

用于真空开关的触头材料

王季梅

(西安交通大学 西安 710049)

1995年9月16日收到

Contact Materials Applied for Vacuum Interrupter

Wang Jimei

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract This paper describes the requirements and characteristics of contact material for vacuum interrupter, demonstrates some of common contact materials to be used in different kind of vacuum interrupters, such as CuTeSe, CuCr and AgWC in recent years. In the final, introduces the development and research works of new contact materials in domestic and international.

Keywords Contact materials, Vacuum interrupter, Development and research

摘要 本文分析了用于真空开关的触头材料的要求和性能;阐述了最近几年来常用于各种真空开关中的触头材料,如 CuTeSe, CuCr 和 AgWC 等;文章最后还介绍了国内外正在开发和研究的新触头材料情况。

关键词 触头材料 真空开关 开发和研究

触头材料是真空灭弧室不可缺少的重要元件之一,并且在很大的程度上决定了真空开关的性能、应用范围和发展方向。当前国际上中等电压等级领域所用的开关多数均被真空开关所占领,其主要因素之一也是由于触头材料得到了合理有效地解决。今后真空开关将向着高电压大容量方向发展,触头材料也是关键问题之一。例如,真空断路器开断能力的提高、截流值的降低、耐电压强度的改善,真空灭弧室的进一步小型化,真空接触器电寿命次数的增加等等都是因触头材料得到解决而实现的。

世界各国研究触头材料的部门,都具有比较完整配套可进行触头材料研制的设备、又有对触头材料作理论分析的手段,更重要的还拥有一套对触头材料电气性能测试的高压大电流试验设备,并可借此进行电气性能的各项测试来验证触头材料能否满足实际应用的技术参数和要求。我国通过了几年来努力,在西安交通大学真空开关研究中心与陕西秦川电工材料设备研究所密切配合下组成了完全能满足上述条件的开发研究机构,并有博士研究生参加研究工作,将为我国真空开关触头材料的开发研究作出贡献。

真空开关触头材料的制造技术作者已在专著文^[2]中详细介绍。限于篇幅,本文仅分析介绍真空开关触头材料的要求和性能,同时指出这方面工作的发展趋势。

1 真空开关常用的几种触头材料

目前,国内外广泛用于制造真空断路器的触头材料主要有 CuTeSe 和 CuCr 两种。

CuTeSe 主要用于 10 kV 及以下电压等级的真空断路器, CuCr 适用于制造 10 kV 及以上电压等级的真空断路器。制造真空接触器和真空负荷开关的触头材料主要用 AgWC。为了节约用 Ag, 我国改用 CuWC 合金来替代 AgWC 合金作触头材料。

1.1 CuTeSe 合金触头材料

CuTeSe 合金是三元合金触头材料。在此合金中, Cu 和 Te, Se 分别生成稳定的金属化合物 Cu_2Te 和 Cu_2Se 。这些金属化合物呈球状均匀地分布在合金中, 使合金具有良好的抗熔焊能力。由于 Cu_2Te 和 Cu_2Se 是相当稳定的金属化合物, 在真空电弧作用下分解时要吸收大量的能量, 这样就使 Te 和 Se 的蒸发变得比较困难, 因而减小了弧区的金属蒸汽密度, 提高了开断能力, 降低了电侵蚀率。

国产的 CuTeSe 合金和含 Fe 质量分数为 2% 的 CuTeSeFe 合金的开断能力如表 1 所示。根据估算这种触头材料的极限开断电流 $J_m = 1.2 \times 10^7 A/m^2$ 。CuTeSe 和 CuTeSeFe 合金在触头开距为 12 mm 下的工频 1 min 耐电压强度分别达到 72 kV(有效值)和 84 kV(有效值)。

CuTeSeFe 合金的截流值测量结果列于表 2 中。从表可知, CuTeSeFe 的最大截流为 4 A, 最小截流为 0.5 A, 平均值为 2.1 A。CuTeSeFe 合金的截流值与 CuTeSe 合金的截流值比较基本相同。

