

时效处理与减径量对连续挤压 Cu-Cr-Zr 合金性能的影响

何剑辉

[中铜(昆明)铜业有限公司]

摘要 对采用“非真空上引连铸+连续挤压”工艺试制出的 Cu-Cr-Zr 合金杆进行时效处理和冷加工试验,研究了时效温度和减径量对其硬度、电导率及抗拉强度的影响。结果表明,随着时效温度提高,经连续挤压和减径的 Cu-Cr-Zr 合金杆软化前硬度和抗拉强度先增大后减小,电导率则逐步提高并最终趋于稳定;连续挤压+拉拔减径+时效后的 Cu-Cr-Zr 合金杆,随着减径量增大,其软化前硬度和软化前强度逐步增大,软化后的硬度和软化前的电导率则基本保持稳定。

关键词 连续挤压;Cu-Cr-Zr 合金;时效温度;减径量

中图分类号 TG249.7;TG146.1⁺1

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.06.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Aging Treatment and Processing Amount on Properties of Cu-Cr-Zr Alloy after Continuous Extrusion

He Jianhui

[China Copper (Kunming) Copper Industry Co., Ltd.]

Abstract: The effects of aging temperature and processing amount on hardness, conductivity and tensile strength of Cu-Cr-Zr alloy wire rod prepared by “non-vacuum up-casting+continuous extrusion” process were investigated by aging treatment and cold working test. The results indicate that with the increase of aging temperature, the hardness and tensile strength of Cu-Cr-Zr alloy wire rod before softening suffering continuous extrusion and diameter reduction are gradually increased and then decreased, while the conductivity is increased and eventually tend to stable. The hardness and strength before softening of Cu-Cr-Zr alloy wire rod after continuous extrusion+drawing reduction+aging is gradually increased with the increase of processing amount, while the hardness after softening and conductivity before softening remain stable.

Key Words: Continuous Extrusion, Cu-Cr-Zr Alloy, Aging Treatment Temperature, Processing Amount

Cu-Cr-Zr 合金是一种具有优异综合性能的功能结构材料^[1],被广泛应用于制备电阻焊电极、电缆连接器、点焊机端子器件、集成电路引线框架、高速电气化铁路用接触网导线以及真空开关触头等^[2,3],其主要由 Cr、Zr 在 Cu 基体中产生固溶、析出强化效果^[4],使材料具备高强、高导的综合性能,因此热处理对 Cu-Cr-Zr 合金的性能影响很大。近年来,有关热处理对 Cu-Cr-Zr 合金性能的影响研究较多,大部分都是真空条件下获得试样,再对固溶、形变及时效等特性进行研究^[5~8],也有关于非真空 Cu-Cr-Zr 合金的熔铸工艺研究,开展了 Cu-Cr-Zr 合金线杆“非真空连铸+连续挤压”产业化生产工艺研究,如非真空上引连铸生产 Cu-Cr-Zr 合金线杆工艺研究^[9]、连续挤压对 Cu-Cr-Zr 合金线杆性能的影响研究^[10]。目前,关于经连续挤压后的 Cu-Cr-Zr 合金

线杆热处理及冷加工工艺研究报道较少。

本课题采用非真空上引连铸+连续挤压工艺试制 Cu-Cr-Zr 合金线杆,并进行后续热处理及冷加工工艺研究,旨在为 Cu-Cr-Zr 合金线材的非真空上引连铸生产技术的产业化提供参考。

1 试验材料及方法

试验材料为连续挤压 $\phi 22$ mm 的 Cu-Cr-Zr 合金线杆(见图 1),其主要化学成分(质量分数)为 0.42%~0.48% 的 Cr、0.026%~0.037% 的 Zr,余量为 Cu。主要性能指标:连续挤压后硬态情况下,抗拉强度为 342 MPa,硬度(HRB)为 69,电导率为 35.96 MS/m。

首先采用 SBB4T-100 重型拉拔机将 $\phi 22$ mm 的 Cu-Cr-Zr 合金连续挤压杆减径至 $\phi 18$ mm,然后对减径

收稿日期:2022-01-26;修改稿收到日期:2022-03-02

作者简介:何剑辉,男,1979 年出生,高级工程师,昆明(650502),E-mail: hjh@chncopper.com

引用格式:何剑辉. 时效处理与减径量对连续挤压 Cu-Cr-Zr 合金性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(6):777-780.

