

综述

快速凝固法制备细晶超细晶Cu-Cr合金的进展

王玉平, 张润理, 游一民

(西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077)

摘要: 快速凝固法是制备细晶和超细晶Cu-Cr合金的重要工艺技术之一。快速凝固技术包括甩熔技术、雾化技术、喷射沉积技术、激光技术等,能够将晶粒从几百微米减小至几微米,甚至100 nm以下,从而使Cu-Cr合金的综合性能得以全面提高。为了更好地利用此方法制备细晶和超细晶Cu-Cr合金,结合国内外Cu-Cr合金有关文献的研究成果,综述了快速凝固法在Cu-Cr高压真空触头材料方面的应用研究现状,比较几种方法的技术特点和性能,以便为今后开展Cu-Cr合金的微晶、超微晶的研究提供一定的参考。

关键词: 快速凝固;细晶;超细晶Cu-Cr合金;真空触头

中图分类号: TM561.2;TG146.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2011)12-0080-06

Review of the Preparation of Fine-grain and Superfine-grain Cu-Cr Alloys Via Rapid Solidification

WANG Yu-ping, ZHANG Run-li, YOU Yi-min

(Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Rapid solidification technology is an important technique for preparing fine-grain and superfine-grain Cu-Cr alloys, including melt-spinning, atomization, spray deposition and laser technology, etc. The grain sizes of the Cu-Cr alloys thus prepared could be reduced from hundreds of micrometers to several micrometers or even to less than 100 nanometers, so that the overall performance of Cu-Cr alloys can be improved. In order to facilitate the preparation of the fine-grain or superfine-grain Cu-Cr alloys, we summarize the researches and applications of the rapid solidification methods to Cu-Cr contact materials for high-voltage and vacuum condition, and compare their technical features.

Key words: rapid solidification; fine-grain; superfine-grain Cu-Cr alloy; vacuum contact

0 引言

随着高电压、大容量、小型化、高可靠性及低过电压真空断路器方向的发展,对触头材料的综合性能要求越来越高^[1-2],现有Cu-Cr合金的部分特性已不能满足需要,必须进一步提高Cu-Cr触头的耐电压强度、分断能力和降低截流值等性能,以分别满足真空灭弧室高电压型、大电流型、频繁操作型及低过电压型的要求。由于Cu-Cr触头材料的显微组织细化及超细化可望全面提升Cu-Cr触头材料的综合性能,同时使真空灭弧室绝缘强度升高^[3-5],特别是Cr相的细化有利于提高合金的耐电压强度、抗电弧烧蚀能力和降低合金的截流值。

快速凝固法^[6-7]可以用于制备难熔合金和二元固溶度较低的合金,所制合金的明显特征如晶粒细小、过饱和固溶度、少偏析或无偏析、亚稳相扩大等成分均匀、独特相结构或显微结构,是普通铸造法难以达到的。快速凝固技术^[8-17]用于制备的Cu-Cr合金,可以大幅度提高Cr元素在Cu中的固溶度、偏析减少、晶体缺陷密度增加、形成新的亚稳相、促使晶粒细化等,在制备细晶、超细晶Cu-Cr系合金材料中有着良好的前景。例如,Cr相尺寸的细化可提高耐电压强度,降低截流值,同时开断性能及抗熔焊性能无明显变化,因此快速凝固技术的发展为研究和开发高性能Cu-Cr合金开辟了新的途径^[13]。目前制备和开发高性能Cu-Cr合金的快速凝固方法主要包括熔甩法(旋铸法)^[14]、雾化制粉法^[15]、喷射沉积法^[16]、激光表面

收稿日期:2011-07-21; 修回日期:2011-08-19

合金化法^[7]等。

笔者结合国内外Cu-Cr合金有关文献的研究成果,综述了快速凝固法在Cu-Cr高压真空触头材料方面的应用研究现状,比较几种方法的技术特点和性能,以便为今后开展Cu-Cr合金的微晶、超微晶的研究提供一定的参考。

