DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.11.018

CuCrZr 基复合材料制备及性能研究进展

王彬宇[1,2],范新会[1,2],李　炳[1],王　鑫[1],杨　珂[1],刘　杰[1,2],谭本立[1,2]
(1. 西安工业大学 材料与化工学院,陕西 西安 710021;2. 商洛学院,陕西 商洛 726000)

摘　要:分析了高强度高导性 CuCrZr 基复合材料的应用及研究现状。综述了在不同工艺条件下制备的 CuCrZr 基最优铸态复合材料,分析了添加不同元素、含量、热处理工艺和不同形变强化对 CuCrZr 基复合材料性能的影响,并总结了 CuCrZr 基复合材料性能的测试方法和条件。

关键词:CuCrZr 基复合材料;制备方法;添加元素;强化机制;测试条件

中图分类号:TG136　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)11-1003-05

Research Progress on Preparation and Properties of CuCrZr Matrix Composites

WANG Binyu[1,2], FAN Xinhui[1,2], LI Bing[1], WANG Xin[1], YANG Ke[1], LIU Jie[1,2], TAN Benli[1,2]
(1. School of Materials and Chemical Engineering, Xi 'an Polytechnic University, Xi 'an 710021, China; 2. Shangluo University, Shangluo 726000, China)

Abstract: The application and research status of CuCrZr matrix composites with high strength and high conductivity were analyzed. The optimum CuCrZr matrix as-cast composites prepared under different technological conditions were reviewed. The effects of different elements, content, heat treatment process and different deformation strengthening on the properties of CuCrZr matrix composites were analyzed. The testing methods and conditions of CuCrZr matrix composites were summarized.

Key words: CuCrZr matrix composites; preparation method; element addition; strengthening mechanism; test conditions

CuCrZr 系合金材料凭借着其鲜明的性能优势,是现今世界上研制出的唯一能够满足超大规模集成电路性能要求的高强高导引线框架材料,已受到全球范围内众多研究学者的关注,一些工业发达国家在电力发展方面将其纳为重点开发项目。成分方面:以铜为基体金属,其中 Cr 含量一般为 0.15%~0.35%,Zr 含量为 0.08%~0.25%,其他的微量元素包括 Mg、Ni、Si、Ag、Zn、Ce、La、Y 等[1-2]。性能方面:硬度(HRB)为 78~83,耐高温和耐氧化性好(软化温度≥400 ℃,焊接时不易被氧化),高强度 σ_b≥600 MPa,高导电性(导电率≥80% IACS),稳定的导热性(20 ℃) W/m·K,700 ℃以下波动较小),耐腐蚀性好(一般潮湿空气中不易被腐蚀),良好的焊接性(易于镀锡、金、银),良好的刻蚀性能(易冲裁加工,且不起毛刺),特别是 CuCrZr 合金具有很好的铸造性能和机械加工性能[3-6]。

收稿日期:2021-04-03

作者简介:王彬宇(1995—),陕西西安人,硕士,研究方向:铜合金工艺. 电话:19991802720,
Email:11196685994@qq.com

1　高性能 CuCrZr 基复合材料

1.1　制备工艺

1.1.1　粉末冶金法

将一定粒度的 Cr 粉、Zr 粉、Cu 粉按照一定比例在惰性气体保护下,机械混合均匀压制成型,将成型品在保护气体作用下热压烧结成形,制备出 CuCrZr 合金材料。该方法的优点可以实现工艺操作简单,成分任意混合,但是缺点也很明显,像如两种材料界面之间难以致密,容易产生空洞缺陷等一系列问题。

韩芳[7]采用粉末冶金热压烧结法制备的 Cu-15Ni-8Sn 材料经热压烧结后获得组织均匀致密的合金,其最佳烧结工艺参数为 850 ℃×150 s,在经过 40%冷压变形和 400 ℃×4 h 时效处理后,材料硬度达到 37.6 HRC,剪切强度达到 570.76 MPa,且拥有了良好的耐磨性。雷若姗[8]利用机械合金化+真空热压烧结工艺制得的 Cu-Nb 纳米弥散铜合金具有高强度、高导电和耐高温的综合性能,并得出了最佳热压工艺为:热压压力 30 MPa,烧结温度 850 ℃,保温时间 2 h。该合金粉末颗粒间的界面已难以分辨,成分分布均匀,相对密度大于 98%,经冷轧变形和

