

Al-4Cu-Mg 合金的半固态变形及模型化研究

Deformation Behavior and Modeling of Semi-solid Al-4Cu-Mg Alloy

卢雅琳, 李森泉

(西北工业大学 材料与科学学院, 西安 710072)

LU Ya-lin, LI Miao-quan

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

摘要: 研究了变形温度和应变速率对 Al-4Cu-Mg 合金半固态变形行为的影响。实验结果表明: 变形温度和应变速率对峰值应力影响显著, 对稳态应力影响较小。在变形初期, 变形主要以液相的流动(LF)和液固相混合流动(FLS)为主, 在液相重新分布以后, 变形主要以固相粒子的相互滑移(SS)和固相粒子的塑性变形(PDS)来实现, 此阶段容易发生液固相分离现象。以半固态热模拟压缩实验为基础, 建立了反映半固态 Al-4Cu-Mg 合金变形行为的本构关系模型, 通过验证可知该模型具有较好的精度。

关键词: 半固态; Al-4Cu-Mg 合金; 变形行为; 模型化

中图分类号: TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)05-0043-05

Abstract: Effects of deformation temperature and strain rate on deformation behavior of semi-solid Al-4Cu-Mg alloy were investigated. The results show that deformation temperature and strain rate are significant effect on peak stress of Al-4Cu-Mg alloy rather than steady flow stress, which result from different deformation mechanism. At the beginning of compression, the deformation mechanism is liquid flow (LF) and flow of liquid incorporating solid particles (FLS). However, with the increasing of height reduction, sliding between solid particles (SS) and plastic deformation of solid particles (PDS) are dominating in the semi-solid compression. On basis of the experimental data of semi-solid Al-4Cu-Mg alloy, a model was established to describe the relationship between the processing parameters and flow stress, which shows good match with experimental data.

Key words: semi-solid; Al-4Cu-Mg alloy; deformation behavior; model

金属半固态成形技术自 20 世纪 70 年代诞生以来就一直受到人们的广泛关注。众所周知, 半固态合金的显著特性就是其流变性和触变性。当固相体积分数很低(< 0.2)时, 半固态浆料可作为一种牛顿黏性流体来处理。当固相体积分数增大到 0.2~0.6 时, 半固态金属浆料的性质可用固相微粒相对运动的流体动力学行为以及固相微粒的附聚行为来解释。当固相体积分数超过 0.6~0.7, 半固态浆料可以被认为是浸透着液体的多孔固体, 可以进行半固态挤压、半固态轧制等成形。半固态成形技术的关键之一在于对半固态合金变形行为的控制, 因此积极开展与其相关的理论与实验研究是非常必要的^[1-6]。

目前, 研究半固态合金变形行为的实验方法主要有压缩实验、剪切实验和拉伸实验。Ferrante 等^[7]对 Al-4Cu 合金进行了半固态压缩实验, 研究发现当应变

速率在某一范围内时, 稳态流动应力随固相体积分数呈指数增加。Iwasaki 等^[8]进行了半固态 Al-5% Mg 合金的剪切实验研究, 指出合金的变形行为与液相的分布密切相关。Haafte 等^[9]研究了 AA3104 和 AA5182 合金的半固态拉伸行为, 并建立了考虑液相体积分数的数学模型。

近年来, 数值模拟技术在半固态材料成形中的应用日益广泛, 为了提高数值模拟的精度, 建立精确描述半固态变形行为的本构关系模型显得尤为重要。在半固态金属本构关系建模方面, Gunasekera 等^[10]考虑了固相体积分数和应变速率敏感性两种情况提出了流动应力与应变速率之间的关系; Kiuchi 等^[11]提出了 K-Y-Y 模型; Martin 等^[12]采用两相本构模型描述半固态合金的变形行为, 用达西定律描述液体的流动, 用连续多孔体本构方程描述固体骨架的变形行为, 并将二

者相互耦合, 推导出了半固态下单向等温轴对称压缩的粘塑性本构方程; 潘洪平^[13]、闫洪^[14]等通过回归分析, 分别建立了半固态 AlSi7Mg 合金和半固态 AZ61 合金的本构关系。

本工作对半固态 Al-4Cu-Mg 合金进行了热模拟单向压缩实验, 分析了该合金的半固态变形行为, 并以此为基础, 建立了半固态合金单向压缩的粘-塑性本构关系模型, 可以为随后半固态触变成形过程的数值模拟及优化半固态合金成形工艺提供技术支持。