1 熔甩法

熔甩法的基本特点就是将Cu-Cr混合粉末在高温下熔融,熔体通过截面尺寸很小的喷嘴流出与高速旋转的Cu合金辊接触而快速凝固,形成纳米晶合金条带。基本工艺路线是:将按一定比例(CuCr25-CuCr50)称量Cu粉和Cr粉(或Cr和其他添加元素的粉末)均匀混合后,置于带有石英喷嘴的坩埚中真空感应加热熔化,熔化后的合金熔液在纯净惰性气体(Ar或He)的压力下通过喷嘴喷射到高速旋转高导热的辊轮上,而获得快速凝固的Cu-Cr合金条带。显微组织结构特别是晶粒大小等与熔甩工艺的冷却速度关系十分密切,而冷却速度与辊轮的转速及合金带材的厚度相关。用该工艺制备的Cu-Cr合金条带的特征是:靠辊轮面的晶粒为细小的等轴晶,其他部位为柱状晶,从辊轮侧往自由表面侧方向生长。通过显微观察明显看到,Cr在Cu中的固溶度得以提高。

文[14,18]用熔甩技术进行Cr质量分数分别为2wt%和5wt%的纳米晶Cu-Cr合金,在氩保护气氛中按比例称量配制好的Cu粉和Cr粉于石英坩埚中熔化,通过石英喷嘴喷射到以36 m/s高速旋转的铜合金制成的辊轮上,制作出了30 μm厚、3 mm宽的Cu-Cr纳米晶合金条带,条带中Cr粒子小于100 nm。文[19-20]采用熔甩法制备了Cr质量分数高达40%(原子分数)的Cu-Cr合金,并观察到球状的富Cr相。文[21]研究了快速凝固制备的Cu-Cr合金,发现熔甩法制备的20 μm厚的薄带中Cr固溶度从平衡的0.65wt%提高到33wt%。时效处理后Cu-33wt%Cr合金的硬度达400 HV,为常规合金的3倍,导电率为50% IACS。文[22]用熔甩技术制备出含8.1%~21.7% (wt) Cr及2wt%Ag的Cu-Cr合金。文[23]发现熔甩法的Cu71Cr29合金出现液相分离,但受到坩埚材料的污染。由于冷却速度的限制,现在还不能用快速凝固法直接制备晶粒尺寸小于10 μm的大块Cu-Cr合金材料。

2 雾化法

雾化法^[7]是采用快速凝固工艺使金属熔体在外力作用下分散成极小的雾滴,在相对运动速度很高

的流体介质中迅速冷却凝固,而获得细晶、超细晶金属粉末的方法,可以用来取代机械破碎法制备合金粉末。主要有气体雾化法和液雾化法两种雾化方法。两者的差别主要是雾化介质不同,气体雾化法的雾化介质为惰性气体(氮气或氩气),液雾化法则是水。液雾化法更多地用于低合金和高合金钢(包括不锈钢)粉末。用于制备Cu-Cr合金超细粉末的主要是气体雾化法:即将熔融的Cu-Cr合金液从石英喷嘴口缓慢流出时,通过高压气流的高速冲击作用,雾化成微小的合金液滴,经冷却形成细小的颗粒。见图1。

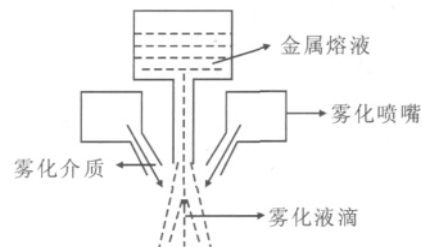


图1 雾化法工艺示意图

Fig. 1 Atomizing technology

高压气体雾化冷却速度为 $10^2 \sim 10^3$ °C/s,雾化粉末为光滑圆球形,获得的粉末颗粒的平均尺寸与气体压力之间表现为幂函数的关系。压力为4~8 MPa的高压气体雾化能产生超细颗粒的粉末。

