文章编号：1000-5773(2013)5-0768-05

# 高压处理对7075铝合金微观力学性能的影响*

王海燕[1]，刘　琳[2]，谌　岩[1]，赵　军[3]，刘建华[4]，张瑞军[4]

(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.北华航天工业学院材料工程系，河北廊坊　065000；
4.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**：借助纳米力学测试系统测试了4 GPa压力处理前、后7075铝合金的硬度、弹性模量和塑性变形量，并结合对其显微组织的观察，探讨了高压处理对7075铝合金微观力学性能的影响。结果表明：4 GPa压力处理能增大7075铝合金的硬度和弹性模量，减小塑性变形量，有效地提高了合金抵抗变形的能力。

**关键词**：7075铝合金；高压处理；力学性能

**中图分类号**：O521.2　　**文献标识码**：A

## 1　引　言

7075铝合金是热处理可强化合金，具有高强度、低密度和良好的抗应力腐蚀能力等特点，已成为航空航天工业中最受重视的结构材料之一[1-4]。随着航空航天技术的迅速发展，对7075铝合金的使用性能提出了更高的要求。根据文献报道[5-7]，采用高压处理可改善金属材料的组织及性能，这项技术已在钢铁及有色金属材料方面得到应用，但采用高压技术提高铝合金力学性能的研究报道甚少。再者，纳米压痕技术是近年来发展起来的一项新技术，与常规硬度测试技术相比，纳米压痕技术能反映材料本身的真实硬度特性，测试的数值更具可比性和客观性[8-10]。为此，本研究采用纳米压痕仪测试4 GPa压力处理前、后7075铝合金的微观力学性能。

## 2　实验方法

实验材料是退火态7075铝合金，其化学成分(质量分数)为Al 89.21%、Zn 5.68%、Mg 2.47%、Cu 1.69%、Cr 0.25%、Fe 0.35%、Mn 0.24%、其余0.11%。将退火态样品密封在石墨套管内，用叶蜡石作为传压介质，在CS-ⅡB型六面顶压机上进行高压处理，压力为4 GPa，加热至475 ℃。保温60 min后断电，保压冷却至室温。然后，将高压处理前、后的样品分别制备成尺寸为∅8 mm×5 mm的纳米压痕试样，利用Triboindenter型纳米力学测试系统测定其硬度和弹性模量，选用Berkovich压头，其曲率半径为150 nm，系统的载荷分辨率为50 nN，位移分辨率为0.01 nm，施加最大载荷为1 000 μN，加载和卸载速率均为100 μN/s，在最大载荷处持续时间为10 s。实验结果均取5次测量结果的平均值。另外，通过对材料表面某一点连续加、卸载，且加载到一定载荷时保持1 s，以获得不同压入深度下试样的

* **收稿日期**：2012-12-28；**修回日期**：2013-06-13

**基金项目**：河北省自然科学基金(E2013409002)；河北省教育厅青年基金(2011252)

**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

硬度和弹性模量,并用 Axiovert200MAT 型光学显微镜和 S-3400N 型扫描电镜( SEM-BSE)对试样组织进行观察。

## 3　实验结果与分析

### 3.1　金相组织

图 1 为 4 GPa 压力处理前、后 7075 铝合金的显微组织。由图 1 可以看出,退火态 7075 铝合金组织中存在大量的第二相组成;经 4 GPa 压力处理后,7075 铝合金的组织明显细化,第二相数量也明显减少。X 射线衍射图(见图 2)也表明,退火态 7075 铝合金组织由 α(Al)固溶体和第二相金属化合物(如 $CuMgAl_2$)组成;经 4 GPa 压力处理后,7075 铝合金的组织仅为 α(Al)固溶体,且 α(Al)固溶体的衍射峰强度和位向发生变化。由扫描电镜背散射观察图(见图 3)可见,4 GPa 压力处理后 7075 铝合金基体中的显微孔隙数量较退火态样品的少,致密性有所提高。

