

强磁场处理固态铝基复合材料的组织和性能

王宏明, 彭琮翔, 李桂荣, 李沛思

(江苏大学, 江苏 镇江 212013)

摘要: 在不同磁感应强度下对固态 Al_2O_3 增强 7055 铝基复合材料进行了脉冲磁场处理。经脉冲磁场处理后, 铝基复合材料的位错密度随磁感应强度的增加呈上升趋势, 分析原因在于位错应变能增加和位错钉扎中心自由基对状态的改变。随着磁感应强度的提高, 晶内析出相的取向性减小, 数量和尺寸增加; 晶界析出相由连续状态转变为断开状态, 析出相数量减少、尺寸增大, 并出现了明显的无沉淀析出带。这些现象主要源于磁场作用增强了晶体内部溶质原子和空位的扩散; 畸变能增加、内应力的释放为析出相析出、长大提供了驱动力。力学性能随磁感应强度的增加, 呈现出先升高、后降低的趋势。在 $B=3\text{ T}$ 时, 抗拉强度、延伸率和显微硬度达到了 548.04 MPa、17.235% 和 1224 MPa, 较处理前试样分别提高了 10.3%、16.2% 和 20.7%。力学性能的改善主要源于位错密度增加造成的位错强化和第二相强化。

关键词: 铝基复合材料; 强磁场; 组织; 性能

中图分类号: TG135.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)05-1425-06

颗粒增强铝基复合材料质量轻, 同时具有综合优异的使用性能, 包括高比强度、高比刚度、高比模量、高耐磨、高耐腐蚀、低热膨胀(尺寸稳定性好)等, 因此在轨道交通、航空航天、军事装备、电子器件等领域有着广泛应用前景^[1]。由于具备诸多优异的性能, 颗粒增强铝基复合材料被认为是本世纪最具发展前景的先进材料之一, 受到了材料学科工作者的广泛关注。但研究同时也发现, 因为硬质颗粒的存在弱化了材料塑性变形能力, 复合材料的延展性不及基体材料, 较大程度地限制了复合材料在更广度和更深度层面的使用, 因此亟待寻找一条能提高复合材料塑性变形能力的有效途径以弥补其塑性变形能力差之关键缺陷。

研究发现, 利用脉冲磁场对掺杂 Ca 和 Eu 的离子晶体进行处理, 发现离子晶体的残余应力、点缺陷和塑性性能发生了松弛, 随松弛率的增加, 晶体内部位错的移动和微塑性流动率增加^[2]。在低温下对纯钨和钨纯金属进行磁场处理, 由于电子的散射作用, 杂乱分布位错的相互作用使得部分位错分解并出现集肤效应, 使得晶体的电阻发生改变^[3]。研究了磁场对孪生位错的影响, 发现有磁场存在时, 位错可以调整移动的角度, 实现最大的应力, 足以克服位错运动所需要的 Peierls 应力^[4], 使位错的移动变得更为容易。这些研究都证实了磁场可以改变原子和分子的排列、匹配和迁移等行为, 从微观尺度上影响到材料的组织^[5]。

目前, 脉冲磁场对颗粒增强铝基复合材料的影响研究较少, 基于磁场的特殊效应, 本实验以微纳尺度 Al_2O_3 增强 7055 铝基复合材料为研究对象, 对其进行常温下的脉冲强磁场处理, 研究位错密度及其形貌、析出相大小及数量等组织的演变规律, 研究脉冲磁场对颗粒增强铝基复合材料微观组织及力学性能的影响, 为用强磁场改善复合材料塑性变形能力提供理论基础。

1 实验

选用的 Al_2O_3 增强 7055 铝基复合材料是由 CeO_2 粉末与铝液经原位内生法制备得到的^[5]。图 1 给出了复合材料的初始态组织图。其中白色相为 Al_2O_3 颗粒,

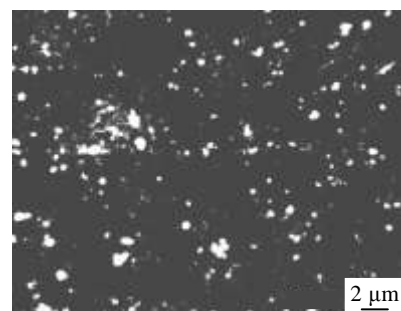


图 1 氧化铝强化铝基复合材料的初始态微观组织

Fig.1 Microstructure of alumina reinforced aluminum matrix composites at initial state