900 ℃退火后其硬度可达 89 kgf/mm^2，电导率可达 97% IACS。

1.1.2 熔渗法

将一定量的铜粉与铬粉按一定比例混合均匀进行压坯，在氩氩气氛或真空的条件下，烧结成为孔状的 Cu-Cr 骨架，控制烧结温度在 800 ℃左右，然后在真空条件下浸入熔融的 Zr 中，由于存在力的作用，Zr 液将充分渗入预先烧结的铜骨架中制成 CuCrZr 合金材料。熔渗法制备合金的主要优势在于工艺设计简单、所制备合金的成分均匀、耐压强度和抗烧蚀能力要比传统粉末烧结法制备的铜基材料好、由于整个烧结和熔渗过程一次性完成，所以工艺周期短，使得氧含量较低，材料致密度在 98% 以上[9]。

Wang[10]等人通过熔渗法制备出了钨铜复合材料。其特点在于所用的钨骨架中掺入了一定量的氧化钨，在熔渗的过程中骨架处于氢气气氛中，氧化钨被还原为单质钨从而增加了骨架中的孔隙率，提高了熔渗法制备钨铜合金中铜含量的上限值，所制备的样品氧含量低，致密度达到 99%，热导率达到 230 W/m·K。

1.1.3 电弧熔炼法

分为真空非自耗电极熔炼和真空自耗电极熔炼这两大类，两者的原理都是在保护气体下，用电弧所产生的高温熔炼 CuCrZr 复合材料。前者和后者区别是后者将所需比例的 Cu 粉、Cr 粉、Zr 粉充分均匀混合后，在一定压力下等静压压制成坯棒，并在真空下进行预先的简单烧结，制成自耗电极在保护气体或真空环境下，使用高温直流电弧迅速熔化耗电极，并在水冷铜模中快速凝固成铸锭。西安思瑞公司[11]制备高强度、高导电率的 CuCrZr 基复合材料采用 900 MPa，利用等静压加真空热熔炼方式制备出成分均匀 CuCrZr 基复合材料。

1.1.4 快速凝固法

根据工艺条件的不同分为雾化技术、深过冷技术、衬底急冷技术以及表面熔凝技术 4 大类[12]。快速凝固后进行时效处理产生大量细小、弥散的析出相弥散强化材料力学性能，其中晶粒组织细化、固溶区域扩大；组织偏析减少、形成亚稳相以及晶体缺陷增加等，所以快速凝固法为开发高性能的 CuCrZr 复合材料开辟了新途径，从导电率而言，由于固溶态的铬原子对铜合金的电阻率有较大影响，使得快速凝固的 CuCrZr 复合材料因固溶度增大而导电率降低，但是在时效过程中，随着 Cr_3Cu 析出导电率有所上升。快速凝固法的缺点是制备的产品有规格上的局限性应用范围较窄，无法生产异型截面、大断面产品[9]。Tenwick 和 Davies[13]研究了快速凝固 CuCr 合金，熔体旋淬法获得的 20 m 厚的薄带中，Cr 的固溶度提高到 3.3%，时效后其硬度峰值达到 400 HV，硬度值为常规合金的 3 倍，电导率为 50% IACS。

1.1.5 机械合金化法

将一定比例的 Cu 粉、Cr 粉、Zr 粉在高能球磨机中进行长时间的研磨，直到达到使合金达到原子级水平的结合状态，然后压紧、成型、挤压、烧结成型[14]。机械合金化法优点：可将熔点相差较大的两种材料复合化，也可将金属间化合物复合化；缺点：生产大量零件控制比较困难，工艺相对铸造法复杂，如有时需球磨几百小时不等。

Morris DG 等[15]对 CuCrZr 合金高能球磨 20 h，球磨后粉末在 300 MPa 下冷压成形，在 500 kN 下热挤压，收缩比为 10:1，断裂强度达 820 MPa。Svar alakshmi [16]首次利用机械合金化方法制备了 AlFeTiCrZnCu 高熵合金，这种合金具有体心结构，用机械合金化法制备的高熵合金成分均匀性好，晶粒尺寸小于 10 nm，在 800 ℃退火 1 h 后，合金中的固溶体仍保持稳定，烧结态 AlFeTiCrZnCu 固溶体的硬度为 2 GPa，密度为 99%。在 CuNiCoZnAlTi 和 NiFeCrCoMnW 合金中也发现了类似的纳米结构固溶体。