1 实验

1.1 实验方法

实验用材料为半固态 Al-4Cu-Mg 合金, 其主要化学成分如下(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 余量。半固态压缩实验过程如下: 将 8mm 12mm 的圆柱形试样在武汉钢铁研究所的 Thermecmaster-Z 型热模拟试验机上进行等温恒变速率压缩实验。采用感应法加热试样, 温升速度为 10 /s, 到温后保温 3min 以确保试样温度均匀。试样温度由焊在试样表面的热电偶测量, 并反馈给加热控制系统。压缩结束后试样以 30 /s 的速度进行冷却以保留压缩变形组织。为了降低试样与夹头之间的摩擦力, 在夹头与试样端面之间加垫了石墨片。

1.2 实验方案

Al-4Cu-Mg 合金的液固相温度由德国 NETZSCH 生产的 STA 409 CD 热分析仪测得, DSC 曲线如图 1 所示。

由图 1 可知该合金的液固相温度区间为 514.1~648.3 。本次实验取变形温度 (T) 为 540, 560, 580 ; 变形程度 (ε) 为 20%, 40% 和 60%; 应变速率 (ε̇) 为 1, 0.1, 0.01, 0.001 s⁻¹。

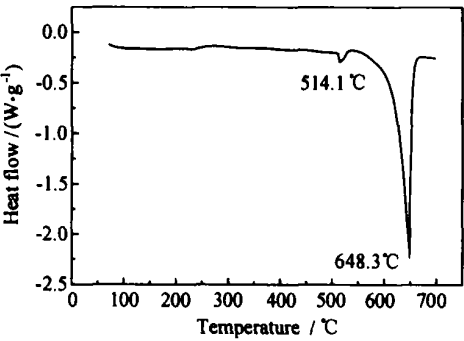


图 1 实验用材料 DSC 分析曲线

Fig. 1 DSC curve of the semi-solid Al-4Cu-Mg alloy

2 实验结果与分析

图 2 为半固态 Al-4Cu-Mg 合金压缩变形时, 不同变形温度下的流变应力曲线。图 3 为不同应变速率下的流变应力曲线。比较图 2 和图 3 可以看出, 在不同变形温度和应变速率下, 流变应力的变化趋势基本一致, 即在变形初期, 应力随应变的增加而快速增大, 并很快达到峰值; 随着变形的进行, 流变应力急剧下降; 之后进入稳态阶段。

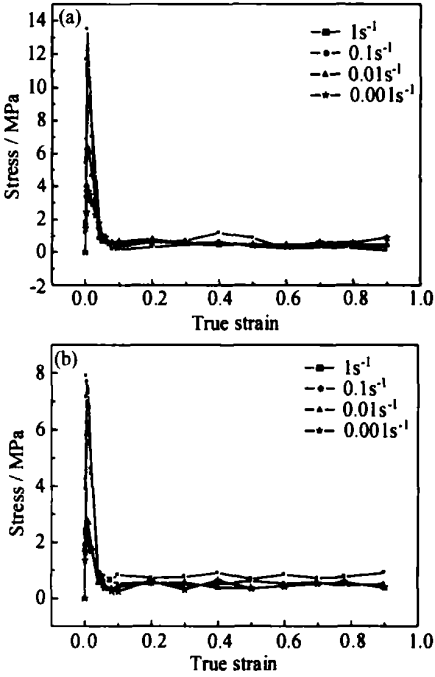


图 2 半固态 Al-4Cu-Mg 合金变形时不同变形温度下的应力-应变曲线
(a) 540 ; (b) 560

Fig. 2 Curves of stress-strain of Al-4Cu-Mg alloys during semi-solid compression at different deformation temperatures (a) 540 ; (b) 560

按照 Al-4Cu-Mg 合金半固态压缩变形时流变应力的变化趋势, 可将其分为三个阶段。第一阶段, 当应变很小 (< 0.06) 左右时, 流变应力随应变急剧增大, 并很快达到峰值。Al-4Cu-Mg 合金在半固态变形前经过了二次重熔, 其组织可看成近球状的固相颗粒和液相搭建成的骨架组成, 在压缩变形初期, 由于受压应力的作用, 液相由中心处的较大等静压力区域向外侧较小等静压力区域流动, 使得液相在宏观范围内重新分布, 此阶段主要的变形机制是液相流动及液固相混合流动。

