

# 碳纳米管含量对汽车刹车片铝合金 显微组织和性能的影响

周大伟<sup>1</sup>, 李 飞<sup>2</sup>

(1. 永城职业学院 机电工程系, 河南永城 476600; 2. 浙江凯风新材料有限公司, 浙江杭州 314599)

**摘要:** 采用超声振动法制备汽车刹车片用CNTs/A356铝合金, 并研究了不同碳纳米管含量对铝合金硬度、孔隙率和耐磨性能的影响。结果表明, 随着碳纳米管含量的增加, CNTs/A356铝合金的 $\alpha$ -Al相晶粒尺寸和硬度先增大后减小, 孔隙率和磨损量先减小后增大, 过量的碳纳米管会发生团聚, 使得铝合金硬度变小、孔隙率变大、耐磨性变差。当碳纳米管含量为0.8%时, 铝合金的微观组织细化最明显, 碳纳米管未出现明显的团聚现象, 铝合金的硬度达到HV112, 孔隙率为0.81%, 磨损量为3.56 mg, 相比于基体分别增大了36.6%、降低了35.2%和57.7%。

**关键词:** 超声振动; 汽车刹车片; 碳纳米管; 硬度; 耐磨性

铝合金由于其优异的力学性能、机械加工性被广泛应用在工业生产各领域<sup>[1-4]</sup>, 例如汽车制造行业<sup>[5-6]</sup>。随着汽车轻量化的进程不断深入, 铝合金被大量运用在汽车零件中, 大到发动机、汽车车架, 小到刹车片等<sup>[7-10]</sup>。但铝合金较低的耐磨性能限制了其广泛应用, 因此很多研究人员将提升铝合金的耐磨性能作为研究的重点。

碳纳米管(CNT)具有优异的力学性能和结构稳定性, 通过在铝合金中引入碳纳米管增强相来提升铝合金的耐磨性能逐渐成为热点<sup>[11-12]</sup>。聂文君等<sup>[13]</sup>利用旋转摩擦挤压(RFE)法制备CNTs增强5A06铝基复合材料, 就其显微组织、显微硬度和耐磨性与基体进行了对比, 发现铝基复合材料的显微组织细化明显, 硬度明显增加, 摩擦系数和磨损率相比于基体材料分别降低了17.6%和34.7%, 磨损表面光滑, 存在塑性变形和少量犁沟, 磨损机制呈现为表面塑性变形和轻微的磨粒磨损。但采用直接添加CNTs的方式会造成烧损、团聚等问题, 本研究通过热挤压制备CNTs/Al中间合金, 并利用超声振动法制备碳纳米管增强汽车刹车片用铝合金, 研究了碳纳米管含量对铝合金微观组织、硬度、孔隙率和耐磨性能的影响, 为汽车刹车片用材料提供一种制备方法。

## 1 试验材料与方法

本研究利用超声振动制备汽车刹车片用铝合金, 原材料为A356铝合金(化学成分如表1所示)、纯铝粉和碳纳米管。首先, 将碳纳米管预先用酸浸泡24 h后, 再将纯铝粉和碳纳米管放置在真空烘箱内高温(250℃)烘干, 去除纯铝粉和碳纳米管粉末中的水分。为使碳纳米管更好地加入到铝合金中, 先利用纯铝粉和碳纳米管制备CNTs/Al中间合金, 通过中间合金制备, 将纯铝粉和碳纳米管在氩气保护中置入行星式球磨机中进行球磨, 球料比为8:1, 转速为200:1, 球磨好后利用热压机进行

表1 A356铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of A356 aluminum alloy

$w_B/\%$

Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Ti	Al
7.15	0.12	0.03	0.36	0.07	0.06	0.01	余量

作者简介:

周大伟(1984-), 男, 讲师, 主要从事机械设计制造及其自动化方向的教学和研究工作。E-mail: dwzhou1984@163.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

05-0610-04

基金项目:

2020年度浙江省重点研发计划(2020A01005)。

收稿日期:

2021-12-13 收到初稿,

2022-01-26 收到修订稿。

挤压成形,制成CNTs/Al中间合金后将其平均剪切成小段。用砂纸打磨去除铝合金表面的杂质和氧化层,再将CNTs/Al中间合金和A356铝合金锭放置在真空烘箱内预热至250℃,然后将A356铝合金电阻炉升温加热至720℃直到铝合金锭完全熔化,再一边加入CNTs/Al中间合金一边搅拌,在熔体凝固过程中施加超声振动,超声功率为1.2 kW,超声温度为605℃,超声时间为300 s,利用高能超声将CNTs均匀分散。超声结束后进行扒渣处理,最后将熔体倒入预热好的模具内,制备不同碳纳米管含量(0、0.4%、0.8%、1.2%)的汽车刹车片铝合金。

