

青年园地

表面机械研磨处理 5182 铝合金的组织 and 力学性能研究

徐颖宣¹, 孟祥晨², 李根², 金斌², 盖炳君², 谢庭祯², 刘勇², 吕坚^{3,4}

(1. 南昌大学 高等研究院, 江西 南昌 330031)

(2. 南昌大学 江西省高性能精确成形重点实验室, 江西 南昌 330031)

(3. 香港城市大学机械与生物医学工程系, 香港 九龙 999077)

(4. 香港城市大学深圳研究院 先进结构材料中心, 广东 深圳 518057)

摘要: 5182 铝合金经过表面机械研磨处理(SMAT), 可以克服铝合金表面性能的不足, 提高铝合金材料整体性能, 延长使用寿命。采用 X-射线衍射仪(XRD)及显微硬度、单轴拉伸等测试方法, 研究了使用表面机械研磨处理后 5182 铝合金的显微组织和力学性能特征。经过 SMAT 处理后的 5182 铝合金, 其表面晶粒细化至纳米级, 且沿试样表面到芯部方向形成纳米梯度结构; 其板材的整体硬度都有一定的提高, 且沿板材试样表面到芯部方向形成了梯度下降的状态; 随着表面机械研磨处理时间的增加, 5182 铝合金的抗拉强度和屈服强度强度也随之提升, 但在一定程度上牺牲了合金的塑性。

关键词: 铝合金; 表面机械研磨处理; 梯度结构; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG178 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2017)02-0122-05

Research on Microstructure and Mechanical Properties of 5182 Aluminium Alloy with Surface Mechanical Attrition Treatment

XU Yingxuan¹, MENG Xiangchen², LI Gen², JIN Bin², GE Bingjun²,
XIE Tingzhen², LIU Yong², LV Jian^{3,4}

(1. Institute of Advanced Studies, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

(2. Key Laboratory of Near Net Forming of Jiangxi Province, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

(3. Department of Mechanical and Biomedical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

(4. Centre for Advanced Structural Materials, City University of Hong Kong, Shenzhen Research Institute, Shenzhen 518057, China)

Abstract: Surface mechanical attrition treatment (SMAT) can overcome the shortcomings of the surface properties of aluminum, improve the overall performance of the material, and prolong service life, therefore, this work was carried out on 5182 aluminum alloys subjected to SMAT. Using X-ray diffraction (XRD), micro-hardness and uniaxial tensile test equipment systems, the authors study the characteristics of microstructure and mechanical properties of 5182 aluminum alloys with different grain sizes after SMAT. The surface grain of the 5182 aluminum alloy was refined to nanoscale after SMAT, and the gradient nanostructure was formed from the surface to the core of the sample; the overall hardness of the sample had a certain increase and it decreased in a gradient trend from the surface to the core; the tensile strength and yield strength of the 5182 aluminum alloy were increased, but the plasticity was sacrificed to a certain extent with the increase of the treatment time.

Key words: aluminum alloy; surface mechanical attrition treatment; gradient structure; microstructure; mechanical properties

收稿日期: 2016-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(51464034, 51671101); 江西省教育厅基金(GJJ150010); 国家重点研发计划(2016YFB0701201); 江西省自然科学基金青年重大项目(20161ACB21003); 江西省杰出青年人才计划(20162BCB23013); 国家基础研究计划(9500006); 香港联合研究基金(C4028-14G)

第一作者: 徐颖宣, 女, 1985 年生, 助理实验师

通讯作者: 刘勇, 男, 1980 年生, 教授, 博士生导师, Email: liuyong@ncu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.02.06

1 前言

铝合金具有密度低、比强度高、加工性能好等优异性能, 因此在航空航天、轨道车辆、交通运输、电气电子、能源动力、冶金化工、机械制造、电器家具等各个领域都获得了十分广泛的应用^[1], 随着汽车行业的迅速发展, 环境污染与能源短缺已经成为全球热门焦点。因此, 减轻汽车重量成为最直接有效减少能耗、提高燃料

