

文章编号: 1004-0609(2003)02-0373-04

热挤压变形对亚微米 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料组织性能的影响^①

栾佰峰, 姜龙涛, 孔海宽, 武高辉

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 利用金相显微镜、扫描电镜、透射电镜和万能拉伸试验机等手段考察了粒度为 $0.3\ \mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 颗粒(体积分数为 26%) 增强 6061Al 复合材料在热挤压前后的显微组织及室温拉伸性能。结果表明: 以 10:1 的挤压比热挤压后复合材料组织的均匀性得到了明显改善, 显微组织变化上呈现位错由压铸态的近无位错转变为位错有明显增殖特征, 并促进了时效析出; 复合材料挤压材的抗拉强度、屈服强度和延伸率较压铸材普遍提高; 热挤压没有改变复合材料的断裂机制, 由于挤压后颗粒分布均匀等原因, 使复合材料的塑性得到改善。

关键词: 热挤压变形; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$; 金属基复合材料; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TB 331

文献标识码: A

近年来, 金属基复合材料(MMCs)的研究和开发均取得了较大进展, 其中陶瓷颗粒增强轻金属(Al, Mg, Ti)基复合材料由于低成本、高模量、高强度、高耐磨性、易于制造等优点^[1, 2], 在航天航空工业、汽车工业及其他产业中展现了很好的应用前景^[3, 4]。美、日等国已成功地将应用于汽车活塞连杆和制动盘零部件等民用领域, 其批量生产取得了显著的经济效益和社会效益。

塑性成形是颗粒增强金属基复合材料应用中的重要技术^[5-7]。热挤压是金属基复合材料塑性成形常用的手段之一, 可以改善颗粒增强金属基复合材料的微观组织和提高力学性能^[8-10]。因此, 作者对 Al_2O_3 颗粒体积分数为 26% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料进行了热挤压实验, 旨在研究热挤压对其微观组织和力学性能的影响, 为解决复合材料的塑性成形

问题提供技术依据。

1 实验

所用复合材料为 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{6061Al}$, 采用压铸法制备。 Al_2O_3 颗粒的尺寸为 $0.3\ \mu\text{m}$ 。所得复合材料在 $580\sim 600\ ^\circ\text{C}$ 以 10:1 的挤压比进行热挤压变形, 挤压速率为 $35\ \text{mm/min}$ 。挤压前后复合材料微观组织的透射电镜观察在 Philips CM-12、日立 H-800 上进行, 加速电压分别为 120 kV 和 200 kV。TEM 分析薄膜样品在 Gattarr-600 离子减薄机上减薄。拉伸试验在 Instron 1186 万能电子拉伸试验机上进行。图 1 所示为复合材料压铸材和挤压材试样尺寸, 加载速率为 $0.5\ \text{mm/min}$ 。利用 S-570 扫描电镜(SEM)观察拉伸断口形貌。

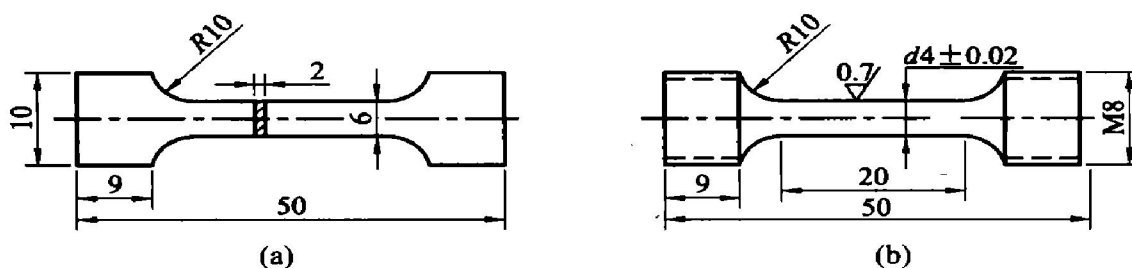


图 1 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料压铸材与挤压材的拉伸试样尺寸(单位: mm)