收稿日期: 2016-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(51371091, 51174099)

作者简介: 王宏明, 男, 1974 年生, 硕士, 副教授, 江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013, E-mail: ujswang@sina.com

平均尺寸为亚微米 ($<1 \mu\text{m}$), 部分处于纳米尺度, 均匀分布于铝基体中。

将凝固后的复合材料先进行热挤压处理, 挤压比为 16:1; 然后加工成直径为 15 mm、厚度为 0.5 mm 的小圆片试样和长度为 45 mm 的标准拉伸试样, 再进行热处理, 处理工艺为: 475 °C 固溶 2 h, 水淬, 120 °C 时效 24 h。热处理结束后, 将试样置于磁场处理设备中。图 2 为脉冲磁场处理示意图, 磁感应强度范围在 0~10 T 范围内连续可调可控。

调节输入到线圈中的电压和电流, 用特斯拉计测量样品托架处的磁感应强度。将样品固定在耐火材料托架上进行磁场处理, 主要调控参数是磁感应强度 (B), 本实验分别设定在 1, 3 和 5 T, 脉冲数固定为 30 个。将磁场处理后试样组织和性能与空白试样进行对比。将脉冲磁场处理后的样品抛光后, 冲成直径为 3 mm 的薄圆片, 经离子减薄后, 用 JEOL- 2100F 型透

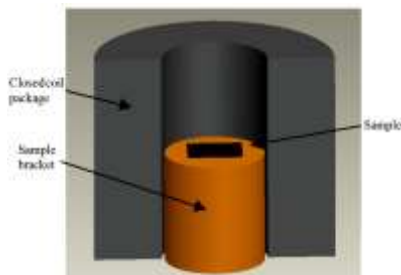


图 2 强磁场处理方法示意图

Fig.2 Schematic diagram of the high magnetic field treatment

射电镜 (TEM) 观察脉冲强磁场冲击处理后铝基复合材料的组织、结构。用 DWD-200 万能试验机对磁场处理后的铝基复合材料拉伸试样进行力学性能测试。

2 结果与讨论

2.1 脉冲磁场处理后复合材料的位错形貌

图 3 为不同条件脉冲强磁场处理后铝基复合材料的位错特征。其中图 3a 为未经磁场处理的铝基复合材料组织形貌, 即初始态组织。3b、3c、3d 的处理条件分别为 $B=1$ 、3 和 5 T, 此时脉冲数固定为 30。观察发现: 在磁场处理后的铝基复合材料内部位错呈现出高度缠结的形貌, 值得注意的是图 3d 内 ($B=5 \text{ T}$) 除缠结位错之外, 还可见大量线性位错。

从位错密度角度看, 随 B 从 1、3 T 增加到 5 T, 复合材料内部位错密度有明显增加, 5 T 时的位错密度要明显升高, 分析原因认为: B 值加大增加了磁场作用的能量, 有利于增加复合材料内部位错的形核和增殖。

从位错增殖机制分析, 在未经磁场处理的初始态组织中 (图 3a), 虽然位错的数量较少, 但在晶体内部存在大量的高应变区域, 这是在材料制备、加工过程中由于晶格畸变所产生的。高应变区域的存在, 会使材料内能增高, 微观应力增大, 体系的混乱度增加, 自由能升高, 使材料处于失稳状态。经脉冲磁场作用后, 能使材料内部的原子磁矩反复磁化, 导致原子的运动状态发生周期性的变化, 使原子的扩散增强, 内应力大量释放^[6], 为位错的形核提供了必要的驱动力。

