热处理和变形对 Cu-0.8Cr-0.15Zr 合金性能的影响

姜 全[1] 孟东东[2] 顾洪斌[2] 韩 乐[3] 张立元[3] 王福兴[1]
(1.烟台鲁宝有色合金有限公司；2.中国科学院力学研究所；3.中国科学院等离子体物理研究所)

摘 要 研究了 3 种处理工艺对 Cu-0.8Cr-0.15Zr 合金性能的影响。结果发现，3 种工艺中，经热变形＋固溶＋时效＋冷变形加工处理后合金的室温性能最佳，其抗拉强度为 515 MPa，屈服强度为 507 MPa，伸长率为 15%、电导率为 47.096 MS/m，屈强比为 0.920～0.984。3 种工艺下合金的软化温度为 620～640 ℃，且伸长率在 200～400 ℃温度范围内最低。

关键词 热处理；软化温度；屈强比；伸长率
中图分类号 TG146.2；TG156 **文献标志码** A
DOI：10.15980/j.tzzz.2022.06.019
开放科学(资源服务)标识码(OSID)：

Effects of Heat Treatment and Deformation on Properties of Cu-Cr-Zr Alloy

Jiang Quan[1], Meng Dongdong[2], Gu Hongbin[2], Han Le[3], Zhang Liyuan[3], Wang Fuxing[1]
(1.Yantai Lubao Nonferrous Alloy Co., Ltd.; 2.Institute of Mechanic, Chinese Academy of Sciences; 3.Institute of Pasma Physics Chinese Academy of Sciences)

Abstract: The influence of different heat treatment processes on the mechanical properties of Cu-Cr-Zr alloy was investigated. The results indicate that alloy after hot forging-solution-aging-cold working process exhibit the satisfied performance, where the tensile strength, yield strength, elongation, electrical conductivity and yield ratio are 515 MPa, 507 MPa, 15%, 47.096 MS/m and 0.920～0.984, respectively. The softening temperature is 620～640 ℃ under different heat treatment processes, and the lowest elongation is achieved at 200～400 ℃.

Key Words: Heat Treatment, Soften Temperature, Yield Ratio, Elongation

Cu-Cr-Zr 系合金是典型的具有时效析出特性的强化型高强高导铜合金，具有良好的导电、导热性，较高的强度及耐热性，已被广泛应用于火箭发动机、集成线路框架、高铁、超临界大型涡轮发电机。国际热核实验堆(ITER)、高超音速高焓风洞、全超导托卡马克核聚变装置(EAST)等高端重大装备中，受到广泛关注。普遍认为 Cu-Cr-Zr 系合金具有较理想的性能指标，抗拉强度≥600 MPa，电导率≥46.40 MS/m，抗软化温度≥500 ℃[1,2]。目前，有关 Cu-Cr-Zr 系合金的研究较多，主要集中于室温性能，关于高温下合金性能的研究报道较少。高强高导铜合金导电、导热性与强度存在此消彼长关系，本课题对 3 种处理工艺的 Cu-0.8Cr-0.15Zr合金的强化机理进行了研究，分析其室温和高温力学性能，旨在为大批量生产高品质 Cu-Cr-Zr 合金提供参考。

1 试验材料及方法

原材料为标准阴极铜 Cu-CATH-2(≥99.95%，质量分数，下同)、海绵锆 HZr-02、JCr99-A 金属 Cr(≥99.0%)，熔炼合金成分：0.8%的 Cr、0.15%的 Zr、余量为 Cu。在 ALD VIDP400 型 3t 真空炉内进行真空熔炼，制备 ϕ600 mm×1 200 mm 的铸锭。铸锭经去冒口、表面车削处理后在真空炉中加热至 900 ℃并保温 5 h，经反复镦拔变形至板材状，其厚度为 60 mm。表 1 为 Cu-0.8Cr-0.15Zr 合金的 3 种处理工艺。

