

半固态流变行为模型及应用

李森泉, 卢雅琳, 江海涛, 黄维超

(西北工业大学材料学院, 西安 710072)

摘要 半固态成形是 21 世纪最具潜力的先进制造技术之一。分析了国内外半固态变形行为研究进展, 重点阐述了近似单相本构关系模型、两相本构关系模型、宏观-微观耦合本构关系模型的特点及应用, 特别是笔者提出的宏观-微观耦合本构关系模型反映了工艺参数和微观组织参数对半固态流变应力的影响。同时, 笔者将新型宏观-微观耦合本构关系模型应用于 Al-4Cu-Mg 合金半固态反挤压过程的有限元数值模拟, 获得了工艺参数对应力应变、温度、晶粒尺寸、液相体分数和挤压载荷等的影响规律, 数值模拟结果与半固态实验结果基本一致。

关键词 半固态 变形 微观组织 模型

中图分类号: TG311

Modeling and Application of Deformation Behavior for the Semi-solid Forming

LI Miaoquan, LU Yalin, JIANG Haitao, HUANG Weichao

(School of Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract Semi-solid forming is one of the most advanced materials processings in the 21th century. In this paper, advances in deformation behavior of the semi-solid forming at home and abroad are analyzed, it is important to clarify the correlation mechanism and models including the quasi-single phase constitutive equation, two-phase constitutive equation and macro-micro coupling constitutive equation, especially the present macro-micro coupling constitutive equation represents the influence of technological parameters and microstructure variables on the flow stress in semi-solid forming. Furthermore, novel macro-micro coupling constitutive equation is applied to simulate the semi-solid back extrusion of Al-4Cu-Mg aluminium alloy and the effects of technological parameters on flow stress, strain, temperature rise, grain size, volume fraction of liquid phase and extrusion load are investigated. Moreover, the simulation results are in a good agreement with the experimental results.

Key words semi-solid, metal forming, microstructure, models

0 引言

美国麻省理工学院 Flemings^[1]提出的半固态成形(Semi-solid metal forming, 简称 SSM)是一种新的金属成形方法。半固态成形是指合金在凝固过程中, 对其施加剧烈的搅拌作用, 充分破坏枝状的初生固相, 得到一种液态合金母液中均匀地悬浮着一定球状初生固相的固-液混合浆料(固相体积分一般约为 50%左右), 然后用于填充铸型或进行塑性成形的方法。

半固态成形工艺路线有 2 种: 一是将半固态合金直接压入模具型腔进行压铸成形, 或进行锻造、轧制以及挤压等, 即流变成形; 另一种是将半固态合金冷却制成坯料, 再根据需求重新加热到半固态温度进行加工, 即触变成形^[2-5]。半固态成形方法如图 1 所示。

Flemings 等^[6-8]研究了由机械搅拌法制备的 A380 合金半固态流变成形。Yurko 等^[9,10]将低过热度的合金液浇入坩埚中, 并进行短时间机械搅拌, 使合金熔体冷却到液相线温

度以下, 最后将坩埚中的半固态合金浆料倒入模腔中, 进行流变成形。Flemings 等^[11]发现, Sn-Pb 合金在半固态成形时变形力极低且受变形速率的影响, 变形过程中存在液相偏析。Chino 等^[12]发现, 当变形温度达到 773K 时 AZ91 镁合金的压缩变形机制发生了变化。一方面, 液相的出现可以减少由位错堆积引起的应力集中, 便于固相流动; 另一方面, 由于动态再结晶以及晶粒细化, 使得合金具有良好的成形性能。Li 等^[13]发现, 半固态不锈钢的流动应力和微观组织与变形过程中发生相变有关。Vieira 等^[14]预测了半固态 Al-Si 合金的流变行为。复合材料半固态时的显微组织、变形行为和增强体的百分数对变形有显著影响^[15,16]。

1 半固态变形行为

半固态浆料在半固态变形过程中具有显著的流变性^[17-19]。流变性是指在搅拌过程中当固相组分不断增加(甚至超过 60%)时, 虽然金属浆料具有较高的粘性, 但仍然保持良好的流动性。半固态合金具有以下 3 种流变行为。