1.1.6 自蔓延熔铸法

将一定比例的 KCl 和 Al 粉与干燥的 CuO、Cr_2O_3 混合均匀，然后放入石墨反应器中，点火进行自蔓延反应生成陶瓷属或金属间化合物的方法。杨欢、张廷安[17]等通过获得互溶的高温熔体，通过凝固过程得到致密度较好的铸态合金，通过比较所用石墨模更适合 CuCrZr 合金的制备。

1.1.7 真空感应熔炼法

真空感应熔炼法主要应用感应电磁搅拌作用防止 Cr、Zr、Cu 的分离使得组织均匀及晶粒细化。其熔炼工艺流程如下以无氧化铜、纯铬和纯锆原料，放入石英坩锅或者石墨坩埚中抽高真空（1×10^{-2}~3×10^{-2}）进行熔炼，充入氩气等保护气体，利用铜液加热其他元素熔化，利用机械搅拌和电磁搅拌使成分均匀，快速浇入模具，待铸锭冷却后打开真空炉取出铸锭[18]。由于真空感应炉主要应用感应电磁搅拌（感应线圈产生涡流），这样可以使得 Cr、Zr、Ag 等元素组织分布的更加均匀并且可以使得晶粒得到了细化。因为是在真空或惰性气体环境下制备的 CuCrZr 复合材料，所以此材料的含气量较低，纯度高，并且工艺方法简单，成本不高，产量也可观。目前很多 Cr 含

量低于35%的CuCrZr复合材料都是使用此方法制备，结合后续的机加工等方法可以得到高性能的材料，使得机械性能好，致密度高。

1.2 添加不同元素对铸态 CuCrZr 基复合材料性能的影响

1.2.1 添加 Ni

随着镍含量的增加，CuCrZr 的硬度随之增加，屈服强度先升高后降低；其导电性能随着镍含量的增加而逐渐降低。当镍含量 1.0%时，CuCrZr 的力学和电学性能达到较好的配合：CuCrZr 的屈服强度为 320.3 MPa（相对于未添加镍的 CuCrZr 材料而言提高了 31.08%），电导率为 45.72 M S·m^{-1}，其电导率百分值(IACS)高达 80.21%。

1.2.2 添加 W

W 作为耐烧蚀相颗粒具有较高的熔点，较低的蒸气压，良好的耐磨性以及硬度广泛应用于硬质合金、矿山切削刀具中，同时也可用于抗烧蚀 CuCrZr 基复合材料的制备。

1.2.3 添加 SiC

SiC 作为典型的减摩耐磨颗粒，拥有较高的化学稳定性、较高的高温强度及低的热膨胀系数，可用于制作高温耐磨材料，作为复合材料的增强颗粒添加相。

SiC 是典型的过度型金属碳化物，其本身具有极高的硬度、熔点、耐磨性能，SiC 属于硬质相。在 CuCrZr 加入 SiC 颗粒相，在材料表面发生摩擦时，大量的 SiC 颗粒相由于其本身具有较高的硬度，会使在材料表面发生摩擦时，大量的 SiC 颗粒相由于其本身具有较高的硬度，会使得材料在表面发生摩擦时的摩擦大大降低，而且因为 SiC 本身的熔点较高，在材料表面发生电弧烧蚀时，也会大大降低材料的烧蚀破坏效果。且 SiC 化学性稳定，具有较高的高温强度和膨胀系数，是如果加入的太多会增加材料的脆性，所以加入 SiC 不易过多在 1%~10%之间。

1.2.4 添加 Ag

Ag 在常温时几乎不溶于铜基体，在共晶温度 780 ℃时，因银在铜中的溶解度为 7.9%，在铜基体中加入银可以提升材料的热稳定性，显著提高铜的再结晶温度与蠕变强度。

1.2.5 添加 Be

Be 是铜的有效脱氧剂之一，但是铍的价格比较昂贵，所以不用做脱氧剂，常用于制备铍青铜。Be 元素作为杂质固溶在铜基复合材料中时，对材料的力学性能影响较大，对材料的导电性会有一定的影响，但是能够大幅度的提高材料的抗高温氧化能力。

1.2.6 添加石墨

石墨、SiC 的熔点高达 3 500 ℃，具有良好的导电性和自润滑性，且在高温环境下具有很好的稳定性，不与金属基体发生化学反应。石墨作为颗粒增强相存在，在材料表面发生摩擦磨损时，大量的石墨颗粒其本身的润滑性能会使得材料整体具有一定的自润滑性，能够极大降低材料的摩擦损耗。而在石墨颗粒上镀镍后能够明显降低石墨对材料的导电性的影响并且能够提高材料的强度、硬度、润滑性等物理性能。但因为石墨对 CuCrZr 合金有缩减效果，所以控制其含量在 10%以下。