表 1 Cu-0.8Cr-0.15Zr 合金的 3 种处理工艺

Tab.1 Different heat trentment processes for Cu-0.8Cr-0.15Zr alloy

编号	热变形	固溶处理	冷变形加工	时效处理	冷变形加工	时效处理
1	900 ℃×5 h，ϕ600 mm 棒材反复镦拔至厚 60 mm	940 ℃×60 min＋水淬	30%	460 ℃×5 h＋炉冷	—	—
2			—	460 ℃×5 h＋炉冷	30%	—
3			—	460 ℃×5 h＋炉冷	30%	400 ℃×2 h＋炉冷

采用 PU-320K 超声波探伤仪选取组织均匀、当量缺陷小于 ϕ1.2 mm 的试样。采用 SPECTRO-LAVB05A 快速直读光谱仪测试合金的成分；采用

收稿日期：2021-9-08；修改稿收到日期：2021-10-27
基金项目：山东半岛国家自主创新示范区发展建设基金资助项目(ZCQ18119)；烟台市科技计划资助项目(2020CXJJ128)
第一作者简介：姜全，男，1974 年出生，工程师，山东烟台(264002)，E-mail：ytlbjq@126.com
引用格式：姜全，孟东东，顾洪斌，等. 热处理和变形对 Cu-0.8Cr-0.15Zr 合金性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2022，42(6)：771-774.
JIANG Q, MENG D D, GU H B, et al. Effects of heat treatment and deformation on properties of Cu-Cr-Zr alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6)：771-774.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

FM140XL 数字电导仪，按 YS/T478-2005 方法进行合金的电导率测量试验，测试 5 个点取平均值；在 DLY10A 万能试验机上对合金进行室温和高温拉伸试验，拉伸试样的形状及尺寸见图 1，拉伸速率为 2 mm/min，测 3 个试样的平均值。布氏硬度测试按 GB/T 231.1-2018 标准进行，在 HB-3000 布氏硬度计上进行硬度测试，每个试样测试 5 个点取平均值，加载载荷为 29.42 N，保压时间为 30 s。用马弗炉按 GB/T33370-2016 对合金材料进行软化试验；采用 $FeCl_3$(5 g)＋HCl(25 mL)＋无水乙醇(100 mL)金相腐蚀剂腐蚀 5～10 s，采用 XJG05 大型金相显微镜观察合金形貌。

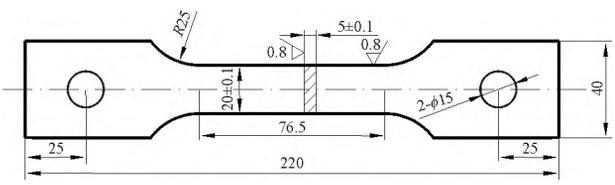


图 1　拉伸试样

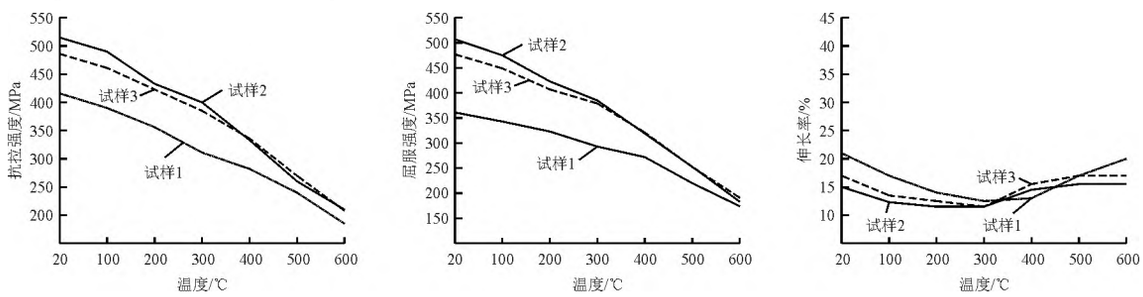
Fig.1　Dimension of tensile specimen

2　试验结果与分析

2.1　力学性能

图 2 为不同工艺处理后 Cu-0.8Cr-0.15Zr 合金的力学性能。可以看出，同一温度下试样 1 的强度、硬度最低，但伸长率最高，试样 2 的强度、硬度最高，伸长率低；随温度升高，3 种试样的抗拉强度和屈服强度均逐渐下降，而伸长率则是先降后升。为便于分析，对固溶淬火态 Cu-0.8Cr-0.15Zr 合金进行了力学性能测试。固溶后的强度较低，有利于后序的冷变形。此时试样的屈服强度为 169 MPa、抗拉强度为 256 MPa、硬度(HB)为 69。