HE J H. Effects of aging treatment and processing amount on properties of Cu-Cr-Zr alloy after continuous extrusion[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6):777-780.



图1 连续挤压后的 Cu-Cr-Zr 合金线杆

Fig.1 Cu-Cr-Zr alloy round wire rod after continuous extrusion 后的线杆分别在 360、390、420、450、480 °C 时效 4 h。采用最佳时效工艺对 $\phi 22$ mm 的 Cu-Cr-Zr 合金连续挤压杆进行时效处理,依次将其减径至 20、18、16、13、9 mm,在 DZL-1 箱式电阻炉内进行 550 °C 保温 2 h + 炉冷的软化处理,最后对时效后再减径至 $\phi 13$ mm 线杆的试样进行金相分析。采用 WA-300 电液式万能试验机测试合金的抗拉强度;采用 QJ36 双臂电桥电阻测试仪测量线杆的电导率;硬度测试在 MRD-600TS 洛氏硬度计上进行。时效设备为利用车间熔铜用中频炉改造而成。

2 试验结果分析

2.1 时效试验结果

图 2 为不同时效温度下时效 4 h 后 $\phi 18$ mm 线杆的抗拉强度、硬度及电导率。可以看出,相比于连续挤压状态 Cu-Cr-Zr 合金杆,经减径时效后,线杆的性能均大幅提高。随时效温度提高,合金抗拉强度和硬度先增加而后减小,在 420 °C 时抗拉强度和硬度(HRB)均达到最大值,分别为 506 MPa 和 77;电导率随时效温度的升高而增加,并最终趋于稳定。由此可见,420 °C 为最佳时效温度。

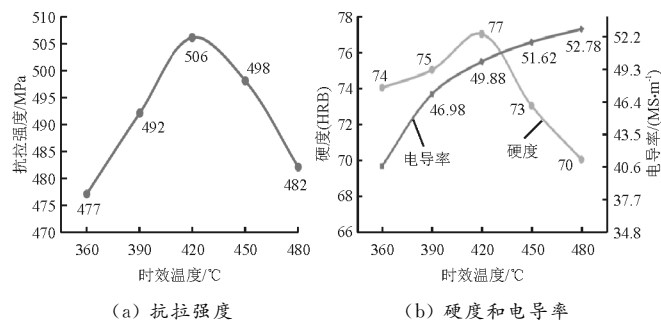


图2 时效温度对 $\phi 18$ mm 的 Cu-Cr-Zr 线杆的抗拉强度、硬度和电导率的影响

Fig.2 Effects of aging temperature on tensile strength, hardness and conductivity of Cu-Cr-Zr wire rod with 18 mm in diameters

2.2 线杆直径对时效后的线杆性能影响

图 3 为不同线杆直径的 Cu-Cr-Zr 合金线杆的硬

度、抗拉强度及电导率。可以看出,经 420 °C × 4 h 时效后的 Cu-Cr-Zr 合金杆的线杆直径对软化后的硬度影响非常小,随着线杆直径减小,软化后的硬度(HRB)基本保持在 73 左右,而软化前的硬度则随着线杆直径减小而逐渐增大。此外,时效后的 Cu-Cr-Zr 合金线杆的直径变化对软化前电导率影响也比较小,随着线杆直径减小,电导率变化不大,而软化前的抗拉强度则随着线杆直径的减小而增加。

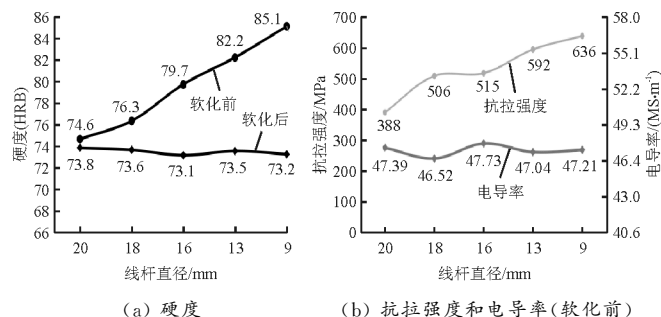


图3 线杆直径对时效后 Cu-Cr-Zr 合金线杆硬度、抗拉强度和电导率的影响

Fig.3 Effect of deformation on hardness, tensile strength and conductivity of Cu-Cr-Zr alloy wire rod after aging