1.2.7 添加 Mo

Mo 元素几乎不固溶于铜，Cu 合金中加入 Mo 元素会起到一定的细化晶粒的作用，并且提高合金的在晶温度，能够提高材料的材料的热稳定性。Mo 的熔点高达 2 617 ℃，在材料表面发生电弧烧蚀时，能够明显地降低烧蚀破坏的效果。

1.3 热处理工艺对铸态 CuCrZr 基复合材料性能的影响

CuCrZr 基复合材料的热处理工艺主要固溶强化和时效强化。固溶处理或淬火是指将温度保持在高温单相区，在加速分子运动的同时给予一定的时间保证，使第二相充分溶解到固溶体中，接着快速冷却，使过剩的原子保留在基体中，这样第二相得不到充分析出，从而得到过饱和固溶体的热处理工艺。CuCrZr 在固溶强化后往往进行时效处理，在时效处理时有弥散的第二相析出钉扎位错，使铜合金的强度增加。由于时效析出的第二相对电子的散射作用相对于固溶原子对电子的散射作用要小得多，所以，时效处理在提高合金强度的同时也提高了合金的导电率。

杨冉、文久巴[19]等研究了热处理对 Cu-6.9Ni-2.97Al-0.99Fe-1.06Mn 合金的组织和耐蚀性的影响进行了研究。该研究固溶处理的温度为 950 ℃保温 2 h 后水淬，时效处理为 550 ℃条件下分别保温 1、6 和 24 h 后空冷。研究表明，随着时效时间的延长，合金的腐蚀速率也逐渐升高，在时效后保温 6 h，合金的耐腐蚀性能优异且优于熔铸态的耐蚀性。贾磊，王晓，杨飞[20]等人对高导电率的 Cu-Ni-Si 合金进行了研究，该实验主要是采用了正交试验研究了热处理工艺对材料综合性能的影响，实验的变量主要为时效温度、固溶温度以及所需的时间。研究表明，对于电导率，各种因素影响的顺序为：时效温度>时效时间>固溶温度>固溶时间；对于硬度指数，时效温度>固溶温度>固溶时间>时效时间。另外，对于这种材

料，在 950 ℃、2 h 固溶，然后在 550 ℃、8 h 时效，材料的整体性能达到最佳。

1.4 形变强化工艺对铸态 CuCrZr 基复合材料性能的影响

对 CuCrZr 复合材料进行形变分为两种：一种热形变，另一种冷形变。热形变就是在形变前进行加热一定温度，减少 CuCrZr 复合材料内应力，达到材料所需性能和大小，主要方式有热挤压、热锻等；冷形变将 CuCrZr 复合材料直接形变强化，主要方式有自由锻、旋锻、挤压、拉拔等，其作用一方面防止氧化，另一方面再次提高 CuCrZr 的材料强度。这两种方式影响因素包含变形程度、变形速度、变形温度。

Zhang X P[21]等人分别在 350 ℃及 450 ℃条件下，对 CuCrZr 复合材料进行了热挤压变形。结果表明，在两种挤压温度条件下，CuCrZr 合金的力学性能都得到了大幅度地提高，但是在 450 ℃条件下，合金挤压变形过程中发生了动态再结晶，其挤压态晶粒尺寸更加细小，可达到 70~80 μm，其室温力学性能也更高。陈一胜[22]对 Cu-0.15Cr-0.35Zr 合金进行了不同挤压比的挤压变形实验。其结果表明：合金在相同挤压速率、相同温度的条件下，挤压比的增大会提高合金的抗拉强度。

2 CuCrZr 基复合材料测试方法

2.1 导电性能测试

目前国内对 CuCrZr 复合材料的导电性测试方法测定较少，主要以涡流为主，测试采用四点法。其四点为在样品表面等距离取四点进行测量，取样品四点的电阻率，求取平均值。影响 CuCrZr 基复合材料导电率主要原因为：CuCrZr 基复合材料由于添加不同种类元素，在不同位置测量的导电率可能相差较大。

