coating of aluminized steel after wearing, respectively. The higher abrasion resistance of the coating of aluminized steel fitting is due to the protective effect of the Fe-Al alloy layer than the others.

Key words: aluminizing fittings; friction and wear; mechanical properties; microstructure

近年来,由于电力通信、公路桥梁、绿色建筑和石油化工等行业的迅速发展以及国内外对镀铝钢的大量需求,热渗铝工艺已经迅速展现出广阔的应用前景[1,2]。钢材热渗铝技术是将经过一定处理的钢铁材料或制品放入一定温度熔融铝液中,浸渍适当时间,通过扩散反应在钢材表面生成 Fe-Al 合金层,从而达到使表面防护和表面强化相结合的一种表面处理技术[3,4]。合金层与基体之间属于冶金结合,牢固并且不易脱落,保证了镀层的表面质量[5],因此渗铝后的零件具有良好的抗氧化性、耐磨性、耐蚀性,故对那些综合力学性能要求高的复杂零件来说,热渗铝优势明显,其工艺简单、操作方便、渗层厚,有助于改进零件的表面质量,全面提高材料的性能,节约金属原材料。热浸渗铝钢作为一种新工艺保护材料,与传统的镀锌钢相比,渗铝钢更加的节能环保,因此是近年来我国大力推广的新材料[6]。输电线路中,金具起着连接和固定裸导线、导体及绝缘子,传递机械载荷、电气负荷的重要作用。金具的摩擦磨损失效,将造成连接线路断开或掉落,引起停电跳闸的重大事故。由于金具检修需高空停电作业,极不方便,需有效提高金具耐磨性能,预防事故发生[7,8]。为了在输电线路中推广渗铝金具的使用,需要对渗铝金具的力学性能和耐磨性能进行系统完整的性能评价,为渗铝金具在输电线路中的使用提供研究依据。

1　试验材料及方法

实验用基体材料为 Q345 型钢,用 99.9%工业纯铝渗铝。用线切割机将金具黑件、渗铝金具和镀锌金

收稿日期:2018-07-31
基金项目:国家电网有限公司科技项目"±1 100 kV 特高压直流通用设计应用研究"(GCB17201700239)
作者简介:牛海军(1975-),黑龙江海伦人,硕士,高级工程师.主要从事输电线路导线和金具相关技术方面的工作.
电话:010-58387114,E-mail:13521517742@126.com

具分别切割成尺寸为 2 mm×2 mm×2 mm 的试样，用砂纸打磨掉试样表面的氧化层。

在干摩擦磨损试验机上进行销、盘式干滑动磨损试验，磨损试验在室温下进行，载荷为 3~19 N，间隔为 4 N，转速为 600 r/min。试样在磨损前后用丙酮清洗除去表面油污，采用称重法来确定试样的磨损量。用电子分析天平称量实验前后销试样的质量，连续试验 3 个试样，质量差的平均值确定为磨损失重。

用 X 射线衍射仪分析扩散退火后试样的镀层物相和磨损试验后的表面物相。用数字显微硬度仪测量热浸铝试样扩散退火后的镀层及磨损试样的剖面显微硬度分布，从表面一端开始每隔 30 μm 测一次，一直测量到试样硬度值不变处。用扫描电子显微镜(SEM)分析镀层、磨面及剖面的微观组织形貌，并用能谱仪分析微区成分。

2 试验结果及分析

2.1 磨损失重分析

图 1 为渗铝金具、镀锌金具和金具黑件经不同加载力磨损后的失重对比图。可以看出，随着加载力的增加，3 种材料的失重量均不断增加，但是在加载力<9 N 时，渗铝金具的失重量基本上没有增加，表现出较好的耐磨性，金具黑件的失重量在初始阶段即有增加的趋势，其耐磨性较差，镀锌钢在最初时，其失重量值较高，说明其表面的粉状镀锌层开始即脱落，在力很小时，其耐磨性最差。随着加载力的不断增加，黑件金具失重量快速增加，其次为镀锌金具，最后为渗铝金具，且渗铝金具的增加速率明显低于前两者。综合以上分析，在耐磨性方面：渗铝金具>镀锌金具 >金具黑件。