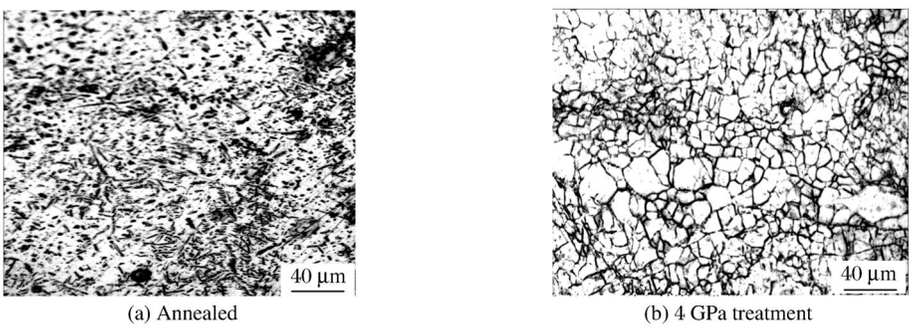



图 1　7075 铝合金的显微组织

Fig. 1　Microstructures of 7075 aluminum alloy

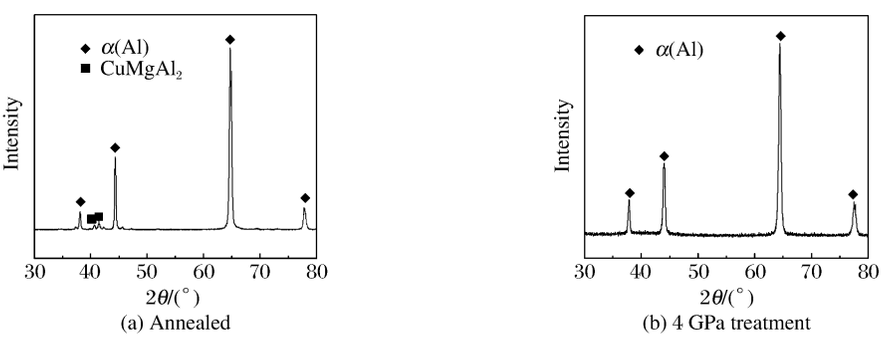



图 2　7075 铝合金 X 射线衍射图

Fig. 2　X-ray diffraction patterns of 7075 aluminum alloy

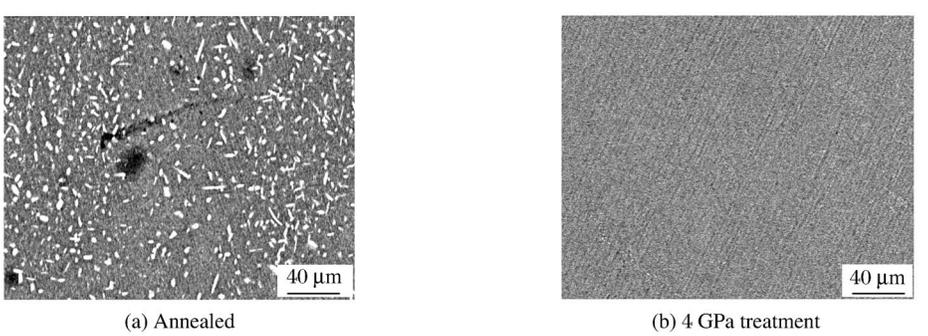



图 3　7075 铝合金扫描电镜背散射形貌图

Fig. 3　SEM-BSE images of 7075 aluminum alloy

## 3.2 微观力学性能

图 4 为高压处理前、后 7075 铝合金的加载和卸载的载荷-压痕深度曲线。由图 4 可以看出，两种状态的 7075 铝合金的加载与卸载曲线均没有重合，表明两种状态的 7075 铝合金在压力作用下均发生了塑性变形。用卸载曲线和位移轴的交点与零点的距离(即残留压痕深度)来表征塑性变形的大小。

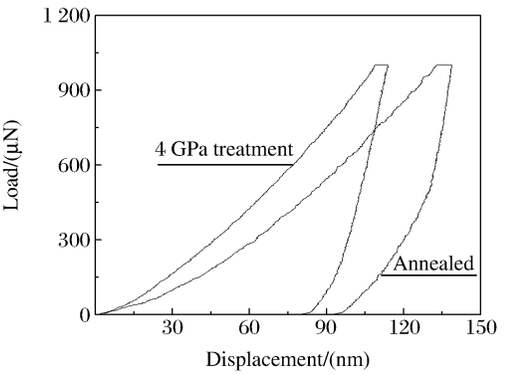



图 4 7075 铝合金纳米压痕载荷-压痕深度曲线

Fig. 4 Load-displacement curves for nano-indentation tests of 7075 aluminum alloy

表 1 为高压处理前、后 7075 铝合金试样的纳米压痕硬度($H$)、弹性模量($E$)、最大压痕深度($h_{max}$)和残余压痕深度($h_f$)。可以看出，高压处理后 7075 铝合金的纳米压痕硬度、弹性模量、最大压痕深度和残余压痕深度分别为 1.81 GPa、76.20 GPa、114.02 nm和 83.91 nm，较高压处理前样品的硬度和弹性模量分别提高了 26.57%和22.10%；而最大压痕深度和残余压痕深度则分别降低了15.32%和10.75%。另外，由图 4 还可以看出，在最大载荷 1000 μN 保持 10 s 后，两曲线上均出现微小的平台，表明合金产生了蠕变。高压处理前、后 7075 铝合金的蠕变量分别约为 6.03 和4.21 nm，高压处理后 7075 铝合金的蠕变量较高压处理前的小，说明高压处理后 7075 铝合金的抗塑性变形能力有所提高。