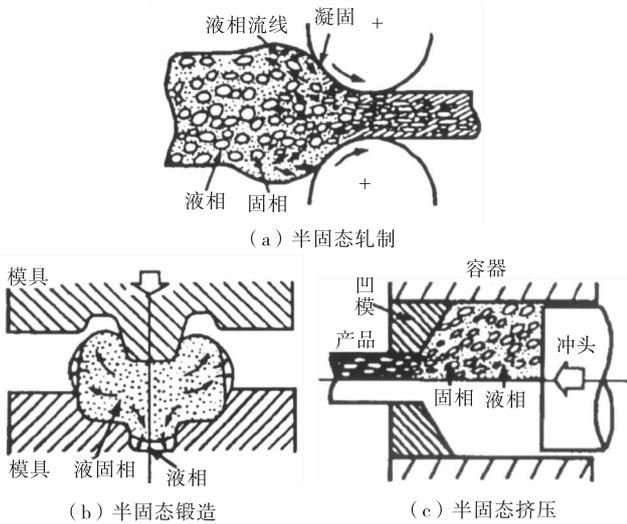


图1 半固态成形方法
Fig. 1 Semi-solid forming technologies

1.1 非稳态流变行为

影响半固态流变行为的主要因素包括:固相体积分、剪切速率和冷却速度以及变形温度。Spencer等^[20]发现,搅拌速度对半固态 Sn-15Pb 合金的表现粘度有显著影响。Joly等^[21]发现,半固态 Sn-15Pb 合金的表现粘度随剪切速率的上升显著下降;在一定的剪切速率下,表现粘度随固相体积分数的增加而增加,半固态浆料的流型从牛顿体向假塑性体、宾汉体转化。

1.2 稳态流变行为

半固态合金的稳态流变特性是指微观组织随剪切历程、时间变化较小的流变规律。Joly等^[21]发现,等温条件下稳态剪切同样存在变稀行为(即伪塑性体)。半固态 ZA12 合金的表现粘度随剪切速率的增加而降低,即呈假塑性特征;剪切速率一定时,剪切应力随固相体积分数的增加而增加^[22]。半固态 Al-4Si-2Mg 合金的表现粘度随着固相体积分数的增加而增大,表现粘度随剪切速率的增大而减小^[23]。

1.3 动态流变行为

半固态合金的稳态流变特性(伪塑性体)不适用于实际工况条件。例如,压铸成型过程一般只持续 0.01~0.2s,属于动态流变范畴。Kumar等^[24]发现,半固态 Sn-15Pb 合金的表现粘度随剪切速率的增加而增加。因此,半固态合金的动态流变行为属于膨胀流型。

半固态合金的另一个特性是触变性。触变性是指表现粘度对剪切时间的依存关系,反映了半固态合金的依时行为。Flemings^[1]指出,当剪切速率恒定时,半固态 Al6.5Si 合金的瞬态表现粘度比稳态时要低。半固态 AlSi6Mg2 合金在等温搅拌时表现粘度会随着剪切速率的增加而降低^[25]。笔者研究了加热条件对半固态 Al-4Cu-Mg 合金二次重熔时微观组织的影响规律和微观组织演化机制^[26],通过热模拟压缩实验,获得了变形工艺参数对 Al-4Cu-Mg 合金半固态变形时流动应力、晶粒尺寸、形貌、液相偏析和显微硬度的影响规律^[27-31]。

2 本构关系模型

半固态合金在外力作用下的流动具有温度和应变率敏感性,以及高度非线性。为了弄清楚半固态合金在变形过程中的流动行为,优化变形过程和工艺参数,建立准确反映半固态合金流变特性的本构关系模型是十分必要的。

2.1 近似单相模型

近似单相模型是将流变应力与变形温度、应变率、固相体积分和变形程度联系在一起,忽略了变形时固相与液相之间的相互作用。Joly等^[21]提出了流变应力与固相体积分和应变率间的本构关系模型为:

$$\sigma = A \exp(B f_s) \dot{\epsilon}^m \quad (1)$$

式中: σ 为流变应力(MPa), A 、 B 均为材料参数, $\dot{\epsilon}$ 为应变率(s^{-1}), m 为应变率敏感性指数, f_s 为固相体积分(%) , $m = c f_s + d$, c 、 d 均为材料参数。