利用率的方法之一,从而有效地减少环境的污染并缓解能源短缺问题^[2,3]。近30年以来,纳米材料因具优异的性能而备受关注,特别是对新一代高性能材料的研究、设计及开发的热捧。至今,获得纳米晶粒材料主要有两种途径:一是使得材料整体的纳米化,形成纳米晶粒材料;二是使材料的局部(通常是表面)实现纳米化^[4]。目前,实现整块纳米晶粒材料的方法通常有:惰性气体凝聚法(Inert Gas Condensation, IGC)^[5]、机械合金研磨结合加压成块法^[6]、非晶晶化法(Crystallization of Amorphous Materials, CAM)^[7]、电沉积法(Electrodeposition, ED)^[8,9]、溶胶-凝胶法(Sol-gel)^[10]、强烈塑性变形法(Severe Plastic Deformation, SPD)^[11]等。而材料表面纳米化包括表面涂层沉积纳米化、表面自身纳米化以及混合纳米化。本文采用的表面机械研磨处理就属于表面自身纳米化的一种。

表面机械研磨处理(Surface Mechanical Attrition Treatment,简称 SMAT)是通过高频、多方向的载荷作用下,使材料的表面通过强烈塑性变形而实现纳米化^[12]的一种表面自身纳米化方法。利用表面机械研磨处理已经成功地在纯铁^[13]、纯铜^[14]、钛^[15]、镁合金^[16]、锌合金^[17]、铝合金^[18]和不锈钢^[19]等材料上实现了表面纳米化。金属材料经表面机械研磨处理后,能够提高材料的硬度、强度和耐疲劳性^[20]等性能。相比其他表面纳米化工艺,表面机械研磨处理适用更加广泛,且实验条件简单,一般常温就可以进行,实验仪器简单,操作安全便捷,在各个领域都可应用;其次,经 SMAT 处理后,材料表面晶粒得到细化,致使材料的强度、硬度等都有一定的提升,但会在一定程度上损失材料的塑性,能够使得材料的综合力学性能得到提升;此外,SMAT 处理后,材料的基体与纳米结构表层拥有较好的结合度。

2 实验

5182 铝合金成形性能好、耐腐蚀、中等强度,其化学成分为 Al-4.0Mg-0.3Mn (wt%)^[21]。本实验选用的材料为 80 mm×60 mm 长宽连铸连轧态 5182 铝合金板材,板厚为 1 mm。选用直径 3 mm、总重为 20 g 的 AISI304 不锈钢材质小球,震动发生器的振动频率选用 20 kHz,处理温度为室温,板材在处理时,采用每单面处理 10 s 后,对另一面进行相同处理,直至板材两面都达到所设定的处理时间,本实验对板材设定两组不同 SMAT 处理时间,分别为 0 min 和 3 min。

采用 Philips 公司生产的 Xpert 型 XRD 对样品表面的物相和结构进行分析,在万能力学实验机上进行拉伸试验,硬度实验在 HXS-1000Z 型显微硬度计上进行,测试压力为 100 gf,保压时间 10 s。

3 结果与讨论

3.1 显微分析

图 1a 为未经 SMAT 处理的 5182 铝合金的显微组织图,可以看到有明显的竖直方向的轧制方向,其晶粒大小不一,而且没有呈现一定的规律,其晶粒的平均尺寸约为 7 μm ;图 1b 为经 SMAT 处理 3 min 后的 5182 铝合金的显微组织图,经 SMAT 处理 3 min 后,距 5182 铝合金表面 20~50 μm 区域的平均晶粒尺寸约为 3.1 μm ,距表面 50~80 μm 区域的平均晶粒尺寸约为 4.7 μm ,距表面 80 μm 至芯部区域的平均晶粒尺寸约为 6.4 μm 。同样可以看出,轧制方向是竖直的方向,晶粒也是呈现大小不一,但是,从材料的表面到材料的芯部,晶粒是逐渐变大的,呈现出梯度纳米结构,并且其梯度纳米结构层厚度约 20 μm 。

