

电弧作用下铜钨触头材料表面特征及失效机理

同建辉^{1,2}, 徐锦峰¹, 李英挺³, 何东继⁴

(1. 西安理工大学材料学院, 陕西 西安 710048; 2. 天津市维杰电器设备开发有限公司, 天津 300051; 3. 中国人民解放军第5702工厂, 陕西 武功 712201; 4. 西安福莱电工合金有限公司, 陕西 西安 710300)

Surface Characterization and Failure Mechanism of CuW Contact Material under the Stress of Electrical Arc

TONG Jian-hui^{1,2}, XU Jin-feng¹, LI Ying-ting³, HE Dong-ji⁴

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Tianjing Weijie Development of Electrical Device Company, Tianjing 300051, China; 3. No. 5702 Factory of APR, Wugong 712201, China; 4. Xi'an Fly Electrical Alloy Limited Company, Xi'an 710300, China)

摘要: 阐述了型式试验后铜钨触头材料表面特征, 得出铜钨触头材料在电弧作用下产生龟裂纹、裂纹、铜液态孔的主要失效机理及原因, 并提出增加触头寿命的措施。

关键词: 铜钨触头; 表面特征; 失效机理

中图分类号: TM205.1; TM201.4 **文献标识码:** B

Abstract: This paper introduces the surface characterizations of CuW contact materials after type test. That is particularly, forming chappy, crack and Cu jet voids. The failure mechanism is discussed. The measures to improve the electrical endurance of CuW contact materials is suggested.

Key words: Cu-W contact; surface characterization; failure mechanism

1 前言

电触头是电器开关的接触元件, 主要担负着接触、断开电路及负载电流的任务, 触头和灭弧系统是开关的心脏, 开关的安全性、可靠性及开断和关合特性很大程度上取决于触头材料的物理性质及其电特性。因此, 触头材料的性能直接影响着开关电器的可靠运行。CuW系触头材料因其具有良好的耐电弧侵蚀性、抗熔焊性及高强度而得到了广泛应用^[1-3], 在其工作过程中, 因承受着机械冲击及电弧腐蚀作用, 在使用过程中触头材料常常会产生缺陷和失效。从而影响材料的机械物理性能和电性能^[4], 导致开关设备不能实现正常合分, 严重时会引起开关爆炸等事故。为此有必要通过电弧侵蚀后触头表面形貌, 分析触头在燃弧过程中的行为及失效原因, 为技术人员从事有关电器产品的开发和改进触头材料的制造工艺及生产提供理论依据。

2 试验后触头表面特征及原因分析

CuW70/CuCr整体触头装在SF₆断路器上进行126 kV型式试验。用扫描电镜观察试验后触头表面形貌。图1为型式试验后铜钨触头的SEM图象, 可看出触头材料的表面出现裂纹(龟裂)、铜喷射和细孔洞等缺陷。