文[24]探讨了水雾化金属粉末形状不规则与粒度间的关系,认为金属液滴的球化时间与凝固时间之比,以及外部拖曳力对液滴的作用,是决定雾化粉末颗粒形状的两个基本因素。

由在雾化过程中,氧含量会随着杂质含量的增加而增加,所以要采用惰性气体或在水中加入防腐剂(如酒精)或纯水以降低合金的含氧量,减轻对合金的电流分断能力的影响。同时,提高Cu-Cr合金的熔炼温度,充分熔化Cr颗粒,避免由于在Cr颗粒表面产生氧化膜,而未熔化,未雾化的现象^[13,25-26]。

文[15]开发一种多级雾化法,该工艺的制粉装置示意图见图2。多级雾化法是将熔炼好的母合金在电炉中熔化,然后将其倾入漏包中,金属熔体经过漏包底部的小孔流进喷嘴,经高压高速氮气流雾化后形成的熔体液滴随即冲撞高速旋转盘的表面,从而再次被破碎。这时,这些更细小的液滴则向圆盘外方向飞行,并被高速的流体冷却介质强制冷却而凝固,据推算合金的冷却速度可达 $10^5 \sim 10^6$ °C/s。制备的Cu-Cr合金粉末颗粒呈球状或类球状,颗粒平均尺寸为10~15 μm,晶粒尺寸可达1~2 μm。粉末在Cu包套中经真空封装后,在390 °C温度下,按10:1的挤压成形经时效处理后可使其导电率达到82% (IACS)

以上,显微硬度达HV170,抗拉强度为540 MPa。

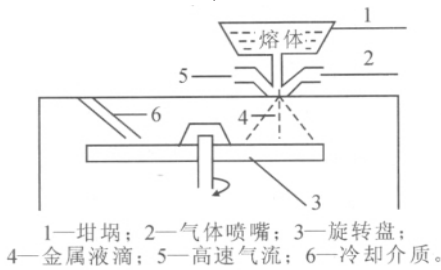


图2 多级雾化装置原理图

Fig. 2 The principle diagram of multistage atomizing device

3 喷射沉积法

用高速惰性气体将熔融的金属合金雾化成弥散的极小尺寸雾滴,迅速使其直接沉积在金属沉积

器上冷焊在一起,快速形成具有一定形状和较高致密度的坯体^[11],这就是喷射沉积法制备超细晶合金的基本原理。它是雾化法的延伸,通常雾化法是形成超细晶粉末颗粒,而喷射沉积法是形成合金坯体。

实际上喷射沉积的过程是一个快速凝固的过程。喷射沉积法制备Cu-Cr合金的工艺流程^[16]见图3。喷射沉积法制取Cu-Cr合金分3个过程^[27-28]:金属的熔化、雾化和沉积,前两个过程与雾化法相同。即按比例将Cu、Cr混合粉末熔化成液态金属后,高速惰性气体雾化为极细小的液滴,定向直接沉积在具有一定形状的收集器上,从而获得大块整体致密度达理论密度99%以上的Cu-Cr合金,雾化—沉积须在真空或惰性气体气氛中进行,全过程应在一密闭的炉体内完成,有助于降低Cu-Cr合金的氧含量^[11]。