第二阶段, 当应变超过 0.06 后, 流变应力随应变快速下降。随着变形的进行, 在外载荷的作用下, 由固

相颗粒搭成的结构骨架被破坏, 由于大变形区域的液相分数减小, 随后的变形主要是通过晶粒之间的相互滑移和固相粒子之间的塑性变形来实现的, 所以试样总的应变包括晶粒间相互滑动的剪应变和晶粒之间的塑性应变。其中, 晶粒之间的相互滑移主要是通过剪应力来实现的^[3, 15]。在晶界滑动的同时, 在某些晶界处受拉应力作用产生孔洞, 从而来调节晶粒间的滑移, 并且形成的孔洞很快沿晶界扩展, 导致液固相产生分离, 宏观表现为试样表面的破裂现象。此时流变应力急剧下降。

第三阶段, 当应变超过 0.1 以后, 流变应力进入稳

态。当试样出现裂纹后, 随着变形的继续进行, 由于液相不断被挤出, 应力基本上在稳态附近波动, 并持续一段时间。一般来说, 处于稳态的时间越长, 对成形越有利。

由图 2 不难看出, 变形温度对峰值应力影响较大, 对稳态应力影响较小。在半固态变形过程中, 随着变形温度的升高, 合金中的液相体积分数增大, 变形时, 液体裹着固相颗粒移动, 使得晶粒之间的滑移容易进行, 变形抗力显著降低。而在后期的变形过程中, 由于液相被不断挤出, 使得液相对变形的影响减弱, 对稳态应力的影响也随之减小。

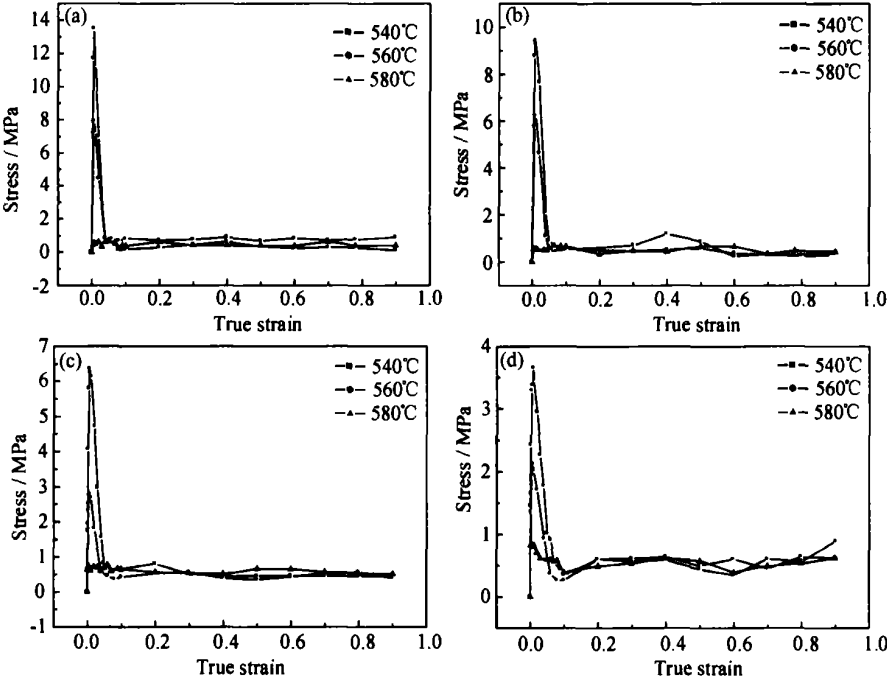


图 3 半固态 Al-4Cu-Mg 合金变形时不同应变速率下的应力-应变曲线

(a) 1s^{-1} ; (b) 0.1s^{-1} ; (c) 0.01s^{-1} ; (d) 0.001s^{-1}

Fig. 3 Curves of stress-strain of Al-4Cu-Mg alloys during semi-solid compression at different strain rate

(a) 1s^{-1} ; (b) 0.1s^{-1} ; (c) 0.01s^{-1} ; (d) 0.001s^{-1}

由图 3 可以看出, 流变应力对应变速率也比较敏感。应变速率升高, 峰值应力显著增大。这是因为随着应变速率的升高, 液相流动、液固相混合流动及晶粒之间滑移加快, 需要更大的剪应力, 所以变形抗力提高。同时, 变形速率的增加也使得变形没有足够的时间发展软化过程, 导致变形抗力的提高。

3 流变应力模型

3.1 流变应力模型的建立

由半固态 Al-4Cu-Mg 合金在液固温度区间的压缩实验研究结果可知: (1) 流变应力大小与变形温度密

切相关; (2) 随着应变速率的增加, 流变应力明显增加; (3) 流变应力随着变形程度的增大而不断变化。应变小时, 流变应力对变形温度、应变速率比较敏感。综合分析可知, Al-4Cu-Mg 合金在半固态温度区间变形时, 其流变应力是变形温度、应变速率和变形程度的函数。