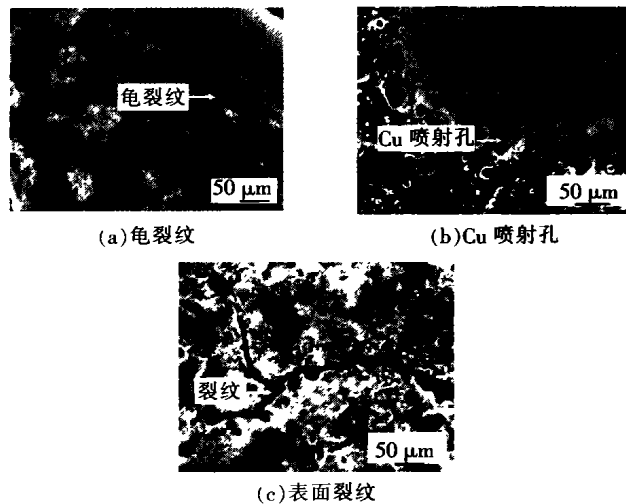


图1 试验后触头表面的缺陷

2.1 触头表面孔洞

对型式试验后的铜钨触头进行观察, 由图1(a)可清楚看出触头表面有许多溅落的铜颗粒和铜喷射孔。这说明触头中靠表面铜熔化后, 聚在一个小区域内, 在外力作用下, 触头表面富铜区材料喷射形成喷射孔洞, 同时铜大量蒸发、喷射后的区域将会出现其它材料杂质的汇集而形成的疏松结构, 继而造成触头龟裂。在开关合分闸时, 铜喷射一方面可以激冷电弧, 同时喷射产生的孔洞可降低触头表面的接触强度, 使熔焊力减小, 在一定程度上防止熔焊的发生。但孔洞也可使触头接触面形貌变得恶劣而导致龟裂

形成,并能进一步发展为裂纹,在机械冲击、电弧热应力和电磁力等外力作用下,可导致裂纹扩展和表面材料的大片脱落,造成触头永久失效和破坏。

2.2 触头表面裂纹

CuW 触头材料在电弧作用下产生裂纹是另一主要失效方式,其主要原因有以下几点:

(1)CuW 触头本身存在的冶金缺陷。采用粉末冶金方法生产的 CuW 触头材料,在预烧 W 骨架和熔渗冷凝时形成的闭孔,不可避免的会有气体和其它氧化物存在,在电弧高温高热作用时,气体的压力增加,W 及 Cu 受压应力,气孔附近的微裂纹有撕裂力产生,促使微裂纹扩展,随着电弧作用次数增加,裂纹便随之形成和扩展,直到裂纹扩展至外表或与外表裂纹相连,如图 1(b)。

(2)熔融 Cu 不断从触头表面 W 粒子间的连通孔隙及裂纹缝隙处蒸发或飞溅。一方面在电弧作用下,裂纹中部或端部不断受到压缩-拉伸状态应力的交互影响,使主裂纹端部扩展,而在主裂纹中部则产生支裂纹,两支支裂纹端部会合后,会在表面形成鱼鳞状龟裂,呈现水磨石状结构,如图 1(c)。另一方面,电弧作用时裂纹最深处附近 Cu 的温度比相邻区域高,这使得裂纹缝隙中的 Cu 首先熔化蒸发掉,相邻区域对这一区域产生压缩作用应力;电弧熄灭时,因裂纹处只有失去 Cu 的钨骨架,相邻区域的冷却比裂纹深处区域快,从而对裂纹深处区域产生拉伸作用,由于该拉伸应力,钨骨架也产生裂纹,裂纹端部便沿纵深方向扩展。此外,毛细管作用可使两裂纹面中的 Cu 在燃弧时蒸发,在触头内部形成许多横向孔洞,而形成新的裂纹源。

(3)燃弧过程中,W 粉再烧结时产生 W 骨架之间的裂纹。当 Cu,W 所形成的毛细管中的 Cu 在电弧作用下飞溅或蒸发后,表面的某些 W 粒子便裸露于(灭弧)介质中,在电弧高温作用下,这些 W 粒子会发生再烧结现象^[5],表面效应使得 W 粒子球化或表面转移,不可避免地会产生 W 骨架之间的裂纹,并逐渐深入至触头内部。

(4)Cu,W 应变的不同产生新裂纹或使裂纹扩展。由于裂纹扩展的路径主要沿着 Cu/W 界面进行。对于高 W 含量 CuW 触头,由于 Cu/W 界面的不均匀及 W 粒表面物质的分解,使得裂纹路径有与 Cu/W 界面相伴而生的趋势。

3 提高 CuW 触头寿命的措施

综合以上分析可知,影响 CuW 触头失效的因素很多,不仅有 CuW 触头制造工艺方面的作用,触头的服役条件对其寿命也有很大的影响。下面分别从 CuW 触头制造工艺和触头服役条件两方面分析增加触头寿命的措施。

3.1 CuW 触头材料制备工艺

烧结熔渗时,在较低温度下液相铜难以均匀分布,高温烧结条件下钨颗粒会严重聚集长大,形成粗大不均匀组织^[6]。增强粉末混合状态,甚至采用化学沉淀包覆方法将两相预先均匀混合,提高 CuW 触头材料的均匀性,以获得均匀分布的组织,可有效增加 CuW 触头的寿命。