从试样 1 的处理流程可知，其冷变形发生在固溶后，时效之前。冷变形能促使过饱和固溶体的合金内部产生大量的晶格畸变以及位错和晶面缺陷，为后序的时效提供了充分的条件。时效过程是由过渡相向平衡相转变的过程，其一般顺序为：过饱和固溶体→偏聚区→过渡相→平衡相[3]。但由于过饱和固溶体在被分解析出强化相的同时还伴随回复、再结晶，两者之间的相互作用，导致冷变形后的时效过程比较复杂，对合金的性能产生不同的影响[4～6]。所以，在同等变形量和同等时效条件下，试样 1 的屈服强度和抗拉强度比试样 2 和试样 3 低。室温下，试样 1 屈服强度为 361 MPa、抗拉强度为 416 MPa、伸长率为 21%。随温度升高，抗拉强度平均下降速率为 38 MPa/100 ℃，屈服强度的平均下降速率为 31 MPa/100 ℃。600 ℃时下试样 1 的屈服强度为 174 MPa，抗拉强度为 185 MPa。



(a) 抗拉强度　(b) 屈服强度　(c) 伸长率

图 2　不同工艺处理后 Cu-0.8Cr-0.15Zr 合金的力学性能

Fig.2　Tensile properties of Cu-0.8Cr-0.15Zr alloy after different processes

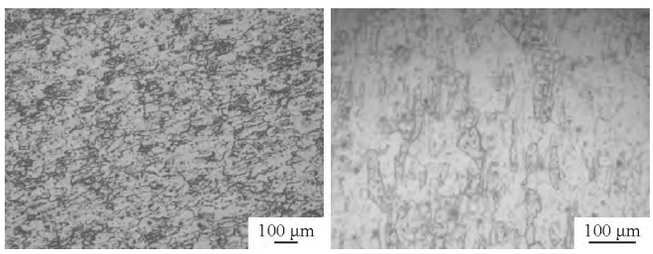
试样 2 的强度最高，伸长率最低，这是析出强化与加工硬化共同导致的。试样 2 的冷变形加工是在合金时效后进行的。由于 Cu-0.8Cr-0.15Zr 合金在 460 ℃保温 5 h 的时效处理过程中，能够使过饱和固溶体中的合金元素从基体中析出，从而形成第二相弥散分布，阻止了晶界和位错移动，使合金强度较高。经 940 ℃固溶水淬＋460 ℃保温 5 h 处理后的合金抗拉强度为 385 MPa、伸长率为 30%。所以试样 2 和试样 3 冷变形加工时强度比固溶后冷变形的试样 1 的强度大幅提高，即试样 2 和试样 3 的冷变形时起始强度比试样 1 冷变形时的起始强度高。

随温度提高，试样 2 的抗拉强度、屈服强度平均下降速率分别为 51、54 MPa/100 ℃，600 ℃时抗拉强度为 209 MPa，屈服强度为 181 MPa；试样 3 的抗拉强度、屈服强度平均下降速率分别为 46、47 MPa/100 ℃，600 ℃时的抗拉强度为 208 MPa，屈服强度为 191 MPa。分析图 2 可知，在室温和高温下试样 3 比试样 2 的伸长率高、硬度和强度低，其原因是：试样 3 是在试样 2 的基础上又进行了 400 ℃保温 2 h 的二次时效，使已时效析出＋冷变形状态的合金出现回复-再结晶现象；位错、空缺和晶格畸变减少等共同因素导致合金的冷加工效应减弱。