Fig. 1 Geometry of tensile specimens of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{6061Al}$ composites

(a) —As-die cast composite; (b) —Extruded composite

① 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000067206-3)

收稿日期: 2002-05-24 修订日期: 2002-08-10

作者简介: 栾佰峰(1973-), 男, 博士研究生。

通讯联系人: 栾佰峰, 博士研究生, 哈尔滨工业大学 433 信箱, 150001; 电话: +86-451-6418147; E-mail: Luanbofeng@yahoo.com.cn

2 结果与分析

2.1 金相组织

图 2 所示为 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{6061Al}$ 复合材料的压铸材和挤压材的光学显微组织。照片上显示的明亮区域为颗粒贫乏区,较暗的区域为颗粒富集区,这种状况的形成是由于复合材料制备过程中,铝液凝固前沿对颗粒团簇排斥作用引起的。因此从微观上看,在复合材料中存在较明显的分布不均匀的状况。挤压后颗粒分布趋于均匀,压铸材中的“岛状团聚”明显减少。

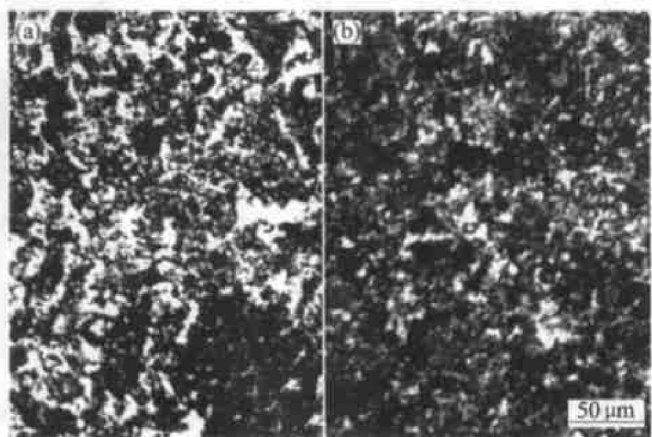


图 2 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{6061Al}$ 复合材料压铸材和挤压材的光学显微组织

Fig. 2 Optical microstructures of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{6061Al}$ composites

(a) —Before hot extrusion;
(b) —After hot extrusion

2.2 透射电镜组织

图 3 所示为 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{6061Al}$ 复合材料压铸材、挤压材和经 T6 处理后的显微组织照片。由观察可知,由于体积分数较低,复合材料压铸材中存在着颗粒稀疏区和密集区,压铸材中有少量的位错和析出相分布在颗粒较为稀疏的基体中;在颗粒密集区的基体中能观察到比较暗的衍射衬度,但位错很少。前期对亚微米级 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料压铸材显微组织研究结果表明^[11],细小的、近球形的 Al_2O_3 颗粒使得复合材料在铸造过程中的热错配应力变得十分均匀,难以形成强烈的应力集中,因此铸造材的基体中呈现位错稀少的特征。

热挤压后复合材料的显微组织发生较大的变化。首先,复合材料基体合金中引入了大量的位错,从图 3(b) 中可以看到,在基体的颗粒贫化区线性位错较多。其次可以观察到热挤压材经 T6 处理后的析出相呈长针状 (Mg_2Si) 和短棒状 (富 Mn 和 Fe 相),且数量明显增加 (如图 3(c) 所示),原因在于挤压过程中引入大量的位错,为析出相的形成提供了非均匀形核的场所和长大的原子扩散通道,导致析出相数量增多。挤压后的复合材料位错密度进一步增殖。

2.3 拉伸力学性能

图 4 给出了复合材料压铸材和挤压材经 T6 处理后的拉伸应力—应变曲线。可见热挤压对该复合材料的弹性模量影响很小,且压铸材和挤压材具有相似的变形规律。不同之处在于,压铸材曲线的线性阶段很短,在较小应力下就发生弯曲,说明压铸