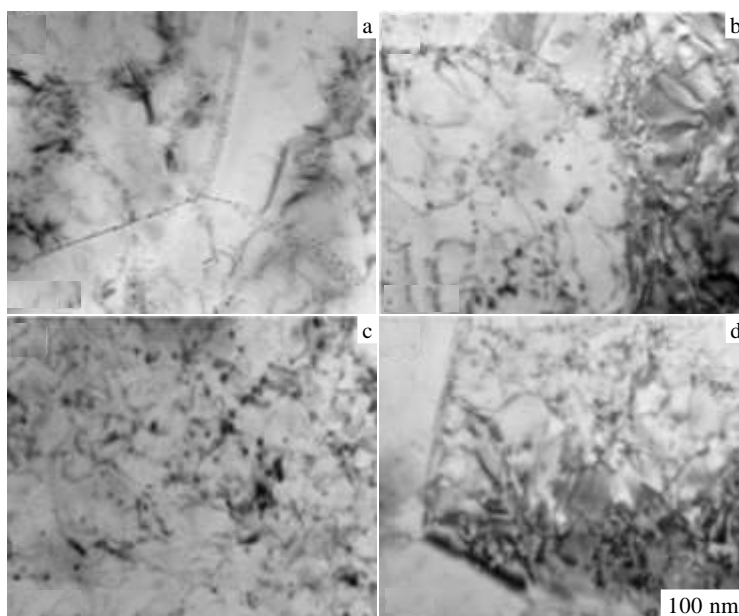


图 3 脉冲磁场处理下不同磁感应强度时铝基复合材料的位错特征

Fig.3 Dislocation characteristic of the aluminum matrix composites under magnetic field treatment with different magnetic induced intensity: (a) $B=0 \text{ T}$, (b) $B=1 \text{ T}$, (c) $B=3 \text{ T}$, and (d) $B=5 \text{ T}$

图 3a、3b、3c 均显示为晶界交汇处, 可见晶粒内部的位错增殖, 是随着 B 值增加而增加的。这是因为铝基复合材料内部组织结构复杂, 包含大量的物相、增强颗粒和晶体缺陷, 其内部能量分布极其不均匀, 而位错的增殖往往起源于更高的能量区域, 即具有高能量特征的晶界位置。

从位错应变能的角度对位错的增殖进行分析认为, 材料在制备、加工过程中, 由于存在剧烈的变形过程, 因此会有大量的势能存在于材料内部, 特别是在位错已经存在的区域。由于位错存在会导致其周围晶体发生不同程度的畸变, 储存大量的能量, 称为位错应变能。位错应变能主要包括位错长程应力场的能量和位错中心区域的应变能。当将晶体看作是均匀连续介质、内部无间隙且晶体内部应力、应变等参量是连续变化时, 则材料内部位错的应变能可以表示为^[7]:

$$E_m = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{r_1}{r_0} (1-\nu \cos^2 \theta) \quad (1)$$

其中, G 为拉梅常数, b 为柏氏矢量, ν 为泊松比 (取 0.33), θ 为柏氏矢量 b 与位错线交角, r_1 和 r_0 为位错线的内外半径。可以看出, 位错的应变能与 b^2 和 r_1 成正比。当有磁场存在时, 含有顺磁性中心的位错核心会被磁场磁化, 产生磁应力。所以在磁场和应力场耦合时, 应当考虑磁场与位错的交互作用。磁场条件下位错的应变能可进一步表示为^[8]:

$$E_H = \frac{bH_0 h_0 r_0}{8(1-\nu)} (\mu-1)(1-2\nu)(2\mu-1) \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (2)$$

其中, H_0 为外部磁场磁感应强度, h_0 为位错磁化产生的磁感应强度, μ 为位移向量。所以, 应力场和磁场同时存在时, 位错的应变能 E 综合表现为:

$$E = E_m + E_H = \frac{b}{4(1-\nu)} \left[\frac{bG}{\pi} (1-\nu \cos^2 \theta) + \frac{H_0 h_0 r_0}{2} (\mu-1)(1-2\nu)(2\mu-1) \right] \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (3)$$

存在外磁场时, 位错的应变能将增加, 然而位错的能量并不能以热量的形式在晶体内部消耗掉^[9]。因此, 位错应变能的增加, 会使得位错以及晶体变得不稳定, 位错间或位错与其他缺陷的交互作用会增强, 主要表现为两个方面: 第一是位错间的交互作用, 对位错的运动、增殖起抑制或者促进作用。同时, 脉冲磁场对原子的周期性作用, 能加快原子的扩散速率, 降低位错形核的动力学势垒^[10]。因此, 铝基复合材料在脉冲磁场的作用下, 会导致其内部位错间的交互作用增强、位错运动增强并发生增殖; 第二方面, 位错与障碍间的交互作用, 一般情况下, 位错与障碍相遇时, 由于位错具有的能量较低, 障碍会钉扎位错, 使