Rassili等^[32]依据流变应力的温度敏感性,提出的半固态粘塑性本构关系模型为:

$$\sigma(\epsilon, T) = \sigma_0 \exp(\beta/T) \epsilon^n \quad (2)$$

式中: σ 为流变应力(MPa), σ_0 为初始流变应力(MPa), β 为材料参数, ϵ 为应变, T 为绝对变形温度(K), n 为应变硬化指数。

Yoon等^[33]根据流变应力随应变的变化规律,提出的本构关系模型为:

$$\epsilon < \epsilon_{cr} \text{ 时, } \sigma = K \epsilon^n \exp(b) \dot{\epsilon}^m \quad (3)$$

$$\epsilon \geq \epsilon_{cr} \text{ 时, } \sigma = K \epsilon^n \exp[b(\epsilon - \epsilon_{st}) / (\epsilon_{cr} - \epsilon_{st})] \dot{\epsilon}^m \quad (4)$$

式中: ϵ_{cr} 为临界应变(枝晶完全破碎时对应的应变), ϵ_{st} 为稳态应变(枝晶臂开始熔断时的应变), ϵ 为应变, $\dot{\epsilon}$ 为应变率(s^{-1}), m 为应变率敏感性指数, n 为应变硬化指数, f_s 为固相体积分(%) , K 、 b 为材料参数。

根据半固态合金变形到一定程度时,坯料外表面会发生液固分离现象,导致流变应力下降;且随着变形量的增加,压实作用使得流变应力回升等特征,Kang等^[34]将流变应力曲线分为3个阶段,提出了考虑固相颗粒变形和液体流动等因素的本构关系模型为:

$$\epsilon < \bar{\epsilon}_{cr} \text{ 时, } \bar{\sigma} = K \exp(S) \dot{\epsilon}^m \exp(Q/RT) [1 - \beta f_1]^{2/3} \quad (5)$$

$$\bar{\epsilon}_{cr} < \epsilon < \bar{\epsilon}_{cr1} \text{ 时, } \bar{\sigma} = K \exp(1-S) \dot{\epsilon}^m \exp(Q/RT) \cdot [1 - \beta f_1]^{2/3} \quad (6)$$

$$\epsilon > \bar{\epsilon}_{cr1} \text{ 时, } \bar{\sigma} = K \dot{\epsilon}^m \quad (7)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为等效应力(MPa), ϵ 为应变, $\bar{\epsilon}_{cr}$ 、 $\bar{\epsilon}_{cr1}$ 为临界等效应变, $\dot{\epsilon}$ 为应变率(s^{-1}), K 为材料参数, Q 为表观塑性变形激活能(kJ/mol), T 为绝对变形温度(K), R 为气体常数(8.314 J/(mol·K)), S 为分离因子, m 为应变率敏感系数, f_1 为液相体积分(%) , β 为几何参数。

考虑固相体积分、液体粘度和液体通道厚度等参数对流变应力的影响,Daniel等^[35]建立了 Al-4.5Cu 合金在高固相体积分下拉伸变形时的本构关系模型。

2.2 两相模型

两相模型以考虑固相与液相之间的相互作用为基础,用连续多孔体模型描述固体骨架的变形行为,用达西定律来描

述液体的流动,并将二者相互耦合。Lalli 等^[36]将固液混合模型中的应力改为:

$$\sigma = \sigma_s - \alpha_1 p_l \quad (8)$$

式中: σ 为流变应力(MPa), σ_s 为固相流动应力(MPa), p_l 为液相流体压力(MPa), α_1 为材料参数, $\sigma = [2(1+0.5f_s^2)J_2' + (1-f_s^2)J_1^2/3]^{1/2}$, J_1 为第一应力不变量(MPa), J_2' 为第二应力偏量不变量(MPa)。

Nguyen 等^[37,38]将作用于固相的等效应力定义为:

$$\sigma = \sigma_s + p_l \quad (9)$$

式中: σ 为流变应力(MPa), σ_s 为固相流动应力(MPa), p_l 为液相流体压力(MPa)。

Martin 等^[39,40]考虑晶间液态压力的影响和拉压变形行为的非对称性,提出新的本构关系模型为:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{A(f_s)c(f_s)2J_2' + B(f_s)J_1^2/c(f_s)^2 - \sqrt{B(f_s)(1-c(f_s)^2)J_1/c(f_s)^2}} \quad (10)$$

