文章编号: 1004-0609(2012)04-1045-08

汽车用铝合金零件的半固态压铸数值模拟

王姣姣¹, 尚淑珍¹, 路贵民¹, 张万宁², 唐小玲¹, 于建国³

(1. 华东理工大学 承压系统与安全教育部重点实验室,上海 200237;
 2. 沈阳国际工程咨询中心,沈阳 110014;
 3. 华东理工大学 资源与环境工程学院,上海 200237)

摘 要:对采用近液相线铸造法制备的 6061 铝合金半固态坯料进行热模拟压缩试验,根据试验获得的 6061 铝合金不同温度与应变速率下的应力一应变曲线,采用多元回归线性方法建立能够表征 6061 铝合金半固态变形行为的本构方程。根据 Stefan 等研究学者提出的半固态浆料的表观黏度与热模拟压缩试验中的应变速率等参数间的关系式,对表观黏度和剪切速率之间的关系进行了研究。应用仿真软件 ANYCASTING 模拟充填速度对 6061 铝合金半固态触变压铸过程的影响。结果表明: Bingham 模型中表观黏度等各个参数的确定符合实际生产经验值,为 6061 铝半固态合金零件触变压铸过程的研究提供了一定的理论基础。

关键词:半固态 6061 铝合金;本构方程;表观黏度;剪切速率;数值模拟

中图分类号: TG292 文献标志码: A

Numerical simulation of semi-solid die-casting process of automobile aluminum alloy part

WANG Jiao-jiao¹, SHANG Shu-zhen¹, LU Gui-min¹, ZHANG Wan-ning², TANG Xiao-ling¹, YU Jian-guo³

(1. Key Laboratory of Pressure Systems and Safety, Ministry of Education,

East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Shenyang International Engineering Consulting Center, Shenyang 110014, China;

3. School of Resource and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology,

Shanghai 200237, China)

Abstract: The thermal simulation compression tests on semi-solid billet of 6061 aluminum alloy prepared by near-liquids semi-continuous casting method were carried out. According to the experiment results of the stress-strain curves at different temperatures and strain rates, the constitutive equation of semi-solid 6061 aluminum alloy was established through multiple regressions. The relationship between apparent viscosity and the shear rate was investigated based on the equations about semi-solid slurry viscosity and shear rate in the thermal simulation compression tests presented by Stefan. The software ANYCASTING was applied to simulate and analyze the effects of the filling speed on the semi-solid die-casting process of 6061 aluminum alloy. The results show that, the parameters determination of Bingham model, such as apparent viscosity, is adjusted empirically during the simulation study, which provides a technological reference for the study of semi-solid die-casting simulation of 6061 aluminum alloy parts.

Key words: semi-solid 6061 aluminum alloy; constitutive equation; apparent viscosity; shear rate; numerical simulation

半固态金属加工技术,因在节能、提高产品质量 和性能、延长模具寿命等方面具有普通液态和固态成 形工艺无可比拟的优越性,从其问世之初就引起了相 关生产企业尤其是汽车工业的高度重视,得到国内外

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51104065)

收稿日期: 2011-03-07; 修订日期: 2011-11-15

通信作者: 尚淑珍, 讲师, 博士; 电话: 021-64252601; E-mail: shangshuzhen@ecust.edu.cn

学术界的广泛关注^[1]。近年来,在理论、技术研究和 工业化应用上引起各国的重视。其中,铝合金半固态 触变成形技术,因其工艺可控性强、过程较稳定、易 操作,被应用于许多领域,尤其是在汽车、电子器件 方面得到越来越广泛的应用^[2]。

半固态浆料含有两相介质,其流动行为非常复杂, 主要取决于浆料的固相体积分数、固相颗粒形状、成 形温度及其所固有的热力学性能等因素。在过去的几 十年中,通过大量实验,对半固态触变成形的部分变 形特点有了初步了解,然而,研究者^[3-7]还没有一个统 一的定论。对于稳态而言,半固态材料存在强烈的剪 切变稀特性,这点已经得到了普遍认可。但也存在下 列现象: 黏度随着剪切速率的阶跃变化而增加(剪切增 厚变形行为)[8-11] 或者黏度是个常数[4,12-13], 半固态合 金是否存在屈服应力或该应力是否高于其物理屈服应 力仍然存在争议^[6,8],从而给数学模型,即本构方程的 建立造成了一定的困难。建立本构方程,最重要的是 考虑半固态金属浆料剪切变稀变形特性[14],诸如塑性 临界值的存在与否、正常与非正常变形行为,即应 力一应变速率之间硬化和软化的关系^[3,6,8]。实际上, 由于实验得到的触变参数存在差异,建立了多种不同 的本构方程, 甚至建立了变形一段时候后得到的诸如 平衡组织等的等温稳态条件下的本构方程[15-16]。 Bingham 模型^[17]是一种用得较多的经典的本构方程模 型,其描述的是实验得到的稳态黏度与剪切应变速率 之间的关系。本文作者正是应用了该模型对汽车用铅 合金零件的半固态压铸成形过程进行了数值模拟。采 用数值模拟技术对半固态金属触变铸造过程进行研 究,掌握半固态合金在充填型腔时的流动行为,指导 半固态合金成形生产和模具设计、触变铸造工艺优化 及提高产品质量等,推动半固态金属加工技术在我国 的应用具有重要的意义。

