文章编号：1000-5773(2013)04-0500-05

高压处理对铝青铜组织与抗压强度的影响*

王海燕[1]，李雅莉[2]，谌 岩[1]，刘建华[3]，张瑞军[3]

(1. 燕山大学应用化学河北省重点实验室，河北秦皇岛 066004；
2. 唐山职业技术学院，河北唐山 063000；
3. 燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室，河北秦皇岛 066004)

摘要：利用电子万能试验机，测试了经高压处理前、后铝青铜的抗压强度，并通过 X 射线衍射(XRD)、金相显微镜、透射电子显微镜及扫描电子显微镜，对高压处理前、后铝青铜的相组成、微观组织及压缩断口进行了分析，探讨高压处理对铝青铜抗压性能的影响。结果表明：高压处理能细化铝青铜组织，2 GPa 压力处理能降低铝青铜的抗压强度，2 GPa 压力处理后再经 600 ℃保温 2 min 热处理，铝青铜的抗压强度有所增大，较高压处理前的抗压强度增大约 34%。

关键词：铝青铜；高压处理；抗压强度

中图分类号：O521.21；TG146.11 **文献标识码**：A

1 引 言

铝青铜具有较高的强度、耐磨性以及良好的抗大气、抗海水腐蚀性能，是铜合金中用途最广泛的一种。因而，关于铝青铜的研究引起了广泛的重视[1-3]。然而，铝青铜存在一些性能缺陷，如室温脆性大、成形性能较差[4]，尤其在外力作用下易开裂，极大限制了其在工业中的实际应用。通常，细小的晶粒组织能改善金属材料的抗脆断性能[5]。近年来的研究结果表明[6-9]，高压处理能细化铜合金组织，提高其力学性能，但是关于高压处理后铜合金抗压性能的研究却未见报道。很多铝青铜制品是在受压条件下服役，鉴于此，本实验通过对铝青铜进行高压处理，测试高压处理前、后铝青铜的抗压强度，初步分析高压处理对铝青铜抗压强度的影响。

2 实验材料与方法

实验材料为铸态铝青铜，其化学成分(质量分数)为：Cu 88.17%、Al 11.76%、其它 0.07%，密度为 7.67 g/cm^3，熔点为 1043.56 ℃。将铸态样品密封在石墨套管内，用叶蜡石作传压介质，在 CS-ⅡB 型六面顶压机中进行高压实验。高压处理方法是：先将样品分别在 1、2 及 4 GPa 压力下加热至 700 ℃，保温 20 min 后，断电保压冷却至室温，然后再将部分高压处理后的样品在 KLX-12B 型箱式电阻炉中加热到 600 ℃，保温 2 min 后，取出空冷至室温。用 WDW3100 电子万能试验机，测试高压处理前、后铝青铜样品的抗压强度，试样尺寸为∅6 mm×8 mm，压缩速度为 0.5 mm/min，样品压缩变形直至发生断裂。实验数据取 3 次实验结果的平均值。采用 D/max-rB 型 X 射线衍射仪(带石墨单色器，Cu K_α 辐射)、Axiovert200MAT 型光学显微镜、Jeol-2010 透射电子显微镜和 KYKY-2800 扫描电子显微镜，对铝青铜的相组成、微观组织及压缩断口进行分析。