图 3 为试样 1 和试样 2 冷变形状态下的晶粒形貌。冷变形能够产生大量位错，产生大面积的位错塞积，可以看出，使合金出现加工硬化现象，其硬度、抗拉强度和变形抗力得到了显著提高，塑性、韧性、导电性降低。此时，试样 1 的抗拉强度为 416 MPa，伸长率为 21%、屈

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

强比为 0.868；试样 2 室温下的抗拉强度为 515 MPa、伸长率为 15%、屈强比为 0.984；在析出强化＋冷加工硬化的共同作用下试样 2 比试样 1 抗拉强度提高了 23.8%、伸长率下降 40%。根据形成强化相元素对铜合金强度和电导率的综合影响，合金的抗拉强度每提升 1 MPa 电导率仅降低 0.017 4～0.046 4 MS/m[7]。该工艺再进一步优化，有潜力成为制备高强高导铜合金材料的有效手段。



(a) 试样 1　　(b) 试样 2

图 3　Cu-0.8Cr-0.15Zr 合金冷变形后的显微组织

Fig.3　Microstructure of Cu-0.8Cr-0.15Zr alloy after cold deformation

结合图 2c 可知，3 种合金的伸长率随温度的升高均先降后升。试样 1 在拉伸试验温度为 400 ℃时，伸长率最低。试样 2、试样 3 的最低伸长率则分别出现在 200 ℃和 300 ℃。随着试验温度不断提高，Cu-0.8Cr-0.15Zr合金的伸长率在 500 ℃时达到室温水平。由此可以看出，时效后冷变形的试样 2 和试样 3 伸长率最低对应的温度比试样 1 的低。

试验温度范围内，Cu-0.8Cr-0.15Zr 合金的伸长率变化规律与铸态纯铜相同[8]，但 Cu-0.8Cr-0.15Zr 合金出现最低伸长率的温度范围比铸造纯铜的窄，且向低温方向移动。200～400 ℃范围正处于合金再结晶速度不高的区间，亦与金属温度—塑性变形规律相同[9]。

图 4 为 Cu-0.8Cr-0.15Zr 合金的屈强比变化。在低于 400 ℃时，试样 1 屈强比随温度的升高而上升，高于 400 ℃开始下降，其室温、400、600 ℃时的屈强比分别为 0.860、0.960、0.940。试样 2 和试样 3 则是随温度的升高不断下降，试样 2 屈强比分别为室温 0.984，600 ℃时0.920；试样3室温和600 ℃时的屈强比分别为0.980、0.940。可以看出，3 种工艺的屈强比与复合材料 Cu-0.6Al_2O_3在室温至 600 ℃时的比值 0.920～0.970 相当[2,10]，表明合金在 600 ℃时仍具有很高的变形抗力。

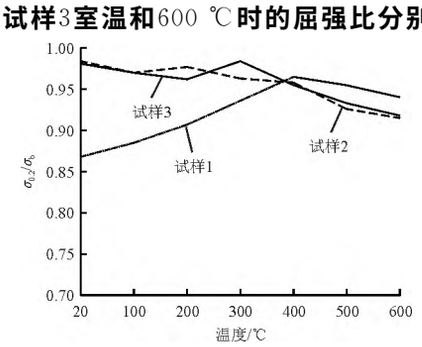


图 4　Cu-0.8Cr-0.15Zr 合金的屈强比变化曲线

Fig.4　Variation curves of yield ratio of Cu-0.8Cr-0.15Zr alloy

2.2　电导率分析

图 5 为不同工艺处理后 Cu-0.8Cr-0.15Zr 合金的硬度和电导率的变化。可以看出，电导率与硬度存在着此消彼长关系。室温下试样 1～3 的电导率分别为 49.88、47.10、48.14 MS/m。试样 1～3 的硬度分别为 125、165、152，室温下试样 1 的硬度最低，电导率最高。试样 2 的硬度最高，电导率则最低。试样 2、试样 3 室温电导率低于试样 1 的原因是时效后弥散析出的第二相在后续的冷变形过程中产生大量钉扎位错运动，从而增加了位错密度，产生了剧烈的加工硬化效应，使 Cu-0.8Cr-0.15Zr合金碱度提高，塑性、韧性、导电性下降。综上，2 号工艺流程处理的铜合金性能最佳。