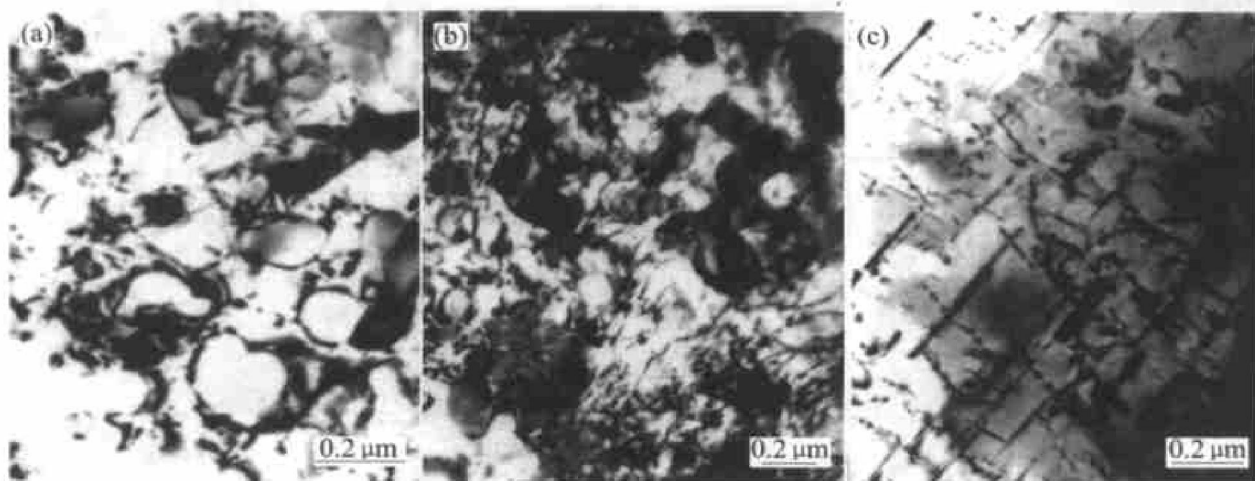


图 3 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{6061Al}$ 复合材料的压铸材和挤压材的透射电镜组织

Fig. 3 TEM micrographs of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{6061Al}$ composites

(a) —Before hot extrusion; (b), (c) —After hot extrusion

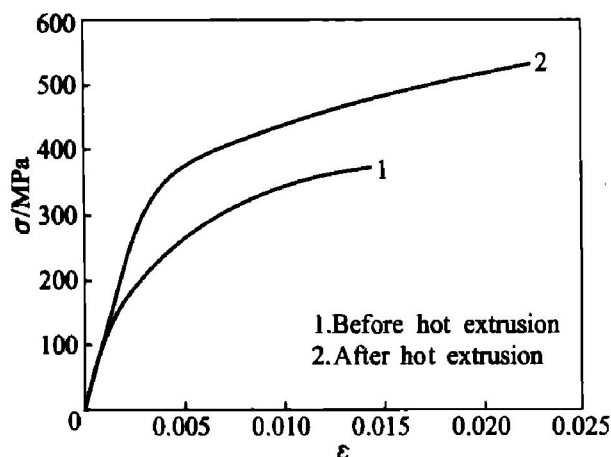


图 4 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{p}/6061\text{Al}$ 复合材料压铸材和挤压材经 T6 处理后的拉伸应力—应变曲线

Fig. 4 Stress—strain curves of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{p}/6061\text{Al}$ composites (T6) before and after hot extrusion

材在较低应力作用下就进入塑性变形阶段, 屈服强度和抗拉强度都较低; 热挤压使 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{p}/6061\text{Al}$ 复合材料的整体性能明显提高, 且挤压材的应力—应变曲线的线性阶段较长, 有较为明显的屈服拐点, 表明挤压材具有较高的微屈服抗力、抗拉强度、屈服强度和延伸率。结果列于表 1。