* **收稿日期**：2012-12-27；**修回日期**：2013-04-12

作者简介：王海燕(1974－)，女，博士，教授，主要从事材料环境效应研究. E-mail：hywang@ysu.edu.cn

通讯作者：张瑞军(1962－)，男，博士，教授，主要从事金属材料研究. E-mail：zhangrj@ysu.edu.cn

3　实验结果与分析

3.1　显微组织

图 1 显示出了不同状态下铝青铜的金相组织。可以看出:高压处理前,铝青铜的组织主要呈粗大的不规则白色条块状;经高压热处理后,组织中出现细小的白色颗粒状和细条状,组织明显细化,且细化效果随压力的增大先增强后减弱,当压力为 2 GPa 时,组织最细小。经透射电子显微镜(TEM)观察(见图 2)可见,高压处理后铝青铜组织中的位错密度明显增大。这是由于高压力能造成铝青铜组织内部晶格畸变,进而产生大量位错,为晶粒的形核提供更多的部位,同时高压力还能降低原子的扩散系数,抑制晶核长大。因此,经高压处理后铝青铜的晶粒尺寸变小,但过高的压力下原子的扩散较困难,原子迁移激活能较大,致使晶粒成核率降低,导致压力为 4 GPa 时,细化效果有所减弱。由 X 射线衍射(XRD)图谱(见图 3)可知,高压处理前、后铝青铜组织均由 α、β' 和 γ_2 相组成,其中:α 相是以 Cu 为基的固溶体,为面心立方结构;β' 相是以 $AlCu_3$ 为基的固溶体,为密排六方结构;γ_2 相是以 Al_4Cu_9 为基的固溶体,为复杂体心立方结构。经分析可以断定,铝青铜组织中的白色条块状为 α 相,β' 和 γ_2 相主要存在于黑色区域中,高压处理能改变铝青铜组织中组成相的形状、大小和分布,但并未导致新相生成。