1.2 CuCr 合金触头材料

为了提高触头材料的耐电压水平, 发展了一种 CuCr 合金触头材料。国产的 CuCr 合金是采用国产 200 目 Cr 粉制备的。该 Cr 粉含氧量大于 $5\ 300 \times 10^{-6}$, 含氮量大于 40×10^{-6} , 为制备低氧 CuCr 合金的原料, 因此必须先对国产 Cr 粉进行真空热碳还原。

高氧 Cr 粉真空热碳还原的过程是将 Cr 粉和碳粉按一定的比例均匀混合后装入坩埚, 放入真空炉内。将炉内气压抽至 $2.5 \times 10^{-3} Pa$ 后, 将炉料加热, 保温。此时, Cr 粉中的氧被碳还原成 CO, CO 被真空炉的真空系统抽走, 然后在 $2.5 \times 10^{-3} Pa$ 的气压下将炉料冷却至室温。还原后 Cr 粉中的氧氮含量分别列于表 3 中。

表 3 Cr 粉中的含气量

	$O_2(\times 10^{-6})$	$N_2(\times 10^{-6})$
原始 Cr 粉	>5 300	40
1 000°C 还原	5 300	<5
1 100°C 还原	1 200~3 400	<5
1 200°C 还原	130~140	<5

表 1 CuTeSeFe 合金的分断能力*

触头直径/mm	60	75	86
开断能力极限值/kA(有效值)	28	36	40

* 在 10 kV 交流电压下试验的结果

表 2 CuTeSeFe 合金的截流值

充电电压/V	400	250	200	150	80	50	30	20
工频电流/A	120	70	56	42	23	14	7	6
最大截流值/A	3.0	4.0	3.0	3.0	2.5	3.0	3.0	3.0
最小截流值/A	1.0	1.5	1.0	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
平均值/A	2.0	2.7	2.0	2.4	1.8	1.5	2.0	2.3

* 100 次测试数据的算术平均值

表 4 CuCr 合金中的氧及相对碳含量

Cu/Cr	$O_2(\times 10^{-6})$	C/%
70/30	560~780	0.11~0.36
60/40	320~550	0.12~0.48
50/50	23	0.22
45/55	14	0.06

将真空热碳还原后的 Cr 粉与一定比例的 Cu 粉均匀混合, 成型, 装入真空炉内。将真空炉的气压抽至 $2.5 \times 10^{-6} Pa$ 后, 将炉料加热烧结 1 h, 再在真空中用去气 Cu 进行熔渗, 可制

备出 Cu70/Cr30, Cu60/Cr40 和 Cu50/Cr50 三种 CuCr 合金。这三种 CuCr 合金的密度经测定均大于理论密度的 0.95。合金的氧及残余碳含量分析结果列于表 4 中。对于 Cu50/Cr50 的合金,其氧含量低于 100×10^{-6} ,最低的仅为 14×10^{-6} ,低于国外同类产品的含氧量。Cu70/Cr30 及 Cu60/Cr40 的氧含量较高,最高达 780×10^{-6} ,其原因是混入的 Cu 粉较多,而 Cu 粉中的氧含量较高($>1000 \times 10^{-6}$)的缘故。

CuCr 合金加入少量的碳能降低其抗拉强度,当含 C 量为 0.36 时,可使 CuCr 合金的抗拉强度从 380 MPa 降至 110~120 MPa,大致接近于 CuTeSe 系合金的横向抗拉强度值,从而可使 CuCr 合金的抗熔焊性能得到较大的改善。碳的加入降低 CuCr 合金强度的作用归因于其在 Cr 粒子的表面形成脆性碳化物膜。这种碳化物膜使 Cr 粒子与 Cu 基体的结合变得十分脆弱。当外加应力大于碳化物膜的开裂应力时,Cr 粒子表面的碳化物膜便开裂形成微裂纹。因此,通过控制 CuCr 合金中碳含量可有效地降低 CuCr 合金的抗拉强度,从而获得抗熔焊的性能。