得材料的强度提高。但磁场存在时, 位错的应变能增加, 可以使位错从钉扎中心完成退钉扎或者直接通过障碍, 使得晶体内部可移动的位错数量增加。

从量子尺度分析位错增殖的原因, 位错运动过程中当逐渐靠近障碍时 (距离 $\leq 10^{-9}$ m), 会在位错与障碍间激发出电子, 从而使得位错与障碍形成一个自由基对^[11]。自由基对的能量取决于其间的电子结构、价电子以及电负性等, 同时也决定了钉扎能力的强弱。因此, 在 Al_2O_3 强化的 7055 铝基复合材料中, 大量微纳米强化相和合金析出相作为位错运动的障碍, 此时材料的塑性变形能力主要取决于障碍处的钉扎特征, 钉扎的松动是改善材料塑性变形能力的重要条件。

位错钉扎中心具有磁敏感性, 在存在磁场作用时, 将会表现出顺磁性特征^[12], 磁场在对钉扎中心起作用时, 会影响到自由基对电子的自旋状态, 从而改变自由基对的能量状态。有研究表明^[13], 磁场能促使自由基对状态由单重态 (singlet state, 简称 S 态) 转变为三重态 (triplet state, 简称 T 态), 即完成 S-T 转变。相比而言, S 态时位错越过障碍所需能量较高, 位错处于钉扎状态, 磁场作用下发生 S-T 转变后, 位错越过障碍所需能量降低, 位错退钉扎趋势明显, 位错运动能力增加, 此时材料内部位错密度增加, 材料塑性变形能力改善。

2.2 脉冲磁场处理后复合材料的晶内析出相

图 4 为不同条件下, 脉冲磁场处理后铝基复合材料内部的晶内析出相形貌, 其中图 4a 为初始态析出相形貌, 图 4b、4c、4d 对应的处理条件分别为 $B=1, 3, 5$ T。

从析出相的数量和尺寸分析, 经过磁场处理后析出相的数目增多, 并随着磁感应强度的提高, 析出相颗粒明显粗化长大。从析出相的排布和数量来看, 初始样中析出相呈现出一定的方向性, 是因为定向挤压处理造成了析出相的取向特征。与初始样对比, 磁场处理后析出相数目增多, 且随着磁感应强度的增加, 析出相的取向性逐减小, 析出相均匀分布于材料内部。通常来说析出相很难通过均匀形核, 主要是借助异质形核, 即借助于晶内缺陷或其他杂质。在 7055 铝基复合材料内存在的大量增强颗粒及异相原子有助于析出相发展异质形核, 同时磁场处理后晶内位错密度增加, 这都有利于析出相形核。当晶体内部析出相达到一定数量时, 从动力学角度来说, 新相的形核将变得更为困难, 从而使得析出相开始粗化。

