

## 感应熔炼水冷铜坩埚焊接用铜磷钇料性能优化

张亚荣,徐千琰

(国家国防科技工业局西北核安全中心,陕西 西安 710021)

**摘要:**以铜磷中间合金、铜钇中间合金和铜为原材料,经熔铸制成含钇量不同的铸锭,通过显微组织观察、熔化特性测试、铺展性能测试、拉伸测试、SEM等测试分析方法,研究了不同钇含量对钇料的显微组织、铺展性能及抗拉强度的影响,最终获得适宜焊接感应熔炼水冷铜坩埚的钇料。

**关键词:**铜磷钇料;Y显微组织;水冷铜坩埚

**中图分类号:**TG425

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-7344(2023)12-0196-03

## 0 引言

水冷铜坩埚是真空感应熔炼关键部件之一,为满足工艺需求,坩埚主体由整块锻造无氧铜经线切割仪切割成多瓣后拼接而成,坩埚瓣片内布置有紫铜制冷却水道,结构较为复杂,各管道与底座之间通过焊接方式连接。考虑到水冷铜坩埚要具有易于安装、更换及承压的性能,对水冷铜坩埚的焊接提出了较高的要求,为满足上述要求,优质的钇料及焊接工艺是获得高质量水冷铜坩埚的前提。

铜质件在焊接时主要使用铜磷钇料,Cu-P钇料熔点低、流动性好,具有良好的润湿铺展能力和钇焊性能,已经在冰箱、空调、变压器等行业得到了广泛应用,是国内主要应用的硬钇料<sup>[1-4]</sup>。Cu-P钇料中适量的元素P可以大幅度降低钇料的熔化温度,这使得钇料可以更好地润湿母材。在实际生产中,通常Cu-P钇料中P含量不低于5wt.%;但是由于钇料基体中存在大量的脆性化合物Cu<sub>3</sub>P,从而使其室温塑性显著降低,导致冷加工困难,而且Cu-P钇料不耐硫化物腐蚀,并对黑色金属的润湿性差,这些缺点不同程度限制铜磷钇料的适用范围<sup>[1-3]</sup>。

为解决Cu-P钇料存在的问题,国内外科研工作者主要从成分设计和改进或使用新的加工工艺方面进行了研究。例如,向Cu-P钇料合金中单独或复合添加Si、Zr、Y、B、Ti、RE等元素,来细化组织;复合添加Sn、Ag、I和Sb,可降低Cu-P钇料的熔化温度并降低其脆性;将普通熔炉升级为真空熔炉,采用热挤压、非晶成型及雾化制粉工艺可改善Cu-P钇料的加工性能<sup>[6-8]</sup>。

文献[5]指出Y元素可提高紫铜的洁净度,并且细化晶粒,通过查阅Cu-Y二元相图,发现二者可以形成

低温相;本文希望通过在铜磷钇料中添加钇元素,提高钇料的洁净度,细化钇料组织,提高焊接接头的综合性能,最终获得最佳钇料配方用于焊接水冷铜坩埚。

## 1 实验材料与方法

该试验所用钇料包括铸态钇料和丝状钇料,其化学成分如表1所示。钇料的制备过程为:首先以铜钇中间合金(含Y量10wt.%)、铜磷中间合金(含P量14wt.%)、电解铜(其纯度99.99wt.%)为原材料,通过熔炼的方法分别得到含Y量0,0.05wt.%,0.1wt.%,0.2wt.%和0.5wt.%的铜磷铸态钇料,然后再将部分铸态钇料挤压成 $\phi$ 1.5mm的丝状钇料。

表1 Cu7P-Y钇料的化学成分

编号	Y/(wt.%)	P/(wt.%)	Cu
0	0.00	7	余量
1	0.03	7	余量
2	0.10	7	余量
3	0.20	7	余量
4	0.50	7	余量

从铸锭上同一位置取样,然后制备成金相试样。利用蔡司HAL100型金相显微镜和JEOL的JSM-7500F扫描电镜对钇料的铸态组织进行观察和分析。用德国耐驰STA449F3综合热分析仪测定丝状钇料的熔化特性,升温速度为10℃/min。

