

# 工艺参数对半固态 Al-4Cu-Mg 合金力学行为的影响

Effect of Process Parameters on Mechanical Behavior of Semi-solid Al-4Cu-Mg Alloy

卢雅琳<sup>1,2</sup>, 黄维超<sup>1</sup>, 江海涛<sup>1</sup>, 李淼泉<sup>1</sup>

(1 西北工业大学材料与科学学院, 西安 710072;

2 江苏技术师范学院机械工程系, 江苏 常州 213000)

LU Ya-lin<sup>1,2</sup>, HUANG Wei-chao<sup>1</sup>, JIANG Hai-tao<sup>1</sup>, LI Miao-quan<sup>1</sup>

(1 College of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2 Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou 213000, Jiangsu, China)

**摘要:** 在热模拟实验的基础上, 研究了各工艺参数对半固态和供应态 Al-4Cu-Mg 合金变形力学行为的影响。研究结果表明: 在液-固温度区间变形时, 变形温度、应变速率对半固态和供应态 Al-4Cu-Mg 合金的流变应力峰值影响显著, 对稳态流变应力影响较小。当变形温度超过某一临界值后, 流变应力随变形温度的变化趋于稳定。在固相温度区间变形时, 半固态与供应态材料流变应力的变化趋势基本一致, 变形均为固相间的塑性变形。但供应态 Al-4Cu-Mg 合金的原始变形组织和半固态 Al-4Cu-Mg 合金的球状组织对变形的影响有所不同。

**关键词:** 半固态; Al-4Cu-Mg 合金; 热压缩变形; 力学行为

**中图分类号:** TG146.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2005)05-0011-04

**Abstract:** Effects of deformation process parameters, including deformation temperature and the strain rate, on mechanical behavior of the semi-solid Al-4Cu-Mg alloy and the as-received were investigated through isothermal compression. The experimental results show that effects of deformation temperature and strain rate on peak stress of the Al-4Cu-Mg alloy are significant, and inappreciable on steady flow stress during the semi-solid state. Flow stress decreases with the increase of deformation temperature and the decrease of strain rate. The stress-strain curves of the semi-solid Al-4Cu-Mg alloy are similar to those of the as-received at deformation temperature of 490 °C. However, the semi-solid Al-4Cu-Mg alloy with spheroid grains and the as-received alloy with irregular microstructure have different influence on mechanical behavior in the semi-solid state.

**Key words:** semi-solid; Al-4Cu-Mg alloy; isothermal compression; mechanical behavior

20 世纪 70 年代初, 美国麻省理工学院(MIT)的 Flemings 等<sup>[1]</sup> 研究人员开发了半固态成形技术(Semi-solid Metal Forming, 简称 SSM)。半固态成形技术是指通过控制固-液温度区间, 得到一种液态金属母液中均匀悬浮着一定固相成分的固液混合浆料的成形加工技术。半固态成形与传统的加工工艺相比, 成形时金属以半固态的形式存在, 容易成形且温度较低, 可以延长模具使用寿命, 提高制件精度与生产率, 并且制件可获得相对较高的综合力学性能。与传统塑性加工工艺相比, 半固态金属屈服强度低, 流动性好, 所需成形力小, 可一次成形复杂形状的制件。所以, 半固态成形工艺是一种高效、低耗的新兴加工工艺, 具有广阔的应

用前景<sup>[2,3]</sup>。

由于半固态合金具有特殊的性质, 其力学行为及变形机理与固态合金相比有所不同<sup>[4-10]</sup>。本工作分别采用供应状态的 Al-4Cu-Mg 合金和应变诱发激活法(SIMA)制备的半固态 Al-4Cu-Mg 合金作为实验材料, 在半固态温度和固态温度下进行热模拟压缩实验, 以研究不同工艺参数对其力学行为的影响。

## 1 实验

### 1.1 实验材料及半固态材料的制备

实验所用 Al-4Cu-Mg 合金的化学成分(质量分

数/%): Cu 4.1, Mg 0.64, Mn 0.54, Fe 0.37, Si 0.34, Zn 0.10, Ti 0.019, Al bal. 供应态 Al+4Cu+Mg 合金的微观组织如图 1a 所示。

