

原位反应喷射沉积 7075 铝合金的塑性变形机理

Plastic Deformation Mechanism of *In-situ* Reactive

Spray Formed 7075 Al Alloy

刘慧敏¹, 呼努斯图², 由国艳¹

(1 内蒙古工业大学 材料科学与工程学院, 呼和浩特 010051;

2 内蒙古师范大学 物理与电子信息学院, 呼和浩特 010020)

LIU Huimin¹, HUNUSITU², YOU Guo-yan¹

(1 School of Materials Science and Engineering, Inner

Mongolia University of Technology, Huhehaote 010051, China; 2 Physics and

Electronic Information College, Inner Mongolia Normal University, Huhehaote 010020, China)

摘要: 采用原位反应喷射沉积法制备 $\text{TiC}_p/7075$ 铝基复合材料, 进行热模拟变形实验。研究了 $\text{TiC}_p/7075$ 铝基复合材料塑性变形后的微观组织与应力-应变曲线的变化规律, 探索其塑性变形机理。结果表明: 应力随变形温度的增加而下降, 当变形温度达到 400°C 后, 发生动态再结晶现象; 变形温度达到 450°C 后, 变形过程中的强化与软化效应保持平衡。

关键词: 原位反应喷射沉积; 7075 铝合金; 塑性变形

中图分类号: TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)09-0058-04

Abstract: The plastic deformation behavior of *in-situ* reactive spray formed 7075 Al alloy during hot compression deformation was studied by isothermal compression test at Gleeble 1500 thermal-mechanical simulator. The dynamic recrystallization mechanism during hot compress was examined using SEM and the true stress-strain curves. The results show that the flow stress decreases with the increase of deforming temperature, dynamic recrystallization occurs at 400°C of deforming temperature. When the deformation temperature increases to 450°C , the balance is remained between hardening and softening during hot compression deformation.

Key words: *in-situ* reactive spray deposition; 7075 Al alloy; plastic deformation

喷射沉积材料是非致密的多孔材料, 其中存在一定数量的微孔, 颗粒与颗粒之间没有形成良好的冶金结合^[1]。必须进行致密化和塑性变形才能获得较高的力学性能以用作结构材料。根据致密化的温度, 将热挤压工艺分为固态成形和固液态成形。近年来, 有关变形铝合金塑性变形方面的研究较多^[2-6], 但喷射沉积铝合金的塑性变形机理的报道并不多见。研究喷射沉积材料的致密化和塑性变形规律, 对于喷射沉积技术的产业化具有重要的指导意义。本工作采用 Gleeble 1500 热模拟机, 对原位反应喷射沉积 7075 铝合金进行热压缩变形, 探讨其固态成形过程中的塑性变形机理。

1 实验方法

热压缩变形采用 Gleeble 1500 热模拟机, 这是一种卧式实验机, 水平夹持试样, 根据设备功能, 将其分为三个系统: 计算机控制、热控制和力学控制系统, 用

计算机可实现两个闭环控制, 其中, 热控制系统采用电阻法加热试样, 能够满足合金所需要的加热速度快、加热温度分布较均匀和温度控制较严格的要求。试样的实际温度由焊接在试样中部表层的热电偶测量, 并反馈热控制系统。

图 1 为压缩变形示意图, 压缩变形完成后, 立即将试样淬火, 以固定其内部组织。

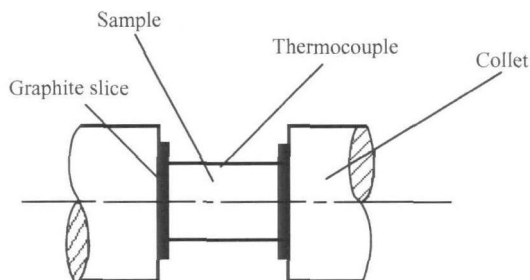


图 1 试样压缩变形示意图

Fig. 1 Schematic of compression deformation

实验用材料为采用原位反应喷射成形技术制备的 7075+ 2.91% TiC(体积分数, 下同)。试样为 $\phi 10\text{mm} \times 15\text{mm}$ 的圆柱体。影响压缩变形的工艺参数包括变形温度、加热速度、保温时间、变形速率及总应变量。变形温度为 300, 350, 400, 450 $^{\circ}\text{C}$; 加热速度选择为 30, 1 $^{\circ}\text{C/s}$ (后者对应距离规定温度仍有 50 $^{\circ}\text{C}$ 以内); 保温时间为 4min; 变形速率为 0.05 s^{-1} ; 总变形量 $\varepsilon = 0.7$ 。