制备完成后,先将试样切割成小块制成金相试样,在光学显微镜和扫描电子显微镜下观察其微观组织,再利用HVS-1000A硬度计对其硬度进行测试,测试载荷为5 N,加载时间为10 s,每组试样取五个测试点数据,取平均值作为该试样的硬度值。将金相试样在室温下利用MMD-1摩擦磨损试验机进行磨损试验,试验采用单向滑销方法进行。每次进行磨损试验前,用砂纸将试样表面打磨光滑,并在超声波清洗设备中用无水乙醇清洗。在载荷为30 N和滑动速度为0.2 m/s下进行磨损试验10 min,利用扫描电子显微镜(SEM)对磨损表面进行形貌观察。观察前,使用超声波装置在乙醇中清洗5 min。每次试验前后使用阿基米德排水法称量试样的体积,获得样品的体积损失,并用此方法对试样的孔隙率进行测试。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 碳纳米管含量对铝合金微观组织的影响

图1是不同碳纳米管含量CNTs/A356铝合金的微观

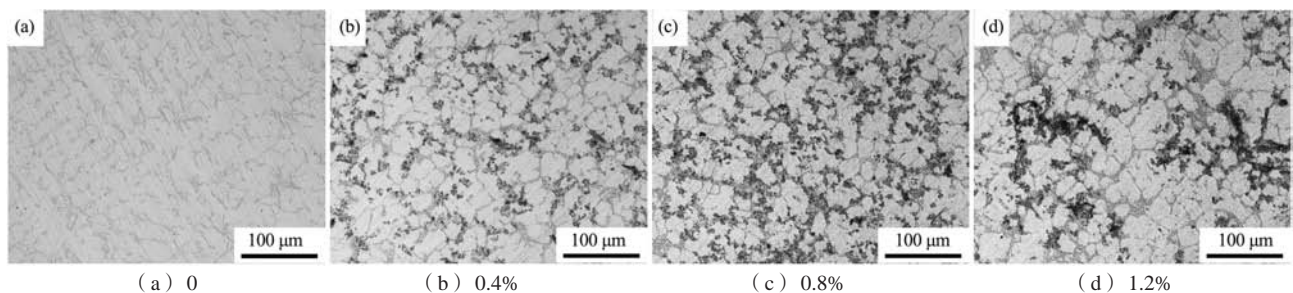


图1 不同碳纳米管含量CNTs/A356铝合金微观组织

Fig. 1 Microstructures of the CNTs/A356 aluminum alloys reinforced by different CNTs contents

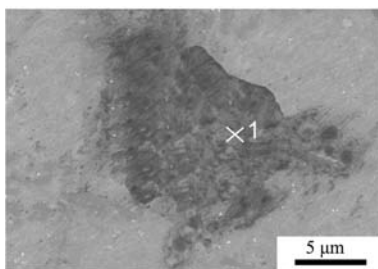


图2 CNTs/A356铝合金的扫描电镜图  
Fig. 2 SEM image of CNTs/A356 alloy

组织图。当未添加碳纳米管时(图1a),铝合金的微观组织较粗大, $\alpha$ -Al相的尺寸较大,Si相呈现为长针状。当碳纳米管含量达到0.4%时(图1b), $\alpha$ -Al相明显得到细化,呈蔷薇状,针状Si相消失,呈短棒状,黑色碳纳米管均匀分布在铝合金晶界周围。当碳纳米管含量为0.8%时(图1c),铝合金微观组织进一步得到细化, $\alpha$ -Al相的尺寸变小,呈椭球状,Si相和富铁相呈颗粒状,黑色碳纳米管增多,在晶界处均匀分布。当碳纳米管含量达到1.2%时(图1d), $\alpha$ -Al相的尺寸变大,黑色碳纳米管聚集在晶界处,发生团聚现象。当碳纳米管添加到铝合金中时,Al与碳纳米管发生界面反应,生成 $Al_4C_3$ 相<sup>[14]</sup>,有利于提高铝合金与碳纳米管之间的润湿性,碳纳米管有明显的细晶强化作用。

图2是碳纳米管含量为0.8%的CNTs/A356铝合金晶界处的扫描电镜图,对图中黑色物质的点1进行EDS能谱分析,发现其主要元素组成为C、Al、Si元素,判断晶界附近的黑色物质是碳纳米管,由此证明黑色碳纳米管均匀地分布在铝合金的晶界处。