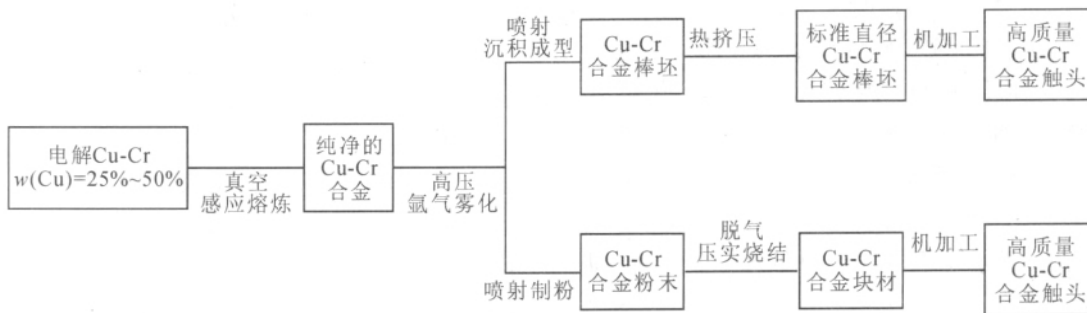


图3 喷射沉积制备Cu-Cr材料的工艺流程

Fig. 3 Process flow of spray deposition for Cu-Cr preparation

采用喷射成型法制备Cu-Cr合金可以实现合金的致密化,致密度达99%。该工艺还能有效地减小颗粒尺寸,因为冷却速度快,可有效地抑制合金中第二相的析出和Cr颗粒的长大。且该工艺制备的Cu-Cr合金中氧、氮气含量很低。

喷射沉积法是将Cu-Cr熔融液态直接雾化同时快速定向沉积凝固,工艺流程短、成本低,可以制作大块高致密合金材料,而且采用接近触头形状的金属沉积收集器,形成接近零件实际形状的高性能Cu-Cr触头材料,具有较高的耐电压强度^[13]。但由于雾化喷射时沉积颗粒存在位置不均匀性,大块致密均匀性受到限制,而且对熔炼设备、惰性气体的纯度、高温坩埚材料、导流管材料、喷嘴等及工艺参数的选择都有较高的要求^[29]。此外,合金的含Cr量越高,造成体系的熔点越高,合金液体的导出方式、雾化喷嘴的设计均对设备提出更高要求,给喷射沉积过程带来很大难度,这是开发喷射沉积Cu-Cr触头材料要克服的主要问题^[30]。

文[31]采用喷射成形工艺制备的Cu71Cr29合金微观组织均匀,析出的Cr相细小而弥散地分布在Cu基体中,Cr相尺寸为3~10 μm,这将大幅度提高材

料的耐电压强度和抗电击穿等电学性能,但致密度较低,仅为95%。

文[32]采用喷射沉积制备的Cu-1.2% Cr(质量分数)合金显微组织以良好的等轴晶形式存在,并具有很好的变形性能。喷射沉积技术的不足之处在于沉积颗粒不均匀。

文[33]采用喷射沉积法制备的Cu-Cr合金中,颗粒大的达到120 μm,小的仅2 μm。

4 激光表面合金化法

激光表面合金化是一种用高密度激光束将合金粉末和基材一起熔化后迅速凝固,在基材表面获得合金层的方法^[34]。

文[17]用激光表面合金化法制取Cu-Cr合金的过程如下:由于铜对CO₂激光具有强烈的反射性,可预先用硅酸盐粘结剂在经过喷丸处理的铜基体表面粘上一层厚100~300 μm的Cr粉,然后用激光束在氦气气氛保护下以一定的速度照射Cr粉层,必要时可反复多次,Cr粉及Cu表层在激光束的照射下快速熔化并凝固形成Cu-Cr合金。可用于制取100~200 μm厚、其硬度达120 HV、含Cr质量分数20wt%的

Cu-Cr合金涂层。

文[35]将机械合金化的Cu-Cr-Fe合金进行激光表面合金化,使Cr晶粒从原来的5~220 μm减少到2.6~25 μm,显微硬度从120 HV增加到200~230 HV。

激光表面合金化法只能用于制取Cu-Cr合金涂层,进行表面改性,不能用于制取整体Cu-Cr合金材料。该合金涂层具有很高的强度和良好的耐磨性。

5 电磁悬浮熔炼和悬淬法

电磁悬浮熔炼Cu-Cr合金是首先将电弧熔炼的Cu-Cr合金样品放在中空的陶瓷支撑杆上,抽至一定真空后,充入高纯氦气,然后接通电源,调节功率使样品感应加热并悬浮起来,待合金样品完全熔化并保温一段时间以后,从中空陶瓷支撑杆中吹入高纯氦气,使样品在悬浮状态下凝固。