式中: $\sigma_{eq} = [A(f_s)J_2' + B(f_s)J_1^2]^{1/2}$, $A(f_s)$ 和 $B(f_s)$ 均是固相体积分数的函数, $c(f_s)$ 为固相粘聚程度,是固相体积分数的函数, J_1 为第一应力不变量(MPa), J_2' 为第二应力偏量不变量(MPa)。

2.3 宏观-微观耦合模型

半固态合金变形时,不仅形状发生改变,而且内部的微观组织也会经历一系列变化,同时这些微观组织的变化又影响了材料的宏观力学性能。Cezard 等^[41]建立了一种宏观-微观耦合的本构关系模型来描述半固态浆料的粘度-剪切速率关系。笔者建立半固态变形的本构关系模型^[42],考虑了变形工艺参数和微观组织演化对流动应力的影响,建立新的本构关系模型为:

$$\sigma = F_1 \cdot F_2 \quad (11)$$

式中: σ 为流动应力(MPa), F_1 为稳态流动应力模型, F_2 为微观组织对流动应力的影响因子模型,反映半固态变形时微观组织演变对流动应力的影响。

考虑变形温度、应变速率、变形程度和液相体积分数对半固态流动应力的影响,本文建立的稳态流动应力模型为^[43]:

$$F_1 : \sigma = \dot{\epsilon}^m \epsilon^n \exp(a-bT)(1-\beta f_l)^k \quad (12)$$

式中: σ 为流动应力(MPa), $\dot{\epsilon}$ 为应变速率(s^{-1}), ϵ 为应变, T 为绝对变形温度(K), f_l 为当前变形阶段的液相体积分数(%), m 为应变速率敏感系数, n 为应变硬化指数, k 、 a 、 b 均为材料参数, β 为几何参数,取值为 1.428^[44]。

微观组织演化对流动应力的影响为^[45]:

$$F_2 : f(d) = A_0 + A_1(d/d_0) + A_2(d/d_0)^2 \quad (13)$$

式中: d_0 为初始晶粒尺寸(μm), d 为瞬态晶粒尺寸(μm), A_0 、 A_1 、 A_2 均为材料参数。

将笔者提出的宏观-微观耦合应用于 Al-4Cu-Mg 合金后,Al-4Cu-Mg 合金半固态热模拟压缩变形时的流变应力计算结果与实验结果的对照情况,如图 2 所示。由图 2 可知,本文建立的本构关系模型与实验结果的最大误差不超过 15%,表明此本构关系模型较好地表征了工艺参数和微观组织参数对 Al-4Cu-Mg 合金半固态变形时流变应力的影响,为

实现变形-传热-微观组织演化的耦合数值分析提供了理论基础。

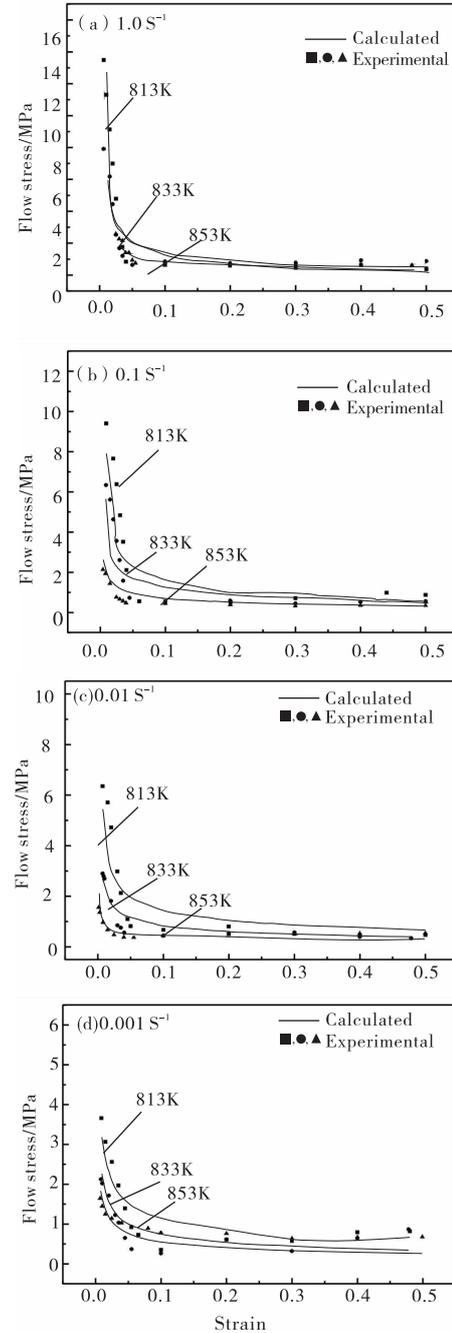


图 2 Al-4Cu-Mg 合金半固态变形时流变应力的计算值与实验值比较

Fig. 2 Comparison of the calculated and the experimental flow stress of semi-solid Al-4Cu-Mg alloy