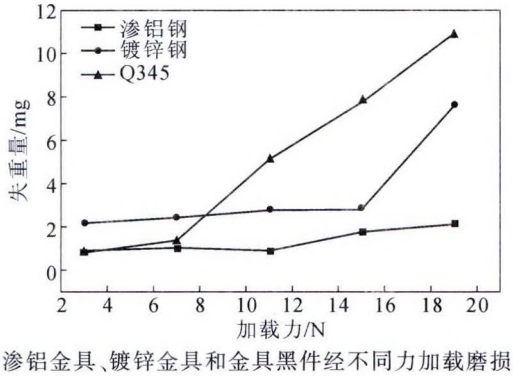


图 1 渗铝金具、镀锌金具和金具黑件经不同力加载磨损后的失重对比

Fig.1 The comparison of weight loss of aluminized fittings, galvanized fittings and fittings wore with different loads

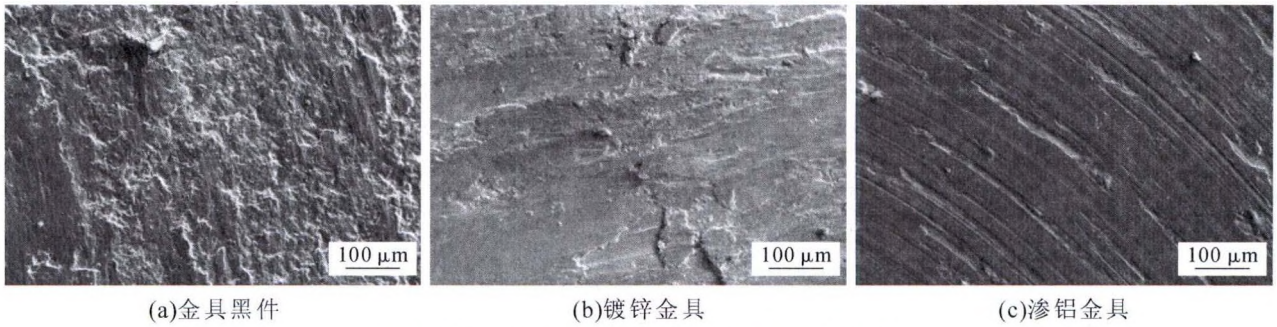
2.2 磨损形貌分析

图 2 为 3 种材料经磨损后(19 N)的表面形貌。可以看出，黑件磨损后其表面呈现出撕裂状的形貌，这是典型的粘着磨损特征，在滑动过程中载荷作用下凸台处的应力超过材料的屈服应力，发生屈服并产生局部塑性变形和撕裂。镀锌金具经磨损后，磨面出现少量的剥落状磨损+大量的撕裂状形貌，其原因是在摩擦过程中产生的摩擦热增加，磨面间会产生少量的氧化物硬质颗粒，摩擦热使接触面氧化，但形成的氧化物无法在磨面处持续积聚成稳定氧化层，而是处于形成与剥落的动态平衡，导致磨面呈现剥落痕迹。渗铝金具的磨损形貌主要由大量的剥落形貌组成，这是由于铁铝金属间化合物本身的抗高温蠕变性能及高温韧性，在摩擦过程中产生的摩擦热增强了 FeAl 的延展性，使镀层在摩擦过程中不易剥落，增强其高温耐磨性。综合以上微观机理分析，可得出与宏观耐磨试验一致的结论，在耐磨性方面：渗铝金具>镀锌金具>金具黑件。

2.3 显微硬度分析

图 3 为镀锌和渗铝金具剖面的显微硬度。可以看出，镀锌层的硬度随着表面到基体的距离，其变化值较小，而渗铝金具则变化幅度很大，主要表现在最表面，其硬度值可达近 640 HV，随着距离增加至 150 μm，其硬度值降低至 180 HV 左右，其硬度值和镀锌金具值很接近，说明此位置为渗铝层和基体的分界线。从硬度变化值可以看出渗铝层的厚度在 150 μm 左右，其较高的硬度值也说明了其具有较好的耐磨性。