为对铝合金微观组织的细化程度进行量化分析,利用IPP图像分析软件对 $\alpha$ -Al相的尺寸大小进行测量。图3显示了不同碳纳米管含量CNTs/A356铝合金的 $\alpha$ -Al相的尺寸变化,随着碳纳米管含量的增大, $\alpha$ -Al相的尺寸先变小后变大。当未添加碳纳米管时, $\alpha$ -Al相尺寸较大,约为65  $\mu\text{m}$ 。当碳纳米管含量达到0.4%时,CNTs/A356铝合金的组织细化, $\alpha$ -Al相尺寸变为42  $\mu\text{m}$ 。当碳纳米管含量为0.8%时, $\alpha$ -Al相尺寸细化为31  $\mu\text{m}$ ,约为未添加碳纳米管时的47.7%。当碳纳米管含量为1.2%时, $\alpha$ -Al相尺寸反而变大为47  $\mu\text{m}$ ,可见,过量的碳纳米管团聚不利于铝合金微观组织的细化。

的碳纳米管团聚不利于铝合金微观组织的细化。

### 2.2 碳纳米管含量对铝合金性能的影响

图4显示了不同碳纳米管含量下铝合金的硬度和孔隙率变化。随着碳纳米管含量的增大,CNTs/A356铝合金的硬度先增大后减小,孔隙率先减小后增大。当铝合金中未添加碳纳米管时,铝合金的硬度约为HV82,孔隙率为1.25%。当碳纳米管含量为0.4%时,CNTs/A356铝合金的硬度增大为HV95,孔隙率降低到

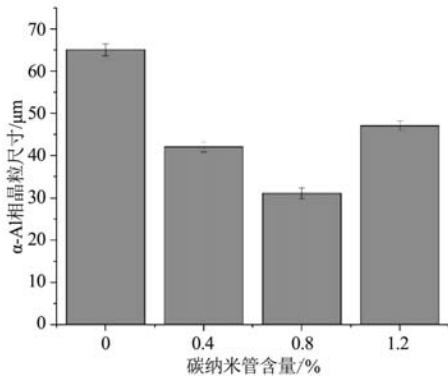
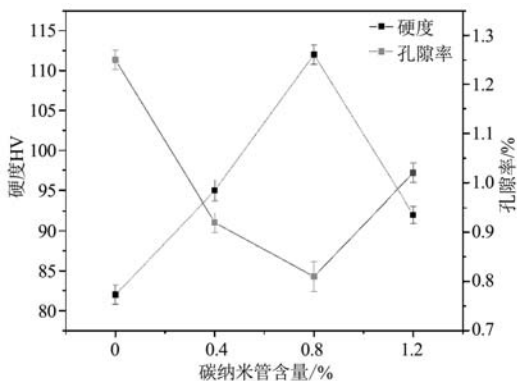
图3 CNTs/A356铝合金中 $\alpha$ -Al相晶粒尺寸Fig. 3 Grain size of  $\alpha$ -Al phase in CNTs/A356 aluminum alloy

图4 不同碳纳米管含量下CNTs/A356铝合金的硬度及孔隙率

Fig. 4 Hardnesses and porosities of the CNTs/A356 aluminum alloys with different CNTs contents

0.92%。当碳纳米管含量为0.8%时，CNTs/A356铝合金的硬度达到最大值HV112，孔隙率达到最小，降低到0.81%，此时碳纳米管对铝合金的硬度提升最大。但当碳纳米管含量增至1.2%时，CNTs/A356铝合金的硬度反而减小到HV92，孔隙率反而增大到1.02%。这说明适量的碳纳米管可以提高铝合金的硬度，降低铝合金的孔隙率，过量的碳纳米管团聚使得铝合金容易产生缺陷<sup>[15]</sup>，长针状Si相的消失有利于提高铝合金的硬度。