2 实验结果分析

图 2 为原位反应喷射沉积 7075+ 2.91% TiC 铝合金(以下称其为原位反应喷射沉积 7075 铝合金) 的沉积态组织。Lavernia 等人对不同材料的喷射沉积组织进行的大量研究表明^[1], 尽管实验条件不同, 材料成分不同, 但其沉积态组织总是以等轴晶形态出现, 尺寸范围约为 10~ 50 μm 。在本工作中, 经统计得出喷射沉积 7075 铝合金的平均晶粒尺寸约为 10 μm 。可见合金的晶粒尺寸达到喷射沉积技术所制备的晶粒尺寸范围的下限, 从晶粒尺寸及形貌上, 合金的组织较理想, 但组织中仍然存在不容忽视的缺陷, 如大量的微孔。

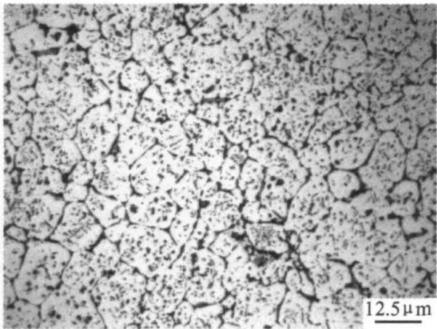


图 2 原位反应喷射沉积 7075 铝合金沉积态组织
Fig. 2 Microstructure of *in-situ* reactive spray formed 7075 Al alloy

图 3 为原位反应喷射沉积 7075 铝合金在 300, 350, 400, 450 $^{\circ}\text{C}$ 进行压缩变形后的横截面组织。由图 3 可知, 经过压缩变形后, 横截面组织仍然保持等轴晶组织特征, 但其晶粒尺寸有所增大。对应 300 $^{\circ}\text{C}$ 的变形温度, 晶界比较清楚, 随着变形温度的升高, 变形组织的晶界逐渐变得模糊, 同时晶粒内部及晶界上的分布物逐渐减少。这表明随着温度的升高, 固溶度也在增加。

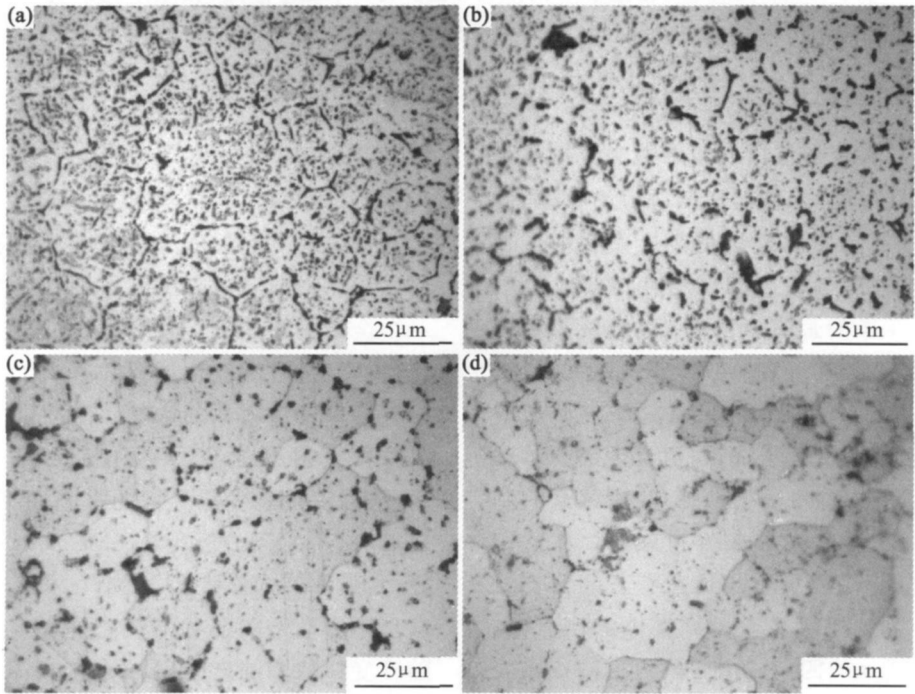


图 3 原位反应喷射沉积 7075 铝合金热压缩变形后的横截面组织 (a) 300 $^{\circ}\text{C}$; (b) 350 $^{\circ}\text{C}$; (c) 400 $^{\circ}\text{C}$; (d) 450 $^{\circ}\text{C}$
Fig. 3 Transverse section microstructure of *in-situ* reactive spray formed 7075 Al alloy after compression deformation at different temperatures (a) 300 $^{\circ}\text{C}$; (b) 350 $^{\circ}\text{C}$; (c) 400 $^{\circ}\text{C}$; (d) 450 $^{\circ}\text{C}$