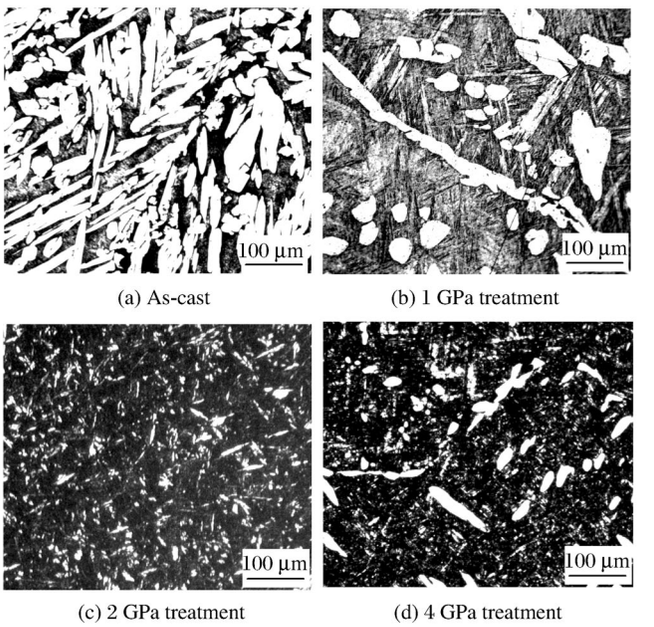


图 1　不同状态下铝青铜的金相组织

Fig. 1　Microstructure of aluminum bronze under different states

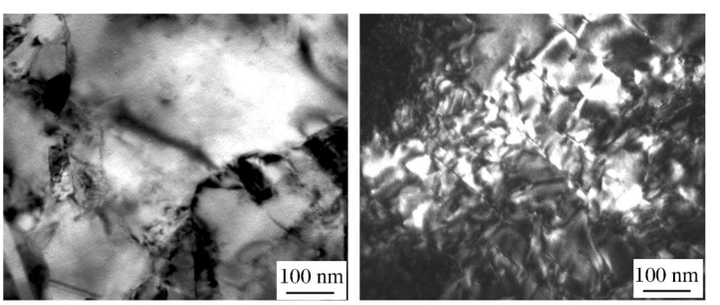


图 2　高压处理前、后铝青铜的 TEM 图像

Fig. 2　TEM images of aluminum bronze before and after high pressure treatment

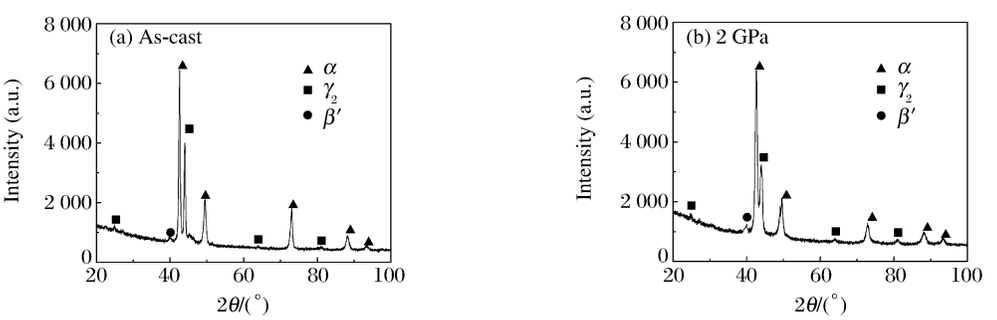


图 3　铝青铜的 XRD 图谱

Fig. 3　XRD patterns of aluminum bronze

3.2 抗压强度

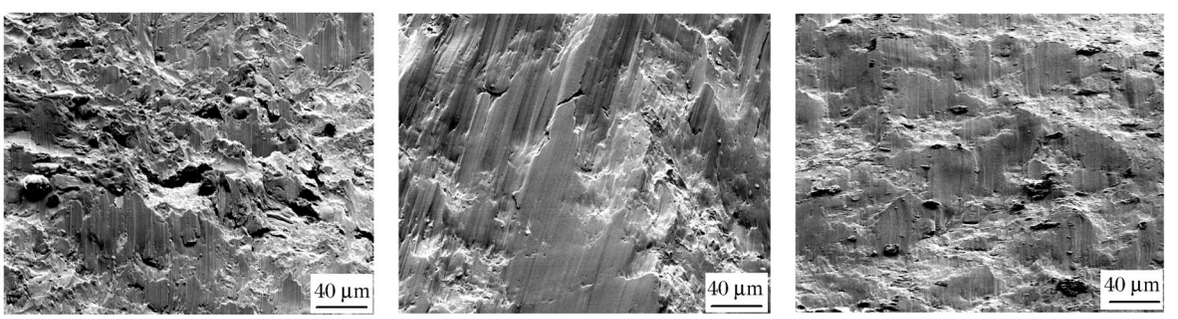
表 1 列出了不同状态下铝青铜的抗压强度。可以看出，铝青铜经 2 GPa 压力处理后的抗压强度为 885 MPa，较高压处理前(1 089 MPa)有所降低，而铝青铜经高压处理后再经 600 ℃、保温 2 min 的热处理，其抗压强度明显升高，为 1 462 MPa，较高压处理前的抗压强度提升约 34%。

表 1 不同状态下铝青铜的抗压强度

Table 1 Compressive strength of aluminum bronze under different states

Specimen	Compressive strength/(MPa)
As-cast	1 089
2 GPa treated	885
2 GPa treated and kept at 600 ℃ for 2 min	1 462

从样品断裂后的宏观形态来看，高压处理前和 2 GPa 压力处理后再经 600 ℃、保温 2 min 热处理的样品，压缩时均沿正应力约 45°方向剪切断裂，而单纯 2 GPa 压力处理的样品则断裂成大小不等的多个小块，且断裂方向无规律性，说明单纯高压处理的样品脆性较大。扫描电子显微镜(SEM)观察(见图 4)表明，上述 3 种状态的样品均属于脆性断裂，高压处理前的样品断口比较疏松、粗糙，而高压处理后的样品断口较平整、致密，相比之下，单纯高压处理的样品断口中二次裂纹数量较多。



(a) As-cast (b) 2 GPa treated (c) 2 GPa treated and kept at 600 ℃ for 2 min

图 4 不同状态下铝青铜压缩断口 SEM 照片

Fig. 4 SEM images of aluminum bronze under different states

经 TEM 观察(见图 5)可见，经 2 GPa 压力处理、再经 600 ℃保温 2 min 的热处理后，铝青铜组织中的位错密度较只进行 2 GPa 高压处理的铝青铜明显降低，且组织中出现颗粒状和细针状特征，晶粒尺寸介于高压处理前与单纯高压处理之间，如图 6 所示。

