● 材料改性 Material Propertiest ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.04.015

深冷处理对 C17510 铍铜合金组织及性能的影响

卢翰林,陈乐平,方森鹏,周 全

(南昌航空大学 航空制造工程学院,江西 南昌 330063)

摘 要:为改善 C17510 合金组织,提高合金性能,采用固溶、时效、深冷处理工艺对 C17510 合金进行了处理,利用维氏硬度计、XRD、电导率测试仪、金相显微镜等手段研究了 C17510 合金深冷处理前后显微组织及性能的变化。结果表明,在保持固溶及时效处理条件不变的情况下,经深冷处理后 C17510 合金组织中出现孪晶;深冷处理对 C17510 合金试样的电导率影响不大;随着深冷时间的延长,C17510 合金的维氏硬度变化呈显先降低后升高再降低的趋势,在 10 h 处达到峰值,为 290.19 HV。

关键词:C17510 合金;深冷处理;显微组织;电导率;硬度

中图分类号: TG156; TG113 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)04-0304-04

Effect of Low Temperature Treatment on Microstructure and Properties of C17510 Beryllium Copper Alloy

LU Hanlin, CHEN Leping, FANG Senpeng, ZHOU Quan

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In order to improve the microstructure and properties of C17510 alloy, C17510 alloy was treated by solid solution, aging and deep cryogenic treatment. The microstructure and properties of C17510 alloy were studied by means of Vickers hardness tester, XRD, electrical conductivity tester and metallographic microscope. The results show that twin crystals appear in the microstructure of C17510 alloy after cryogenic treatment under the condition of constant solution and aging treatment. Cryogenic treatment has little effect on the conductivity of C17510 alloy. With the prolonging of cryogenic time, the Vickers hardness of C17510 alloy decreases firstly, then increases and then decreases, and reaches the peak value of 290.19 HV at 10 h.

Key words: C17510 alloy; deep cryogenic treatment; microstructure; electrical conductivity; hardness

铍铜合金是一种可锻和可铸合金,属时效析出强化的铜基合金,经固溶时效处理后具有一系列优良的综合性能,被誉为“有色弹性材料之王”。近年来,铍铜合金应用范围在逐步扩大,广泛用于电子电器、通讯仪器、航空航天、汽车家电、机械制造等多种领域,成为国民经济建设中不可缺少的重要工业材料[1-3]。

随着现代工业的发展,对铍铜的使用性能提出更高的要求,但是当前我国在高性能铍铜合金材料研究和开发技术等方面与世界先进水平还存在较大的差距,力学性能的不足使其应用受到极大局限。通常采用优化热处理工艺、添加合金元素或表面处理等方法来改善性能,但是这些方法很难同时提高材料的强度与塑性。深冷处理也可以称作超低温处理,是常规冷处理的延伸,通常指以液氮(-196 ℃)等低温液态物质作为制冷剂,在-130 ℃以下对材料进行处理,并获得优良材料性能的一种方法。深冷处理的研究始于20世纪五、六十年代,主要应用于刀具、模具、轴承等零件中,可提高金属材料的力学性能、稳定尺寸和减小变形[5-6]。目前国内外对深冷处理的研究主要集中于钢铁材料,对有色金属的研究工作还相对较少。高文林等研究了深冷处理对7A99铝合金峰值时效析出相的影响,发现深冷处理可以降低7A99铝合金中Zn、Mg元素的微观偏聚,提高析出相的分布均匀性;Nuwan Wannaprawat等研究了深冷处理保温时间对CuBeZr合金中CuNi相和CuNiZr相转变的影响,发现随着保温时间的延长,分布在α相基体周围的析出相数量增加,提高了CuBeZr合金的硬度和耐磨性。

收稿日期:2021-02-09

基金项目:江西省科技重点研发项目(20192BBE50035);南昌航空大学第十五届“三小”项目(2020HZ033)

作者简介:卢翰林(1999—),江西宜春人,本科生.研究方向:有色金属材料和铸造技术,电话:15797905883,Email:1554587869@qq.com

通讯作者:陈乐平(1964—),江西南昌人,教授.研究方向:金属材料和铸造技术.电话:0791-83863027,Email:jnclp@163.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基于以上情况,本文通过对固溶时效处理后的C17510铍铜合金材料进行深冷处理,以求达到改善C17510合金组织,提高合金综合性能的目的,同时为深冷处理在铍铜合金的相关研究提供理论依据。