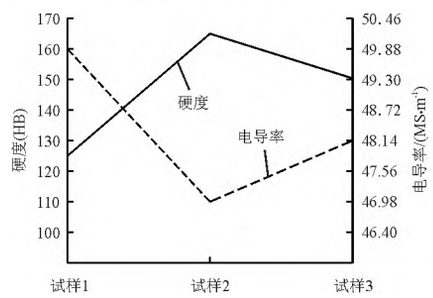


图 5　不同工艺处理后 Cu-0.8Cr-0.15Zr 合金的硬度和电导率的变化

Fig.5　Variation of hardness and electrical conductivity of Cu-0.8Cr-0.15Zr alloy during different processes

2.3　硬度测试

图 6 为加热温度高于 540 ℃对 3 种工艺试样的硬度曲线影响及变化情况。可以看出，试样 1～3 的室温硬度(HB)分别为 122、152、140，540 ℃时的硬度(HB)分别为 115、130、128，640 ℃时的硬度(HB)分别为 98、119、111。540～640 ℃内 3 种试样硬度下降率分别为 14.8%、8.5%和 13.3%。此外，3 种试样在温度高于 600 ℃后硬度的下降速率变缓。试样 1～3 硬度下降到原始硬度的 80%时所对应的温度分别为 640、620、630 ℃。

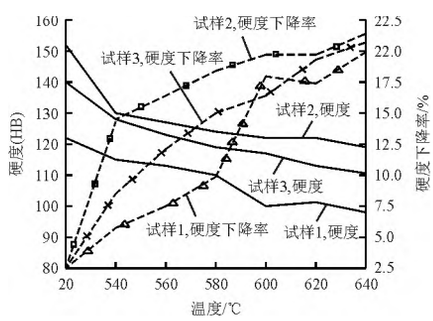


图 6　Cu-0.8Cr-0.15Zr 合金的硬度变化曲线

Fig.6　Hardness variation curves of Cu-0.8Cr-0.15Zr alloy

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

铜合金带材拉拔用辊模的设计及应用

李 锋[1] 彭 孜[1] 陈国权[2] 徐高磊[2] 沈铁军[1]
(1.绍兴市天龙锡材有限公司；2.浙江力博实业股份有限公司)

摘 要 采用辊模技术替代钨钢拉拔模拉拔铜合金带材，设计了使用寿命长、精度高的辊模结构，结合卷拉机或链条式拉拔机，用于拉拔铜合金带材。结果表明，采用辊模技术可明显改善铜合金带材的表面品质，提高带材平整度，拉拔节能22%左右，且与轧机相比，辊模的结构简单、维护调整方便。用不同孔型的辊模可适用多种规格铜合金带材生产。

关键词 铜合金带材；钨钢拉拔模；表面缺陷；辊模
中图分类号 TG359；TG249.7；TG146.1+1 **文献标志码** A
DOI:10.15980/j.tzzz.2022.06.020
开放科学(资源服务)标识码(OSID)：

Design and Application of Copper Alloy Strip Roller Die for Drawing

Li Feng[1], Peng Zi[1], Chen Guoquan[2], Xu Gaolei[2], Shen Tiejun[1]
(1.Shaoxing Tianlong Tin Materials Co., Ltd.; 2.Zhejiang LIBO Industrial Co., Ltd.)