2.3 脉冲磁场处理后复合材料的晶界析出相

图 5 为脉冲磁场处理条件下不同磁感应强度时复合材料晶界析出相形貌, 其中图 5a~5d 分别对应初始

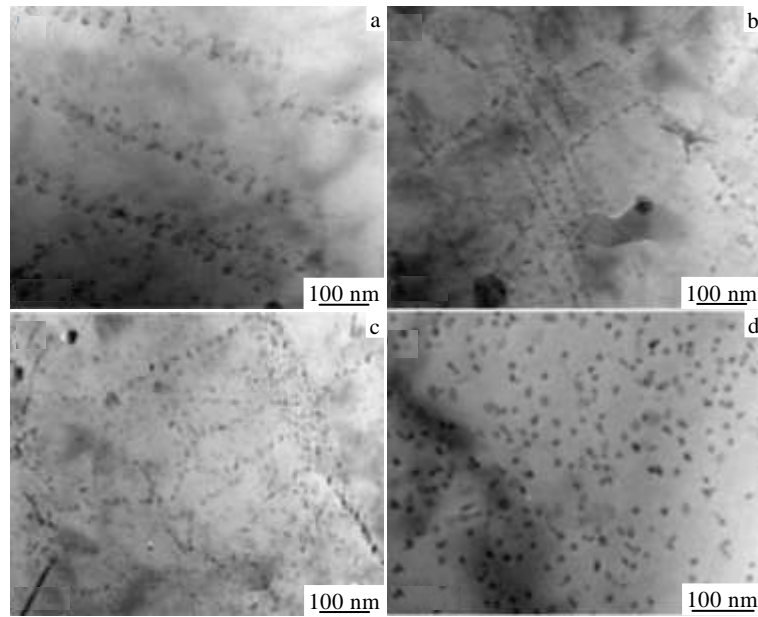


图 4 脉冲磁场处理下不同磁感应强度时铝基复合材料的晶内析出相特征

Fig.4 Intragranular precipitation characteristics of the aluminum matrix composites under magnetic field treatment with different magnetic induced intensities: (a) $B=0$ T, (b) $B=1$ T, (c) $B=3$ T, and (d) $B=5$ T

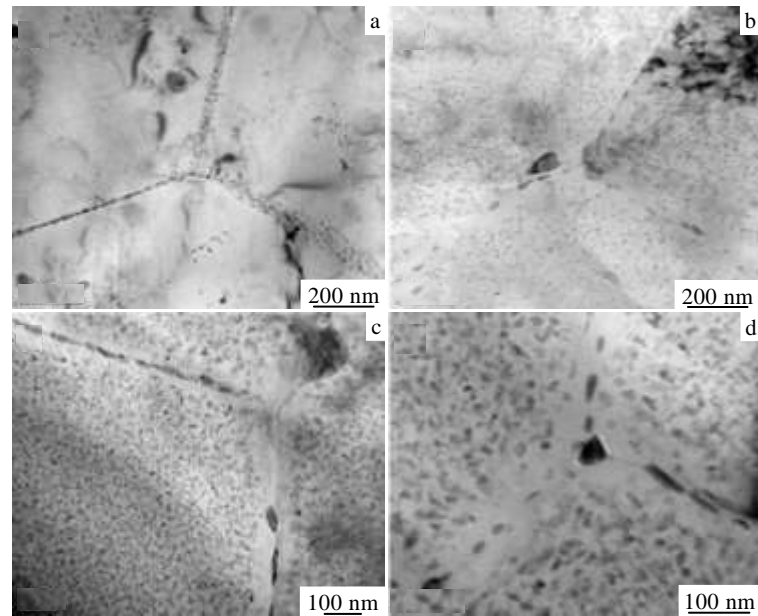


图 5 脉冲处理条件下不同磁感应强度时铝基复合材料的晶界析出相形貌

Fig.5 Precipitates at the grain boundary of the aluminum matrix composites under magnetic field treatment with different magnetic induced intensities: (a) $B=0$ T, (b) $B=1$ T, (c) $B=3$ T, and (d) $B=5$ T

样、 $B=1$ T、 $B=3$ T 和 $B=5$ T。可见初始样中晶界析出相呈连续状态，并且数量较多。经磁场处理后，晶界处的析出相呈断开状态，数量减小但尺寸增大。处理后材料晶界处出现了明显的无沉淀析出带。这是因为在脉冲磁场的作用下，晶界附近的溶质原子和空位的

扩散增强，使它们在晶界处聚集形成粗大的沉淀相，造成晶界附近的溶质原子和空穴贫化，局部出现无析出相特征。分析认为：磁场可以增强复合材料内部原子的扩散，减少材料制备过程中留下的空位和气孔等缺陷^[14]，提高材料致密度，使得材料晶格发生收缩，

畸变能增加^[15]; 同时, 磁场能使残存在材料内部的内应力得到释放, 所以能量将聚集在晶界及晶体内部, 这为析出相的析出及长大提供了驱动力。

2.4 脉冲磁场处理后复合材料的力学性能

脉冲磁场处理后, 铝基复合材料内部位错的数量和形态, 晶内晶界析出相的数量、大小及分布都发生了变化, 说明磁场作用后, 虽然试样的宏观尺寸未发生明显变化, 但是材料内部发生了微观组织变化和微塑性变形, 材料的力学性能也必然会产生相应的改变。