实验分析表明, 液固相体积分数的对合金的半固态变形行为具有重要影响, 建立模型时应考虑液固相体积分数对流变应力的影响。本工作在建立流变应力模型时, 主要考虑了变形温度、应变速率、变形程度和液相体积分数对流变应力的综合影响, 其流变应力模型为:

= m n exp(a- bT) (1- f1) k (1)

式中: 为流动应力(MPa); 为应变速率(s⁻¹); 为真应变; T 为变形温度(K);f₁ 为当前变形阶段的液相体积分数;m, n, a, b, k 为材料常数; 为形状系数, 一般取值 1. 428^[5]。

3.2 模型参数的求解

在对式(1) 中的系数进行求解时, 不同工艺参数下的液相体积分数可以通过人工神经网络理论来实现。本研究中采用 P+sigma 神经网络及学习算法来实现对液相体积分数的预测。各变量在不同模糊区间的初始隶属函数表达式如下:

对于变形温度:

UL1(x) = { 1 x 853 exp[-(x- 853)²/600] x < 853 UM1(x) = exp[-(x- 833)²/200] US1(x) = { 1 x 813 exp[-(x- 813)²/600] x > 813 (2)

对于变形程度:

UL2(x) = { 1 x 0. 92 exp[-(x- 0. 92)²/0. 03] x < 0. 92 UM2(x) = exp[-(x- 0. 57)²/0. 035] US2(x) = { 1 x 0. 22 exp[-(x- 0. 22)²/0. 03] x > 0. 22 (3)

对于应变速率:

UL3(x) = { 1 x 0 exp[-x²/20] x < 0 UM3(x) = exp[-(x+ 3. 45)²/3]

US3(x) = { 1 x - 6. 91 exp[-(x+ 6. 91)²/20] x > - 6. 91 (4)

其中, UL, UM 和 US 分别为大、中、小不同区间套的隶属函数。

在本研究中, 模型的输入 x₁, x₂, x₃ 分别为变形温度、应变和应变速率, 输出 Y 为液相体积分数(f₁/%)。根据模糊神经网络模型的算法, 液相体积分数 Y 的计算值为:

Y= 27 i y i / 27 i = 27 i=1 [i1(T) i2() i3() (p0+ p1T+ p2 + p3)] 27 i=1 [i1(T) i2() i3()] (5)

其中, ij = exp[-(xj- aj)²/bj] (6)

式中: T 为变形温度(K); 为真应变; 为应变速率(s⁻¹); i 为权值; yⁱ 为中间层输出; pⁱ 为中间层的权系数; aj 和 bj 分别为隶属函数的均值和方差。

为了建立半固态 Al-4Cu-Mg 合金变形过程中液相体积分数的预测模型, 本研究将部分实验数据作为教师样本对模型进行训练, 其余的实验数据作为测试样本用于模型的验证。表 1 为液相体积分数计算结果与实验结果的比较。由表 1 可以看出, 本研究建立的预测液相体积分数的模糊神经网络模型最大误差不超过 14%, 预测精度较高。

将液相体积分数预测结果代入流变应力模型式(1) 中, 采用数值拟合的方法可以确定其中的材料常数, 结果如表 2 所示。

3.3 流变应力模型的验证

图 4 为应变速率为 1s⁻¹ 时流变应力模型的计算结果与实验数据的对比情况。从图4可以看出, 上述

表 1 液相体积分数计算结果与实验结果的比较

Table 1 Comparison of the liquid volume fractions between the calculated results and the experimental

Temperature/	Height reduction/ %	Strain rate/ s ⁻¹	Liquid volume fraction f ₁ / %		
			Experimental	Calculated	Error
540	20	1	12. 11	12. 92	- 6. 68
	60	0. 01	12. 19	13. 52	- 10. 9
560	40	0. 1	15. 83	15. 17	4. 17
	60	0. 01	14. 74	15. 9	- 7. 87
580	20	0. 01	10. 26	9. 58	6. 63
	40	0. 001	13. 32	15. 07	- 13. 14

方法确定的流变应力曲线与实验曲线能够达到满意的 拟合精度。

表 2 流变应力模型中的材料常数

Table 2 The constants of the A14Cu-Mg alloy

<i>m</i>	<i>n</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>k</i>
0.1174	- 0.58457	13.7457	0.01893	- 3.48855