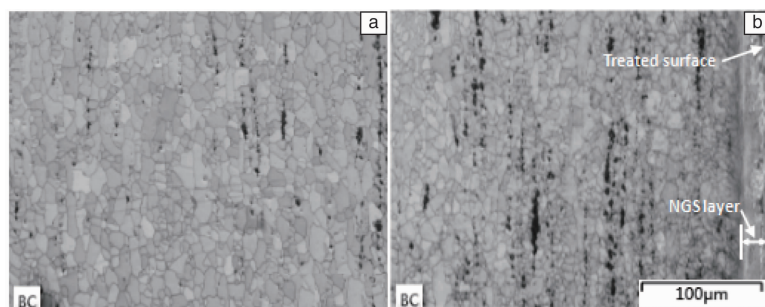


图1 SMAT 处理 5182 铝合金的微观组织:(a) 0 min, (b) 3 min

Fig. 1 Microstructure of the 5182 Al alloy with SMAT: (a) 0 min and (b) 3 min

图 2 给出了 SMAT 处理连铸连轧态 5182 铝合金沿板材深度方向的晶粒尺寸分布及其表面的 X 射线衍射谱图。如图 2a 所示,对比 SMAT 处理前的连铸连轧态 5182 铝合金的组织图,经 SMAT 处理 3 min 后,晶粒尺寸从表面至

芯部呈现梯度增长,在距表面 20~80 μm 之间形成了一个梯度结构,这是因为铝合金在受到外界严重的撞击以后,材料表面发生严重的塑性变形,这种应变从表面传到材料的芯部,使得材料的表面到芯部的晶粒尺寸不一。

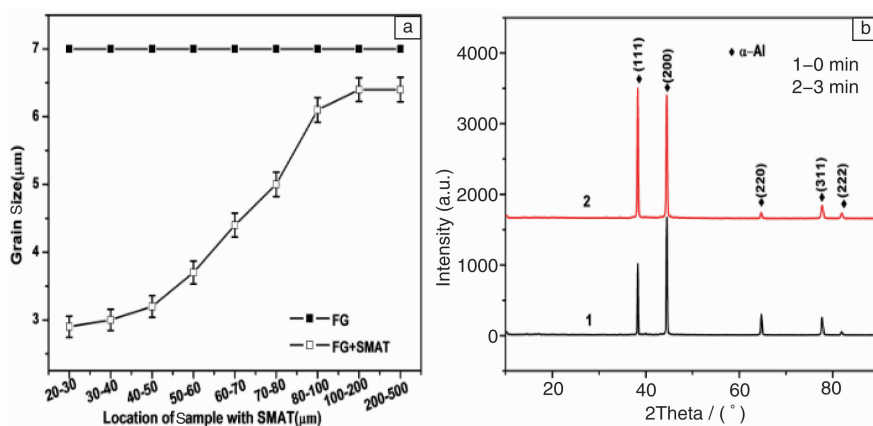


图 2 经过 SMAT 处理 5182 铝合金沿板材深度方向的晶粒尺寸分布(a)和表面的 X-射线衍射谱图(b)

Fig. 2 The grain size distribution along the depth (a) and the XRD patterns of the surface (b) of 5182 Al alloy after SMAT

3.2 XRD 分析

XRD 是研究纳米晶体材料微观结构的重要手段之一,从结果中可以得出纳米晶体相的一些结构参数^[22]。图 2b 给出了 SMAT 处理连铸连轧态 5182 铝合金表面的 X 射线衍射谱图。对 X 射线衍射图标定后,可以发现细晶和粗晶的 5182 铝合金 SMAT 处理前后都为 Al 单相合金,而且都只有面心立方结构所有的晶面(111)、(200)、(220)、(311)和(222)。SMAT 处理后,合金基体 Al 的衍射峰强度发生了明显的变化^[22]。

运用 Williamson-Hall 公式,见式(1),对 SMAT 处理后细晶和粗晶 5182 铝合金表面的晶粒度与微观应变进行了分析^[23]。

$$\beta \cos \theta = \frac{K\lambda}{d} + \eta \sin \theta \quad (1)$$

式中, β 是衍射峰半高宽, θ 为衍射峰角度, K 为谢乐常数(0.89), η 为微观应变,且 $\eta = 2\varepsilon$, λ 为 X 射线的波长($\lambda = 0.154056 \text{ nm}$), d 为实际晶粒尺寸。结果表明,SMAT 处理 3 min 后,铝合金的表面平均晶粒尺寸降低 82.17 nm(纳米级别),微观应变为 0.13%。

