



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109346353 B

(45)授权公告日 2020.04.24

(21)申请号 201811267429.1

(22)申请日 2018.10.29

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 109346353 A

(43)申请公布日 2019.02.15

(73)专利权人 中国科学院力学研究所  
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72)发明人 虞钢 张犁天 郑彩云 何秀丽  
李少霞 宁伟健

(74)专利代理机构 北京和信华成知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11390  
代理人 胡剑辉

(51)Int.Cl.  
H01H 11/04(2006.01)

(56)对比文件

CN 106296648 A, 2017.01.04, 全文.  
CN 105839037 A, 2016.08.10, 全文.  
CN 101834077 A, 2010.09.15, 全文.  
苗柏和. 激光表面熔凝CuCr50粉末冶金材料.《应用激光》.1999, 第19卷(第5期), 第253-255页.

审查员 王美娟

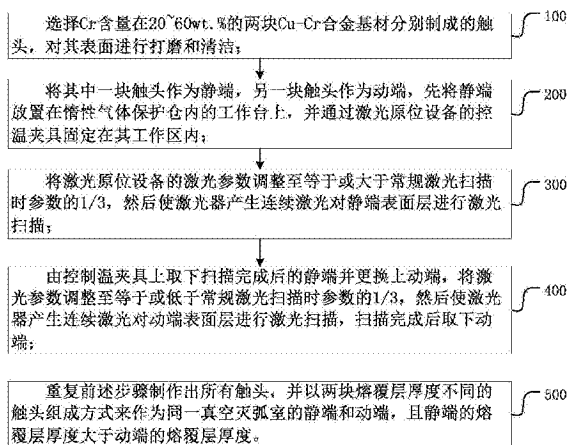
权利要求书1页 说明书6页 附图2页

(54)发明名称

一种高硬度高电导率梯度结构Cu-Cr合金触头的制备方法

(57)摘要

本发明提供一种高硬度高电导率梯度结构Cu-Cr合金触头的制备方法,包括如下步骤:选择Cr含量在20~60wt.%的两块Cu-Cr合金基材分别作为静端和动端;将激光原位设备的激光参数调整至等于或大于常规激光扫描时参数的1/3,然后使激光器产生连续激光对静端表面层进行激光扫描;将激光参数调整至等于或低于常规激光扫描时参数的1/3,然后使激光器产生连续激光对动端表面层进行激光扫描,扫描完成后取下动端;以两块熔覆层厚度不同的触头组成方式来作为同一真空灭弧室的静端和动端,且静端的熔覆层厚度大于动端的熔覆层厚度。本发明使触头材料的接触电阻、耐冲击电压值与容性负载开断能力产生变化,可以满足动、静触头设计的专业要求,提升综合开断能力。



1. 一种高硬度高电导率梯度结构Cu-Cr合金触头的制备方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤100,选择Cr含量在20~60wt.%的两块Cu-Cr合金基材分别制成的触头,对其表面进行打磨和清洁;

步骤200,将其中一块触头作为静端,另一块触头作为动端,先将静端放置在惰性气体保护仓内的工作台上,并通过激光原位设备的控温夹具固定在其工作区内;

步骤300,将激光原位设备的激光参数调整至等于或大于常规激光扫描时参数的1/3,然后使激光器产生连续激光对静端表面层进行激光扫描,所述将激光原位设备的激光参数调整至等于或大于常规激光扫描时参数的1/3时为:激光功率密度: $6.4 \times 10^4 \text{MW/m}^2 \sim 1.2 \times 10^5 \text{MW/m}^2$ ,激光扫描速度:6~10m/min,搭接率:20%~60%,波长:1~3 $\mu\text{m}$ ;

步骤400,由控制温夹具上取下扫描完成后的静端并更换上动端,将激光参数调整至等于或低于常规激光扫描时参数的1/3,所述将激光参数调整至等于或低于常规激光扫描时参数的1/3为:激光功率密度: $5.5 \times 10^4 \text{MW/m}^2 \sim 7.6 \times 10^4 \text{MW/m}^2$ ,激光扫描速度:8~12m/min,搭接率:20%~60%,波长:1~3 $\mu\text{m}$ ;然后使激光器产生连续激光对动端表面层进行激光扫描,扫描完成后取下动端;