1　实验材料与方法

本实验所用材料为市面购买C17510合金,成分(质量分数)见表1。该合金生产工序如下:浇注后热锻,于920 ℃下固溶处理1 h,然后拉拔成直径30 mm合金棒,在480 ℃下时效3 h炉冷至室温。采用液氮浸泡法对试样进行-196 ℃深冷处理2、4、6、8、10和14 h,最后空冷至室温。

表1　C17510合金的成分 *w*(%)
Tab. 1 Chemical composition of C17510 alloy

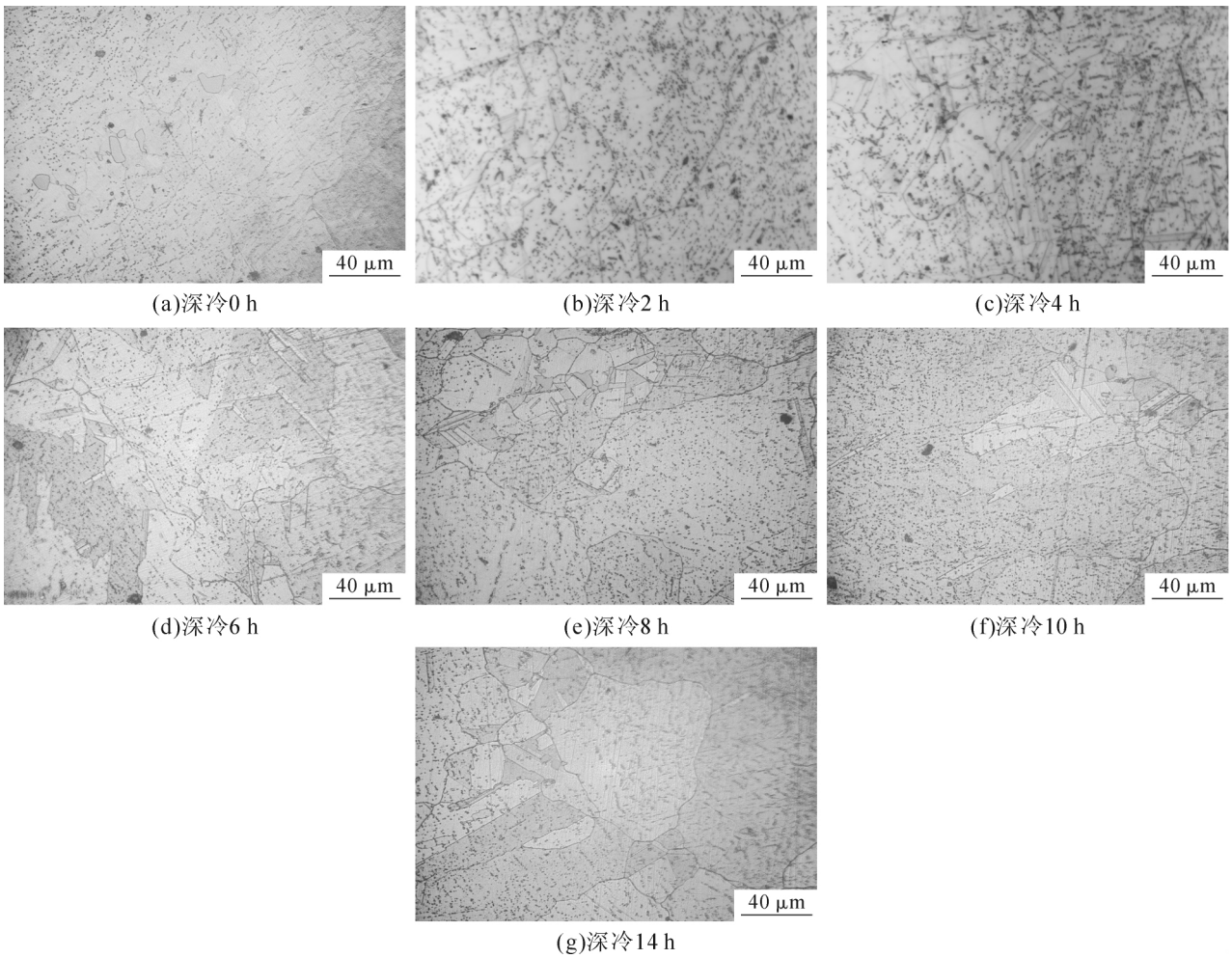
铍	钴	镍	铁	铝	硅	铜
0.2~0.6	≤0.3	1.4~2.2	≤0.1	≤0.2	≤0.2	余量