3.3 硬度测试

图 3 给出了 SMAT 处理 5182 铝合金沿板材厚度方向的硬度分布。未经 SMAT 处理时,5182 铝合金沿板材厚度方向分布均匀,约在 76 HV 左右。SMAT 处理 3 min 后,合金硬度明显提升,距合金表面 100 μm 左右处硬度最高,达 97 HV 左右,5182 铝合金硬度最大提升约为 39% 左右,且沿板材厚度方向同样呈现梯度分布。连铸连轧态 5182 铝合金的最表层(0~100 μm)不完全压实或含有缺陷,导致硬度下降,这与 Lei Wen 等^[24]的研究结果一致。

3.4 拉伸测试

图 4a~4b 分别给出了 5182 铝合金不同时间 SMAT 处理后的拉伸工程应力-应变和真应力-应变曲线。从图 4

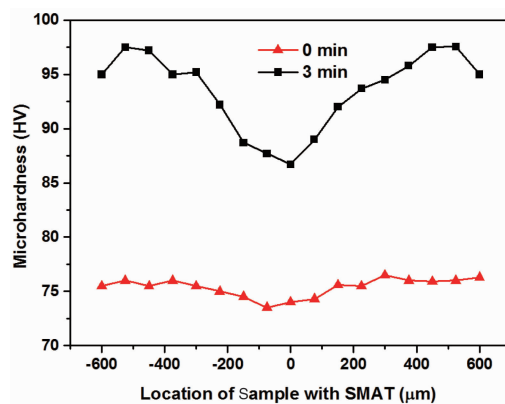


图 3 SMAT 处理 5182 铝合金沿板材厚度方向的硬度分布

Fig. 3 Microhardness distribution along depth of 5182 Al alloy with SMAT

可以看出,SMAT 处理后,合金的强度明显提升,但塑性却下降。

表 1 给出了 5182 铝合金 SMAT 处理前后的力学性能,可以看出未经 SMAT 处理的 5182 铝合金抗拉强度为 285.4 MPa,屈服强度为 131.2 MPa,断面延伸率为 29.4%。SMAT 处理 5182 铝合金 3 min 后,其抗拉强度为 325.5 MPa,屈服强度为 246.1 MPa,断面延伸率为 12%,较之 SMAT 处理前的合金,抗拉强度和屈服强度分别提升了 14.1% 和 87.6%,而断面延伸率下降了 59.2%。

表 1 SMAT 处理 5182 铝合金的力学性能

Table 1 Mechanical properties of 5182 aluminum alloy after SMAT for different time

SMAT duration (min)	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)
0	131.2	285.4	29.4
3	246.1	325.5	12

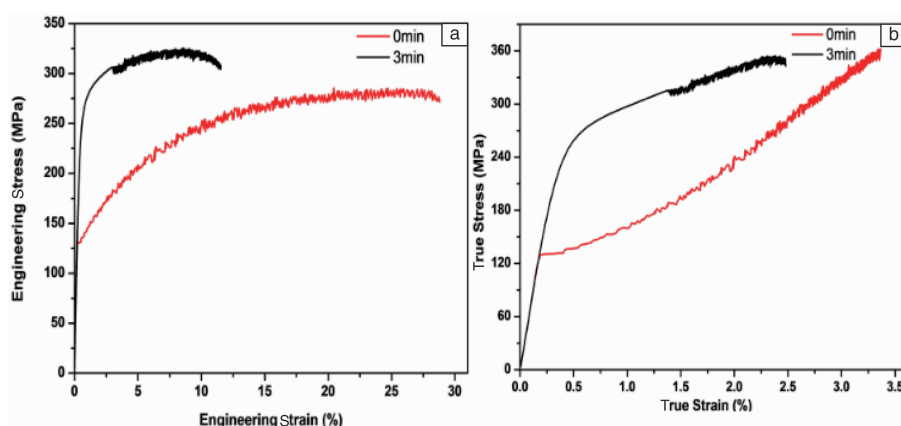


图4 5182 铝合金 SMAT 处理前后工程应力-应变曲线 (a) 和真应力-应变曲线 (b)

Fig. 4 Typical tensile engineering (a) and the corresponding true stress-strain curves (b) of 5182 Al alloy before and after SMAT