图5是载荷为30 N时不同碳纳米管含量下CNTs/A356铝合金的磨损量。随着碳纳米管含量的增加，CNTs/A356铝合金的磨损量先减小后增大，当碳纳米管

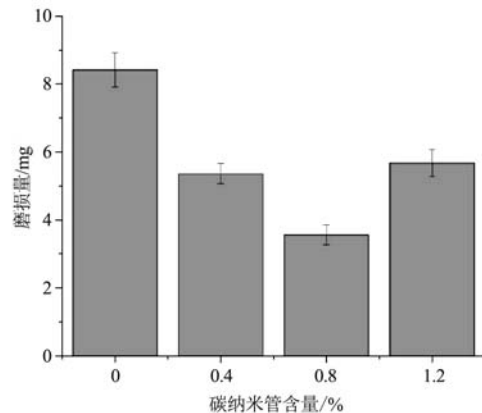


图5 不同碳纳米管含量下CNTs/A356铝合金的磨损量

Fig. 5 Wear losses of the CNTs/A356 aluminum alloys with different CNTs contents

含量为0.8%时，磨损量最小达到3.56 mg，相比于未添加碳纳米管铝合金磨损量8.42 mg降低了57.7%。

图6是不同碳纳米管含量的CNTs/A356铝合金的磨损表面形貌SEM图。当未添加碳纳米管时，铝合金的磨损形貌如图6a所示，磨损表面出现大片的磨损坑和较深的犁沟，呈现为粘着磨损机制，磨损量较大。当碳纳米管含量为0.4%时，如图6b所示，铝合金表面磨损程度减弱，出现较小的磨损坑和较浅的犁沟，以粘着磨损和轻微的磨粒磨损为主。碳纳米管含量达到0.8%时，磨损形貌如图6c所示，磨损表面只有较浅较窄的犁沟，呈现为明显的磨粒磨损，磨损表面得到明显的改善。如图6d所示是碳纳米管含量为1.2%的铝合金磨损表面形貌，此时的磨损表面有明显的犁沟，磨损坑重新出现，呈现为粘着磨损和磨粒磨损。不同碳纳米管含量的CNTs/A356铝合金耐磨性能出现这种变化的原因是：随着碳纳米管的加入，在铝合金中起到了细晶强化的作用，铝合金硬度得到明显提升，而硬度越高，铝合金的耐磨性能越好<sup>[16]</sup>。此外，碳纳米管也在铝合金中承载着外加载荷的破坏作用。当加入过量的碳纳米管时，碳纳米管在晶界处富集形成团聚，导致碳纳米管与Al之间的结合减弱，不能发挥碳纳米管的优势，铝合金的耐磨性能减弱。

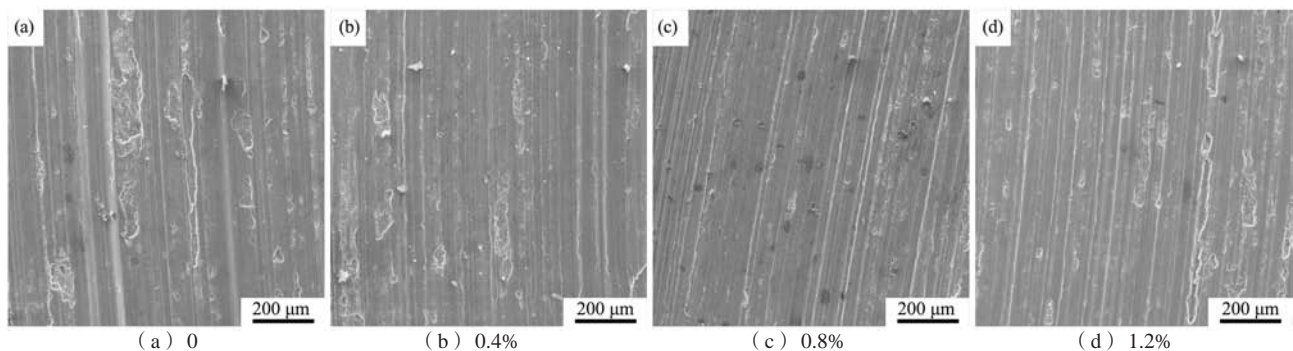


图6 不同碳纳米管含量CNTs/A356铝合金磨损形貌SEM图

Fig. 6 SEM images of wear morphologies of the CNTs/A356 aluminum alloys with different CNTs contents

### 3 结论

(1) CNTs/A356铝合金中, 黑色碳纳米管相均匀分布在晶界处。碳纳米管可以细化铝合金的微观组织, 随着碳纳米管含量的增加, 铝合金中 $\alpha$ -Al相晶粒尺寸先变小后变大, 长针状Si相消失。当碳纳米管含量为0.8%时,  $\alpha$ -Al相晶粒最小, 呈椭球状。

(2) 随着碳纳米管含量的增加, CNTs/A356铝合

金的硬度先增大后减小, 孔隙率和磨损量先减小后增大。当碳纳米管含量为0.8%时, CNTs/A356铝合金的硬度最大, 孔隙率和磨损量最小, 分别为HV112、0.81%和3.56 mg, 相比于A356基体增大了36.6%和降低了35.2%、57.7%, 磨损表面只有较浅的犁沟出现, 呈现为磨粒磨损。