在激光扫描过程中,激光束采用递进式扫描方式,使熔池由扫描方向向未扫描方向产生温度梯度,利用温度梯度引起的表面张力在熔池中形成对流以强化Cr粒子的弥散;

步骤500,重复前述步骤制作出所有触头,并以两块熔覆层厚度不同的触头组成方式作为同一真空灭弧室的静端和动端,且静端的熔覆层厚度大于动端的熔覆层厚度。

2. 根据权利要求1所述的制备方法,其特征在于,

所述步骤200中惰性气体保护仓内的氧和氮含量小于50ppm。

3. 根据权利要求1所述的制备方法,其特征在于,

所述打磨后Cu-Cr合金基材的表面粗糙度为1~2 $\mu\text{m}$ 。

4. 根据权利要求1所述的制备方法,其特征在于,

在激光扫描时,通过对触头的水冷和激光扫描条件的配合使熔池的冷却速度达到 $10^5 \sim 10^6 \text{K/s}$ 。

5. 根据权利要求1所述的制备方法,其特征在于,

激光扫描时熔池中的温度>Cr的熔点且Cr粒子熔化成球形。

6. 根据权利要求1所述的制备方法,其特征在于,

经过激光扫描后的静端和动端的表面层的合金硬度 $\geq 290 \text{HV}_{0.25}$ 。

7. 根据权利要求1所述的制备方法,其特征在于,

静端的熔覆层厚度为动端熔覆层厚度的1~3倍。

## 一种高硬度高电导率梯度结构Cu-Cr合金触头的制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于材料科学与表面工程技术领域,特别涉及一种高硬度高电导率梯度结构Cu-Cr合金触头的制备方法。

### 背景技术

[0002] Cu-Cr合金触头广泛用于中高压真空灭弧室中,真空灭弧室的开发是一项系统工程,如果能够将触头材料的研发与真空开关管的结构、设计及开关机构等的改进相结合,就有可能实现真空灭弧室性能的极大提升。特别能够解决在电压高于12kV时,真空灭弧室开断短路电流及传切背靠背电容器组会因过电压和涌流导致接触熔焊问题。

[0003] 目前,细化Cu-Cr合金表面显微组织的方式主要包括电老炼、镀膜和电子束表面改性等方法。

[0004] 电老炼技术的发展已有数十年的历史,工艺方法较成熟,但老炼效率低不均匀,老炼面积仅为30%,老炼深度 $<40\mu\text{m}$ 。此外,其注入单片触头上的能量较大,均大于10kJ,因此在老炼过程中会出现降低真空灭弧室绝缘水平的现象,并且老炼效果无法控制,只能在极有限的范围内增强性能。

[0005] 真空电弧镀膜法将真空腔抽真空至 $1.5\times 10^{-2}\text{Pa}$ 以下,选定电弧离子镀靶材,电弧蒸发出的靶材粒子沉积在Cu-Cr合金表面,然后进行退火处理,退火温度为 $400^{\circ}\text{C}$ ,保温时间为1.5h。涂层厚度小于 $10\mu\text{m}$ ,该方法工艺复杂且对设备的要求高,制作过程耗时长(单片耗时 $>1.5\text{h}$ ),而且冲击电压的提升效果不可知,形成的涂层易脱落且对环境有污染。

[0006] 脉冲电子束机器对Cu-Cr合金进行表面合金化和表面重熔,通过照射不同的次数使改性层硬度显著提升。但改性层不能全表面层覆盖,易产生裂纹,而且电子束机器价格昂贵( $>1$ 千万),同时需要在高真空环境中进行作业,无法适应大规模生产线的需要。

[0007] 综上所述,目前常用方法至少存在改性层厚度小(均 $<50\mu\text{m}$ )、可控性低、覆盖率低、能耗大等缺陷,难以满足工业应用需求,也不能满足灭弧室设计人员的需求。

### 发明内容

[0008] 本发明的目的是提供一种高硬度高电导率梯度结构Cu-Cr合金触头的制备方法。

[0009] 特别地,本发明提供一种高硬度高电导率梯度结构Cu-Cr合金触头的制备方法,包括如下步骤:

[0010] 步骤100,选择Cr含量在20~60wt.%的两块Cu-Cr合金基材分别制成的触头,对其表面进行打磨和清洁;

[0011] 步骤200,将其中一块触头作为静端,另一块触头作为动端,先将静端放置在惰性气体保护仓内的工作台上,并通过激光原位设备的控温夹具固定在其工作区内;

[0012] 步骤300,将激光原位设备的激光参数调整至等于或大于常规激光扫描时参数的 $1/3$ ,然后使激光器产生连续激光对静端表面层进行激光扫描;

[0013] 步骤400,由控制温夹具上取下扫描完成后的静端并更换上动端,将激光参数调整

至等于或低于常规激光扫描时参数的1/3,然后使激光器产生连续激光对动端表面层进行激光扫描,扫描完成后取下动端;

[0014] 步骤500,重复前述步骤制作出所有触头,并以两块熔覆层厚度不同的触头组成方式来作为同一真空灭弧室的静端和动端,且静端的熔覆层厚度大于动端的熔覆层厚度。

[0015] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤200中惰性气体保护仓内的氧和氮含量小于50ppm。

[0016] 在本发明的一个实施方式中,所述打磨后Cu-Cr合金基材的表面粗糙度为1~2 $\mu\text{m}$ 。

[0017] 在本发明的一个实施方式中,所述将激光原位设备的激光参数调整至等于或大于常规激光扫描时参数的1/3时为:激光功率密度: $6.4 \times 10^4 \text{MW/m}^2 \sim 1.2 \times 10^5 \text{MW/m}^2$ ,激光扫描速度:6~10m/min,搭接率:20%~60%,波长:1~3 $\mu\text{m}$ 。

[0018] 在本发明的一个实施方式中,所述将激光参数调整至等于或低于常规激光扫描时参数的1/3为:激光功率密度: $5.5 \times 10^4 \text{MW/m}^2 \sim 7.6 \times 10^4 \text{MW/m}^2$ ,激光扫描速度:8~12m/min,搭接率:20%~60%,波长:1~3 $\mu\text{m}$ 。

[0019] 在本发明的一个实施方式中,在激光扫描时,通过对触头的水冷和激光扫描条件的配合使熔池的冷却速度达到 $10^5 \sim 10^6 \text{K/s}$ 。

[0020] 在本发明的一个实施方式中,在激光扫描过程中,激光束采用递进式扫描方式,使熔池由扫描方向向未扫描方向产生温度梯度,利用温度梯度引起的表面张力在熔池中形成对流以强化Cr粒子的弥散。

[0021] 在本发明的一个实施方式中,激光扫描时熔池中的温度>Cr的熔点且Cr粒子熔化成球形。

[0022] 在本发明的一个实施方式中,经过激光扫描后的静端和动端的表面层的合金硬度 $\geq 290 \text{HV}_{0.25}$ 。

[0023] 在本发明的一个实施方式中,静端的熔覆层厚度为动端熔覆层厚度的1~3倍。

[0024] 本发明通过对激光扫描参数的调整使单片触头上的能量低(<0.5J),改性层厚度可控,晶粒尺寸可控。显微组织的变化又导致了触头性能的差异,使触头材料的接触电阻、耐冲击电压值与容性负载开断能力产生变化,可以满足动、静触头设计的专业要求,提升综合开断能力,提高灭弧室的安全性和寿命,达到真空灭弧室的最优的使用效果。

## 附图说明

[0025] 图1是本发明一个实施方式的制备方法流程示意图;

[0026] 图2是本发明一个实施方式中搭配的静端和动端的剖面示意图。

## 具体实施方式

[0027] 如图1所示,本发明一个实施方式提供一种高硬度高电导率梯度结构Cu-Cr合金触头的制备方法,一般包括如下步骤:

[0028] 步骤100,选择Cr含量在20~60wt.%的两块Cu-Cr合金基材分别制成的触头,对其表面进行打磨和清洁;

[0029] 打磨是使Cu-Cr合金基材表面产生相应的粗糙度,该过程的粗糙度可达到1~2 $\mu\text{m}$ 。清洁是为清理Cu-Cr合金基材表面,避免杂质或油污影响激光扫描时的熔覆效果,具体方式