3 本构关系模型在数值模拟中的应用

Kang 等^[46]对 A356 合金半固态压缩变形过程进行数值模拟时发现,应变速率越高,固相体积分数、等效应变速率和等效应力的分布越均匀。Yoon 等^[47]通过 CAMPform2D 软件对 2024 铝合金半固态锻造过程进行了数值模拟,研究了半固态 60Si2Mn 钢轧制时辊缝、转速和浆料初始温度对应力

场、速度场的影响,上述结果表明与半固态轧制试验结果基本一致^[48]。

笔者对 Al-4Cu-Mg 合金半固态挤压过程进行了数值模拟^[43],发现变形温度和凸模速度对流动性能和微观组织分布有重要影响;适当提高变形温度和降低凸模速度对半固态变形有利;半固态变形时,由于变形能转化的热能不断被未熔化的低熔点相吸收而发生熔化,与固相的高温变形相比,温升很小;半固态变形过程中,液相的存在削弱了摩擦效应,使得摩擦条件对各个场变量的影响很小;半固态反挤压时,随着变形温度的升高、凸模速度的降低和挤压比的减小,挤压力明显减小;压下量超过某一值(即应变大于某一值)后,挤压力基本保持不变。Al-4Cu-Mg 合金半固态反挤压时的载荷-位移曲线的计算结果与实验结果的比较,如图 3 所示。由图 3 可知,二者变化趋势基本一致。

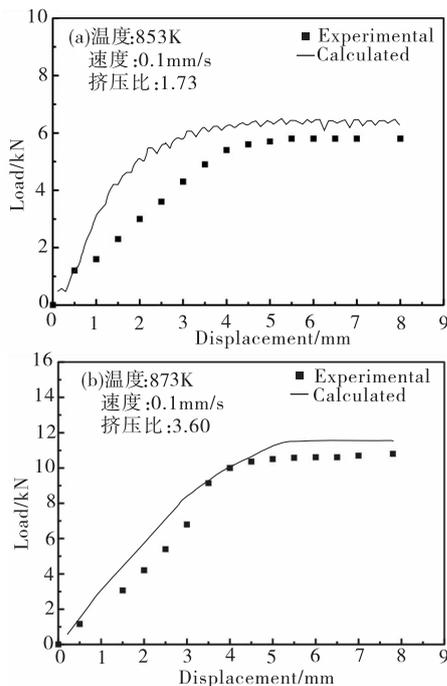


图 3 Al-4Cu-Mg 合金半固态反挤压载荷计算值与实验值比较

Fig. 3 Comparison of the calculated and the experimental extrusion load of semi-solid Al-4Cu-Mg alloy

4 结语

半固态合金在压力作用下的流动具有温度和应变速率敏感性,而且高度非线性。因此,建立准确描述半固态合金流变行为的本构关系模型是十分必要的。早期的本构关系模型有:近似单相模型和两相模型,近似单相模型是将流变应力与变形温度、应变速率、固相体积分数和变形程度联系在一起,忽略了半固态变形时固相与液相间的相互作用。两相模型以考虑固相与液相之间的相互作用为基础,用连续多孔体模型描述固体骨架的变形行为,用达西定律描述液体流动,并将二者相互耦合。

半固态合金变形时,不仅形状发生改变,而且内部的微

观组织也会经历一系列变化,同时微观组织的变化又影响了材料的宏观力学性能。因此,建立半固态变形本构关系模型时,考虑变形工艺参数和微观组织演化对流变形的影响,即宏观-微观耦合本构关系模型是目前研究的热点和重点,应用宏观-微观耦合本构关系模型获得的数值模拟结果与半固态反挤压试验结果基本一致。