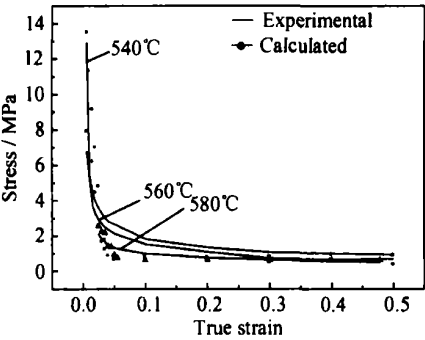


图 4 半固态流变应力模型的计算结果与实验结果的对照

Fig. 4 Comparison of the calculated results with the experimental of flow stress

4 结论

- (1) A14Cu-Mg 合金在液固两相区变形时,当变形程度较小时,流变应力对变形温度和应变速率比较敏感。
- (2)在半固态变形过程中,4种变形机制随着液固相体积分数的变化而变化。在变形初期,以液相流动及液固相混合流动为主;在随后的变形中,固相间的相互滑移和固相粒子之间的塑性变形占主导地位。
- (3)本工作建立的流变应力模型能较好地反映流变应力与变形工艺参数之间的关系。

参考文献

[1] FLEMINGS M C. Behavior of metal in the semi-solid state[J]. Metall Trans, 1991, 22A: 957- 981.
[2] 康永林,毛卫民,胡壮麒.金属材料半固态加工理论与技术[M].北京:科学出版社,2004.

[3] 郭钧,丁志勇,谢水生,等.半固态 A1-6% Si 合金的变形行为[J].中国有色金属学报,2000,10: 115- 119.
[4] 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 Tech, 2002, 6376: 1- 7.
[5] KANG C G, JUNG H K. Finite element analysis with deformation behavior modeling of globular microstructure in forming process of semi-solid materials[J]. Int Mech Sci, 1999, 41: 1423 - 1445.
[6] 王顺成,陈彦博,温景林. A2017 合金半固态压缩的变形机制和成形性能[J].材料研究学报,2004,18(3): 285- 289.
[7] FERRANTE M, FREITAS E. Rheology and microstructural development of an A14wt% Cu alloy in the semi solid state[J]. Mater Sci Eng, 1999, A271: 172- 180.
[8] IWASAKI H, MORI T. Shear deformation behavior of A15% Mg in a semi solid state[J]. Acta Mater, 1998, 46: 6351- 6360.
[9] HAAFTEN W M VAN, KOOL W H, KATERMAN L. Tensile behavior of semisolid industrial aluminum alloys AA3104 and AA5182[J]. Mater Sci Eng, 2002, A336: 1- 6.
[10] GUNASEKERA J S. Development of a constitutive model for mushy materials[A]. The 2nd International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites[C]. USA: Cambridge Press, 1992. 211- 222.
[11] KIUCHI M, YANAGIMOTO J, YOKOBAYASHI H. Flow stress yield criterion and constitutive equation of mushy/ semi-solid alloys[J]. Annals of the CIRP, 2001, 50(1): 151- 156.
[12] MARTIN C L, FAVIER D, SUERY M. Viscoplastic behavior of porous metallic materials saturated with liquid part : constitutive equations[J]. Int J Plas, 1997, 13(3): 215- 235.
[13] 潘洪平,丁志勇,董原生,等.半固态 AlSi7Mg 合金触变力学模型研究[J].金属学报,2003,39(4): 369- 374.
[14] 周冰锋,闫洪.试验研究半固态 AZ61 合金的本构关系[J].中国机械工程,2006,17(17): 1854- 185 7.
[15] 罗守靖,孙家宽. LY12 合金半固态压缩变形机制研究[J].科学通报,1999,44(3): 545- 549.

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK2005025)

收稿日期:2007-01-11;修订日期:2007-03-28

作者简介:卢雅琳(1967-),女,副教授,博士研究生,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 542信箱(710072)。

欢迎订阅《材料工程》

《材料工程》主要刊登有关材料科学与工程方面的学术论文,同时刊登综合性评述,报道新材料、新工艺、新产品信息,及时、准确反映国内材料领域最新成就和最新进展。《材料工程》是美国工程索引(EI)收录期刊,是中国科技论文统计分析用刊,同时入选《中文核心期刊要目总览》、中国科学引文数据库、中国学术期刊综合评价数据库、中国学术期刊(光盘版)及万方数据网和中国期刊网。在国内外材料科技期刊中具有一定的地位和影响。本刊设有 测试与表征、表面工程、工艺、综述等栏目。同时欢迎国内外厂商刊登广告,价格优惠。
《材料工程》为月刊,大 16 开本,精美印刷,每期 10.00 元,全年 12 期 120 元。需订阅者可向本刊编辑部索取订单,或直接汇款至编辑部即可。
地 址:北京 81 信箱 62 分箱《材料工程》编辑部
邮 编:100095
电 话:(010)62496276