2.3 时效后 Cu-Cr-Zr 合金线杆金相组织分析

图 4 为 420 °C 时效 4 h 时效处理后 $\phi 13$ mm 线杆的显微组织。可以看出,线杆整体组织致密,无缺陷。图 4a 中呈颗粒状或链状分布的组织为时效过程中析出的富 Cr 相,颗粒尺寸为 1~5 μ m,白色区域为 Cu 基体,在其内分布着长条状 CuZr 相。从图 4b 可以看出,经过拉拔后,析出的 Cr 相和 CuZr 相沿着减径拉拔方向被拉长,形成细长的纤维组织。

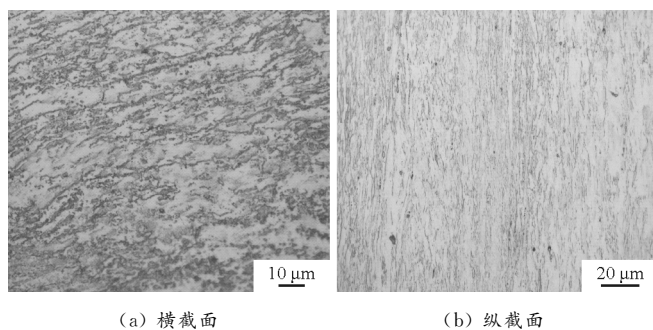


图4 时效后 $\phi 13$ mm 的 Cu-Cr-Zr 合金杆金相组织

Fig.4 Metallographic structure of Cu-Cr-Zr alloy rod with 13 mm in diameter after aging

3 试验机理分析与讨论

3.1 挤压、拉拔后的合金线杆时效温度对其性能影响

Cu-Cr-Zr 合金线杆经连续挤压和拉拔减径后,形成的固溶体极不稳定,将其加热到一定温度后,Cr、Zr 从饱和固溶体中大量分解和析出,形成强化相弥散分布

于 Cu 基体中,其能有效地阻止位错和晶界移动,从而极大地提高线杆的强度和硬度。在较低的温度范围内,随着时效温度升高,析出的强化相(单质 Cr 相和 CuZr 相)逐渐增加,从而导致合金抗拉强度和硬度上升。在时效过程中,在强化相析出的同时,Cr 颗粒存在再结晶长大的现象,温度越高生长速度越快,导致合金杆的强度降低。在较低的温度范围内,析出强化效果起主导作用,因此,合金杆表现出强度和硬度持续升高;当温度超过临界值时,析出相的再结晶长大弱化强度效果起主导作用,随着温度持续升高,合金杆的强度和硬度反而逐渐降低。从图 2 可以看出,合金杆在温度 420 °C 下的抗拉强度和硬度达到峰值。

若继续升高温度,析出相继续长大,但由于 CuZr 相的抑制作用,析出的 Cr 长大到一定程度保持不变,使相应的合金杆硬度、强度保持在一定的稳定范围,从而体现出了 Cu-Cr-Zr 合金的高温强度较高的特点。Zr 含量越高,其抑制作用就越大,合金高温强度越好。Cu-Cr-Zr 软化过程中(温度为 550 °C),析出的 Cr 相已达到最大值,其硬度达到最低值,且保持较为稳定状态。因此,也可以看出,Cu-Cr-Zr 合金线杆最终软化后的硬度取决于合金元素的含量,含量越高,软化后的硬度值就越大。

合金元素对铜合金导电性的影响主要是固溶于 Cu 基体中的合金元素引起铜合金中 Cu 基体晶体发生畸变而增加对电子的散射作用从而使电导率下降。在时效过程中,固溶在 Cu 基体中的 Cr、Zr 逐渐析出,形成单质的强化相和化合物强化相。随着时效温度逐渐提高,虽然析出的单质 Cr 相逐渐长大而导致合金杆的强度和硬度降低,但是在低于固溶温度情况下,其析出过程就一直存在,Cu 基体的晶格畸变程度逐渐变小,从而使其电导率逐步提高。