**表 1 7075 铝合金纳米压痕实验结果**

**Table 1 Nano-indentation results of the 7075 aluminum alloy**

| Sample | $H$/(GPa) | $E$/(GPa) | $h_{max}$/(nm) | $h_f$/(nm) |
|---|---|---|---|---|
| Annealed | 1.43 | 62.41 | 134.65 | 94.02 |
| 4 GPa treatment | 1.81 | 76.20 | 114.02 | 83.91 |

图 5 为材料表面某一点连续加、卸载的载荷-深度曲线。图 6 为根据图 4 获得的不同压入深度下 7075 铝合金的硬度和弹性模量。从图 6 可以看出，高压处理前、后 7075 铝合金的纳米压痕硬度值随着压痕深度的增加而逐渐减小，出现了纳米压痕硬度的压痕“尺寸效应”现象[11]；而弹性模量随压痕深度的变化呈现波动现象，且高压处理后 7075 铝合金的弹性模量值波动较高压处理前 7075 铝合金的小，无明显的“尺寸效应”现象。

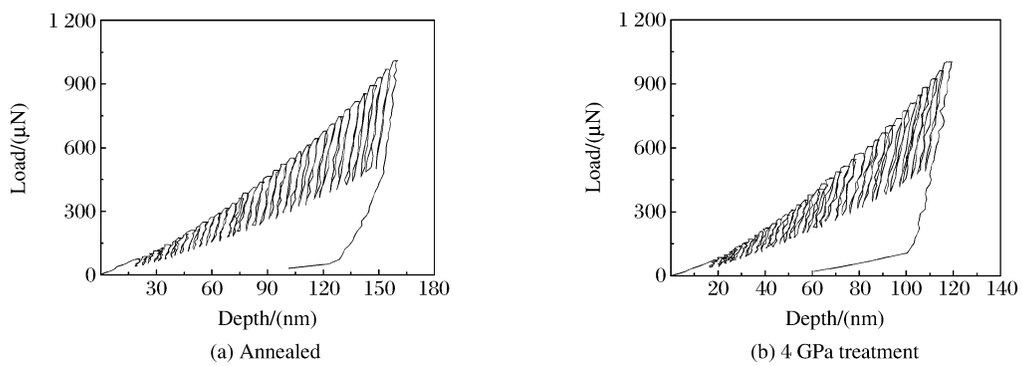



图 5 材料表面某一点连续的加、卸载曲线

Fig. 5 Load-unload curve of all measured points

从以上结果可以看出，高压处理能增大 7075 合金的硬度和弹性模量，降低其塑性变形量。这主要归因于高压处理能细化 7075 铝合金组织的晶粒。众所周知，晶粒越小，晶界对形变的阻力作用越大，其

硬度和弹性模量值越高。另外,高压处理能提高材料的致密性,同时能使 Zn、Mg 等合金元素固溶于 Al 基体中,导致了基体晶格畸变,起到固溶强化效果,使材料的强度提高,抗变形的能力增大,这也是造成硬度和弹性模量值增大以及塑性变形量减小的一个重要原因。虽然纳米压痕范围较小,但本研究的实验结果均是取多点测量值的平均值,因此基本能反映样品的平均性能。弹性模量值的波动主要反映了材料内部微孔等微观结构及组成相分布的随机性和不均匀[12]。高压处理能减少 7075 铝合金内部的微孔数量,也能使退火态 7075 铝合金组织中的第二相固溶入基体中,从而减少因微孔和第二相所造成的微观组织的不均匀性,致使高压处理后 7075 铝合金的弹性模量值波动减小。

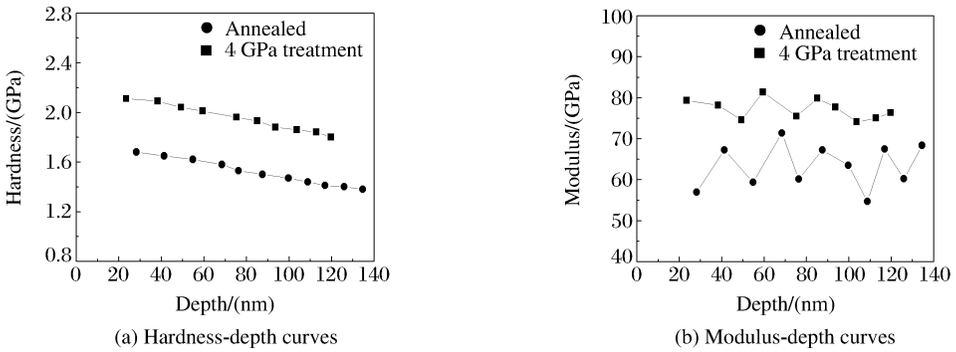



图 6　7075 铝合金的硬度和弹性模量与压痕深度关系曲线

Fig. 6　Relationship between indentation depth and hardness, elastic modulus of 7075 aluminum alloy