图 4 为不同工况下的渗铝钢硬度的变化曲线。



(a)金具黑件　(b)镀锌金具　(c)渗铝金具

图 2 不同材料金具磨损后(19 N)表面形貌 SEM 图

Fig.2 SEM images of wore (19 N) of the different materials

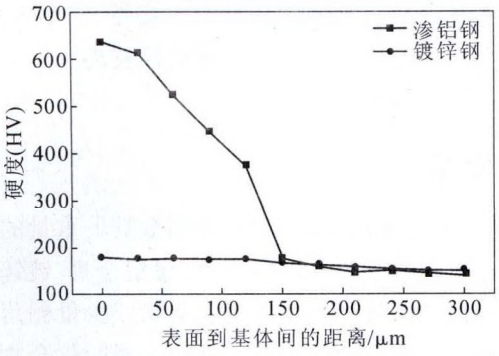


图 3 镀锌和渗铝层表面硬度变化

Fig.3 Surface hardness changes of the galvanized and aluminized layers

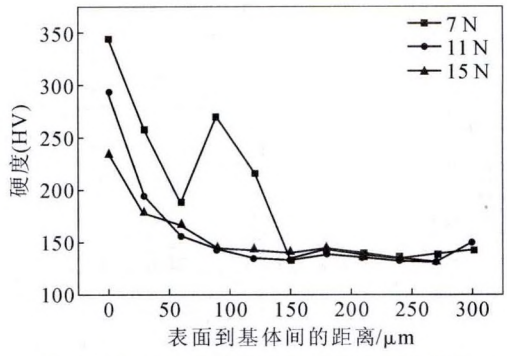


图 4 渗铝层经磨损后的表面硬度变化情况

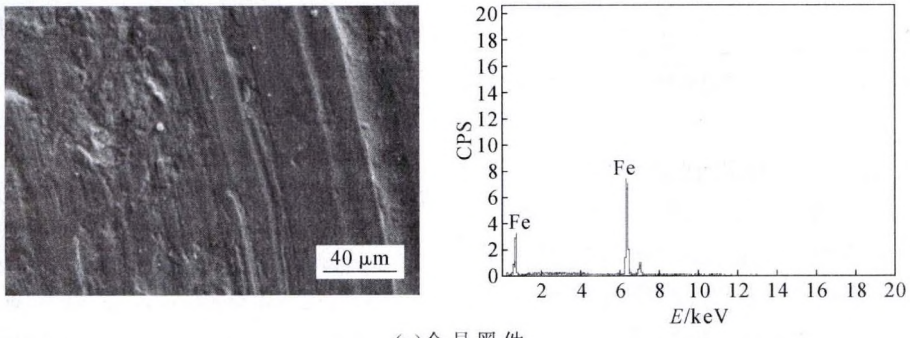
Fig.4 Surface hardness changes of the wore aluminized layer

可以看出，随着加载力的增加，其硬度值在表面层逐渐下降，随着距离的增加，中间层的硬度值有小幅度的波动。由此说明了渗铝钢硬度值主要来源于表面的 Fe-Al 合金层。

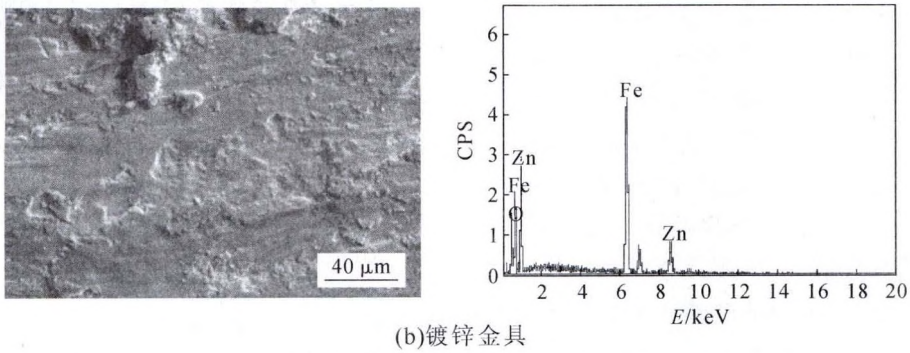
2.4 磨损后物相分析

图 5 为金具黑件、镀锌金具、渗铝金具物相分析结果。对金具黑件进行耐磨试验后进行物相观察，磨损后的颗粒主要是 Fe 颗粒，因此没有外界物质的保护作用，其耐磨性一般。对镀锌金具耐磨后的物相观察发现，其颗粒状物质主要由 Fe-Zn 合金氧化物等产生，该合金能对基体起到一定程度的保护作用，因此耐磨性比黑件金具的好。