4 结 论

(1) 经过 SMAT 处理后, 5182 铝合金表面晶粒细化至纳米级, 且沿试样表面到芯部方向形成梯度纳米结构。

(2) 5182 铝合金在经过 SMAT 处理后, 板材的整体硬度都有一定的上升, 且沿板材试样表面到芯部方向形成了梯度下降的状态。

(3) 随 SMAT 处理时间的增加, 5182 铝合金的抗拉强度和屈服强度也随之提升, 但在一定程度上牺牲了合金的塑性。

参考文献 References

- [1] Hu Gengxiang (胡庚祥), Cai Xun (蔡珣). *Fundamentals of Material Science* (材料科学基础) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2002.
- [2] Miller W S, Zhuang L, Bottema J, et al. *Materials Science & Engineering A* [J], 2000, 280 (1): 37-49.
- [3] Wang Mengjun (王孟军), Huang Dianyan (黄电源), Jiang Haitao (姜海涛). *Heat Treatment of Metals* (金属热处理) [J], 2006, 31 (9): 34-38.
- [4] Zhang Shulan (张淑兰), Chen Huaining (陈怀宁), Lin Quanhong (林洪泉), et al. *Nonferrous Metals* (有色金属) [J], 2003, 55 (4): 5-8.
- [5] Birringer R, Gleiter H, Klein H P, et al. *Physics Letters A* [J], 1984, 102 (8): 365-369.
- [6] Aning A O, Wang Z, Courtney T H, et al. *Acta Metallurgica Et Materialia* [J], 1993, 41 (1): 165-174.
- [7] Lu K, Wang J T, Wei W D. *Journal of Applied Physics* [J], 1991, 69 (1): 522-524.
- [8] Á, Czirák, Tonkovics Z, Geröcs I, et al. *Materials Science & Engineering A* [J], 1994, s 179-180 (94): 531-535.
- [9] Erb U, El-Sherik A M, Palumbo G, et al. *Nanostructured Materials* [J], 1993, 2 (4): 383-390.
- [10] Yao Minqi (姚敏琪), Wei Yinghui (卫英慧), Hu Lanqing (胡兰青), et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* (中国有色金属学会会刊) [J], 2002, 12 (5): 833-836.
- [11] Valiev R Z, Islamgaliev R K, Alexandrov I V. *Progress in Materials Science* [J], 2000, 45 (2): 103-189.
- [12] Lu K, Lu J, *J. Mater Sci Tech* [J], 1999, 15: 193.
- [13] Wang Z B, Tao N R, Tong W P, et al. *Acta Materialia* [J], 2003, 51 (14): 4319-4329.
- [14] Zhang Y S, Han Z, Wang K, et al. *Wear* [J], 2006, 260 (9): 942-948.
- [15] Huang L, Lu J, Troyon M. *Surface & Coatings Technology* [J], 2006, 201 (201): 208-213.
- [16] Sun H Q, Shi Y N, Zhang M X. *Surface and Coatings Technology* [J], 2008, 202 (13): 2859-2864.
- [17] Zhang X, Wang H, Scattergood R O. *Acta Materialia* [J], 2002, 50 (50): 3995-4004.
- [18] Prakash N A, Gnanamoorthy R, Kamaraj M. *Materials Science and Engineering: B* [J], 2010, 168 (1): 176-181.
- [19] Bagherifard S, Guagliano M. *Engineering Fracture Mechanics* [J], 2012, 81: 56-68.
- [20] Arifvianto B, Suyitno, Mahardika M, et al. *Materials Chemistry & Physics* [J], 2011, 125 (3): 418-426.
- [21] Story J M, Jarvis G W, Zonker H R, et al. *SAE Technical Paper* [R], 1993.
- [22] Li Yang (李杨), Xu Jiujun (徐久军), Wang Liang (王亮). *China Surface Engineering* (中国表面工程) [J], 2010, 23 (3): 60-63.
- [23] Williamson G K, Hall W H. *Acta metallurgica* [J], 1953, 1 (1): 22-31.
- [24] Wen L, Wang Y, Zhou Y, et al. *Materials Chemistry and Physics* [J], 2011, 126 (1): 301-309.

(编辑 盖少飞)