悬淬Cu-Cr合金^[3]与电磁悬浮一样通过高频感应加热使合金样品在悬浮状态下熔化,待合金样品完全熔化并保温一段时间以后,将陶瓷支撑杆移开,然后突然断电,Cu-Cr合金熔体在重力作用下落到Cu板上,从而实现快速凝固。

Cu-Cr合金不接触任何坩埚材料在电磁悬浮状态下进行熔炼然后在悬浮状态下快速凝固或者在基体材料上快速凝固。突破了坩埚材料的限制,熔体无污染。这种工艺是目前快速凝固工艺的最新发展。

文[36]实现了Cu71Cr29合金的电磁悬浮无容器凝固与悬淬实验。文[13]通过电磁悬浮熔炼法和悬淬法成功实现了Cr质量分数高达70%(原子分数)的Cu-Cr合金的快速凝固。研究结果发现电磁悬浮熔炼的Cu-Cr合金由于强烈的电磁搅拌作用,显微组织均匀,没有偏析现象。当合金中Cr质量分数高于15%(原子分数)时,悬淬Cu-Cr合金中开始出现亚稳态的液相分离。随着合金中Cr质量分数的增加,富Cr枝晶不断减少,富Cr球的直径不断增大,且富Cr球中出现二次液相分离的富Cu相。

快速凝固方法的不足之处诸如:熔用法不能制备大铸锭合金;水雾化法存在含氧量较高的缺点;喷射沉积工艺对熔炼设备及惰性气体的纯度等有较高的要求,而且其对高温坩埚材料、导流管材料及工艺参数的选择都较熔铸法敏感等。

6 结语

快速凝固方法是速熔快淬技术制备的非晶纳米晶合金在Cu-Cr合金制备中的应用。由于快速凝固方法制备的Cu-Cr合金可以提高Cr在Cu中的固溶度,有效地细化合金材料的晶粒度,经过这几年的不断

发展,熔用法可以制备出Cr质量分数大于20wt%,晶粒尺寸小于10 μm的Cu-Cr合金;多级雾化法制粉晶粒尺寸可达1~2 μm;喷射沉积技术可以制备大尺寸Cu-Cr合金而且一次成型,污染小;激光表面合金化法可以制备细晶涂层;最新技术悬浮熔炼和悬淬法可以避免坩埚的二次污染。但是还不能制备高质量分数Cr的Cu基合金,熔用法不能制备大铸锭合金;雾化法存在含氧量较高的缺点;喷射沉积工艺对熔炼设备及惰性气体的纯度等有较高的要求,而且其对高温坩埚材料、导流管材料及工艺参数的选择都较熔铸法敏感等。经过快速凝固技术制备的Cu-Cr合金其晶体缺陷密度增大,须经适当的时效处理,促使过饱和固溶体分解,细小的Cr析出相均匀弥散地分布在铜基体及晶界上,并且时效析出的Cr颗粒大多与基体间保持共格关系,产生所谓的“共格强化效应”,从而提高Cu-Cr合金的性能。快速凝固技术在制备细晶、超细晶Cu-Cr系合金材料中有着非常广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 朱建娟,田保红,刘平. Cu-Cr合金触头材料制备技术的研究进展[J]. 铸造, 2006, 55(11): 1110-1113.
ZHU Jian-juan, TIAN Bao-hong, LIU Ping. Development of manufacture technology for Cu-Cr contact materials[J]. Foundry, 2006, 55(11): 1110-1113.
- [2] 豆志河,张延安,赫冀成,等. Cu-Cr合金触头材料的研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(10): 63-67.
DOU Zhi-he, ZHANG Ting-an, HE Ji-cheng, et al. Research progress of Cu-Cr alloy contact materials[J]. Materials Review, 2005, 19(10): 63-67.
- [3] 冯宇,张程煜,丁秉钧. 纳米晶CuCr合金的制备及其截流值研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(9): 1439-1443.
FENG Yu, ZHANG Cheng-yu, DING Bing-jun. Preparation of nanocrystalline CuCr contact materials and their chopping currents[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(9): 1439-1443.
- [4] 贾申利,王季梅. 真空电弧重熔法制造CuCr触头材料[J]. 高压电器, 1995, 31(1): 33-36.
JIA Shen-li, WANG Ji-mei. Vacuum arc re-melting prepared CuCr contact materials[J]. High Voltage Apparatus, 1995, 31(1): 33-36.
- [5] 王亚平,张丽娜,丁秉钧,等. 选择性相强化对CuCr触头材料在真空小间隙中耐电压强度的影响[J]. 中国电机工程学报, 1999(3): 47-50.
WANG Ya-ping, ZHANG Li-na, DING Bing-jun, et al. Effect of selective strengthening of CuCr contact materials on the dielectric strength in a short vacuum gap[J]. Proceedings of the Csee, 1999(3): 47-50.