适当地加入碳,不但能显著地降低 CuCr 合金中的氧含量和抗拉强度,还能提高合金在高温下的耐电压强度,因而可以判断含碳的 CuCr 合金的极限分断电流密度略大于不含碳的 CuCr 合金触头,即略大于 $1.75 \times 10^{-7} \text{A/m}^2$ 。

表 5 列出了国产 CuCr 合金(含碳)触头材料的电阻率值:

表 5 CuCr 合金的电阻率

合成成分	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 电阻率
Cu70/Cr30	4.5
Cu60/Cr40	4.98
Cu50/Cr50	5.03
Cu45/Cr55	5.05

1.3 AgWC 合金触头材料

AgWC 合金触头材料是一种具有低截流水平和中等分断能力的触头材料,它的分断能力一般在 7.2 kV 时为 20 kA 的范围。日本东芝电气公司 90 年代以来开始发展了一种经过改进的 AgWC 合金触头材料。这种改进的 AgWC 触头材料是将 Ag 渗透到烧结成型的 WC 晶体中制成。

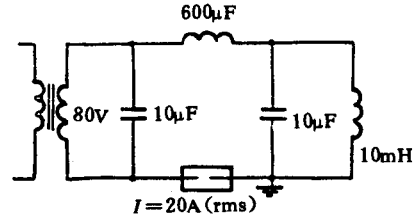


图 1 测量真空灭弧室截流值的电路

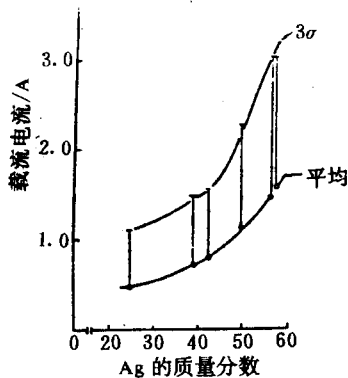


图 2 截流值与触头含 Ag 量的关系

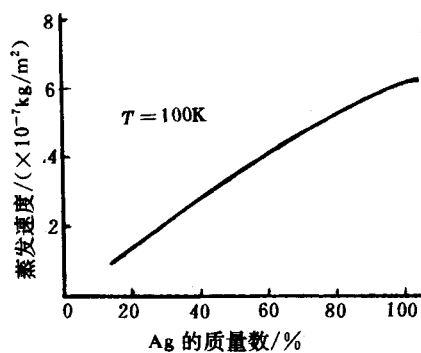


图 3 蒸发速度与 Ag 含量(质量分数)的关系

利用图 1 的标准试验电路,测出 Ag 质量分数 25%到 55%的截流值。试样是置于 10^{-4} Pa 的真空可折式灭弧室内进行试验的,电极为纵向磁场结构,电弧电流为 50 Hz,40A(有效

值)的正弦波,电极的开距调整到 8 mm,从试验可观察到电弧扩散到整个触头表面,扩散是由于阴极斑点在触头表面高速运动形成的。测量结果如图 2 所示,由图可知,截流水平随含 Ag 量降低而降低。Ag 质量分数在 25%,具有最低截流值,其平均截流值为 0.5 A,标准偏差为 0.2 A。截流值的降低是由于阴极斑点及其触头周围有足够的 WC 成分的热效应导致的。

图 3 所示为计算所得的蒸发速度和 Ag 含量(质量分数)的关系。蒸汽密度是由真空电弧加热阳极来估算的。由图可见,减小 Ag 在触头材料中的含量可以减少触头材料的蒸发。

2 正在开发研究的触头材料

世界各国正在继续不断地开发研究新触头材料,以改善真空开关的性能和满足产品发展的需要。它的主攻方向主要是提高开断能力、增强耐电压强度,降低截流水平和改善耐磨损率四个方面。