试样腐蚀液为三氯化铁盐酸水溶液，配比为5g$FeCl_3$+25 mLHCl+100 mL蒸馏水。深冷处理前后的样品经腐蚀后在MR5000型倒置金相显微镜下观察显微组织。物相表征在D8ADVANCE-A25型X射线衍射仪上进行。采用HV-1000SPTA型维氏硬度计和D60K数字金属电导率测量仪分别测试硬度和电导率。

1.1　深冷处理对合金显微组织的影响

图1为不同深冷处理时间后C17510合金的金相显微组织图,由图1可知,深冷处理前后C17510合金的晶粒尺寸无明显变化,主要变化为孪晶的出现。

孪生是发生在金属晶体内局部区域的一个均匀切变过程,沿特定晶面和晶向进行,可改变晶体的取向。铜作为层错能较高的面心立方晶体结构金属,主要的形变机制为滑移,孪生的出现需具备形变速率高或形变温度低等条件[10]。深冷处理时-196 ℃的极低温度为C17510合金显微组织中孪晶形核和长大提供了充分条件,满足了孪晶形成的动力学条件。此外,低温导致原子迁移困难,合金易于通过孪晶方式进行变形[11]。孪晶界面能低于普通晶界的界面能,孪晶中的共格孪晶的界面能约为一般界面能的1/10,而非共格孪晶界面能约为一般界面能的1/2。界面能之差推动着晶体结构的转变，满足了结构转变的热力学条件,为孪晶的形成提供了驱动力。



(a)深冷0 h　(b)深冷2 h　(c)深冷4 h

(d)深冷6 h　(e)深冷8 h　(f)深冷10 h

(g)深冷14 h

图 1　不同深冷时间的 C17510 合金显微组织

Fig. 1 Microstructure of C17510 alloy after cryogenic treatment for different time

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.2 深冷处理对合金电导率的影响

对不同深冷时间的C17510合金进行电导率测试，结果如表2及图2，可以看出，深冷处理对C17510合金的电导率影响不大。对于同一种金属，影响电导率的主要因素是电子运动过程中所受到的散射，散射主要有两个来源：一是温度引起离子震动造成的散射，二是各种晶体缺陷及杂质引起的晶格畸变造成的散射[12]。

表2 不同深冷时间下C17510合金的电导率
Tab. 2 Conductivity of C17510 alloy at different deep cryogenic time

DCT Time /h	0	2	4	6	8	10	14
%IACS	56.9	57.3	57.3	57.2	57.3	57.0	57.3

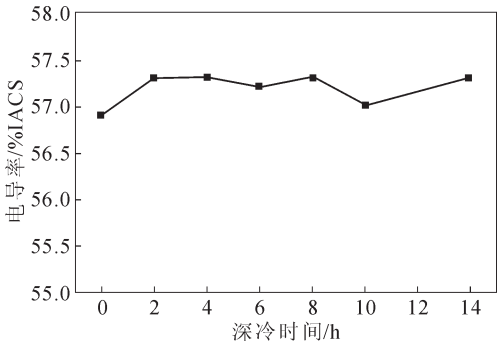


图 2 不同深冷时间下 C17510 合金的电导率变化
Fig.2 Conductivity variation of C17510 alloy after cryogenic treatment for different time

在深冷处理过程中，空位在晶界、位错、表面处消失，导致空位浓度减小，空位缺陷对电子的散射作用减小，提高了合金的电导率，增强合金的导电性[13]。但合金组织中大量孪晶的出现会造成晶格畸变，同时孪晶界阻碍位错运动，使位错易在孪晶界前堆积，位错密度增加，增大了电子传输阻力，降低了合金的电导率。空位浓度减小与位错密度增加的共同作用导致深冷处理对C17510合金电导率影响不大。