将 15mm 25mm 的供应态 Al+4Cu+Mg 合金棒料在 60 吨万能材料实验机上进行 20% 的预压缩, 再将其在电阻炉中加热到 600 并保温 5min 后进行急冷, 即可得到具有球状晶粒的半固态坯料<sup>[11]</sup>。其微观组织如图 1b 所示。

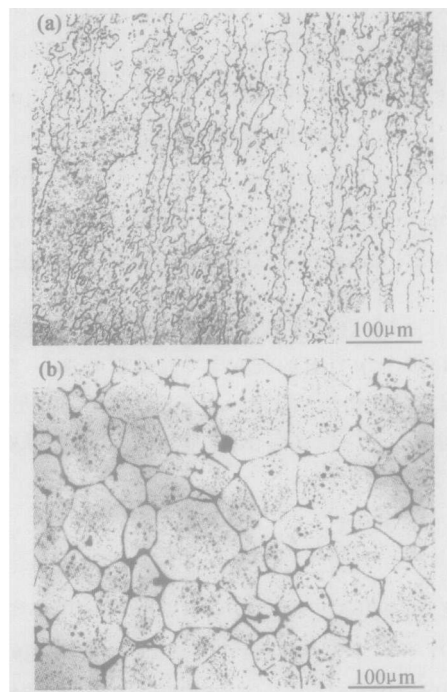


图 1 试样变形前的微观组织 (a) 供应态合金; (b) 半固态合金

Fig. 1 Microstructure of Al+4Cu+Mg alloy

(a) as-received; (b) semi-solid

## 1.2 压缩实验方案

将半固态和供应态的 Al+4Cu+Mg 合金加工成 8mm 12mm 的圆柱形试样, 在武汉钢铁研究所的 Thermecmaster-Z 型热模拟机上进行等温恒应变速率压缩实验。采用感应法加热试样, 温升速度 10 /s, 到温后保温 3min, 热压缩变形结束后试样以 30 /s 的速度进行冷却。实验中采用石墨作为润滑剂。

取变形温度( $T$ )为 540, 560, 580 ; 变形程度( $e$ )为 20%, 40%, 60%; 应变速率( $\dot{\epsilon}$ )为 1, 0.1, 0.01, 0.001  $s^{-1}$ 。此外还进行了半固态和供应态 Al+4Cu+Mg 合金 490 高温压缩实验。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 工艺参数对半固态 Al+4Cu+Mg 合金流变行为的影响

#### 2.1.1 变形温度

变形温度对半固态 Al+4Cu+Mg 合金流变行为的影响如图 2 所示。从图 2 可以看出, 半固态 Al+4Cu+Mg 合金热变形时, 变形温度越低, 流变应力越大。压缩刚开始(应变从 0~0.05)时, 流变应力随应变的增大急剧增加, 并很快上升到峰值(对应的应变为 0.01~0.03)。达到峰值以后, 随着变形的继续增大, 流变应力迅速下降, 当应变大于 0.05 以后, 流变应力随应变的变化趋于平缓, 即进入稳态。

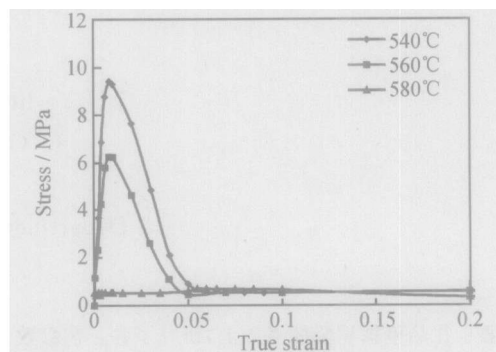


图 2 变形温度对半固态 Al+4Cu+Mg 合金流变应力的影响( $\dot{\epsilon} = 0.1 s^{-1}$ )

Fig. 2 Effect of deformation temperatures on flow stress of the semi-solid Al+4Cu+Mg alloy ( $\dot{\epsilon} = 0.1 s^{-1}$ )