表 1 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{p}/\text{Al}$ 复合材料压铸材和挤压材的力学性能

Table 1 Mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{p}/6061\text{Al}$ (T6) before and after hot extrusion					
State	σ_b/MPa	E/GPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\sigma_{0.01}/\text{MPa}$	$\delta/\%$
As die cast composite	369.84	109.03	237.55	114.66	1.06
Extruded composite	539.37	113.94	393.25	279.25	1.71

图 5(a) 和图 5(b) 分别为复合材料压铸材和挤压材拉伸断口 SEM 照片。两者没有明显的颈缩现

象, 在宏观上皆呈脆性平断口特征。微观上可以观察到大量的细小韧窝和撕裂棱, 铝合金基体以撕裂型破坏为主, 可明显见到断裂过程中留下的裂纹。造成压铸材和挤压材断口形貌区别的主要原因与颗粒的分布密切相关。由前述光学显微组织观察可知, 压铸材中存在颗粒富集区和贫化区。以往对亚微米级 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{p}/\text{Al}$ 复合材料研究发现, 裂纹萌生于近界面基体中并在基体中扩展, 亚微米级 Al_2O_3 颗粒对裂纹的扩展阻力较小, 往往以颗粒“集团”的形式阻碍裂纹扩展并使裂纹绕过, 从而对基体铝合金起到增强的作用^[11]。因此, 压铸材中的颗粒富集区能够有效的阻碍裂纹的扩展, 而颗粒贫化区却为裂纹的扩展提供了通道, 不能使颗粒的增强作用得到充分发挥。但是, 热挤压变形有效地促进了颗粒在基体中的均匀分布, 提高了复合材料的组织致密度, 从而能够提高复合材料的抗拉强度。另外, 对复合材料 TEM 微观组织的观察发现, 经 10:1 挤压比的热挤压后, 复合材料中的位错密度明显提高, 形成位错缠结, 同时材料的致密度提高, 同样也对提高复合材料的抗拉强度起到很大的促进作用。

3 结论

1) 亚微米级 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{p}/6061\text{Al}$ 复合材料经过热挤压加工后, 可显著提高颗粒在铝合金基体中的分布均匀性和微观组织中位错增殖, 并促进析出相析出。

2) 与压铸材相比, 亚微米级 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{p}/6061$ 复合材料挤压材的弹性模量变化不大, 但抗拉强度、屈服强度和延伸率均有较大幅度的提高, 这与热挤压变形后的组织均匀性改善、以及基体强化等因素有关。

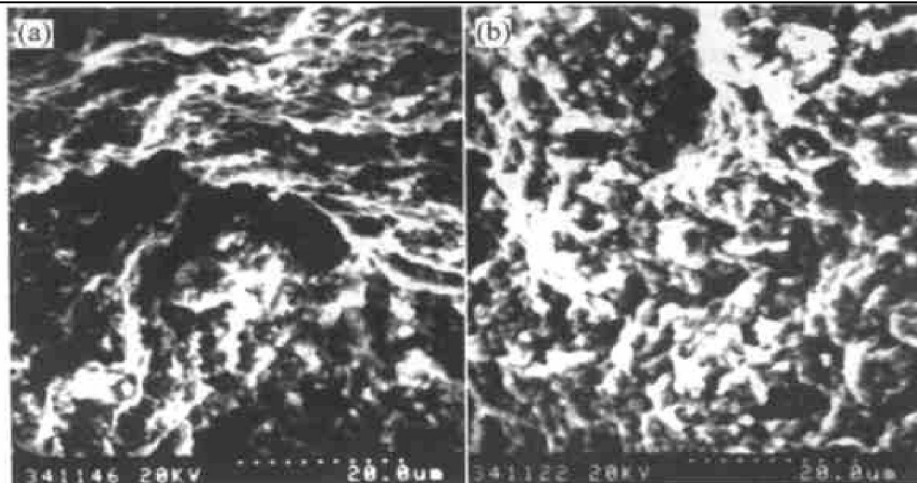


图 5 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{p}/6061\text{Al}$ 复合材料压铸材(a)和挤压材(b)拉伸断口形貌