3.2 时效后合金线杆减径量对性能的影响

在减径过程中,发生了加工硬化,加工量越大,硬化效果越明显,因此随着减径量增大,合金线杆软化前的硬度和强度逐步提高。经过软化后,加工硬化效果完全消除,合金线杆的硬度和强度主要由合金元素含量决定,因此其软化后的硬度随线杆直径的变化不大。

3.3 合金元素对电导率的影响

铜合金线杆的电导率主要受加工状态和合金元素含量影响,合金元素含量对铜合金线杆的导电性的影响起着主导作用,合金元素含量越高,相应的合金杆电导率就越低;加工硬化相比于合金元素含量,其对铜合金杆的导电性的影响较小。铜合金线杆经加工后,由于晶格发生畸变,产生大量位错,导致晶格对于电子的散射

作用增强,从而使材料的电导率在一定程度上有所减小。但是在实际的工业生产实践中,采用“非真空上引连铸+连续挤压”工艺批量连续生产 Cu-Cr-Zr 合金线杆存在特殊现象,即加工量的变化对其电导率的影响未能完全表现出来。

试验所用 Cu-Cr-Zr 合金线杆采用的生产工艺为“非真空上引连铸+连续挤压”,其不同于实验室内试验,为保持连续不断的引出 Cu-Cr-Zr 合金线杆,需要定时、间断地向的上引炉内添加铜原料和 Cr、Zr 合金元素,即当引出一定质量的 Cu-Cr-Zr 合金线杆后,必须立即向上引炉内补充等量的铜板和合金元素。经验表明,采用连铸工艺连续生产铜合金线杆,很难将合金元素含量精确控制到某一值,尤其是对于高活性 Cr、Zr 合金元素。对于非真空条件下配置熔铸 Cu-Cr-Zr 合金,目前还没开发出可以完全防止 Cr、Zr 元素损耗的工艺,只能通过采用特殊的表面覆盖方式在一定程度上减少其损耗速度,需采用定时增补充合金元素方式保持其相对的稳定性。因此,生产出的 Cu-Cr-Zr 线杆的中的 Cr、Zr 元素含量在一定范围内波动,其中 Zr 含量波动最大,从而导致相应的合金杆电导率也在一定范围内发生波动。在实际生产和应用中,加工硬化和合金元素含量大小同时影响着 Cu-Cr-Zr 线杆的电导率,但由于合金元素含量大小的影响占主导作用,因此最终导致了 Cu-Cr-Zr 合金线杆电导率波动的现象。

4 结 论

(1)经连续挤压和拉拔减径的 Cu-Cr-Zr 合金杆,当时效温度低于 420 °C 时,随着温度升高,Cu-Cr-Zr 合金杆的硬度和抗拉强度逐渐提高;当时效温度高于 420 °C 时,随着温度升高,Cu-Cr-Zr 合金杆的硬度和抗拉强度逐渐降低。时效温度为 420 °C、时效时间为 4 h 是最佳的时效工艺。随着时效温度升高,时效后的 Cu-Cr-Zr 合金线杆电导率逐步增加。

(2)连续挤压后的 Cu-Cr-Zr 合金线杆经时效处理后再进行减径,随着其加工量增加,相应的软化前硬度和强度逐步提高,软化后的硬度基本保持稳定,其大小取决于合金元素 Cr、Zr 含量的大小;其软化前的电导率变化情况具有一定的特殊性,呈现出在一定范围内保持稳定的现象。

参 考 文 献

- [1] 顾小兰,叶以富,田秋红,等.铜铬合金等径角挤压后的组织与性能[J].机械工程材料,2006,30(3):51-53,67.
- [2] DENG J Q, ZHANG X Q, SHANG S Z, et al. Effect of Zr addition on the microstructure and properties of Cu-10Cr insitu composites[J]. Materials and Design, 2009, 30(10): 4 444-4 449.