由变形温度为 540, 560 的曲线图可见, 开始压缩时, 实验机夹头接触试样进行压缩, 应力随应变的增加而增加并快速达到峰值。由于晶界处低熔点相的熔化, 使得晶界处的强度降低, 加之在外载荷作用下液相不断地被挤出, 使得液固相容易发生分离现象, 流变应力急剧下降。另外, 由于半固态铝合金试样在液固两相区发生的塑性变形主要依靠球形微粒的相互转动和滑动来完成的, 变形力主要用来克服液相的流动阻力及球形固相微粒之间的摩擦阻力。所以变形温度越高, 液相分数就高, 相应的流变应力也就越小<sup>[12]</sup>。

当变形温度为 580 时流变应力随应变的变化不显著。流变应力无峰值出现, 几乎很快就进入稳定流动状态。这是因为变形温度升高, 材料变形抗力减小, 其中的液相比比例增加。当液相分数高于某一临界值时, 变形时液相的润滑作用增强, 固相颗粒之间运动时的摩擦力减小, 即: 液相的润滑作用大于摩擦力对变形力的影响, 故变形力随变形程度的增加而趋于平稳, 变形很快进入稳定流动状态。由图 2 可知, 变形温度在 560~580 间, 存在一个这样的温度临界值。

#### 2.1.2 应变速率

图 3 是半固态 Al+4Cu+Mg 合金在液-固温度区间变形时不同应变速率对流变应力的影响曲线。可以看出, 随着应变速率增大, 半固态铝合金的流变应力也随

之增大。其中峰值应力增幅较大而稳态应力增幅不显著。当应变很小时, 流变应力迅速达到峰值后随应变的增加快速下降, 应变大于 0.06 以后流变应力进入稳定流动状态。

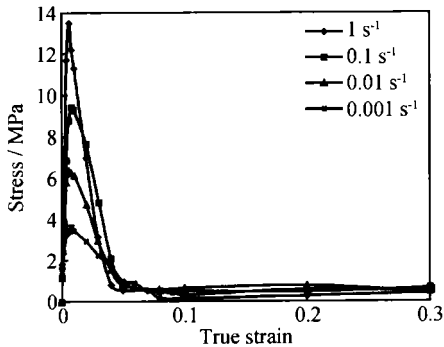


图3 应变速率对半固态 Al-4Cu-Mg 合金流变应力的影响( $T = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 3 Effect of strain rates on flow stress of the semi-solid Al-4Cu-Mg alloy ( $T = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

半固态合金在液固两相区变形时, 在外载荷作用下, 内部液体要向外流动, 球形固相颗粒要随之移动或转动, 实际上, 液体起到了润滑剂的作用。当应变速率低时, 液相有足够的时间浸润到固相之间, 使得液相的润滑作用增强, 固相间运动时的摩擦力减少, 变形容易进行, 故所需的变形力也小。反之, 当应变速率高时, 液相的润滑作用减小, 变形力也随之增大<sup>[13]</sup>。

2.2 工艺参数对供应态 Al-4Cu-Mg 合金流变行为的影响

2.2.1 变形温度

图4是供应态 Al-4Cu-Mg 合金在半固态温度区间变形时的应力-应变曲线。可以看出, 不同温度下应力-应变曲线的变化趋势基本一致, 变形温度越高, 流变应力越小。这主要是随着变形温度的升高, 一方面,

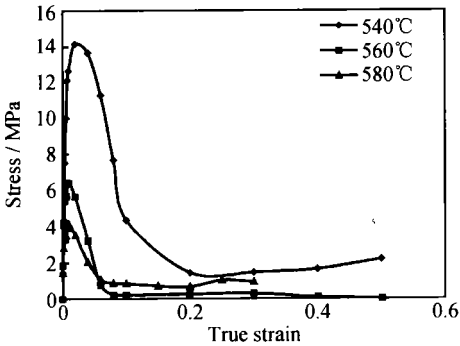


图4 变形温度对供应态 Al-4Cu-Mg 合金流变应力的影响( $\dot{\epsilon} = 0.1\text{ s}^{-1}$ )

液相不断增加, 液相的润滑作用增强, 使得固相间的运动变得容易, 变形力减小。另一方面, 原始的不规则变形组织逐渐向球状组织转变, 这种转变也使得固相间的运动变得容易进行, 变形力也随之减小。