尽管许多研究者对半固态变形过程的变形行为开展了大量的研究工作,但是半固态变形时液态和固态共同存在,因此尚未建立全面反映半固态变形特点的变形行为普适模型。因此,建立半固态变形行为的普适模型,并通过半固态变形过程的耦合数值模拟,可实现半固态变形全程优化设计,将推动半固态变形技术的快速发展。

参考文献

- 1 Flemings M C. Behavior of metal alloys in the semi-solid state[J]. Metall Trans, 1991, 22A: 957
- 2 Idegomori T, Hirono H, Ito O, et al. The manufacturing of automobile parts using semi-solid metal processing [C]// Proceedings of the 5th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Golden, USA, 1998: 71
- 3 Witulski T, Winkelmann A, Hirt G. Thixoforming of aluminum components for light weight structures [C]// Proceedings of the 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Sheffield, England, 1996: 242
- 4 Cho W G, Kang C G. Mechanical properties and their microstructure evaluation in the thixoforming process of semi-solid aluminum alloys [J]. J Mater Process Technol, 2000, 105 (3): 269
- 5 田战峰, 徐骏, 杨必成, 等. Al-Mg-Si 合金半固态触变成形研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2005, 25(8): 504
- 6 Mehrabian R, Flemings M C. Die casting of partially solidified alloys [J]. AFS Transactions, 1972, 80: 173
- 7 Flemings M C, Riek R G, Young K P. Rheocasting [J]. Mater Sci Eng, 1976, 25: 103
- 8 单巍巍. 半固态镁合金组织成分演变及流变特性分析 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2005
- 9 Yurko J A, Martincz R A, Flemings M C. Development of the semi-solid rheocasting process [C]// Proceedings of the 7th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Tsukuba, Japan, 2002: 659
- 10 Yurko J A, et al. Rheocasting and squeeze casting technology [J]. Die Casting Eng, 2002, 46(4): 20
- 11 Suery M, Flemings M C. Effect of strain rate on deformation behavior of semi-solid dendritic alloys. Metall Trans, 1982, 13A: 1809
- 12 Chino Y, Kobata M, Iwasaki H, et al. An investigation of compressive deformation behavior for AZ91 Mg alloy containing a small volume of liquid [J]. Acta Mater, 2003, 51: 3309