可通过无水酒精进行清洗后烘干处理。

[0030] 此步骤中选择的两块Cu-Cr合金基材不需要有任何限制,只要满足制作触头的条件即可。

[0031] 步骤200,将其中一块触头作为静端,另一块触头作为动端,先将静端放置在惰性气体保护仓内的工作台上,并通过激光原位设备的控温夹具固定在其工作区内;

[0032] 这里对两块触头的划分仅是为了后续步骤中要分别采取不同的激光扫描参数进行扫描。

[0033] 控温夹具是激光原位设备的一部件,用于在固定触头的同时对触头进行降温,降温方式可以是水冷、风冷、冷却液交换等方式。放置在惰性气体保护仓内可避免触头表面氧化,其中惰性气体中氧和氮的含量至少小于50ppm。

[0034] 步骤300,将激光原位设备的激光参数调整至等于或大于常规激光扫描时参数的1/3,然后使激光器产生连续激光对静端表面层进行激光扫描;

[0035] 本步骤中的常规激光扫描时的参数是指本行业正常对材料表面进行改性时,其激光时所采用的参数。而该步骤中对静端激光扫描时的参数需要等于或大于常规激光扫描时参数的目的是在满足改性的前提下,使触头上的熔覆层表现出一定的厚度,以与后续的动端熔覆层厚度出现区别。

[0036] 激光在对触头表面进行改性时,其产生的熔池的温度优选大于Cr的熔点温度,此时Cu能够形成液相,而Cr粒子的边缘是熔化并形成相应的球形,从而可增加流动性,使弥散效果更好。

[0037] 在该步骤中,激光扫描时的方式与常规的扫描方式相同,即激光束垂直于Cu-Cr合金基材表面层,并以逐渐递进的轨迹对触头的表面进行扫描。激光束采用递进式扫描方式,可使熔池由扫描方向向未扫描方向产生温度梯度,利用温度梯度引起的表面张力在熔池中形成对流以强化Cr粒子的弥散。

[0038] 其中,将激光原位设备的激光参数调整至等于或大于常规激光扫描时参数的1/3的具体数值为:激光功率密度: $6.4 \times 10^4 \text{ MW/m}^2 \sim 1.2 \times 10^5 \text{ MW/m}^2$ ,激光扫描速度:6~10m/min,搭接率:20%~60%,波长:1~3 $\mu\text{m}$ ;该参数下静端表面熔化层的厚度为180~330 $\mu\text{m}$ 。这里限定出的参数是一个范围值,这样可使最终完成的静端具备不同的熔化层厚度,为后续挑选两个不同厚度的触头提供方便。

[0039] 步骤400,由控制温夹具上取下扫描完成后的静端并更换上动端,将激光参数调整至等于或低于常规激光扫描时参数的1/3,然后使激光器产生连续激光对动端表面层进行激光扫描,扫描完成后取下动端;

[0040] 对动端的扫描方式与要求静端的相同,这里不再重复。需要注意的是,动端最终完成后其熔覆层同样是根据参数不同能表现出不同的厚薄,从而可与静端形成不同的搭配方式。此外,本实施方式虽然将搭配方案以静端和动端作为相互搭配の説明,但在实际搭配时,不同厚度的静端或动端之间同样可进行搭配。

[0041] 其中,将激光参数调整至等于或低于常规激光扫描时参数的1/3时的具体参数为:激光功率密度: $5.5 \times 10^4 \text{ MW/m}^2 \sim 7.6 \times 10^4 \text{ MW/m}^2$ ,激光扫描速度:8~12m/min,搭接率:20%~60%,波长:1~3 $\mu\text{m}$ 。在该参数下,动端的熔覆层厚度一般为静端熔覆层厚度的1/3。

[0042] 步骤500,重复前述步骤制作出所有触头,并以两块熔覆层厚度不同的触头组成方

式来作为同一真空灭弧室的静端和动端,且静端的熔覆层厚度大于动端的熔覆层厚度。

[0043] 该步骤在选择不同厚度的触头时,可根据激光扫描时不同的参数进行区分,如同一参数处理的触头记录后独立放置,然后在配对时根据性能要求选择出相应的静端和动端。