- [6] 王强,梁淑华,范志康.CuCr系合金材料制造工艺的新进展[J]. 材料导报, 2000, 14(8):22-24.
WANG Qiang, LIANG Shu-hua, FAN Zhi-kang. New developments in production technology of CuCr alloy materials[J]. Materials Review, 2000, 14(8):22-24.
- [7] 张剑平,陈敬超,周晓龙,等.快速凝固法在铜铬系材料制备中的应用[J]. 材料导报, 2002, 16(10):39-41.
ZHANG Jian-ping, CHEN Jing-chao, ZHOU Xiao-long, et al. Application of rapid solidification in producing CuCr alloys[J]. Materials Review, 2002, 16(10):39-41.
- [8] 周志明,陈元芳,刘春,等.快速凝固Cu-Cr合金的研究进展[J]. 电工材料, 2009(2):26-29.
ZHOU Zhi-ming, CHEN Yuan-fang, LIU Chun, et al. Research development of rapidly solidified Cu-Cr alloys[J]. Electrical Engineering Materials, 2009(2):26-29.
- [9] 刘平,康布熙,曹兴国,等.快速凝固Cu-Cr合金时效析出的共格强化效应[J]. 金属学报, 1999, 35(6):561-564.
LIU Ping, KANG Bu-xi, CAO Xing-guo, et al. Coherent strengthening of aging precipitation in rapidly solidified Cu-Cr alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35(6):561-564.
- [10] 冯晶,陈敬超,于杰,等.快速凝固法制备过饱和CuCr合金时效析出动力学[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(2):281-285.
FENG Jing, CHEN Jing-chao, YU Jie, et al. Kinetics of aging precipitation of CuCr alloy by rapidly solidification [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(2):281-285.
- [11] 向青春,周彼德.快速凝固法制取金属粉末技术的发展状况[J]. 粉末冶金技术, 2000, 18(4):283-286.
XIANG Qing-chun, ZHOU Bi-de. Developments of rapid solidification techniques for metal powder production[J]. Powder Metallurgy Technology, 2000, 18(4):283-286.
- [12] 刘平,黄金亮,顾海澄,等.时效处理对快速凝固Cu-Cr-Zr合金组织和性能的影响[J]. 有色金属, 1999, 51(1):70-73.
LIU Ping, HUANG Jin-liang, GU Hai-cheng, et al. Effects of aging treatment on structures and properties of rapidly solidified Cu-Cr-Zr alloys[J]. Nonferrous Metals, 1999, 51(1):70-73.
- [13] 周志明,王亚平,夏华,等.Cu-Cr合金制备技术的研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(3):44-47.
ZHOU Zhi-ming, WANG Ya-ping, XIA Hua, et al. Research development of manufacture processing of Cu-Cr alloy[J]. Materials Review, 2008, 22(3):44-47.
- [14] MORRIS M A, MORRIS D G. Microstructure and mechanical properties of rapidly solidified Cu-Cr alloys[J]. Acta Metall, 1987, 35(10):2511-2522.
- [15] 刘平,康布熙,曹兴国,等.多级雾化Cu-Cr合金粉末成形后的组织和性能[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(4):677-682.
LIU Ping, KANG Bu-xi, CAO Xing-guo, et al. Microstructure and property of multistage atomized Cu-Cr alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(4):677-682.
- [16] 李晓燕,王顺兴,田保红. Cu-Cr触头材料的制备方法及其进展[J]. 材料研究与应用, 2007, 1(4):265-269.
LI Xiao-yan, WANG Shun-xing, TIAN Bao-hong. Present status and development of Cu-Cr contact materials[J]. Materials Research and Application, 2007, 1(4):265-269.
- [17] HIROSE A, KOBAYASHI K F. Surface alloying of copper with chromium by CO₂ laser[J]. Mater. Sci. Eng. (Material Science and Engineering), 1994(A174):199-209.
- [18] MORRIS D G, MORRIS M A. Rapid solidification and mechanical alloying techniques applied to CuCr alloys[J]. Material Science and Engineering, 1988(A104):201-213.
- [19] SUN Z B, ZHANG C Y, ZHU Y M, et al. Microstructures of melt-spun Cu_{100-x}-Cr_x (x = 3.4~25) ribbons[J]. J Alloys Comp, 2003(361):165-170.
- [20] SUN Z B, WANG Y H, GUO J, et al. Liquid and solid phase separation during melt spinning and annealing in melt-spun Cu-Cr ribbons[J]. Materials Science & Engineering A, 2007, (A452-453):411-416.
- [21] 张瑞丰,沈宁福.快速凝固高强高导铜合金的研究现状及展望[J]. 材料科学与工程, 2000, 18(4):140-144.
ZHANG Rui-feng, SHEN Ning-fu. Review and prospect of researches on rapidly solidified high-strength high-conductivity copper alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2000, 18(4):140-144.
- [22] COOPER K P, AYERS J D, MALZAHNKAMPE J C, et al. Microstructural evolution and thermal stability in rapidly solidified high chromium containing coppers[J]. Materials Science and Engineering A, 1991(142):221-233.
- [23] ZHOU Z M, GAO J R, WANG Y P, et al. Microstructure of rapidly solidified Cu-25wt%Cr alloys[J]. Mater. Sci. Eng. A, 2005(398):318-323.
- [24] 张树格,赖和怡.水雾化金属粉末的形状与粒度间的关系[J]. 粉末冶金技术, 1983(6):1-9.
ZHANG Shu-ge, LAI He-yi. Between the metal powder shape and particle size by water atomizing method[J]. Powder Metallurgy Technology, 1983(6):1-9.
- [25] 田冲,杨林,陈桂云,等.用喷射铸造法制备CuCr25电触头合金[J]. 材料研究学报, 2005, 19(6):639-643.
TIAN Chong, YANG Lin, CHEN Gui-yun, et al. Preparation of CuCr25 alloy by spray casting[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2005, 19(6):639-643.
- [26] LAVERNIA E J, GRANT N J. Spray deposition of metals: a review [J]. Materials Science and Engineering, 1988(98):381-394.
- [27] 王亚平,张丽娜,杨志懋,等.细晶-超细晶CuCr触头材料的研究进展[J]. 高压电器, 1997, 33(2):34-39.
WANG Ya-ping, ZHANG Li-na, YANG Zhi-mao, et al. The development of fine-ultrafine crystal CuCr contact