为了进一步了解半固态变形行为,对近液相线铸造法制备的 6061 铝合金进行了热模拟压缩试验,根据 实验获得的 6061 铝合金不同温度下单道次压缩变形 的真实应力一真应变曲线,应用多元回归线性方法建 立了能够表征 6061 铝合金半固态变形行为的本构方 程。同时,根据半固态浆料的表观黏度与热模拟压缩 试验中的应变速率等参数间的关系式^[18],本文作者还 对表观黏度和剪切速率之间的关系进行了研究,为汽 车用铝合金零件的半固态压铸的模拟计算奠定了基 础。最后,本文作者利用仿真软件 ANYCASTING 对 6061 铝合金半固态触变压铸成形过程进行了分析。

1 模拟方法

1.1 模拟假设

在模拟 6061 铝合金半固态触变压铸充型凝固过 程前,作如下几点模拟假设:在模拟过程中将半固态 浆料视为连续不可压缩的金属流体,其流动特性由表 观黏度来表征。在模拟过程中采用的流体模型为比较 典型的非牛顿流体-Bingham 模型;半固态流变压铸成 形的充型过程近似为等温流动。

1.2 Bingham 模型

铝合金半固态浆料的表观黏度与温度、固相分数、 剪切速率等有关,基于触变压铸成形瞬间充型、温度 变化小的特点,在模拟过程中流体模型采用 Bingham 模型^[17]描述黏度的变化。Bingham 流体与牛顿流体相 比,既有相同之处,又有不同之处,相同处为剪切应 力应变曲线呈线性关系,不同处是 Bingham 流体的直 线不通过原点,且只有当剪切应力达到一定值后才开 始流动,该值称为屈服应力。其表达式如下:

$$\begin{cases} \eta = \infty, \tau < \tau_r \\ \eta = \eta_0 + \frac{\tau_r}{D}, \tau \ge \tau_r \end{cases}$$
(1)

式中: τ_r 为屈服应力, N/m²; η_0 为塑性黏度; $D = \sqrt{I_2}$, $I_2 = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j L_{ij} L_{ij}$, $L_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i})$; $v_{i,j}$ 为 j 方向上 速度 v_i 的梯度; $\tau = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_i \sum_j \tau_{ij} \tau_{ij}}$, τ_{ij} 为 j 方向 i 面 上的偏差应力。

仅当材料所受剪应力超过屈服应力时才会流动, 而小于屈服应力时材料具有弹性固体的行为,忽略时 间对半固态浆料黏度的影响。

1.3 Bingham 模型中的参数确定

1.3.1 热模拟压缩试验

实验所用的材料为采用近液相线半连续铸造方法 制备的 6061 铝合金半固态坯料,用差热分析法(DSC) 测得该合金的固液相线温度分别为 582 ℃和 652 ℃。 用线切割从棒材的中径处割取尺寸为 d 8 mm×15 mm 的圆柱体试样,对该试样进行了热模拟压缩试验。试 验得到的流动应力—应变曲线如图 1 所示。

1.3.2 本构方程

为了综合考虑温度 T、应变速率 $\dot{\epsilon}$ 和应变 ϵ 对流 变应力 σ 的影响, 文献[19]给出了一种本构关系式,



图 1 6061 铝合金在不同温度下高温单道次压缩变形真应 力一应变曲线

Fig	g. 1	True stress—	true stra	in cur	ves of 6061 a	luminum all	oy
by	high	temperature	single	pass	compression	experiment	at
dif	ferent	temperatures	: (a) 585	5℃;((b) 595 °C; (c)	605 °C	

如式(2)所示。

 $\sigma = a_1 \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \exp(-cT) \tag{2}$

式中: *a*₁ 为常数; *n* 为应变硬化指数; *m* 为应变速率 敏感系数; *c* 为温度系数。 根据流动应力一应变曲线提取数据(σ,ε, έ和 *T*),进行多元线性回归,回归结果如表1所列。

表 1 6061 铝合金热压缩变形的本构方程的多元线性回归 结果

Table 1Multiple regression of constitutive equation of6061aluminum alloy in hot compression deformation