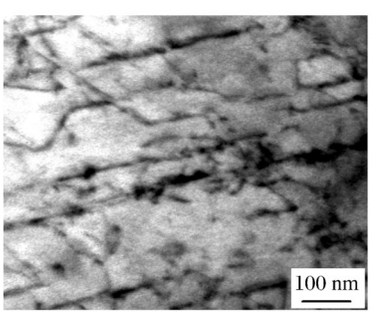


图 5 铝青铜经 2 GPa 处理后再经 600 ℃ 保温 2 min 后的 TEM 照片

Fig. 5 TEM image of aluminum bronze treated at 2 GPa and kept at 600 ℃ for 2 min

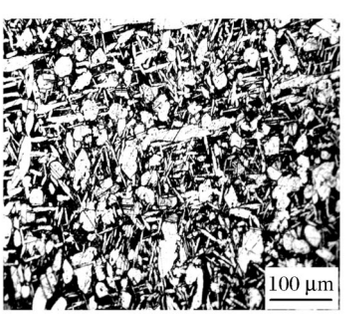


图 6 铝青铜经 2 GPa 处理后再经 600 ℃ 保温 2 min 后的金相组织

Fig. 6 Microstructure of aluminum bronze treated at 2 GPa and kept at 600 ℃ for 2 min

铝青铜经高压处理后,一方面组织内部保留较高的残余应力以及因高应变而产生的高密度位错等晶体缺陷,在外部压力作用下,这些残余应力和位错等晶体缺陷为铝青铜内部裂纹的形核、扩展和相互贯通提供了有利条件[10-11],造成高压处理后铝青铜的脆性增大,抗压强度降低;另一方面,高压力能使铝青铜内部微孔隙弥合,造成微孔隙数量减少,致密性提高,从而减少铝青铜在受压时因组织内部的微孔隙所产生的裂纹,有利于抗压强度的提高。比较上述两方面的作用,前者起着主导作用,因此铝青铜经高压处理后的抗压强度有所降低。高压处理后再经 600 ℃热处理可消除高压处理后铝青铜组织内部的残余应力,减少位错等晶体缺陷密度,降低铝青铜的开裂倾向,同时也细化了晶粒。由于晶粒变得很细小,且形状为颗粒状,受压时晶粒之间很容易产生滑动[12],因此有效地延缓了裂纹的形成与扩展,使其抗脆断性能得以提高,表现出抗压强度优于具有不规则形状且粗晶粒组织的铸态铝青铜。

4　结　论

(1) 高压热处理能细化铝青铜的微观组织,增大组织内部的位错密度,在 1～4 GPa 压力范围内,铝青铜经 2 GPa 压力处理后组织最细小。

(2) 高压处理能减小铝青铜的抗压强度,而高压处理后再经适当的热处理,可使铝青铜的抗压强度有所提高。

(3) 铝青铜在 2 GPa 压力下经 700 ℃保温 20 min 后,再经 600 ℃保温 2 min,其抗压强度为 1 462 MPa,较高压处理前的抗压强度增大约 34%。

References:

[1] Li W S, Wang Z P, Lu Y, et al. Mechanical and tribological properties of a novel aluminum bronze material for drawing dies [J]. Wear, 2006, 261(2): 155-163.

[2] Badawy W A, El-Sherif R M, Shehata H. Electrochemical behavior of aluminum bronze in sulfate-chloride media [J]. J Appl Electrochem, 2007, 37(10): 1099-1106.

[3] Mahmoud S S. Inhibition of pitting corrosion of aluminum bronze in sodium chloride solution [J]. Corrosion, 2008, 64(9): 727-732.