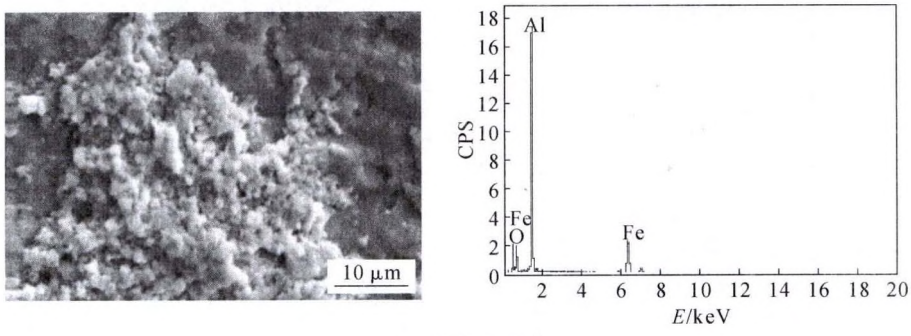
图 6 为热浸镀铝钢镀层的 XRD 图谱。可以看出，镀层的物相为铁铝化合物，但 Fe_2Al_5 的衍射强度



(a)金具黑件



(b)镀锌金具



(c)渗铝金具

图 5 金具黑件、镀锌金具和渗铝金具的能谱结果图

Fig.5 EDS results of the fittings, galvanized fittings and aluminized fittings

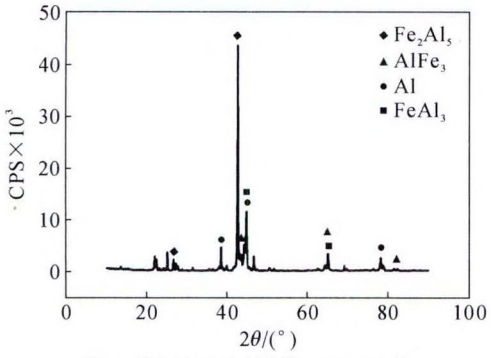


图 6 热浸铝钢浸层的 XRD 图谱
Fig.6 XRD pattern of the hot dipped aluminum steel coating

明显高于 $FeAl_3$ 和 Fe_3Al 的衍射强度，说明镀层中的主要物相是 Fe_2Al_5，$FeAl_3$ 和 $AlFe_3$ 只存在于部分区域，或以析出的形式存在于 Fe_2Al_5 基体中。结合镀层 XRD 图谱，说明镀层物相主要为 Fe_2Al_5，而在靠近基体位置也含有少量的 $FeAl_3$。文献表明[9,10]，铁铝金属间化合物的耐磨性随着铝原子含量的提高而减弱，磨损率主要取决于材料的屈服强度和应变硬化率，与材料本身的硬度没有很大关系。由此可知，镀铝钢镀层中的 $AlFe_3$ 相比 Fe_2Al_5 相更耐磨，但其含量较少，因此热浸镀铝钢中起耐磨作用的主要物相仍为 Fe_2Al_5 相。

图 7 为磨损后热浸铝钢磨损表面的 XRD 图谱。可以看出，磨损后除有少量的镀层物相外，大量的铁、铝及其氧化物分别以 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 的形式存在，与表面形成致密的氧化物膜，在摩擦中起到了一种固体润滑作用，从而降低了磨损量[11,12]。另外，Al_2O_3 作为一种硬质相，其硬度大，可用作耐磨料，因此热浸镀铝钢中多种氧化物的存在，是其耐磨性较高的原因。对渗铝金具的耐磨产物进行分析，发现其颗粒状物为 Fe-Al-O 化合物，氧化铝是一种硬质相，其硬度仅次于金刚石，因此具有较好的耐磨性，综合产物对比分析，渗铝金具耐磨性 > 镀锌金具> 黑件金具。通过对渗铝金具、镀锌金具和金具黑件进行耐磨对比试验，硬度测试试验和耐磨后的产物