- materials[J]. High Voltage Apparatus, 1997, 33(2): 34-39.
- [28] MÜLLER R. Arc-melted Cu-Cr alloys as contact materials for vacuum interrupters[J]. Siemens Forsch-U Entwickl. Ber. Bd, 1988(17): 105-111.
- [29] 洗爱平, 朱耀宵. Cu-Cr触头合金制备技术的发展[J]. 金属学报, 2003(39): 225.
XIAN Ai-ping, ZHU Yao-xiao. The development of manufacture processing for Cu-Cr contact alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003(39): 225.
- [30] 夏茅栗, 张济山, 张永安, 等. 大功率真空开关用Cu-Cr触头材料研究现状及进展[J]. 材料导报, 2002, 16(11): 4-7.
XIA Xu-li, ZHANG Ji-shan, ZHANG Yong-an, et al. Present status and development of research on Cu-Cr contact material used in vacuum interrupter[J]. Materials Review, 2002, 16(11): 4-7.
- [31] 张永安, 熊柏青, 刘红伟, 等. CuCr25 触头材料的喷射成形制备及其组织分析[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(5): 1067-1070.
ZHANG Yong-an, XIONG Bai-qing, LIU Hong-wei, et al. Spray forming process and microstructure of CuCr25 contactor material[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(5): 1067-1070.
- [32] WANG X F, ZHAO J Z, HE J. Investigation on the microstructure and mechanical properties of the spray-formed Cu-Cr alloys[J]. Mater. Sci. Eng. A, 2007 (460-461): 69.
- [33] LI Z, SHEN J, CAO F, et al. A high strength and high conductivity copper alloy prepared by spray forming [J]. J Mater. Proc. Techn, 2003(137): 60-66.
- [34] 应小东, 李午申, 冯灵芝. 激光表面改性技术及国内外发展现状[J]. 焊接, 2003(1): 5-8.
YING Xiao-dong, LI Wu-shen, FENG Ling-zhi. Technology of laser surfacing modification and development situation domestically and abroad[J]. Welding & Joining, 2003(1): 5-8.
- [35] GENG H R, LIU Y, CHEN C Z, et al. Laser surface remelting of Cu-Cr-Fe contact material[J]. Mater. Sci. Techn., 2000(16): 564-569.
- [36] GAO J R, WANG Y P, ZHOU Z M, et al. Phase separation in undercooled Cu-Cr melts[J]. Mater. Sci. Eng. A, 2007 (449-451): 654-661.