[4] Cui K. Ferrous and Nonferrous Metal Materials [M]. Beijing: China Machine Press, 1986: 424-426. (in Chinese)
崔　崑. 钢铁材料及有色金属材料 [M]. 北京:机械工业出版社, 1986: 424-426.

[5] Shu D L. Mechanical Properties of Metals [M]. Beijing: China Machine Press, 1994: 53-55. (in Chinese)
束德林. 金属力学性能 [M]. 北京:机械工业出版社, 1994: 53-55.

[6] Chen Y, Liu L, Wang Y H, et al. Microstructure evolution and thermal expansion of Cu-Zn alloy after high pressure heat treatment [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2011, 21(10): 2205-2209.

[7] Wu L L, Liu L, Liu J H, et al. Effects of high pressure heat treatment on microstructure and micro-mechanical properties of $Cu_{77.96}Al_{22.04}$ alloy [J]. Mater Trans, 2012, 53(3): 504-507.

[8] Wang H Y, Liu J H, Peng G R, et al. Effects of high-pressure heat treatment on the solid-state phase transformation and microstructures of $Cu_{61.13}Zn_{33.94}Al_{4.93}$ alloys [J]. Chin Phys B, 2010, 19(9): 096203.

[9] Chen Y, Liu L, Liu J H, et al. Effect of high pressure treatment on microstructure and resistivity of $Cu_{75.15}Al_{24.85}$ alloy [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(17): 176103. (in Chinese)
谌　岩, 刘　琳, 刘建华, 等. 高压处理对 $Cu_{75.15}Al_{24.85}$ 合金组织与电阻率的影响 [J]. 物理学报, 2012, 61(17): 176103.

[10] Wang Q, Wang X, Mi W Y. Reason analysis of cracks on the outside surface after gun barrel chromium-plating [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2011, 34(5): 94-96. (in Chinese)
王　青, 王　霞, 米文宇. 炮管镀铬后外表面裂纹成因分析 [J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(5): 94-96.

[11] Du X D, Ding H F, Cui F M. Effect of impact work on impact corrosion-abrasion mechanism of ZGMn13 cast steel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(11): 143-147. (in Chinese)

杜晓东,丁厚福,崔方明. 冲击功对 ZGMn13 钢在腐蚀环境下冲击磨损的影响 [J]. 农业机械学报,2006,37(11):143-147.

[12] Zhang S J,Li W X. The effect of Zr to the grain size and as-cast mechanical properties of magnesium alloy Mg-Ce [J]. Light Alloy Fabrication Technology,2003,31(2):16-18. (in Chinese)
张世军,黎文献. Zr 对 Mg-Ce 合金的晶粒大小及铸态组织性能的影响 [J]. 轻合金加工技术,2003,31(2):16-18.

Effects of High Pressure Treatment on Microstructure and Compressive Strength of Aluminum Bronze

WANG Hai-Yan[1],LI Ya-Li[2],CHEN Yan[1],LIU Jian-Hua[3],ZHANG Rui-Jun[3]

(1. *Provincial Key Laboratory of Applied Chemistry*, *Yanshan University*, *Qinhuangdao* 066004, *China*;
2. *Tangshan Vocational Technology College*, *Tangshan* 063000, *China*;
3. *State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology*, *Yanshan University*, *Qinhuangdao* 066004, *China*)

Abstract: The effects of high pressure treatment on the compressive strength of aluminum bronze were investigated, based on the measurement of its compressive strength, the analysis of its phase composition, and the observation of its microstructure and fracture morphology by means of electronic universal testing machine, X-ray diffraction, optical microscope, transmission electron microscope (TEM), and scanning electron microscope (SEM). The results show that high pressure treatment is favorable to form fine-grained microstructures and can reduce the compressive strength of aluminum bronze, while the compressive strength of the aluminum bronze treated at 2 GPa and kept at 600 ℃ for 2 min is increased about by 34%, compared with the as-cast alloy.

Key words: aluminum bronze; high pressure treatment; compressive strength