图 4 为原位反应喷射沉积 7075 铝合金在 300, 350, 400, 450 $^{\circ}\text{C}$ 进行压缩变形后的纵截面组织。由图 4 可知, 合金组织具有明显的变形特征, 当变形温度为 300, 350 $^{\circ}\text{C}$ 时, 纵截面组织已经失去等轴晶特征, 但是

与三向受力条件下的热挤压变形组织有所不同, 即未形成明显的纤维组织。当温度升至 400 $^{\circ}\text{C}$ 后, 组织中出现了晶界, 说明在压缩变形过程中, 发生了动态的再结晶现象。动态的再结晶晶粒由于受到压缩变形力的

作用, 呈现非等轴晶特征: 在垂直于作用力的方向上, 晶粒尺寸变大, 而与作用力平行的方向上晶粒尺寸变

小。分析认为晶粒形貌的这种变化与试样的受力状态有关。

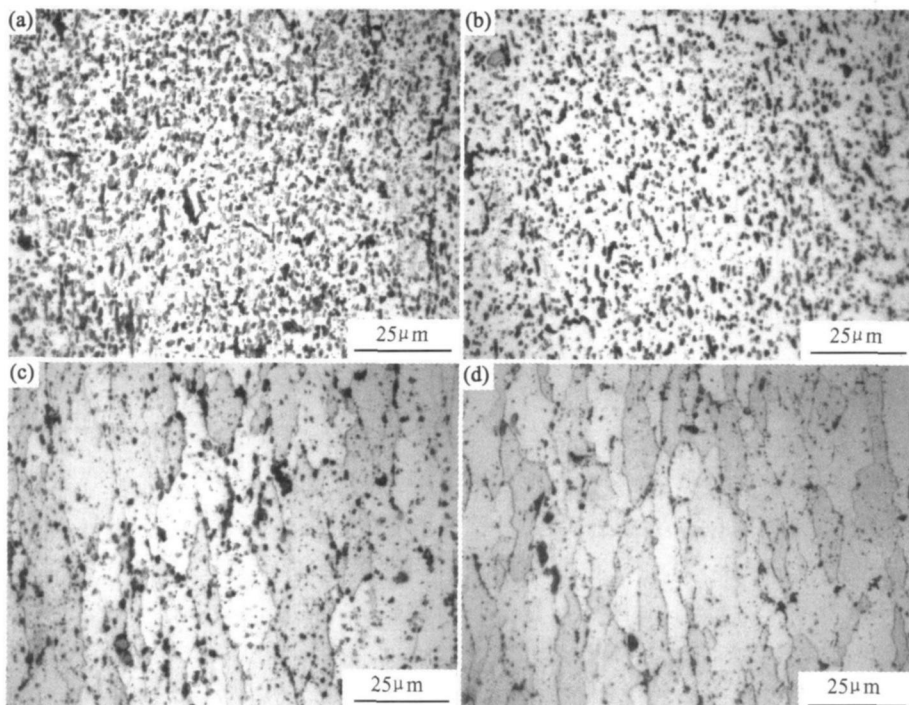


图 4 原位反应喷射沉积 7075 铝合金热压缩变形后的纵截面组织 (a) 300℃; (b) 350℃; (c) 400℃; (d) 450℃

Fig 4 Longitudinal section microstructure of *in-situ* reactive spray formed 7075 Al alloy after compression deformation at different temperatures (a) 300℃; (b) 350℃; (c) 400℃; (d) 450℃