王玉平(1963—), 男, 正高级工程师, 从事高压电器关键材料的研究。

(上接第 79 页)

- 障的超高频局部放电在线实时监控[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 51-54.
CUI Zai-yu, JIANG Chang-yuan, PIAO Ji-jun, et al. On-Line UHF partial discharge monitoring system for prevention of failures in gas-insulated switchgears[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 51-54.
- [20] 陈志勇. 变压器超声波局部放电测试在电网的应用[J]. 河北电力技术, 2004, 23(3): 6-7.
CHEN Zhi-yong. Supersonic measurement of partial discharge in 1 transformers in power network[J]. Hebei Electric Power Technology, 2004, 3(23): 6-7.
- [21] DL/T 417—2006. 电力设备局部放电现场测量导则[S].
DL/T 417—2006. Guide for partial discharge measuring of power equipment[S].
- 孙利朋(1982—), 男, 工程师, 主要从事高电压与绝缘技术研究。
- 毛柳明(1981—), 男, 工程师, 主要从事高电压与绝缘技术研究。
- 刘兴文(1966—), 男, 高级工程师, 主要从事高电压与绝缘技术研究。
- 卢杰(1979—), 男, 工程师, 主要从事高电压与绝缘技术研究。

简讯

中美将积极推进智能电网标准、电动汽车和充电设备交流与合作

第二十二届中美商贸联委会 2011 年 11 月 21 日在成都举行。国务院副总理王岐山与美国商务部部长布赖森、贸易代表柯克共同主持, 美国农业部部长维尔萨克与会。中美双方就彼此关切的问题进行深入沟通。

当日下午, 中美双方举行了经贸合作文件签字仪式, 双方签署了《中美知识产权合作项目框架协议》、《关于支持中美能源合作项目的谅解备忘录》等 5 项经贸合作文件。美国商务部还向中国贸促会颁发了“商业促进和平奖”。