1.3 深冷处理对合金硬度的影响

对试样进行维氏硬度测试，表3为不同深冷时间后C17510合金的硬度具体测量结果，图3为其维氏硬度变化。可知，随着深冷处理时间的延长，合金维氏硬度呈现先降低，后升高，再降低的趋势，并于深冷时间10 h时达到峰值290.19 HV。硬度先降低的原因，是由于对合金深冷处理时急剧的温度变化使析出相析出时产生的空位强化及应变强化降低，并

表3 不同深冷时间的C17510合金维氏硬度
Tab. 3 Vickers hardness of C17510 alloy after cryogenic treatment for different time

DCT 时间 /h	0	2	4	6	8	10	14
硬度 /HV	240.21	226.19	234.22	237.72	241.44	290.19	245.54

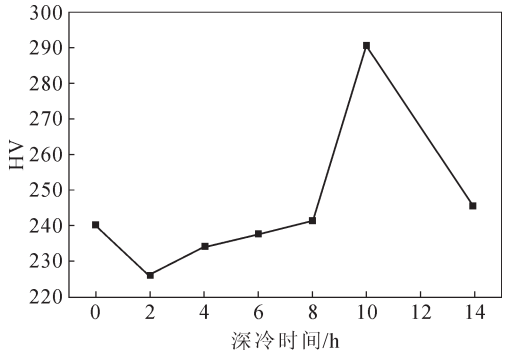


图 3 深冷处理时间对 C17510 合金维氏硬度的影响
Fig.3 Effect of cryogenic treatment time on Vickers hardness of C17510 alloy

使位错运动及重排减少，位错密度降低[14]。随着深冷时间的延长，深冷过程中铜合金组织出现孪晶，而孪晶界面在塑性变形中起着类似于晶界的作用，阻碍位错的运动，起到硬化作用；另一方面，急剧的温度变化使晶粒发生体积收缩，组织更为致密，从而提高了合金的硬度[15]。合金深冷处理至14 h后维氏硬度大幅度降低的原因，判断有多方面因素，其中一方面是长时间的深冷过程使晶粒取向相同的空位发生聚集，从而形成大量的空位片，这些空位片会因为合金组织中内应力的存在而发生崩塌，从而导致位错环的出现，空位片的出现会减少位错运动，导致位错浓度降低，降低材料的硬度[16]。

C17510合金深冷处理0 h及10 h的XRD的分析结果如图4。由图4可知，深冷处理0 h及10 h的C17510合金波峰数量和波峰的位置均未发生明显变化，但衍射峰的强度有显著的变化。如深冷处理10 h的C17510合金(220)、(111)及(200)晶面衍射峰的强度明显增加。大量钢材和有色金属块实验表明，材料的硬度越高，其X射线衍射峰的半高宽越大，这是利用X射线衍射峰的半高宽来表征加工硬化的物理基础热处理对试样的晶体结构有影响[14]，由XRD图可知，深冷处理10 h大大提高了C17510合金组织中各晶面衍射峰的峰强值，表明合金的硬度也明显

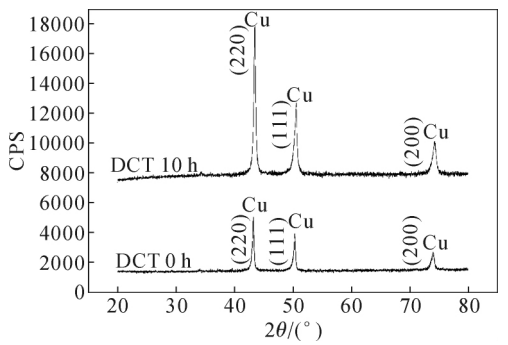


图 4 C17510 合金深冷处理 0 h 及 10 h 的 XRD 图谱
Fig.4 XRD patterns of C17510 alloy after 0 h and 10 h cryogenic treatment

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

加强。

2　结论

(1)C17510合金经深冷处理后，晶粒尺寸无明显变化,主要变化为合金组织中孪晶的出现。

(2)随着深冷处理时间的延长,C17510合金的维氏硬度呈现先降低,后升高,再降低的趋势,并于深冷时间10 h时达到最大值290.19 HV。

(3)在空位浓度减小与位错密度增加的共同作用下,深冷处理对C17510合金电导率影响不大。

参考文献:

[1] MONZEN R, SHIMADA Y, WATANABE C. Mechanical properties of Cu-Ni-Be system alloys [J]. Journal of Physics Conference, 2010, 240(1):012102.