[0044] 本实施方式的目的旨在制作不同改性层厚度的触头,然后通过相应厚度的搭配来配置一个真空灭弧室的静端和动端。

[0045] 这是因为在实际应用中,Cu-Cr合金触头的失效大多是其改性层失效,在真空灭弧室的实际使用环境中,应用于真空灭弧室的触头分为静触头(+)和动触头(-)两端,往往采用相同显微组织的触头成对置于动静两端,但真空灭弧室内电弧在侵蚀静触头(+)和动触头(-)时的形式往往不同,尤其是当真空电弧形态发展到阳极斑点模式甚至达到强电弧模式阶段时,静端触头(+)表面出现的电弧斑点的直径较动端(-)更大,并且出现的更加集中,这就使得静端(+)耐压水平与动端(-)耐压水平相同的情况下,同一真空灭弧室中的静端(+)先失效而动端还能够继续使用,这显然不能够最大限度的提升灭弧室的性能。

[0046] 本实施方式经过激光扫描后的静端和动端的表面层的合金硬度 $\geq 290\text{HV}_{0.25}$ 。通过在制作时即生产出不同熔覆层厚度的触头,为后期选用时搭配厚薄不同的静端和动端,来满足额定电压在12~40.5kV的真空灭弧室要求提供了基础。

[0047] 由于静触头(+)改性层厚度比动触头(-)更深,可满足Cu-Cr触头整个寿命期内损耗的厚度,延长静触头使用寿命;动触头(-)表面的改性层厚度较低,可以有效降低动静触头两端的接触电阻值,在分断电流过程中降低触头整体发热;动触头(-)表面的Cr相粒子比静触头(+)的直径小,有利于动触头表面细小、分散的阴极斑点局部热点温度下降,蒸发减少,而静触头表面由于阳极斑点直径更大、更聚集,所以表面Cr相粒子的尺寸较之动端更大。通过设计具有梯度结构的Cu-Cr触头,并且搭配不同的动、静端,可以使设计人员在设计阶段无需把触头材料的性能作为考虑要求,只需提出对触头性能的特殊要求,激光表面处理可采用不同工艺进行相应针对的设计,从而提升综合开断能力。

[0048] 本实施方式通过对激光扫描参数的调整使单片触头上的能量低( $< 0.5\text{J}$ ),改性层厚度可控,晶粒尺寸可控。显微组织的变化又导致了触头性能的差异,使触头材料的接触电阻、耐冲击电压值与容性负载开断能力产生变化,可以满足动、静触头设计的专业要求,提升综合开断能力,提高灭弧室的安全性和寿命,达到真空灭弧室的最优的使用效果。

[0049] 在本发明的一个实施方式中,在对静端和动端进行激光扫描时,可通过对设置在控温夹具上的冷却系统对触头进行降温,同时由于本方案对扫描速度和温度的设定,使得每一个熔池快速产生和消失,其产生的热量不及向四周扩散,在这个状态下,本方案通过水冷和激光扫描条件的配合可使熔池的冷却速度达到 $10^5\sim 10^6\text{K/s}$ 。

[0050] 以下以具体的数值对本发明的实施过程进行进一步说明。

[0051] 实施例一:

[0052] 1. 选取混粉法制备而成的Cu-Cr合金触头,厚度为3mm,其中Cr重量含量百分比约为30%;将待用的Cu-Cr合金触头用无水酒精进行清洗、烘干,保证Cu-Cr合金触头表面的清洁;

[0053] 2. 根据待使用的不同加工参数,对待加工的Cu-Cr合金触头进行划分(静端和动端),将Cu-Cr合金触头(静端)放置于氧含量可控的气氛箱内(含氧量 $\leq 20\text{ppm}$ )内,再放置于

数控工作台上的控温夹具上；

[0054] 3. 将Cu-Cr合金触头(静端)放置于激光原位合金化设备的工作区域,调节激光器参数,激光功率密度: $9 \times 10^4 \text{ MW/m}^2$ ,激光扫描速度: $8 \text{ m/min}$ ,搭接率:30%,波长: $3 \mu\text{m}$ ;通过连续激光快速扫描作用于Cu-Cr合金(静端)表面,激光扫描完成后,Cu-Cr合金触头(静端)剖面形成了一层厚度约 $330 \mu\text{m}$ 的熔化层,其Cr相晶粒直径为 $0.8 \sim 2 \mu\text{m}$ ,如图2右所示;