2.1 Cu75/Cr25 Ta 合金触头材料

在 CuCr 中加入 Ta,可制成 Cu75/Cr25 Ta 合金。研究表明:当 Ta 含量达到 15% 时,分断能力最高;当 Ta 含量超过 20% 以后,分断能力便下降,如图 4 所示。Ta 含量的增加还会使 Cu75/Cr25 Ta 合金的耐电压强度呈直线上升。Ta 含量约为 15% 时,耐电压强度提高 15%,如图 5 所示。因此,为了获得较大的分断能力,保持合适的耐电压强度,Ta 的含量一般取 10%~20% 之间。为了进一步提高 Cu75/Cr25 Ta 合金触头材料的分断能力,还可加入少量的 Ti,Zr,Al 等元素。例如加入约 0.5% Ti,可使分断能力提高近一倍,如图 6 所示。

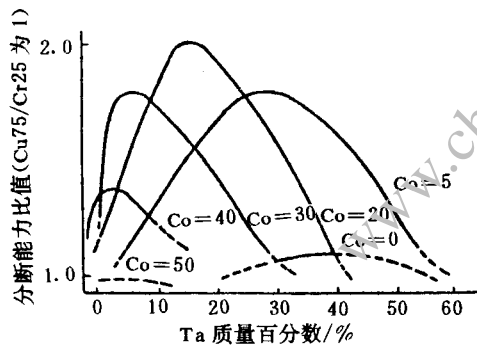


图 4 Cu75/Cr25 Ta 合金触头与 Cu75Cr25 合金触头分断能力之比

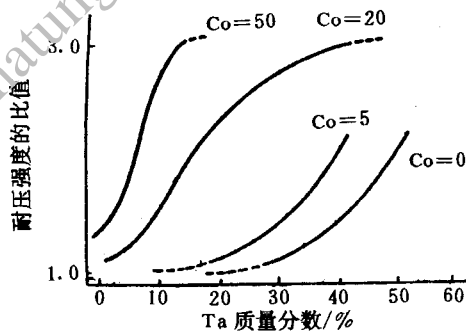


图 5 Cu75/Cr25Ta 合金触头的耐电压强度

2.2 Cu75/Cr25Nb 合金触头材料

Cu75/Cr25Nb 合金的性能与 Cu75/Cr25Ta 合金相似,Nb 在 CuCr 合金中的作用与 Ta 相同。Cu75/Cr25-Nb5 合金的分断能力与 Cu75/Cr25 合金比较可提高约 75%,耐电压强度可提高约 8%,如图 7 和图 8 所示。同样,在 Cu75/Cr25-Nb5 合金中加入少量的 Ti,Zr,Al 等元素也可进一步提高该合金的分断能力。

2.3 CuCoTa 合金触头材料

CuCoTa 合金中的 Co 含量一般小于 50%,在 CuCo 合金中加入 Ta 后对触头的分断能力及耐电压能力的影响分别如图 9 和图 10 所示。由图中可知,当 CuCo 合金中的 Co 含量为 5%~30% 时,加入 Ta 后能使其分断能力和耐电压水平都有较大的提高。CuCoTa 合金中的 Co 可用 Fe 来代用。Fe 能和 Ta 反应生成 Fe_2Ta ,性能与 Co_2Ta 相似。此外,在 CuCoTa 合金