## 4　结　论

(1) 高压处理能增大 7075 铝合金的硬度和弹性模量,减小其塑性变形量和弹性模量的波动,有效地提高了 7075 铝合金抵抗变形的能力。

(2) 7075 铝合金在 4 GPa 压力下经 475 ℃保温 60 min 处理后,其纳米压痕硬度和弹性模量较高压处理前样品的分别提高了 26.57%和 22.10%,而塑性变形量则降低了 10.75%。

## References:

[1] Zhu Q F, Zhao Z H, Cui J Z, et al. Effect of casting speed on surface quality of horizontal direct chill casting 7075 aluminum alloy ingot [J]. Acta Metal Sin(Eng Lett), 2011, 24(5): 399-404.

[2] Tajally M, Emadoddin E. Mechanical and anisotropic behaviors of 7075 aluminum alloy sheets [J]. Mater Des, 2011, 32(3): 1594-1599.

[3] Mo J L, Zhu M H, Zheng J F, et al. Study on rotational fretting wear of 7075 aluminum alloy [J]. Tribol Int, 2010, 43(5): 912-917.

[4] Hatamleh O, Forth S, Reynolds A P. Fatigue crack growth of peened friction stir-welded 7075 aluminum alloy under different load ratios [J]. J Mater Eng Perform, 2010, 19(1): 99-106.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] Lee D Y. An investigation of thermal aging effects on the mechanical properties of a $Ni_3Al$-based alloy by nanoindentation [J]. J Alloy Compd, 2009, 480(2): 347-350.

[9] Youn S W, Kang C G. Characterization of age-hardening behavior of eutectic region in squeeze-cast A356-T5 alloy

using nanoindenter and atomic force microscope [J]. Mater Sci Eng A, 2006, 425(1): 28-35.

[10] Fan G J, Jiang W H, Lin F X, et al. The effects of tensile plastic deformation on the hardness and Young's modulus of a bulk nanocrystalline alloy studied by nanoindentation [J]. J Mater Res, 2007, 22(5): 1235-1239.

[11] Zhai C S, Yang L, Wang J, et al. Microstructure and nanoindentation mechanical properties of detonation sprayed coatings derived from $Al_2O_3/TiO_2$ nanocomposite powders [J]. Journal of Inorganic Materials, 2005, 20(6): 1500-1509. (in Chinese)
翟长生, 杨 力, 王 俊, 等. $A1_2O_3/TiO_2$ 纳米复合粉体爆炸喷涂层微结构及纳米压痕力学特性 [J]. 无机材料学报, 2005, 20(6): 1500-1509.

[12] Ren M X, Li B S, Yang C, et al. Hardness and elastic modulus of microcastings by nanoindentation [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(2): 231-236. (in Chinese)
任明星, 李邦盛, 杨 闯, 等. 纳米压痕法测定微铸件硬度及弹性模量 [J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(2): 231-236.

# Effects of High Pressure Treatment on Micro-Mechanical Properties of 7075 Aluminum Alloy

WANG Hai-Yan[1], LIU Lin[2], CHEN Yan[1], ZHAO Jun[3],
LIU Jian-Hua[4], ZHANG Rui-Jun[4]

(1. *Heibei Provincial Key Laboratory of Applied Chemistry, College of Environmental and Chemical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao* 066004, *China*;
2. *Tangshan Vocational Technology College, Tangshan* 063000, *China*;
3. *Department of Materials and Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang* 065000, *China*;
4. *State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao* 066004, *China*)

**Abstract**: The hardness, elastic modulus and plastic deformation of the 7075 aluminum alloy before and after 4 GPa pressure treatment are measured by nano-indenter, and combined with the observation for the microstructure. The effects of high pressure treatment on micro-mechanical properties of 7075 aluminum alloy are investigated. The results show that 4 GPa pressure treatment can increase the hardness and elastic modulus of the 7075 aluminum alloy, and decrease its plastic deformation. As a result, the non-deformability of the alloy is improved effectively.

**Key words**: 7075 aluminum alloy; high pressure treatment; mechanical properties