[0055] 4. 取下Cu-Cr合金触头(静端),再将Cu-Cr合金触头(动端)放置于激光原位合金化设备的工作区域,调节激光器的参数产生激光;激光功率密度: $6 \times 10^4 \text{ MW/m}^2$ ,激光扫描速度: $10 \text{ m/min}$ ,搭接率:40%,波长: $1 \mu\text{m}$ ;通过连续激光快速扫描作用于Cu-Cr合金(动端)表面,经激光处理后,剖面形成了一层厚度约 $120 \mu\text{m}$ 的熔化层,其Cr相晶粒直径为 $0.2 \sim 1 \mu\text{m}$ ,如图2左所示;

[0056] 5. 将获取的Cu-Cr合金触头(静端)和Cu-Cr合金触头(动端)以熔化层厚度相差三倍的组合方式进行搭配;可将搭配后的静端和动端安装于额定电压为 $12 \text{ kV}$ (型号12/1600-31.5N)的真空灭弧室内部,进行后续电性能测试;

[0057] 额定触头压力下的静端(+)-回路接触电阻 $17 \mu\Omega$ ,动端(+)-回路接触电阻 $15 \mu\Omega$ ,静端(+)-动端(-)回路接触电阻 $16 \mu\Omega$ 。未经过激光处理时,其空气中冲击耐受电压(峰值)为 $85 \text{ kV}$ 。进行耐压值测试,结果如下表所示,不论何种搭配,经过激光处理后的耐点压值均高于未处理的耐压极限( $85 \text{ kV}$ )。尤其是静端(+)-动端(-)的不对称型搭配,其耐压值较之对称搭配提升 $20.2 \sim 32.7\%$ ,并且耐压值的分布更为均匀,容性负载电流开断性能试验失败0次(0/30)。

[0058] 不同的动、静触头搭配的冲击空气中耐压极限对比

耐电压值		$U_{\text{average}}(\text{kV})$		$\Delta U = U_{\text{max}} - U_{\text{min}}(\text{kV})$	
		动触头(-)	静触头(+)	动触头(-)	静触头(+)
静端(+)-	$U_1$	104	100	10	9
动端(+)-	$U_2$	100	98	8	2
静端(+)-动端(-)	$U_3$	125	130	4	3
$(U_3 - U_1)/U_1$		20.2%	30%	-60%	-66.7%
$(U_3 - U_2)/U_2$		25%	32.7%	-50%	-77.8%

[0060] 实施例二

[0061] 1. 选取混粉法制备而成的Cu-Cr合金触头,厚度为 $3 \text{ mm}$ ,其中Cr重量含量百分比约为50%;将待用的Cu-Cr合金触头用无水酒精进行清洗、烘干,保证Cu-Cr合金触头表面的清洁;

[0062] 2. 根据待使用的不同加工参数,对待加工的Cu-Cr合金触头进行划分(静端和动端),将Cu-Cr合金触头(静端)放置于氧含量可控的气氛箱内(含氧量 $\leq 20 \text{ ppm}$ )内,再放置于数控工作台上的控温夹具上;

[0063] 3. 将Cu-Cr合金触头(静端)放置于激光原位合金化设备的工作区域,调节激光器参数,激光功率密度: $10^5 \text{ MW/m}^2$ ,激光扫描速度: $10 \text{ m/min}$ ,搭接率:40%,波长: $3 \mu\text{m}$ ;通过连续激光快速扫描作用于Cu-Cr合金(静端)表面,激光扫描完成后,Cu-Cr合金触头(静端)剖面形成了一层厚度约 $180 \mu\text{m}$ 的熔化层,其Cr相晶粒直径为 $5 \sim 7 \mu\text{m}$ ;