[2] AHMED M P, JAILANI H S, MOHIDEEN S R, et al. Effect of Cryogenic Treatment on Microstructure and Properties of CuBe2 [J]. Metallography Microstructure and Analysis, 2016, 5 (6): 528-535.

[3] 何霞,张彦敏,宋克兴,等. Cu-0.23Be-0.84Co合金熔铸工艺及组织性能研究[C]// 2014:1765-1768.

[4] 陈慧. 硬质合金深冷处理的研究现状[J]. 铸造技术,2015, 36(7): 1703-1705.

[5] CHANG Y P, CHOU H M, HORNG J H, et al. Effects of Deep Cryogenic Treatment on Tribological Properties of the Tool Steel DC53[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 311:477-481.

[6] 赵金柱. 深冷处理对TC6钛合金热导率和热膨胀系数的影响[J]. 铸造技术, 2019, 40(1):26-29.

[7] 高文林,王向杰,陈军洲,等. 深冷处理对7A99铝合金峰值时效析出相的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2019, v.48; No.393(4): 131-136.

[8] WANNAPRAWAT N, TUCHINDA K. Study of Deep Cryogenic Treatment Process Effect on Microstructure and Properties of CuBeZr Alloy[J]. Key Engineering Materials, 2020, 841:335-339.

[9] 刘芳. 深冷处理对铜合金、锌合金组织与性能的影响[D]. 长沙: 湖南大学,2009.

[10] 李超. 金属学原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1989.

[11] 高英俊,吴伟明,冯冠之,等. 低温下含Zn,Ag或Sc的8090合金正电子寿命谱分析[J]. 金属学报, 1995(14):91-96.

[12] 赵冬梅,董企铭,刘平,等. 高强高导铜合金合金化机理[J]. 中国有色金属学报, 2001(S2):21-24.

[13] 刘佳,王献辉,冉倩妮,等. 深冷处理对Cu-3Ti-5Ni合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(11):160-164.

[14] 张胜全,尹赟,李鹏. 固溶、时效、深冷处理对QAl9-4铝青铜组织及性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(10):39-43.

[15] 金磊磊,陈爱华,王英华,等. 深冷处理对铜合金组织与性能影响[J]. 金属热处理, 2018(9):199-202.

[16] 尹赟. 深冷处理对QA19-4,QA110-4-4组织及性能影响的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.

2021年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志，中文核心期刊，月刊，1979年创刊，中国铸造协会会刊，被20余家数据库收录。中国标准连续出版物号：ISSN1000-8365/CN 61-1134/TG，国内外公开发行，国内邮发代号：52-64，国外发行号：M855。

报道范围：报道国内外铸造领域的先进科技成果、实用工艺技术、生产管理经验以及铸造行业发展动态。内容涵盖铸造成型工艺和铸造材料研究，并兼顾其他金属材料成型方法。

主要栏目：试验研究、工艺技术、生产技术、装备技术、特种铸造、实用成型技术、材料改性、应力控制与理化测试技术、今日铸造、企业精英人物专访等。

发行对象：国内外铸造企业，科研院所，高等学校，铸造原辅材料厂商，设备、仪器厂商，铸件采购商等。

广告范围：刊登铸造设备、熔炼设备、环保设备、铸造原辅材料、检测仪器以及铸件生产、热处理设备、科研成果转让等相关信息。

订阅方式及价格：

请从当地邮局订阅，也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年12期，每期定价25元，平寄全年300元（含邮费），挂号全年336元，快递全年420元。

海外：每期定价25美元，全年300美元。

银行汇款：

户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司

账　号：3700 0235 0920 0091 309

开户行：中国工商银行西安市互助路支行

邮购地址：西安市金花南路5号西安理工大学608信箱（710048）

联系人：李巧凤　　电话/传真：13991824906

网址：www.zhuzaojishu.net　　Email：zzjs@263.net.cn

微信扫一扫 信息快知道

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net