根据压缩试样受力状态, 将其分为难变形区、大变形区和自由变形区。难变形区由于受摩擦力及压缩变形力的作用, 其受力特点为强烈的三向压应力状态, 变形最困难, 所以该区域的变形量也最小。大变形区处于试样体积的中心部位, 与垂直的作用力轴线成 45° , 是产生滑移和变形发展的最有利部位, 而且该体积中越靠近与作用力轴线成 45° 角处, 变形量也越大, 所以称之为大变形区。从应力状态看, 也是处于三向压应力状态, 但由于此区离接触面稍远, 阻碍其变形的体积也较小, 三向应力状态中静水压力较低, 故此区最有利于产生滑移变形, 而且变形发展条件也最好。在此区内, 晶粒质点由中心沿着难变形区和大变形区分界线附近流向四周。自由变形区靠近试样柱体的侧表面, 处于大变形区中心部分的四周。由于其更远离接触表面, 受接触摩擦力的影响最小, 又处于试样体积的边缘而没有其他部分的阻碍, 变形较为自由, 因此称为自由变形区。此区内变形较为平均, 其变形量介于大变形区与难变形区之间。从力学特征来看, 当试样刚开始受压缩时, 此区所受的应力状态为近似单向压应力, 此后, 随着变形过程的进展, 由于试样逐渐形成明显的腰鼓形, 造成周边不断扩大, 使试样的环向附近产生拉应力, 所以在变形过程中该区域试样承受的是两向拉应

力及一向压应力。也正是这种应力状态, 使得试样在压缩变形过程中容易产生纵向裂纹。图 3, 4 是对应于大变形区的部位。虽然处于三向压应力状态, 但平行于外加载荷方向的应力远大于其他两个方向的应力, 所以最终形成非等轴晶的再结晶组织。

金属材料热加工后的组织与性能受热加工时的硬化(强化)过程和软化过程的影响。而这两个过程又受到变形温度等因素的影响。图 5 中给出了不同变形温度条件下得到的应力-应变曲线。应力-应变曲线显示, 应力值随着变形温度的升高而减小, 在 300℃进行变形时, 最大应力值为 116MPa, 而变形温度到 450℃后, 其最大应力值降至 35MPa, 同时曲线呈现波浪形, 这是因为动态的强化与动态的软化过程并存所导致。随应变量的增加应力值的变化规律与变形温度有关, 变形温度为 300℃时, 随着变形量的增加, 应力迅速上升, 随后的变形过程中伴有一定的强化趋势; 当变形温度为 350℃时, 应力的上升几乎与变形同时进行, 未产生明显的加工硬化而直接进入稳态的应力状态; 从 400℃的变形温度开始, 屈服强化现象非常微弱, 应力-应变曲线基本变成一条水平线, 曲线的斜率变得很小, 到 450℃时几乎等于 0。这一结果与前面的组织特征是相吻合的。当变形温度达到 400℃后发生动态再结

晶,削弱了强化效果,使得应力-应变曲线的斜率下降。由于发生再结晶之前有回复过程,从应力-应变曲线的特征上推测,对应于 350℃ 的变形温度,已经发生了动态回复现象,抵消了变形初期的强化效应,使曲线呈现如图 5 所示的特征。

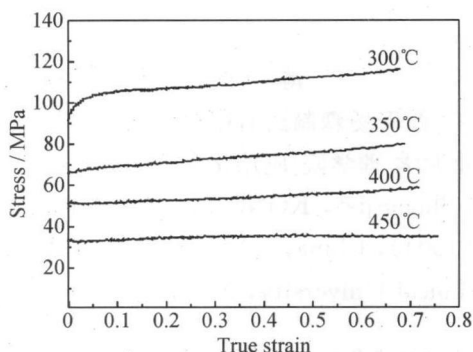


图 5 原位反应喷射沉积 7075 铝合金的真应力-应变曲线

Fig 5 True stress-true strain curve of *in-situ* reactive spray formed 7075 Al alloy

另外,曲线的斜率始终保持 ≥ 0 的特征,这一点与采用常规凝固方法制备的 7075 铝合金的情形是不同的^[3]。采用原位反应喷射沉积法制备的 7075 铝合金组织,属于快速凝固组织,加之 TiC 颗粒的细化作用^[7],如前所示其平均晶粒尺寸已经细化为 10 μm 左右。因此,合金在压缩变形过程中除了存在形变强化,还存在细晶强化和 TiC 颗粒的弥散强化作用,使得总体强化效果始终不低于动态回复与动态再结晶等的软化效果。应力随变形温度的升高而下降的主要原因是由于加热而使原子动能增加,原子振动的振幅增加,从而使位错和空位运动性提高,滑移系增多,增加合金的塑性^[5]。