#### 参考文献:

- [1] 彭靓, 孙文德, 钱翰城. 压铸铝合金及先进的压铸技术 [J]. 铸造, 2001, 50 (1): 14-17.
- [2] 刘兵, 彭超群, 王日初, 等. 大飞机用铝合金的研究现状及展望 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20 (9): 11.
- [3] 王占库, 吕朔. 铝合金轮毂的不同成形工艺及其力学性能 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (12): 2738-2743.
- [4] 姚元燊. 铝合金模板在高层房屋建筑施工中的应用 [J]. 建材与装饰, 2018, 510 (1): 15-16.
- [5] 郑晖, 赵曦雅. 汽车轻量化及铝合金在现代汽车生产中的应用 [J]. 锻压技术, 2016, 41 (2): 1-6.
- [6] 张炳荣, 田身军, 王宏远. 二次枝晶间距和热处理工艺对铝合金发动机缸盖力学性能的综合影响 [J]. 铸造技术, 2009 (10): 1367-1370.
- [7] 崔兰芳, 李洪, 周洪涛. 压铸铝合金变速箱壳体应力热裂分析 [J]. 铸造, 2016, 65 (8): 795-797.
- [8] 万里, 刘后尧, 吴树森, 等. 轿车底盘铝合金后副车架的压铸技术开发 [J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32 (2): 145-148.
- [9] 李宇飞, 冯志军, 李泽华, 等. 挤压铸造高强度铝合金汽车转向节铸件 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (12): 1308-1311.
- [10] 张银帅, 黄正华, 宋东福, 等. 铝合金汽车转向器压铸过程的数值模拟与产品组织分析 [J]. 铸造, 2017, 66 (6): 572-576.
- [11] BENYAMIN A, BEHZAD N, SAYED M, et al. Tribological behavior of A356-CNT nanocomposites fabricated by various casting techniques [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29 (10): 1993-2004.
- [12] MINA M H, AMAL M K, ABDLLA W. Friction and wear behavior of Al-CNT composites [J]. Wear, 2013, 307: 164-173.
- [13] 聂文君, 邢丽, 刘奋成, 等. 旋转摩擦挤压法制备CNTs/5A06铝基复合材料的摩擦磨损行为 [J]. 机械工程材料, 2019, 43 (4): 69-72.
- [14] CI L J, RYU Z Y, JIN-PHILLIPP N Y, et al. Investigation of the interfacial reaction between multi-walled carbon nanotubes and aluminum [J]. Acta Materialia, 2006, 54 (20): 5367-5375.
- [15] DENG C F, WANG D Z, ZHANG X X, et al. Processing and properties of carbon nanotubes reinforced aluminum composites [J]. Materials Science & Engineering A, 2007, 444: 138-145.
- [16] ALTNKOK N, OZSERT I, FINIDK F. Dry sliding wear behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC particle reinforced aluminum based MMCs fabricated by stir casting method [J]. Acta Physica Polonica, 2013, 124 (1): 11-19.

## Effect of CNTs Content on Microstructure and Properties of Aluminum Alloy for Automobile Brake Pads

ZHOU Da-wei<sup>1</sup>, LI Fei<sup>2</sup>

(1. Department of mechanical and electrical engineering, Yongcheng vocational college, Yongcheng 476600, Henan, China;  
2. Zhejiang Kaifeng New Material Co., Ltd., Hangzhou 314599, Zhejiang, China)

#### Abstract:

CNTs/A356 aluminum alloy for automobile brake pad was prepared by ultrasonic vibration, and the effects of different CNTs contents on the hardness, porosity and wear resistance of the aluminum alloy were studied. The results showed that with the increase of the CNTs content, the  $\alpha$ -Al phase size and hardness of the CNTs/A356 aluminum alloy increased at first and then decreased, and the porosity and wear loss decreased at first and then increased. Excessive agglomeration of the CNTs made the hardness smaller, the porosity larger and the wear resistance worse. When the content of the CNTs was 0.8%, the microstructural refinement of the aluminum alloy was the most obvious, and there is no obvious agglomeration of the CNTs. The hardness of the aluminum alloy reached HV112, the porosity was 0.81%, and the wear loss was 3.56 mg, which is 36.6% higher, 35.2% lower and 57.7% lower than those of the matrix.

#### Key words:

ultrasonic vibration; automobile brake pad; carbon nanotubes; hardness; wear resistance