对 Cu 基复合材料导电率计算国际上通常采用退火铜标准采用密度为 8.89 g/cm^3、长度为 1 m、质量为 1 g、电阻为 0.153 28 Ω 的退火铜线作为基准。在 20 ℃温度下，上述退火铜钱的电阻率 0.017 241 Ω·mm^2/m(μΩ·m)确定为 100% IACS，其他材料的导电率按公式(1)计算：

$$C=\frac{0.017\,241}{\rho}\times 100 \tag{1}$$

式中，C 为国际退火铜标准导电率，% IACS；ρ 为试样的电阻率，Ω·m。

2.2 金相制备及分析

对于 CuCrZr 基复合材料金相制备分为机械抛光和电化学抛光，机械抛光以不同粗糙度砂纸，进行粗抛和精抛，粗抛以 150 目砂纸为起，每换一张砂纸试样旋转 90°，观察划痕是否是一个方向，将试样放在强光下观察，可以看出在砂纸上磨擦产生粗划痕，则必须在相同型号砂纸旋转 90°进行磨，CuCrZr 复合材料试样必须达到在光照下，肉眼观察划痕均匀且照射下有蓝光投入眼中，在金相镜 50 倍观察细微划痕，则可以高倍 3 000 砂纸在用抛光剂抛光，再次进行水精抛。

电化学抛光，首先正在砂纸磨到 2 000 目，在金相显微镜下观察，划痕为一个方向无粗大深划痕，然后进行化学电解抛光，电解化学剂的选择可根据腐蚀剂种类进行选，一般以 HCl 或者 HNO_3 为主，抛光时当表面产生黑色物质，则电解抛光结束，在用水进行精抛，不用腐蚀直接金相显微镜观察。

对于溶于基体的相分析主要采用二元相图，参照二元相图特殊点和线(比如固溶点、共晶线、化合物等)来分析组织的组成；对于不溶于基体的相，看材料目数即材料颗粒大小，在金相显微镜下大致分析出这种元素分布，比如不溶于 CuCrZr 基复合材料的 Mo，则以添加颗粒原貌分布在基体上。

2.3 电弧烧蚀性能测试

目前对电弧烧蚀主要分为 3 种，第 1 种带有氩气保护氩弧焊机烧蚀，第 2 种电焊烧蚀，样品裸露在空气中加大氧化程度，第 3 种离子电弧打出电离子进行烧蚀。电弧烧蚀属于一种物理化学腐蚀，物理电弧刨削，化学高温氧化。针对对不同测试条件，选择不同烧蚀种类。

2.4 摩擦性能测试

摩擦测试测量方式基本有 2 种，一种是对磨材料对材料进行摩擦，另一种是材料对对磨材料相对摩擦，两种产生的摩擦结果(磨损率即材料前后质量变化除以摩擦体积和摩擦系数)可能相差很大。

对于对磨材料的载物重量不同，产生摩擦系数在 CuCrZr 基复合材料中会有一定变化，目前在对磨材料(GCr15 钢)、摩擦 300 r/min、摩擦半径 6 mm、载物重量 20 N 以下，随着载物重量增加，CuCrZr 基复合材料摩擦系数是升高的。磨痕对于 CuCrZr 基复合材料客观上反应着添加润滑相和硬质相作用，一般以石墨作为润滑相、SiC 作为硬质相。目前在高温摩擦中，在 CuCrZr 基复合材料添加润滑相和硬质相可能存在相互转化，主要是因为存在高温氧化物，产生高温氧化一部分留在基体上起到润滑作用，一部分相溅射在磨痕周围。

2.5 硬度及抗拉强度性能测试

CuCrZr 基复合材料硬度测试采用布氏硬度和显微硬度，测试条件采用载荷为 250 kgf，压头直径 5 mm，保压时间 25 s，测试 3 次取平均值得到测试结果；对于组织硬度测试采用显微硬度，载荷为 25 gf，压头直径 3.5 mm，保压时间 20 s，测试 3 次取平均值得到测试结果。对于 CuCrZr 基复合材料的抗拉强度测试采用 GB/T228-2002 国标进行试样加工，拉伸速率 3 mm/min，计算 CuCrZr 基复合材料的断后收缩率、断后伸长率、抗拉强度。

3 结论

(1)CuCrZr 基复合材料主要以感应熔炼、熔渗法、自蔓延熔铸法、电弧熔炼法、机械合金化法制备为主。

(2)说明了添加不同种类元素对 CuCrZr 基复合材料性能影响。

(3)介绍了热处理工艺、形变强化工艺在 CuCrZr 复合材料的应用。

(4)总结出 CuCrZr 复合材料测试方法及测试存在的问题。

参考文献：

[1] 于朝清. 引线框架用高强高导铜合金材料 [J]. 电工材料, 2005 (2):33-37.