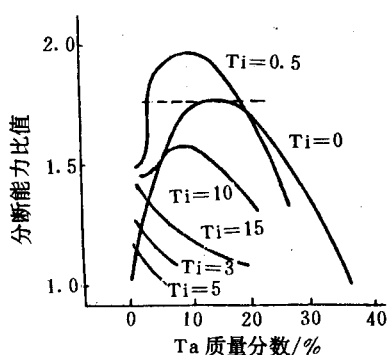


图 6 Ti 对 Cu75/Cr25 Ta 合金触头分断能力的影响

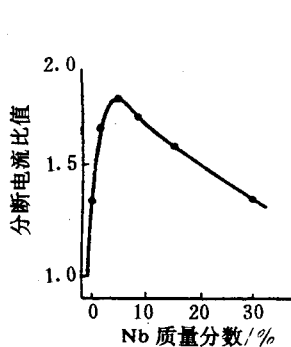


图 7 Nb 对 Cu75/Cr25 合金触头分断能力的影响

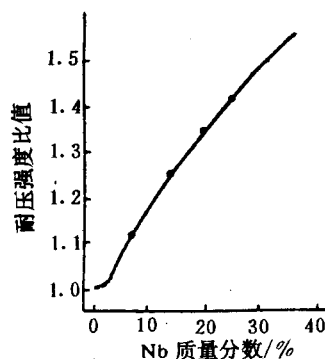


图 8 Nb 对 Cu75/Cr25 合金触头耐电压强度的影响

中加入少量的 Ti,Zr,Al 等元素,可使合金触头的分断能力和耐电压水平进一步提高。

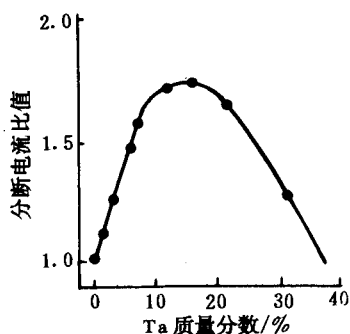


图 9 含 Ta 量不同的 CuCoTa 合金触头与 Cu75/Cr25 触头的分断能力的比值关系

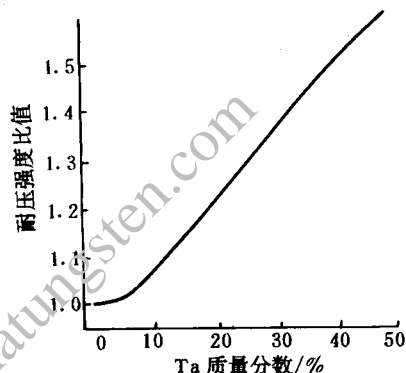


图 10 不同含 Ta 量的 CuCoTa 合金触头与 Cu75/Cr25 耐电压强度之比

2.4 CuCr-Al₂O₃ 合金触头材料

在 Cu75/Cr25 合金中加入少量的 Al₂O₃ 粉末,能使 Cu 基体产生弥散强化,从而提高合金耐电压强度。其中 Cr 与 Al₂O₃ 粉末的质量比为 98.9 : 1.1,按比例混合的粉末在 910 MPa 的压力下先压制成型,然后在低于 Cu 熔点的温度下,一般为 1 050℃ 烧结 4 h 制成。用这种方法制成的触头材料具有高的机械强度、导电性能和耐电压强度。

2.5 CuW-WC 合金触头材料

CuW-WC 是我国近年来研制成功的一种低截流触头材料。其成分为 Cu 含量 20%~30%,WC 含量 24%~30%,W 含量 40%~55%。密度为 $\rho \geq 13.5 \times \text{kg/m}^3$,硬度 $H_B \geq 1960 \text{ MN/m}^2$,导电率 $\geq 35 \text{ (IACS\%)}$,含气量: $\text{O}_2 < 60 \times 10^{-6}$, $\text{N}_2 < 10 \times 10^{-6}$, $\text{H}_2 < 2 \times 10^{-6}$ 。

CuW-WC 合金触头材料适用于真空接触器和真空负荷开关。截流特性是在 120 V,电流为 10 A,交流 50 Hz 下进行测量的,其测量结果最大值小于 4 A,平均值为 1.9 A。

参 考 文 献

- 1 王季梅主编. 真空灭弧室设计、制造及其应用. 西安交通大学出版社,1993 年 11 月
- 2 王季梅编著. 真空开关触头材料及其制造技术. 西安交通大学真空开关研究中心,1995 年 9 月

* 图中比值均是相对于 Cu75/Cr25 而言