选用规格为40mm×40mm×2mm紫铜板做为基材,并在试验前进行表面清理,使用丝状钇料,依据标准《钇料润湿性试验方法》(GB/T 11364—2008)进行铺展性试验。参照《金属材料 布氏硬度试验 第1部分:试验方法》(GB/T 231.1—2009),用HB-3000B型布氏硬度计上测定丝状钇料的布氏硬度值。参照国家标准《金属材料 拉伸试验 第一部分:室温试验方法》

(GB/T 228.1—2010), 在立式电子万能试验机(MTSCMT4104)上对丝状钎料的抗拉强度进行测定, 加载速率为 1mm/min。每种钎料的铺展性、硬度和抗拉强度测定试验各做 5 次, 结果取其平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Y 元素对 Cu-7P-xY 钎料的显微组织的影响

不同 Y 含量的 Cu-7P 钎料光学金相图片如图 1 所示, 由图 1 可知不添加 Y 的 Cu-7P 钎料由粗大的  $\alpha$ -Cu 树枝晶和 ( $\alpha$ -Cu+Cu<sub>3</sub>P) 共晶组织组成; 添加 0.03wt.%~0.2wt.% 的 Y 后  $\alpha$ -Cu 树枝晶得到明显细化, 树枝晶数量增加, 其中一次轴缩短异常显著二次轴数量减少, 当钎含量为 0.5wt.% 时, 一次轴有所长大, 树枝晶数量下降。

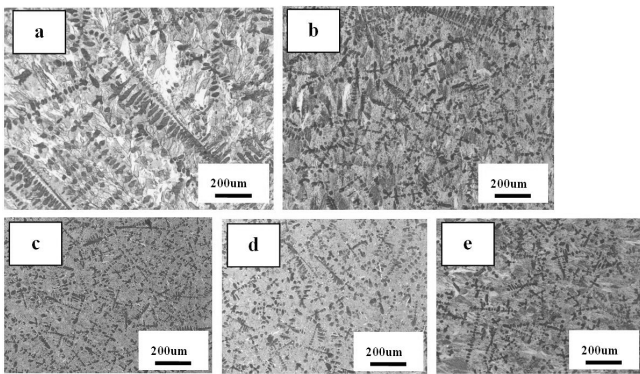


图 1 不同 Y 含量的 Cu-7P-xY 的光学显微图片

### 2.2 Y 元素对 Cu-7P-xY 钎料熔化特性的影响

图 2 为不同 Y 含量 Cu-P 钎料的固相线温度  $T_S$ , 液相线温度  $T_L$  和熔程  $\Delta T$  (即  $T_S - T_L$  的差值) 的变化趋势。由图 2 可以看出, 随着 Cu-P 钎料中 Y 含量增加, 钎料的  $T_L$  和  $T_S$  逐渐升高, 熔程  $\Delta T$  逐渐降低。但是与 Cu-7P 钎料相比, 添加钎 Y 后的钎料的  $T_L$  和  $T_S$  增加不多, 熔程  $\Delta T$  降低了 12℃。

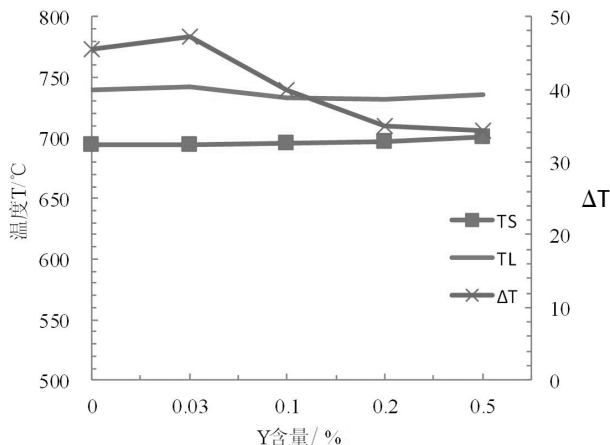


图 2 不同 Y 含量的 Cu-7P-xY 的熔化特性

由 Y 对钎料的组织影响规律可知, 随着 Y 含量的增加, 组织中先出现了 YP 相, 接着伴随着 YP 相减少出现了  $YCu_2$  相, 虽然两种相热力学性质有差异, 但是由于 Y 元素的添加量不多, 所以对其液相线、固相线及熔程影响不大。