3 结论

(1) 原位反应喷射沉积 7075 铝合金在压缩变形过程中存在稳态流变变形特征,稳态的流变应力随变形温度的升高而降低,在 0.05 s⁻¹ 的应变速率和 400℃ 的变形温度条件下,产生动态再结晶。

(2) 在 0.05 s⁻¹ 的应变速率的条件下,当变形温度进一步提高到 450℃ 后,变形过程中的强化(硬化)与软化效应保持动态的平衡。

参考文献

- [1] ERRIQUE J, LAVERNIA E J, YUE W. Spray Atomization and Deposition [M]. New York: JOHN WILEY & SONS, 1996. 368 - 374.
- [2] ZHOU Jian, ZHANG Ting-jie, ZHANG Xiao-ming, et al. The influence of strain rate and solution treatment on dynamic recrystallization for 7075 aluminum alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(6): 580- 584.

tallization for 7075 aluminum alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(6): 580- 584.

- [3] 刘文娟, 韩冰, 袁鸽成. 7075 铝合金高温等温变形的流变应力特征[J]. 广东有色金属学报, 2004, 14(1): 44- 47.
- [4] 万菊林, 孙新军, 顾家林, 等. Al-Cu-Mg-Zn-Cr 合金热扭转中连续动态再结晶机理[J]. 金属学报, 1999, 35(10): 1031- 1035.
- [5] 胡卓超, 张德芬, 黄涛, 等. 3104 铝合金的流变应力行为与动态再结晶[J]. 机械工程材料, 2005, 29(2): 6- 9.
- [6] 林高用, 张胜华, 胡泽豪. 2024 铝合金挤压过程动态再结晶问题的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2000, 23(1): 40- 44.
- [7] 刘慧敏, 郝斌, 杨滨, 等. 原位 TiC 颗粒细化喷射沉积 7075 铝合金组织的机理[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(4): 369- 372.

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目(200408020705)

收稿日期: 2007-01-12; 修订日期: 2007-06-29

作者简介: 刘慧敏(1972-), 女, 蒙古族, 副教授, 博士, 研究方向: 金属材料, 联系地址: 呼和浩特市新城区爱民街 49 号内蒙古工业大学材料科学与工程学院(010051)。

(上接第 57 页)

Cr₃C₂ particulate-reinforced Al₂O₃ composites [J]. J Mater Sci, 1996, 31: 4697- 4704.

- [2] LI DING-FWU, HUANG JOW-LAY, HUANG JIN-JAY, et al. The interfacial reaction in Cr₃C₂/Al₂O₃ composites[J]. J Mater Res, 1999, 14: 817- 823.
- [3] HUANG JOW-LAY, LIN HO-DON, JENG CHING-AN, et al. Crack growth resistance of Cr₃C₂/Al₂O₃ composites[J]. Mater Sci & Eng, 2000, A279: 81- 86.
- [4] 许崇海, 黄传真, 李兆前, 等. Al₂O₃/SiC/(W, Ti)C 多相复合陶瓷材料的研究[J]. 硅酸盐学报, 2000, 28(6): 538- 544.
- [5] 尹衍升, 张景德. 氧化铝陶瓷及其复合材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [6] 程兰征, 章燕豪. 物理化学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988.
- [7] 肖衍繁, 李文斌. 物理化学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2003.
- [8] 梁英教, 车荫昌. 无机物热力学数据手册[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993.
- [9] 孙德明, 刘立红, 鹿晓阳, 等. Al₂O₃/Cr₃C₂/(W, Ti)C 陶瓷材料的力学性能及微观结构[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(4): 411- 415.
- [10] BATEMAN C A, BENNISON S J, HARMER M P. Mechanism for the role of magnesia in the sintering of alumina containing small amount of a liquid phase[J]. J Am Ceram Soc, 1989, 72(7): 1241- 1246.
- [11] BENNISON S J, HARMER M P. Effect of magnesia solute on surface diffusion in sapphire and the role of magnesia in the sintering of alumina[J]. J Am Ceram Soc, 1990, 73(4): 833- 837.

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20050422032); 山东建筑大学博士基金资助项目(SJBS07007)

收稿日期: 2007-01-10; 修订日期: 2007-06-30

作者简介: 孙德明(1969-), 男, 副教授, 博士, 主要从事陶瓷模具材料的研究与开发, 联系地址: 山东建筑大学(250014)。