[0064] 4. 取下Cu-Cr合金触头(静端),再将Cu-Cr合金触头(动端)放置于激光原位合金化设备的工作区域,调节激光器的参数产生激光;激光功率密度: $6.5 \times 10^4 \text{ MW/m}^2$ ,激光扫描速度:8m/min,搭接率:40%,波长:1 $\mu\text{m}$ ;通过连续激光快速扫描作用于Cu-Cr合金(动端)表面,经激光处理后,剖面形成了一层厚度约80 $\mu\text{m}$ 的熔化层,其Cr相晶粒直径为1~3 $\mu\text{m}$ ;

[0065] 5. 将获取的Cu-Cr合金触头(静端)和Cu-Cr合金触头(动端)以熔化层厚度相差三倍的组合方式进行搭配;可将搭配后的静端和动端安装于额定电压为40.5kV(型号40.5/1600-25C)的真空灭弧室内部,进行后续电性能测试;

[0066] 额定触头压力下的静端(+)-回路接触电阻16 $\mu\Omega$ ,动端(+)-回路接触电阻15 $\mu\Omega$ ,静端(+)-动端(-)回路接触电阻14 $\mu\Omega$ 。未经过激光处理时,其油介质中冲击耐受电压(峰值)为185kV。进行油介质中的耐压值测试,不论何种搭配,经过激光处理后的耐点压值均高于未处理的耐压极限(185kV)。尤其是静端(+)-动端(-)的不对称型搭配,其耐压值较之对称搭配提升至215kV,并且动、静两端的最低和最高耐压值的差值更小,容性负载电流开断性能试验失败0次(0/20)。

[0067] 至此,本领域技术人员应认识到,虽然本文已详尽示出和描述了本发明的多个示例性实施例,但是,在不脱离本发明精神和范围的情况下,仍可根据本发明公开的内容直接确定或推导出符合本发明原理的许多其他变型或修改。因此,本发明的范围应被理解和认定为覆盖了所有这些其他变型或修改。