Fig. 5 SEM of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{p}/6061\text{Al}$ composites before(a) and after hot extrusion(b)

REFERENCES

- [1] Lloyd D J. Particle reinforced aluminum and magnesium matrix composites[J]. *Int Met Rev*, 1994, 39 (1): 1 - 23.
- [2] Nair S V, Tien J K, Bates R C. SiC-reinforced metal matrix composite[J]. *Int Met Rev*, 1995, 30(6): 275 - 288.
- [3] Eliosson J, Somelstrom R. Applications of aluminum matrix composites[J]. *Key Eng Mater*, 1995, 104 - 107: 3 - 36.
- [4] Mangin C, Isaacs J A, Clark J P. MMCs for automotive engine applications[J]. *JOM*, 1996, 48(2): 49 - 51.
- [5] Imai T, Hong B D, Kojima S. High strain rate superplasticity of AlN particulate reinforced 1N90 pure aluminum composite [J]. *Scr Metall Mater*, 1995, 33(8): 1333 - 1338.
- [6] Mabuchi M, Iwasaki H, Higashi K, et al. Processing and superplastic properties of fine grained $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al-Mg-Si}$ composites[J]. *Mater Sci Technol*, 1995, 11(12): 1295 - 1299.
- [7] Murty S V S N, Rao B N. Instability map for hot working of 6061Al-10vol% Al_2O_3 metal matrix composite[J]. *J Phys D*, 1998, 31(22): 3306 - 3311.
- [8] 秦蜀懿, 张国定. 改善颗粒增强金属基复合材料塑性和韧性的途径与机制[J]. *中国有色金属学报*, 2000, 10(5): 621 - 629.
- QIN Shu-yi, ZHANG Guo-ding. Methods and mechanisms to improve ductility and toughness of particle reinforced metal matrix composites [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2000, 10(5): 621 - 629.
- [9] 吴树森, 中江秀雄. 铝基复合材料中颗粒在凝固界面的行为[J]. *金属学报*, 1998, 34(9): 939 - 944.
- WU Shu-sen, Hideo N. Behavior of particles at solidification interface of aluminum matrix composites[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1998, 34(9): 939 - 944.
- [10] WU Gao-hui, MA Serr-lin, ZHAO Yong-chun, et al. Suppression effect of fine Al_2O_3 particulates on aging kinetics in a 6061 matrix composite material[J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 1999, 9(4): 818 - 82.
- [11] 马森林. 超细颗粒增强铝基复合材料的微观组织与拉伸行为[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999.
- MA Serr-lin. Microstructure and Tensile Behaviors of Ultrafine Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1999.

Effect of hot extrusion deformation on microstructure and mechanical properties of sub-micro $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ composite

LUAN Bai-feng, JIANG Long-tao, KONG Hai-kuan, WU Gao-hui

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{6061Al}$ composite reinforced by Al_2O_3 particle with size of 0.3 μm (volume fraction 26%) before and after hot extrusion were investigated by OM, SEM, TEM and tensile test. The results show that, the microstructure of the composite after hot extrusion with the extrusion ratio of 10:1 becomes more uniformly, and compared with the microstructure characteristic of nearly free dislocation before hot extrusion, more dislocations are found in the microstructure. The ultimate strength, yield strength and elongation of the composite are also increased after hot extrusion. The hot extrusion do not change the fracture mechanism of the composite and the plasticity is improved due to the evenly distributed particles after hot extrusion.

Key words: hot extrusion deformation; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$; metal matrix composite; microstructure; mechanical properties

(编辑 陈爱华)