[2] 胡号旗，许赪，丽景，等. 高强高导铜铬锆合金的最新研究进展 [J]. 材料导报，2018, 32(3):453-460.

[3] 刘平. 高性能铜合金的热处理及其加工技术 [J]. 金属热处理, 2005, 30:1-7.

[4] Grylls R, Tuck CDS. Identification of or-thorhombic phase in &high-strength cupronickel [J]. Scipta Materialia, 2006, 34(1): 26.

[5] 傅声华. 引线框架用 Cu-Cr-Zr-Mg 合金的加工工艺与性能研究 [D]. 江西：江西理工大学, 2009.

[6] IAO YQ, LU P. Study on the properties of nonvacuum melting Cu-Cr Zr alloy [J]. China Foundry, 2010(10): 1020.

[7] KAPPOOR K, LAHIR D, BATRA LS, et al. X-ray diffraction line profile analysis for defect study in Cu-1%Cr-0.1%Zr alloys[J]. Materials Characterization, 2005, 54: 131-140.

[8] BATAWI E, MORRIS DG, MORRIS MA. Effect of small alloying additions on behaviour of rapidly solidified Cu-Cr alloys [J]. Materials Science and Technology, 2005, 6(9): 892.

[9] ZHOU J, ZHU D, TANG L, et al. Microstructure and properties of powder metallurgy Cu-1%Cr-0.65%Zr alloy prepared by hot pressing [J]. Vacuum, 2016, 131: 156.

[10] 慕思国. 高强高导 Ci-Cr-Ti 系合金制备新工艺及理论研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.

[11] SZABLEWSKI J, HAIMANN R. Influence of thermo-mechanical treatment on electrical properties of a Cu-Cr alloy [J]. Materials Science and Technology, 2006, 1(12): 1053-1057.

[12] 郁瑞平. 高性能 Cu-Cr-Zr-Ag 合金组织性能研究[D]. 北京：北京有色金属研究院, 2013.

[13] 张毅，许倩倩. 稀土 Ce 对 Cu-Cr-Zr 合金高温变形行为的影响 [J]. 材料热处理学报，2014, 35(8):1-6.

[14] 刘勇，刘平，董企铭，等. Cu-Cr-Zr-Ce-Y 合金时效析出特性和受电磨损行为研究[J]. 材料热处理学报, 2005, 26(5):92-96.

[15] FUXIANG H, JUSHENG M, HONGLONG N, et al. Analysis of phases in a Cu-Cr-Zr alloy [J]. Scripta Materialia, 2003, 48(1): 97-102.

[16] ZHANG Y, VOVLINSKY AA, TRAN HT, et al. Aging behavior and precipitates analysis of the Cu-Cr-Zr-Ce alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2016, 650: 248.

[17] 王艳蕊，刘平，刘勇，等. 微量稀土钇对 Cu-Cr-Zr 合金时效性能的影响[J]. 有色冶金:冶炼部分, 2006(1): 46-49.

[18] 秦永强. 高强度高导电铜铬锆合金的设计、制备及性能研究[D]. 合肥：合肥工业大学, 2013.

[19] 李继林. Cu-Cr-Zr 系合金成分和加工工艺对组织及性能的影响 [D]. 济南：山东大学, 2014.

[20] 李华清. Cu-Cr-Zr-Mg 合金真空熔铸工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2006: 26(7):397-399.

[21] ZHANG XP, YANG B, LI MM, et al. Anti-burning loss of Cu-Cr-Zr alloys melted undermon-vacuum conditions [J]. Nonferrous Metals Science & Engineering, 2015(3): 36.

[22] 陈一胜，魏梅红，目丰. 高性能 Cu-Cr-Zr 合金的熔炼[J]. 铸造, 2003, 56(6):648-650.

技术资料邮购

《铸造实用生产技术集锦》

《铸造实用生产技术集锦》本书由李德臣教授级高工编著。共七章：1 重大铸件生产技术；2 耐热耐磨产品生产技术；3 耐蚀耐磨产品生产技术；4 耐磨产品生产技术；5 铸造工艺设计；6 铸造用辅助产品生产技术；7 铸造与哲学。特快专递邮购价：97元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-88491681