比较图2和图4可以看出, 在相同变形温度下, 供应态合金比半固态合金的流变应力高, 主要原因是二者内部组织状态不同所致。半固态 Al-4Cu-Mg 合金为球状微粒组织, 而供应态 Al-4Cu-Mg 合金是不规则变形组织。尽管随着变形温度的升高, 供应态 Al-4Cu-Mg 合金的不规则组织向球状逐渐转变, 但与半固态合金球状微粒的运动相比, 供应态不规则组织的运动要困难得多, 所需的变形力也就大。

当变形温度为 580 °C 时, 图2和图4中的应力-应变曲线变化趋势有所不同。半固态材料变形曲线很平缓, 无应力峰值出现。供应态材料应力曲线仍有峰值出现, 但数值较小。由变化趋势可以看出, 随着变形温度升高, 应力峰值越来越小以至于接近稳态应力值。这说明不论供应态还是半固态 Al-4Cu-Mg 合金, 当变形温度高于某一临界温度值后, 流变应力几乎不出现峰值, 变形很快进入稳态。比较图2和图4可知, 供应态的临界温度要高于半固态的临界温度。即相同变形温度下, 半固态材料较供应态材料容易进入稳态变形阶段。

2.2.2 应变速率

图5是变形温度为 540 °C 时供应态 Al-4Cu-Mg 合金材料在不同应变速率下压缩变形的应力-应变曲线。由图可见, 随着应变速率增大, 流变应力峰值和稳态值较低应变速率下均有大幅度增加。原因是当合金加热到半固态温度区间时, 有液相出现, 当应变速率大时, 液相很容易被挤出, 液相的润滑作用减弱, 不规则固相间运动时的摩擦力增大, 导致固相不易产生运动, 从而使变形力增大。

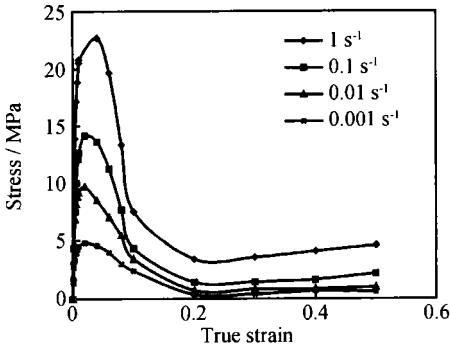


图5 应变速率对供应态 Al-4Cu-Mg 合金流变应力的影响( $T = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 5 Effect of strain rates on flow stress of the as received Al-4Cu-Mg alloy at 540

比较图 3 和图 5 可以看出, 供应态合金与半固态合金的应力-应变曲线也有所不同。当应变在 0~0.2 之间, 流变应力均由 0 增加到峰值后下降, 但对于供应态材料, 应力下降较图 3 缓慢。变形温度为 540 时二者虽均为液固两相共存的组织, 但由于固相形态不同, 所以对变形的影响也有所不同。

### 2.3 半固态和供应态 Al-4Cu-Mg 合金在固相温度区间的流变行为

Al-4Cu-Mg 合金的高温变形不同于液固两相区发生的塑性变形。图 6 是变形温度为 490、变形程度为 40%、应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  的半固态与供应态 Al-4Cu-Mg 合金的压缩变形曲线图。可以看出, 两条曲线的趋势大致相同。在变形初期, 应力随变形程度的增加而升高并达到最高值。经过峰值后, 流变应力稍有降低并出现了一个稳态特征, 类似于一般材料的高温变形。但供应态材料压缩时的流变应力明显高于半固态材料。

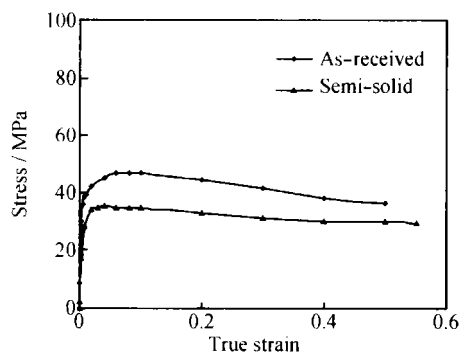


图 6 半固态和供应态 Al-4Cu-Mg 合金的高温变形( $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 6 True stress-true strain curve of Al-4Cu-Mg alloy at deformation temperature of 490 ( $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$ )