通过改变 W 粉粒度大小及 W 空间架构、改善 Cu/W 界面性能和添加其它元素可提高液态 Cu 对裂纹面或钨骨架的润湿特性,改善钨空间架构和 Cu/W 界面性能,从而提高 Cu 对裂纹面或钨骨架的润湿性,减少裂纹形成。

由于机械磨损和塑性变形的主要原因为触头间的相互撞击和触头电动力的作用,使触头强烈振动,发生弹跳,从而增大动静触头摩擦系数。同时,触头材料的铜与铜钨材料的结合面接触不好时,会引起接触电阻增大,产生大量的热量,在电弧作用下,使该处的铜首先熔化、喷溅,从而造成烧蚀凹坑。因而提高触头的加工和装配精度,可增加触头的寿命。

3.2 服役条件

影响 CuW 触头材料服役条件的主要有触头的工作环境、应用场合和负荷状况等因素。周围介质对电触头的灭弧能力影响较大,灭弧能力强的介质可大大减少触头材料的电弧烧损。在低压开关中用空气或真空灭弧,而在中高压断路器中常用油、六氟化硫和真空灭弧的原因就是如此。

触头的闭合速度及关合初压力对触头也有很大影响,提高初开速度可缩短燃弧时间,减少触头烧损;而增加初压力,也可减少机械磨损和电弧烧损,二者都可增加触头的寿命。

磁场对电弧的停滞时间和运动方式有很大影响,当给灭弧室的触头外加一合理磁场,可以让电弧在磁吹作用下迅速移动、拉长,以缩短电弧的停滞时间和燃弧时间,可以提高开关的灭弧能力,减轻电弧对触头材料的电弧侵蚀作用,因而选择合适的外部磁场可削弱电弧对触头的侵蚀,从而增加触头寿命。

4 结语

CuW 触头材料表面的失效主要有龟裂纹、裂纹和 Cu 喷溅孔洞。

提高 CuW 触头材料的组织均匀性,改善钨空间架构和 Cu/W 界面的润湿特性,提高触头的加工和装配精度,可减少裂纹和孔洞的形成,增加触头的寿命。灭弧能力强的介质可大大减少触头材料的电弧烧损;提高初开速度和增加初压力可减少机械磨损和电弧烧损;选择合适的外部磁场可削弱电弧对触头的侵蚀,从而增加触头的寿命。(下转第 234 页)

I_{C1} 不对称, I_{A2}, I_{B2}, I_{C2} 也不对称。因此 $I_1 = I_{A1} + I_{B1} + I_{C1} \neq 0, I_2 = I_{A2} + I_{B2} + I_{C2} \neq 0$ 。在变压器三相电流平衡的情况下, $I_A + I_B + I_C = I_1 + I_2 = 0$, 即 $I_1 = -I_2$, 可见, I_1 和 I_2 即为流过接地引下线的电流, 大小相等, 方向相反, 其大小由变压器负荷电流及回路电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 决定, 见图 3。若变压器三相电流不平衡, $I_1 + I_2 = I$ 即为较小的变压器本身的不平衡电流。

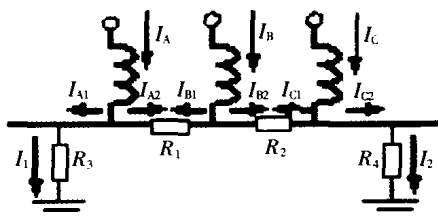


图3 “π”型接地电流流向图

某 500 kV, 3×250 MVA 单相变压器组成的三相变压器中性点汇流母线原接地方式见图 1, 在有功 650 MW, 无功 109 MVA 工况下, 笔者测得流过接地引下线的不平衡电流 I (即变压器本身的不平衡电流) 仅为 2.7 A。将中性点接地方式改为图 2 所示的“π”型接地后, 在相同工况下, 测得流过两根接地引下线的电流分别为 $I_1 = 157.4$ A, $I_2 = 155.2$ A, 矢量图见图 4, 两电流之差 $I = 2.2$ A, 即为变压器本身的不平衡电流。实例证明, 中性点汇流母线采用“π”型接地时, 两根接地引下线中会有大小相等, 方向相反的较大的电流流过。数百安的电流不仅使金属构架和接地装置连接头发热, 造成电能损耗, 还会加速接地装置的电化腐蚀, 同时也造成电磁污染, 这种接地方式不利安全运行。