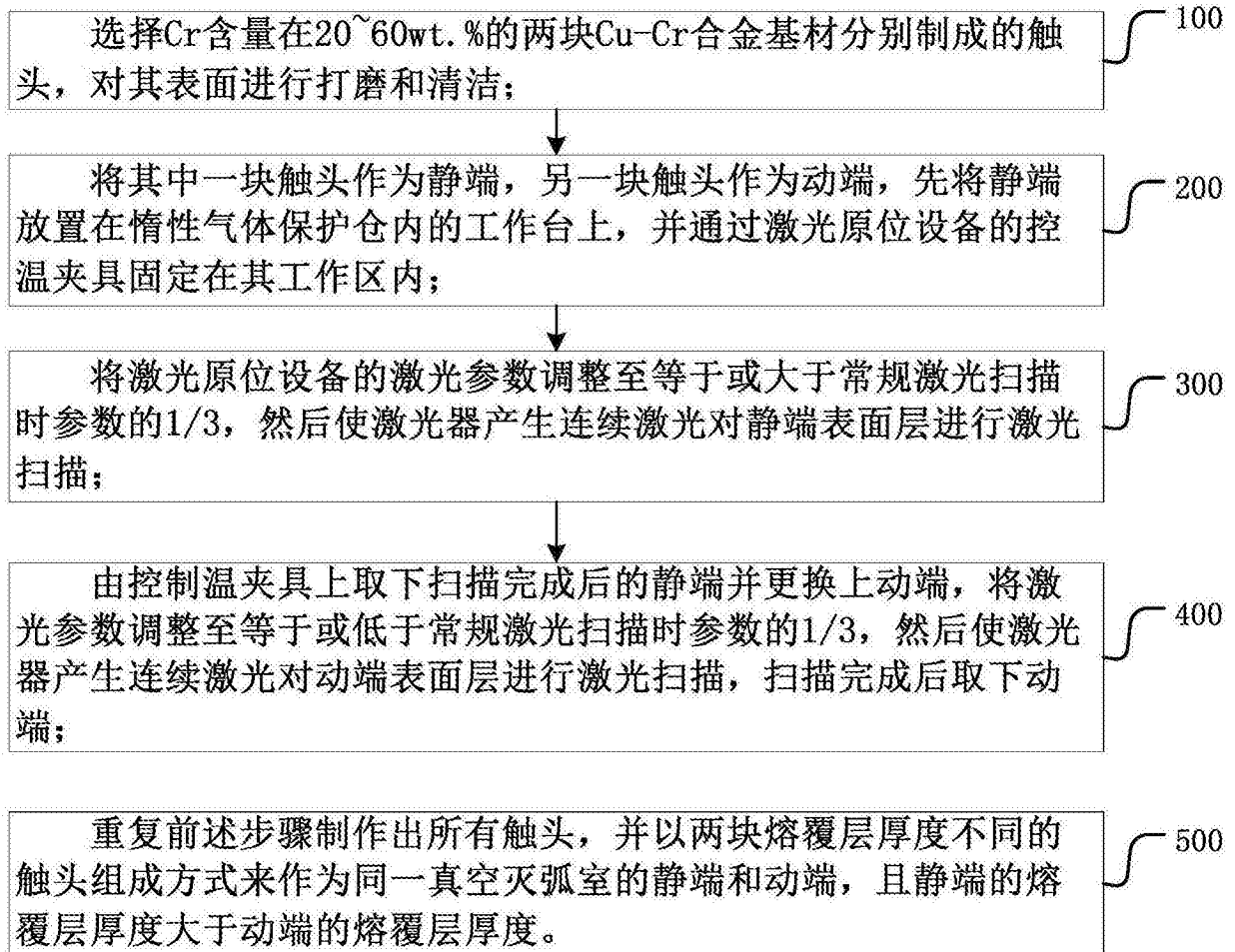


图1

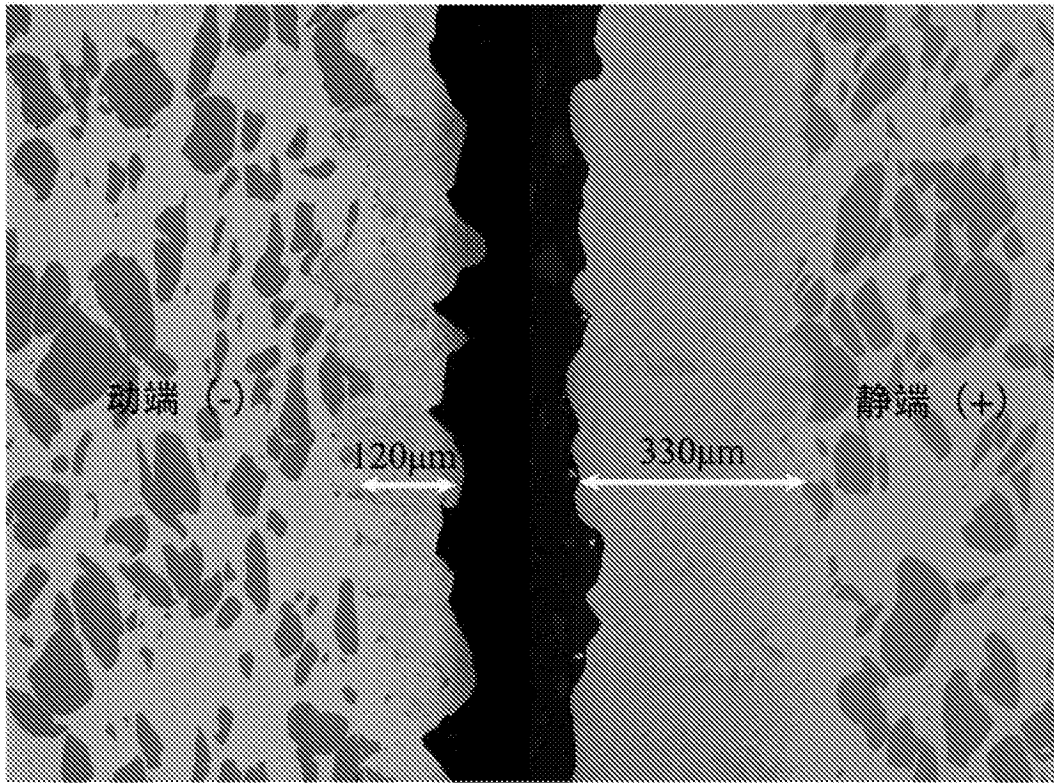


图2