图6是脉冲磁场处理后复合材料力学性能与磁感应强度 B 之间的关系。从力学性能的结果可以看出, 随 B 增加, 抗拉强度、延伸率和显微硬度呈现出了先升高后降低的趋势, 但与初始态相比较, 都得到了不同程度的提高。在 $B=3\text{T}$ 时, 抗拉强度、延伸率和显微硬度达到了最大值, 分别为 548.04 MPa、17.235% 和 1224 MPa, 增幅分别为 10.3%、16.2% 和 20.7%。

前面分析了脉冲磁场处理后, 铝基复合材料内部

的位错形貌, 发现位错发生了增殖。在只考虑位错对材料力学性能的影响因素, 位错密度(ρ)与复合材料强度($\Delta\sigma$)之间的关系可以用式(4)表示^[16]:

$$\Delta\sigma \propto Gb\sqrt{\rho} \quad (4)$$

其中, G 为颗粒的剪切模量, b 为柏氏矢量。因此, 位错密度的增加, 在材料内部将形成位错强化。同时, 复合材料内部存在大量纳米和亚微米级的增强相, 它们弥散分布于基体中, 材料发生塑性变形时, 这些细小的增强相与位错发生交互作用, 阻碍位错的自由移动, 形成第二相强化, 从而使得材料的力学性能得到提高。值得注意的是, 与 3 T 的测试结果相比较, 在 $B=5\text{T}$ 时, 复合材料的力学性能出现了降低的现象。这是因为材料的力学性能并不是只取决于位错这一因素, 特别是对于多相增强的铝基复合材料, 其内部组织结构复杂, 位错密度的持续增加不一定会使得材料力学性能的持续增强。

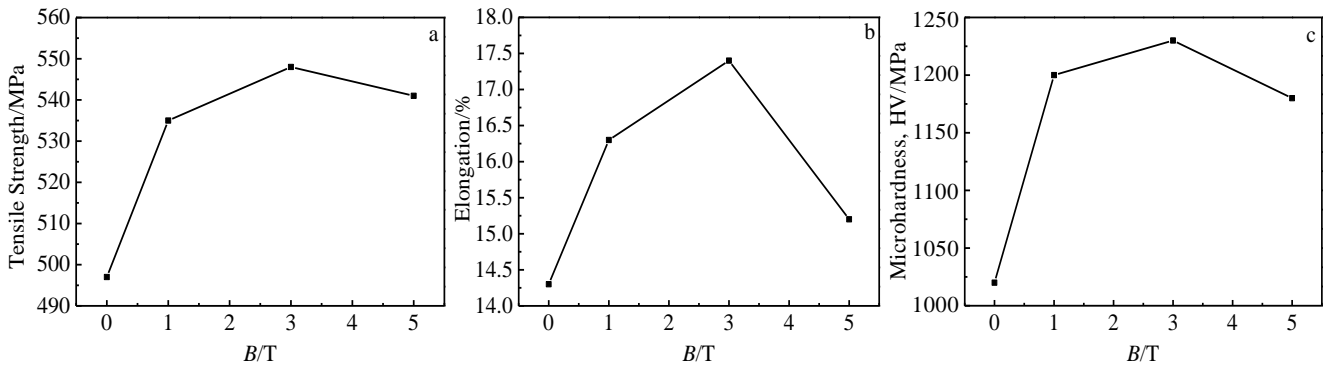


图6 铝基复合材料力学性能与磁感应强度的关系

Fig.6 Relationship between mechanical properties of composites and magnetic induced intensity B :

(a) tensile strength, (b) elongation, and (c) microhardness

3 结论

1) 对脉冲磁场处理后铝基复合材料的位错形貌进行了研究, 位错均呈高度缠结形态, 随磁感应强度增加位错密度增加。分析认为: 一是磁场增加了晶体内部位错应变能, 二是磁场促进了位错退钉扎。