- 13 Li J Y, Sugiyama S, Yanagimoto J. Microstructural evolution and flow stress of semi-solid type 304 stainless steel[J]. *J Mater Process Techn*, 2005, 161: 396
- 14 Vieira E A, Ferrante M. Prediction of rheological behaviour and segregation susceptibility of semi-solid aluminum-silicon alloys by a sample back extrusion test[J]. *Acta Mater*, 2005, 53: 5379
- 15 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
- 16 祖丽君. SiCp/2024 复合材料半固态触变成形研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001
- 17 Lashkari O, Ghomashchi R, Ajersch F. Deformation behavior of semi-solid A356 Al-Si alloy at low shear rates: The effect of sample size[J]. *Mater Sci Eng*, 2007, A444: 198
- 18 江海涛. 半固态 Al-4Cu-Mg 合金的制备及微观组织演化研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004
- 19 Paes M, Zoqui E J. Semi-solid behavior of new Al-Si-Mg alloys for thixoforming[J]. *Mater Sci Eng*, 2005, A406: 63
- 20 Spencer D B, Mehrabian R, Flemings M C. Rheological behavior of Sn-15pct Pb in the crystallization range[J]. *Metall Trans*, 1972, 3: 1925
- 21 Joly P A, Mehrabian R. The rheology of a partially solid alloy[J]. *J Mater Sci*, 1976, 11: 1393
- 22 朱鸣芳, 高志强, 苏华钦. 半固态 ZA12 合金的瞬态流变性能[J]. *金属学报*, 1999, 35(10): 1021
- 23 周志华, 毛卫民, 刘政等. 半固态 AlSi4Mg2 铝合金的稳态流变性能[J]. *材料研究学报*, 2006, 20: 5
- 24 Kumar P, Martin C L, Brown S B. Shear rate thickening flow behavior of semi-solid slurries[J]. *Metall Trans*, 1993, 24A: 1107
- 25 汤国兴, 毛卫民, 周志华. 半固态 AlSi6Mg2 铝合金的触变性[J]. *特种铸造及有色合金*, 2006, 26: 366
- 26 Lu Yalin, Li Miaoquan, et al. Microstructure and element distribution during partial remelting of an Al-4Cu-Mg alloy[J]. *J Mater Eng Perform*, 2008, 17: 1
- 27 Lu Yalin, Li Miaoquan, Huang Weichao, et al. Deformation behavior and microstructure evolution during the semi-solid compression of Al-4Cu-Mg alloy[J]. *Mater Charact*, 2005, 54: 423
- 28 Lu Yalin, Li Miaoquan, Li Xingcheng. Deformation and microstructure characterization during the semi-solid extrusion of Al-4Cu-Mg alloy[J]. *Trans Nonferrous Metals Soc China*, 2006, 16(S3): 1606
- 29 卢雅琳, 黄维超, 江海涛, 等. 工艺参数对半固态 Al-4Cu-Mg 合金变形的影响[J]. *材料工程*, 2005, (5): 11
- 30 卢雅琳, 江海涛, 黄维超, 等. 半固态 LY11 合金的压缩变形[J]. *特种铸造及有色合金*, 2005, 25(3): 164
- 31 卢雅琳, 黄维超, 李森泉. 半固态 Al-4Cu-Mg 合金的变形行为及组织演化[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(S3): 510
- 32 Rassili A, Geuzaine C, Legros W, et al. Numerical simulations and experimental investigations of the semi-solid metal processing of steels[C]// *Proceedings of the 7th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Tsukuba, Japan, 2002: 367
- 33 Yoon J H, Im Y T, Kim N S. Rigid-thermoviscoplastic finite element analysis of the semi-solid forging of Al2024[J]. *J Mater Process Techn*, 1999, 89: 104
- 34 Kang C G, Kang B S, Kim J I. An investigation of the mushy state forging process by the finite element method[J]. *J Mater Process Techn*, 1998, 80/80: 444
- 35 Daniel L, Joseph L, Wu W L, et al. A constitutive model for the tensile deformation of a binary aluminum alloy at high fractions of solid[J]. *Metall Mater Trans*, 2006, 37B: 431
- 36 Lalli L A. A model for deformation and segregation of solid-liquid mixtures[J]. *Metall Trans*, 1985, 16A: 1393
- 37 Nguyen T G, Suery M, Favier D. Mechanical behavior of semi-solid alloys under drained compression with lateral pressure[C]// *Proceedings of the 2nd International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Cambridge, USA, 1992: 296
- 38 Nguyen T G, Favier D, Suery M. Theoretical and experimental study of the isothermal mechanical behavior of alloys in the semi-solid state[J]. *Int J Plast*, 1994, 10(6): 663
- 39 Martin C L, Favier D, Suery M. Viscoplastic behavior of porous metallic materials saturated with liquid part I: constitutive equations[J]. *Int J Plast*, 1997, 13(3): 215
- 40 Martin C L, Favier D, Suery M. Viscoplastic behavior of porous metallic materials saturated with liquid Part II: experimental identification on a Sn-Pb model alloy[J]. *Int J Plast*, 1997, 13(3): 237
- 41 Cezard P, Favier V, Bigot R, et al. Simulation of semi-solid thixoforging using a micro-macro constitutive equation[J]. *Comput Mater Sci*, 2005, 32: 323
- 42 卢雅琳, 李森泉. Al-4Cu-Mg 合金的半固态成形及模型化研究[J]. *材料工程*, 2007, (5): 43
- 43 卢雅琳. Al-4Cu-Mg 合金半固态成形及耦合数值模拟[D]. 西安: 西北工业大学, 2007
- 44 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 J Mech Sci*, 1999, 41: 1423
- 45 黄维超, 陈春生, 卢雅琳, 等. Al-4Cu-Mg 合金半固态压缩时微观组织的计算模型[J]. *材料工程*, 2004, (10): 7
- 46 Kang C G, Seo P K, Youn S W. Finite element analysis of thixoforming process with arbitrary shape die[J]. *J Mater Process Techn*, 2005, 159(3): 321
- 47 Yoon J H, Im Y T, Kim N S. Finite element modeling of the deformation behavior of semi-solid materials[J]. *J Mater Process Techn*, 2001, 113: 153
- 48 康永林, 宋仁伯, 任学平等. 变形参数对半固态轧制影响规律的有限元模拟[J]. *塑性工程学报*, 2002, 9(3): 66