### 2.3 Y 元素对 Cu-7P-xY 钎料润湿性能的影响

图 3 为不同钎含量的 Cu-P 钎料在紫铜板上的铺展面积分析结果。由图 3 可知, Y 含量在 0~0.2wt.% 时, 钎料铺展面积随 Y 含量增加明显增加; 当 Y 含量在为 0.2wt.% 时, 3 号 Cu-P 钎料比 0 号铺展面积 (154.03mm<sup>2</sup>) 增加约 15.7wt.%; 当 Y 含量在超过 0.2wt.% 时, 钎料铺展面积开始下降, 当 Y 含量为 0.5wt.% 时, 4 号 Cu-P 钎料对紫铜板润湿面积降低到最小值 (133.61mm<sup>2</sup>)。

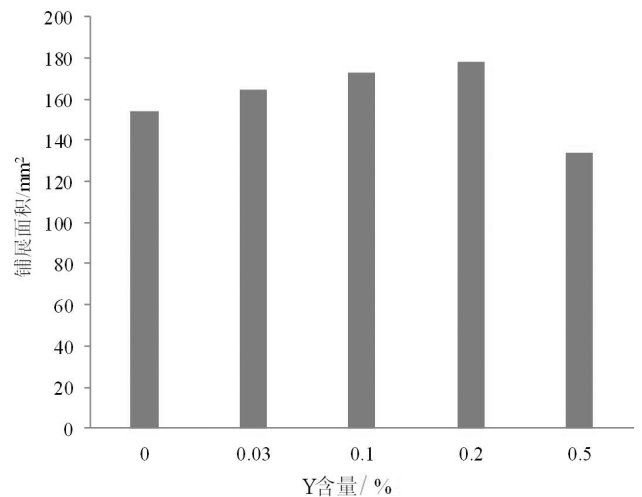


图 3 不同 Y 含量的 Cu-7P-xY 的铺展面积变化趋势

从图 3 可知, 在钎含量在 0~0.2wt.% 之间时, 稀土钎减小钎料与紫铜板之间的界面张力的作用强于其被氧化降低润湿作用的程度, 固钎料润湿面积随着 Y 含量的增加而增大; 钎含量超过 0.2wt.%, 润湿面积降低。

### 2.4 Y 元素对 Cu-7P-xY 钎料力学性能的影响

图 4 为不同的 Y 含量 Cu-7P 钎料布氏硬度变化趋势。由图 4 可看出, 与 Cu-7P 钎料相比, 添加 0.2wt.% Y 时, 钎料的布氏硬度平均值增大到 HB122。随着 Y 含量的增加, 钎料的布氏硬度平均值先增大后降低, 但整体变化范围不大。

图 5 为不同 Y 含量 Cu-7P 钎料抗拉强度变化趋势。由图 5 可看出, 和不添加 Y 的钎料相比, 随着 Y 含量的增加, 钎料抗拉强度先升高, 继续增加 Y 含量至 0.5wt.%, 其抗拉强度下降。但整体变化幅度不大, 这主要与钎元素细化晶粒及提高钎料洁净度有关。