Abstract: Roller die technology substituted for drawing die of tungsten steel was utilized to draw copper alloy strip. The structure of roller die with long service life, high precision and reliability was designed combined with coiling or chain drawing machine to drawing copper alloy strip. The results indicate that the surface quality and flatness of copper alloy strip can be significantly improved by roller die technology, and the energy saving is about 22%. Compared with rolling mill, the roller die with simple structure is convenient to maintain and adjust, and roll dies with different hole patterns can be suitable for a variety of specifications of Cu alloy strip.

Key Words: Copper Alloy Strip, Drawing Die of Tungsten Steel, Surface Defect, Roller Die

收稿日期：2021-09-24；**修改稿收到日期**：2021-10-11
第一作者简介：李锋，男，1963年出生，工程师，浙江绍兴(312001)，E-mail：dongjianguang @damno.com
通信作者：沈铁军，男，1989年出生，工程师，浙江绍兴(312001)，E-mail：1274873583@qq.com
引用格式：李锋，彭孜，陈国权，等. 铜合金带材拉拔用辊模的设计及应用[J]. 特种铸造及有色合金，2022，42(6)：774-776.
LI F, PENG Z, CHEN G Q, et al. Design and application of copper alloy strip roller die for drawing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6):774-776.

3 结 论

(1)热变形-固溶-时效-冷变形工艺得到的Cu-0.8Cr-0.15Zr合金强度最高，其抗拉强度为515 MPa、屈服强度为507 MPa、硬度(HB)为165、屈强比为0.984。

(2)在600℃时，Cu-0.8Cr-0.15Zr试样经热变形-固溶-冷变形-时效处理后的屈强比为0.940；经热变形-固溶-时效-冷变形处理后屈强比为0.920；经热变形-固溶-时效-冷变形-时效处理后的屈强比为0.940。

(3)Cu-0.8Cr-0.15Zr合金的软化温度：热变形-固溶-冷变形-时效为640 ℃；热变形-固溶-时效-冷变形为620 ℃；热变形-固溶-时效-冷变形-时效为630 ℃。

(4)Cu-0.8Cr-0.15Zr合金的伸长率在20～600 ℃的范围内先降后升，在200～400 ℃区间的伸长率最低，500 ℃时恢复到室温水平。

(5)试验温度范围内合金的强度随温度的升高而下降，通过固溶-冷变形-时效工艺处理的合金的抗拉强度平均下降速率最小，为38 MPa/100 ℃，屈服强度平均下降速率为31 MPa/100 ℃；通过固溶-时效-冷变形工艺处理后合金的抗拉强度平均下降速率最大，为51 MPa/100 ℃，屈服强度的平均下降速率为54 MPa/100 ℃。

参 考 文 献

[1] 陈婷婷，胡美俊，刘文扬，等.非真空熔炼制备Cu-0.37Cr-0.046Sn合金的时效动力学研究[J].热加工工艺，2016，45(24)：189-192.
[2] 李华清，谢水生，米绪军，等.Cu-Cr-Zr合金热处理工艺研究[J].热加工工艺，2006，35(20)：39-42.
[3] 刘平，任凤章，贾淑果，等.铜合金及其应用[M].北京：化工工业出版社，2007.
[4] 谢水生，周健，任合，等.稀土铬锆铜合金强化工艺研究[J].金属热处理，2001(6)：12-14.
[5] 雷静果，刘平，赵冬梅，等.CuNiSiCr合金时效析出与再结晶的交互作用[J].新技术工艺，2005(6)：53-55.
[6] 姜峰，陈猛，李金龙，等.热处理工艺对高强高导Cu-Cr-Zr系合金性能的影响[J].特种铸造及有色合金，2010，30(11)：1 068-1 071.
[7] 刘平，赵冬梅，田宝红.高性能铜合金及其加工技术[M].北京：冶金工业出版社，2005.
[8] 中国工程机械学会铸造分会.铸造手册(第3卷，铸造非铁合金)[M].北京：机械工业出版社，2003.
[9] 樊东黎.热加工工艺规范[M].北京：机械工业出版社，2003.
[10] 刘平，苏华娟.新型铜铬系合金及其制备技术[M].北京：科学出版社，2007.

(编辑：刘晨辉)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net