由于 490 处在 Al-4Cu-Mg 固相温度线以下, 所以变形时合金内部无液相产生。对于供应态 Al-4Cu-Mg 合金来说, 变形靠不规则晶粒间的相互运动来完成, 由于晶粒间的互相牵连使得变形较难进行, 故变形力大。对于半固态合金来说, 加热到 490 时, 虽然其中仍未有液相出现, 但合金内部是球状微粒组织, 压缩时, 主要靠球状颗粒之间的相互滑动和转动来完成, 球状颗粒间的运动较拉长不规则晶粒间的运动要容易得多, 所以变形较供应态合金容易。

## 3 结论

(1) Al-4Cu-Mg 合金在液固两相区变形时, 变形温度越高, 应变速率越小, 液相的润滑作用增强, 所需变形力越小。

(2) 在液固两相区进行压缩变形时, 半固态和供应态 Al-4Cu-Mg 合金变形的共同特征为: 当变形温度大于某个临界值时, 流变应力无峰值出现, 变形能很快进入稳态。但供应态的临界温度大于半固态合金变形时的临界温度。

(3) 供应态 Al-4Cu-Mg 合金在液固两相区进行压缩变形时, 材料内不规则变形组织向近球状组织的转变有利于改善其流动性能。

### 参考文献

- [1] FLEMINGS M C. Behavior of metal in the semi-solid state[J]. Metall Trans, 1991, 22A: 957-981.
- [2] 谢水生, 黄声宏. 半固态金属加工技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [3] 毛卫民, 赵爱民, 钟雪友. 半固态金属成形应用的新进展与前景展望[J]. 特种铸造及有色合金, 1998, 6: 33-36.
- [4] 杨雄飞, 康永林, 宋仁伯, 等. 60Si2Mn 半固态压缩变形组织演变[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10: 120-125.
- [5] VANHAFTEN W M, KOOL W H, KATERMAN L. Tensile behavior of semisolid industrial aluminium alloys AA3104 and AA5182[J]. Mater Sci Eng, 2002, A336: 1-6.
- [6] TURENNE S, LEGROS N. Mechanical behavior of aluminium matrix composite during extrusion in the semisolid state[J]. Metall Trans, 1999, 30A: 1137-1146.
- [7] KOPP R, CHOI J, NEUDENBERGER D. Simple compression test and simulation of an Sn-15% Pb alloy in the semi-solid state[J]. Mater Proc Technol, 2002, 6376: 1-7.
- [8] TZIMAS E, ZAVALIANGOS A. Mechanical behavior of alloys with equiaxed microstructure in the semisolid state at high solid content[J]. Acta mater, 1999, 47: 517-528.
- [9] KANG C G, YOON J H, SEO Y H. The upsetting behavior of semisolid aluminium material fabricated by a mechanical stirring process[J]. Mater Proc Technol, 1997, 66: 30-38.
- [10] KANG C G, CHOI J S, KIM K H. The effect of strain rate on macroscopic behavior in the compression forming of semi-solid aluminium alloy[J]. Mater Proc Technol, 1999, 88: 159-168.
- [11] JIANG H T, LI X L, LI M Q, et al. Fabrication and microstructure evolution of semi-solid Al-4Cu-Mg alloy by SIMA[J]. J Mater Eng Perf, 2003, 12: 249-253.
- [12] 郭钧, 丁志勇, 谢水生, 等. 半固态 Al-6.6% Si 合金的变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10: 115-119.
- [13] 田文彤. LC4 合金半固态坯 SIMA 生成及触变成形研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.

基金项目: 西北工业大学博士创新基金资助项目(200210); 江苏技术师范学院项目(KYY04040)

收稿日期: 2004-11-22; 修订日期: 2005-04-09

作者简介: 卢雅琳(1967-), 女, 副教授, 博士生, 主要从事半固态材料成形技术的研究。联系地址: 西北工业大学材料科学与工程学院 542#(710072)。