综上所述, 向 Cu-7P 钎料中添加 0.1~0.2wt.% 的 Y

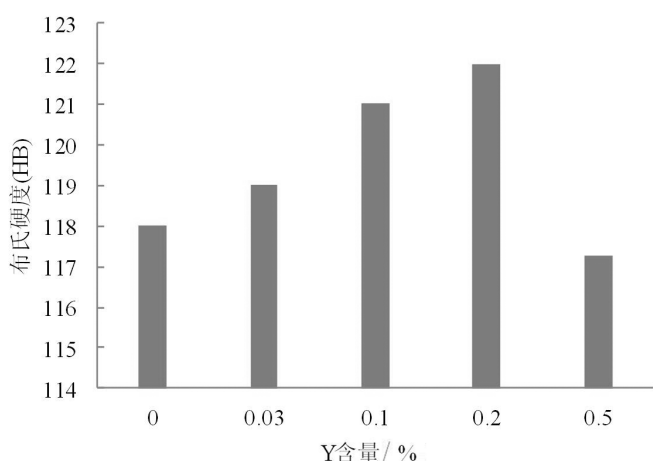


图4 不同Y含量的Cu-7P-xY的布氏硬度变化趋势

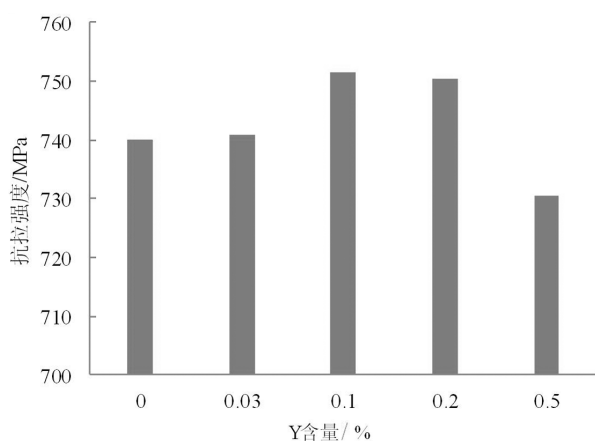


图5 不同Y含量的Cu-7P-xY的抗拉强度变化趋势

元素,可提高钎料洁净度,细化钎料显微组织,进而提高钎料的力学性能,并且提高钎料焊接性能。

在焊接水冷铜坩埚时采用含0.1~0.2wt.%Y元素的铜磷钎料,所得焊缝外表美观、质量达标,最终获得满足技术指标的感应熔炼用水冷铜坩埚,实物如图6所示。

### 3 结语

(1)未添加Y的Cu-7P钎料铸态组织主要由粗大树枝状 $\alpha$ -Cu和层片状( $\alpha$ -Cu+Cu<sub>3</sub>P)共晶相组成;加入0.1~0.2wt.%Y可以明显细化 $\alpha$ -Cu树枝晶。

(2)在该试验条件下,提高Y含量对钎料的固液相线温度影响不大,但可降低熔程 $\Delta T$ 。Y含量为0.1wt.%和0.2wt.%的钎料铺展面积和断后伸长率达到最大值。

(3)用含0.1~0.2wt.%Y元素的铜磷钎料可焊接出满足要求的水冷铜坩埚。

通过本试验研究初步探索了向铜磷钎料中添加Y的最佳范围,优化了钎料的性能,后续可通过向含有其他合金元素的铜磷钎料中添加Y,探索Y对铜基、铜磷



图6 感应熔炼用水冷铜坩埚实物局部钎料的优化作用。

### 参考文献

- [1] 黄杰,薛松柏,王博.合金元素对Cu-P系钎料性能影响的研究现状[J].焊接,2014(11):14-19.
- [2] 张启运,庄鸿寿.钎焊手册[M].2版.北京:机械工业出版社,2008:10-13.
- [3] 李宏磊,娄花芬,马可定.铜加工生产技术问答[M].北京:冶金工业出版社,2008:20-25.
- [4] 刘国明,张萌,付绍云.微量稀土La和Y在铜中的分布及对导电性的影响[J].南昌大学学报(理科版),2005,29(1):50-53,58.
- [5] 孟祥锋.稀土元素对纯铜显微组织和导电性的影响[D].阜新:辽宁工程技术大学,2008.
- [6] 黄俊兰,龙伟民,张冠星.Sn元素对铜磷钎料性能和组织的影响[J].焊接,2012(3):57-60.
- [7] 姜锋,刘辉,文康,等.复合添加La,Ce和Si对铜磷钎料润湿性和焊缝微观组织的影响[J].热加工工艺,2013,42(11):202-205.
- [8] 邹家生,许祥平,王磊.微量B元素对Cu-P基急冷钎料润湿性的影响[J].焊接学报,2011,32(9):69-72.

作者简介:张亚荣(1991—),男,汉族,甘肃白银人,硕士研究生,工程师,主要从事材料研发及安全相关工作。