薄壁复杂钛合金铸件熔模铸造工艺模拟及优化

程亚珍 李渤渤 孙冰 杜延乐 孙宏喆 刘茵琪
(洛阳双瑞精铸钛业有限公司)

摘要 利用数值模拟技术对某薄壁复杂钛合金铸件的温度场、应力场进行了模拟,确定了适合于生产该铸件的铸造工艺。该方案模拟的温度场分布比较均匀,利于铸件的均衡凝固,铸件的内部品质较好,模拟的应力场分布比较均匀,整个铸件的应力差最小。根据模拟的结果,对大壁厚比部位采用冒口补缩。采用优化后的铸造工艺生产铸件,制造出与模拟结果一致的符合技术要求的优质铸件。

关键词 数值模拟;钛合金铸件;铸造工艺

中图分类号 TG249.5;TG146.23

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.06.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation and Process Optimization of Investment Casting Process for Thin-walled Complex Titanium Alloy Casting

Cheng Yazhen, Li Bobo, Sun Bing, Du Yanle, Sun Hongzhe, Liu Yinqi
(Luoyang Sunrui Titanium Precision Casting Co., Ltd.)

Abstract: The temperature field and stress field of a thin-walled complex titanium alloy casting was simulated by numerical simulation technology, and the casting process suitable for the casting was determined. The temperature field distribution simulated by the scheme is relatively uniform, which is conducive to the balanced solidification of the casting. Internal quality reaches optimal, and the simulated stress field distribution is relatively uniform with the lowest stress difference in the whole casting. According to the simulation results, riser feeding is adopted for the parts with large wall thickness ratio. High quality castings which are consistent with the simulation results and meet the technical requirements are effectively produced by optimized casting process.

Key Words: Numerical Simulation, Titanium Alloy Casting, Casting Process

随着航空航天技术的进步,钛合金铸件的结构向轻量化、薄壁化、整体化方向发展。钛合金流动性差,在凝固过程中易产生缩孔、缩松缺陷^[1];浇注温度高、热导率偏低,成形过程中易产生热裂及变形等缺陷^[2]。某钛合金铸件(见图1)为薄壁复杂腔体类结构,材质为ZTC4

钛合金,主体结构为异形结构的腔体,腔体尺寸为530 mm×70 mm×95 mm,两侧平均壁厚为2 mm,有两个凸台,连接处的壁厚为32 mm;另外两侧壁厚为4 mm,该处壁厚比为16:1。工艺难点为:一是壁厚比大,收缩应力差异大,且壁厚较薄,易产生穿透性裂纹,采用补

收稿日期:2021-06-24;**修改稿收到日期**:2021-11-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(2020YFB2008300)

第一作者简介:程亚珍,女,1982年出生,高级工程师,河南洛阳(471023),E-mail:3504169@qq.com

通信作者:李渤渤,男,1987年出生,高级工程师,河南洛阳(471023),E-mail:libobo0816@126.com

引用格式:程亚珍,李渤渤,孙冰,等.薄壁复杂钛合金铸件熔模铸造工艺模拟及优化[J].特种铸造及有色合金,2022,42(6):780-784.

CHENG Y Z, LI B B, SUN B, et al. Numerical simulation and process optimization of investment casting process for thin-walled complex titanium alloy casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6):780-784.

[3] 宋鲁南,刘嘉斌,黄六一,等.强变形对Cu-Cr合金组织性能的影响[J].金属学报,2012,48(12):1459-1466.

[4] 赵冬梅,董企铭,刘平,等.探索高强高导铜合金最佳成分的尝试[J].功能材料,2001,32(6):609-610.

[5] JIA S G, LIU P, SONG K X, et al. Microstructures and properties of Cu-Cr-Zr in-situ composites[J]. Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(7):1334-1338.

[6] GUO S H, ZHANG M, PENG G Y, et al. Aging precipitation of Cu-Cr-Zr-Y alloys with different heat treatment[J]. Dongbei Daxue Xuebao, 2010, 31(1):23-26.

[7] 陈小波,姜锋,陈蒙,等.固溶时效后高强高导Cu-Cr-Zr合金的性能与显微组织研究[J].宇航学报,2009,30(4):1673-1678.

[8] 朱永兵,慕思国,李华清,等.Cu-Cr-Zr系合金变形过程中的组织分析[J].材料工程,2009(7):9-11.

[9] 管桂生. Cu-Cr-Zr合金线材非真空上引连铸生产工艺研究[J].云南冶金,2021(4):97-103.

[10] 郭大为,管桂生.连续挤压对铸态Cu-Cr-Zr合金性能的影响[J].云南冶金,2020(3):88-92.

(编辑:刘晨辉)