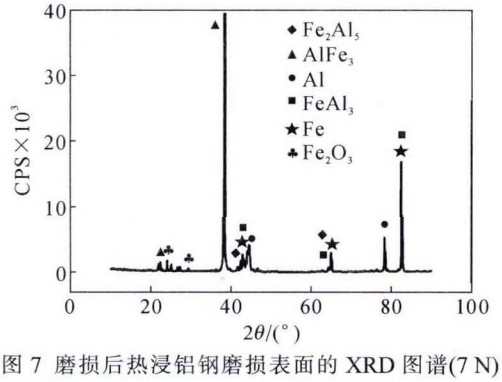


图 7 磨损后热浸铝钢磨损表面的 XRD 图谱(7 N)
Fig.7 XRD pattern of the wore surface (7 N) of hot dipped aluminum steel

进行物相分析表明：渗铝金具耐磨性 > 镀锌金具 > 黑件金具，且发现渗铝金具耐磨性较高原因是因为 Fe-Al 合金层的保护作用。

3 结论

(1)随着加载力的增加，渗铝金具失重量的增加速率低于镀锌金具和金具黑件。渗铝金具、镀锌金具和金具黑件磨损形貌分别呈剥落状、少量剥落状与大量撕裂状混合及撕裂状，铁铝金属间化合物的抗高温蠕变性能及高温韧性增强了渗铝钢高温耐磨性。

(2)渗铝钢在扩散退火后表面硬度近640 HV，从表面至心部硬度依次减小，渗铝层厚度在 150 μm 左右。随着加载力的增大，磨损后渗铝钢的表面硬度减小，渗铝钢硬度值主要来源于表面的 Fe-Al 合金层。

(3)磨损后渗铝钢浸层有大量的铁、铝及其氧化物分别以 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 的形式存在，与表面形成致密的氧化物膜，耐磨性较高原因是 Fe-Al 合金层的保护作用，热浸镀铝钢中起耐磨作用的主要物相为 Fe_2Al_5 相。

参考文献：

[1] 黄耀，王旭明，牛海军，等. 热处理工艺对 Q345 渗铝钢力学性能及耐磨性的影响[J]. 金属热处理，2016，41(7):112-117.

[2] Li Y S, Ma H T, Yang L Z, et al. Competitive graphitization and diamond growth on hot-dip aluminized carbon steel substrate[J]. Applied Surface Science, 2014, 314(10): 1041-1046.

[3] 李杨，李明，孟堃. 碳钢热浸渗铝工艺的研究进展[J]. 热加工工艺，2017，46(12): 35-37.

[4] 郭莉梅. 表面改性对建筑装饰用 6063 合金组织与性能的影响[J]. 铸造技术，2018，39(3): 704-706.

[5] 丁庆如. 钢铁渗铝及渗铝钢的性能 [J]. 腐蚀与防护，1999(11): 508-510.

[6] Zaba. Selected problems of formability of aluminised steel plates [J]. Archives of Civil Mechanical Engineering, 2012, 12 (2): 163-170.

[7] 夏谦，伍林伟，陈俊帆. 渗铝钢与镀锌钢应用于输电线路铁塔的比较研究[J]. 电工技术，2018，3: 044.

[8] 韩孟岩. 高性能新型渗铝钢材料的研究及制备 [C]. 第九届中国钢铁年会论文集，北京:中国金属学会，2013：1-5.

[9] 王猛，周勇. 热喷涂 FeAl 金属间化合物涂层的综述[J]. 热加工工艺，2018，47(6): 45-48.

[10] 黄健康，王梓懿，刘宁，等. 金属镀层对铝 / 钢激光熔钎焊接头组织与性能的影响[J]. 材料工程，2018，46(5): 99-105.

[11] 刘晓明，高云鹏，闫侯霞. 载荷和温度对 Fe-Al/Cr_3C_2 复合涂层摩擦磨损性能的影响[J]. 表面技术，2016，45(11): 55-61.

[12] 余本红，林健，白海林，等. 焊接温度对热镀锌钢 / 铝合金压力焊接头组织和拉伸性能的影响 [J]. 机械工程材料，2016，40(9): 58-61.