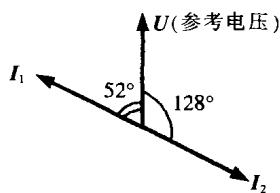


图4 “π”型接地时 I_1, I_2 矢量图

2.3 一端两点接地

为满足文[1]中 17.7 条的要求, 又避免在中性点汇流母线接地引下线中有较大的电流流过, 采用在中性点汇流母线一端引两根接地引下线与主接地网

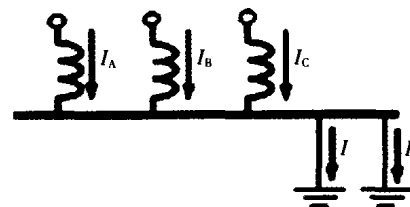


图5 中性点汇流母线一端两点接地

不同地点连接的接地方式, 见图 5。正常运行时, 两根接地引下线的电流之和仅为较小的变压器本身的不平衡电流, 事故情况下, 两根接地引下线对故障电流还将起到分流的作用, 减小故障电流对接地装置的不良影响。

3 建议

(1) 将变压器中性点汇流母线为“π”型接地的改为“一端两点接地”的接地方式。

(2) 文[1]中 17.7 条应明确为: “三相变压器中性点应有两根与主接地网不同地点连接的接地引下线, 由单相变压器组成的三相变压器 (或由单相电抗器组成的三相电抗器) 中性点应在汇流母线一端引两根接地引下线与主接地网不同地点连接, 且每根接地引下线均应符合热稳定的要求……”。

(3) 按规定及时校核变压器中性点接地引下线的热稳定, 保证接地引下线热稳定满足系统短路容量不断增大的要求。

(4) 定期测量接地引下线流过的电流, 用红外测温仪或成像仪监测变压器中性点套管连接处和汇流母线连接处的温度, 防止过热引发断线事故。

(5) 加强接地装置的维护检查, 必要时应进行开挖检查, 地网开挖检查或其它地下挖掘施工时, 应加强管理, 防止外力对接地引下线和接地网造成损伤^[2]。

参考文献:

- [1] 国家电力公司. 防止电力生产重大事故的二十五项重点要求 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] DL/T 596-1996. 电力设备预防性试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.

作者简介: 唐芳轩 (1966-), 男, 高级工程师, 主要从事高电压技术及高压电气设备的维修与试验研究。

(上接第 232 页)

参考文献:

- [1] J Kaczmar. Effect of Production Engineering Parameters on Structure and Properties of CuW Composite Powders [J]. Powder Metallurgy, 1989, 32(3): 171-175.
- [2] J L Johnson, R M German. Phase Equilibria Effects on the Enhanced Liquid Phase Sintering of Tungsten-copper [J]. Metallurgical Transaction A, 1993, 24A(11): 2 369-2 377.
- [3] Yang Bin, R M German. Powder Injection Molding and

Infiltration Sintering of Superfine Grain W-Cu [J]. Int J Powder Metal, 1997(4): 55-63.

- [4] 范志康, 梁淑华, 杨红旺. 立式烧结熔渗整体式 CuW/CuCr 自力型触头的开闭式试验结果[J]. 电工合金, 1999(2): 27-30.
- [5] 张小苹. CuW 触头材料电弧侵蚀表面形貌分析 [J]. 电工合金, 1992(3): 26-30.
- [6] 王志法. W-Cu 合金中 Cu 相纯度对热导的影响[J]. 中南工业大学学报, 1999, 4(2): 186-188.

作者简介: 同建辉 (1970-), 男, 陕西富平人, 硕士, 工程师。