2) 随磁感应强度增加, 晶内析出相的取向性减弱, 数量和尺寸增加, 晶间析出相由连续状态转变为断开状态, 析出相数量减少、尺寸增大, 并出现了明显的无沉淀析出带。分析是磁场增强了晶体内部溶质原子和空位的扩散, 析出相析出、长大的驱动力来源于畸变能的增加和内应力的释放。

3) 在磁感应强度为 3 T 时, 抗拉强度、延伸率和显微硬度达到了最大值, 分别为 548.04 MPa、17.235%

和 1224 MPa, 分别提升了 10.3%、16.2% 和 20.7%。力学性能的提升, 主要源于位错密度增加造成的位错强化和第二相强化。

参考文献 References

- [1] Goldbaum D, Chromik R R, Yue S *et al.* *J Thermal Spray Technol*[J], 2011, 20(1-2): 275
- [2] Golovin Y I, Morgunov R B, Dmitrievskii A A. *Materials Science and Engineering A*[J], 2000, 288(2): 263
- [3] Marchenkov V, Gornostyrev Y. *Materials Science and Engineering A*[J], 2001, 309(2): 67
- [4] Ferreira P J, Vander Sande J B. *Scripta Materialia*[J], 1999, 41(2): 121
- [5] Li Guirong(李桂荣), Wang Hongming(王宏明). *Electromag-*

- netic Processing of Materials*(材料电磁过程)[M]. Zhenjiang: Jiangsu University Press, 2014
- [6] Li G R, Wang H M, Yuan X T *et al. Materials Letters*[J], 2013, 99(19): 52
- [7] Lubarda V A. *International Journal of Solids and Structures*[J], 2003, 40(15): 3817
- [8] Liu Z, Fan T, Hu H *et al. Chin Phys Lett*[J], 2006, 23(1): 176
- [9] Vattre A J, Demkowicz M J. *Acta Materialia*[J], 2013, 61(14): 5179
- [10] Chao S Y. *Acta Physica Sinica*[J], 2004, 53(10): 3455
- [11] Molotskii V, Fleurov M. *The Journal of Physical Chemistry* [J], 2000(16): 3815
- [12] Yonenaga I, Takahashi K, Taishi T *et al. Physica B-Condensed Matter*[J], 2007, 401(4): 149
- [13] He L Z, Cao Y H, Liu X T *et al. Materials Characterization* [J], 2013, 84(10): 193
- [14] Kakeshita T, Fukuda T. *Science and Technology of Advanced Materials*[J], 2006, 7(4): 354
- [15] Li G R, Wang H M, Cai Y *et al. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*[J], 2013, 20(9): 896
- [16] Li Guirong(李桂荣), Wang Hongming(王宏明), Zhao Yutao(赵玉涛). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(S2): 253

Structural Evolution and Mechanical Properties of Solid Aluminum Matrix Composites Processed by High Magnetic Field

Wang Hongming, Peng Congxiang, Li Guirong, Li Peisi
(Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Al₂O₃ reinforced 7055 aluminum matrix composite was subjected to a pulsed magnetic field treatment with different induced intensities (*B*). Results show that the dislocation density in the composites increases when the *B* rises from 0, 1, 3 to 5 T due to the enhancement of strain energy of dislocation and the transition from S to T for the radicals between the dislocation and pinning center. Meanwhile, the orientation tendency of intragranular precipitates is lowered, together with the increase of amount and size. For the precipitates at grain boundary, the morphology has transformed from continuous to disconnected states. The precipitation amount decreases while the size increases. It is highlighted that the precipitation free zone can be found because the magnetic field accelerates the diffusion of solute atoms and vacancies. The increased distortion energy and internal stress facilitate the precipitating and growing process. The mechanical properties rise firstly and then decline. When *B* equals to 3 T, the tensile strength, elongation and micro hardness reach to 548.04 MPa, 17.235% and 1224 MPa, which are increased by 10.3%, 16.2% and 20.7%, respectively, compared to the initial sample without any magnetic field treatment. The strengthening mechanisms are attributed to the dislocation strengthening and second phase strengthening.

Key words: aluminum matrix composites; high magnetic field; dislocation; mechanical property

Corresponding author: Li Guirong, Associate Professor, School of Materials Science and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, P. R. China, E-mail: liguirong@ujs.edu.cn