$\ln a_1$	п	т	С	Multiple correlation coefficient
64.239 85	-0.743 7	0.205 55	-0.073 63	0.954 63

因此,6061 铝合金热压缩变形的本构关系可表示 如下

$$\sigma = \exp(64.239\ 85 - 0.073\ 63T)\varepsilon^{-0.743\ 7}\dot{\varepsilon}^{0.205\ 55}$$
(3)

1.3.3 表观黏度

利用压缩实验得出的位移和时间函数可以计算黏度。根据热模拟压缩试验的应力一应变曲线关系,在 KIM 等^[18]研究学者验证并一直被其他学者引用的 Stefan 方程的基础上可进一步计算出半固态压铸数值 模拟所需的黏度等模拟参数,Stefan 方程如式(4)和(5) 所示,式中给出半固态浆料表观黏度与热模拟压缩试 验应变速率等参数间的关系。KIM 等^[18]以及 YURKO 和 FLEMINGS 等^[20]也验证了式(4)和(5)的可用性。

 ε 描述了从试样的初始高度 h_0 压缩到 h_{ϵ} ,试样在 热模拟压缩试验过程相对变形。表观黏度 η_{app} 与压缩 力 F_{ϵ} 、应变速率 $\dot{\epsilon}$ 和试样的体积 V等有关。

$$\eta_{\rm app} = \frac{2\pi h_{\varepsilon}^4}{3V^2 \dot{\varepsilon}} F_{\varepsilon} \tag{4}$$

与表观黏度 η_{app} 相对应的剪切速率 $\dot{\gamma}_{av}$ 的表达式 如下:

$$\dot{\gamma}_{\rm av} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{V}{\pi h_{\varepsilon}^3} \dot{\varepsilon}}$$
(5)

应变与表观黏度和剪切速率都有关,关系式如式 (4)和(5)所示。两个公式中的应变 *ε* 的值即为热模拟压 缩试验中应力—应变曲线峰值应力所对应的应变值。 在热模拟压缩试验的基础上,得出 6061 铝合金在不同 温度下高温单道次压缩变形真实应力—应变曲线,温 度和应变速率一定,则可以唯一确定应力—应变曲线 的峰值应变,根据 6061 铝合金半固态变形行为的本构 方程(3)及式(4)和(5)即可计算不同温度不同应变速率 下 6061 铝合金的表观黏度值及其剪切速率值。式(4) 1048

和(5)为汽车用铝合金零件的半固态压铸的模拟计算 奠定了基础。

由计算可知,黏度和剪切速率关系满足幂律定律, 如式(6)所示。

$$\eta_{\rm app} = k \dot{\gamma}^{b}_{\rm av} \tag{6}$$

式中: k 为稠度系数, N·sⁿ/m²; b 为流体特性指数, 无 因次,表示与牛顿流体偏离的程度。此两参数表示各 种材料的特性常数。由此式可知,当b=0时, $\eta_{app}=k$, 即 k 具有黏度的量纲,此时流体为牛顿流体;当b<0时表示剪切变稀,即伪塑性流体;当b>0时表示剪切 增稠,即涨塑性流体。

幂律定律两边同时取对数后成线性关系,如图 2 所示,黏度随着剪切速率的升高而降低,由此可证明 6061 铝合金半固态材料存在强烈的剪切变稀特性: 温 度越高,变形阻力越低,黏度下降越明显。幂律模型 中的系数 k 和 b 分别为与固相分数及剪切速率有关的 系数, 它们与温度的关系见图 3, 随着温度的升高, 稠度系数 k 呈下降趋势,这是由于稠度随温度的升高 而降低, 稠度系数 k 的变化符合这一规律; 而指数 b 值随温度的变化基本无变化,从图 3 中还可以看出, 指数 b 的值小于零,由此再一次证明了 6061 铝合金半 固态材料具有剪切变稀的特性,为伪塑性流体。6061 铝合金在不同剪切速率条件下,黏度随着温度的升高 而下降,剪切速率为 0.01 s⁻¹ 时黏度下降最明显,如图 4 所示,同时也验证了6061 铝合金是一种应变速率敏 感材料。当充型温度为 625 ℃,根据热模拟压缩试验 及式(3)~(5),可计算出各个模拟参数,计算出的表观 黏度值与从文献中查到的值相符^[21-22],可以用于数值 模拟计算。







图 3 幂律模型中 6061 铝合金常数 $k \ \pi b$ 与温度的关系图 Fig. 3 Constants (k and b) at power law of viscosity as function of shear rate of 6061 aluminium alloys according to temperatures



图 4 不同剪切速率条件下 6061 铝合金黏度一温度关系图 **Fig. 4** Variation with apparent viscosity of 6061 aluminium alloys for different shear rate obtained from compression test at various temperatures

2 充型及凝固过程模拟

2.1 数值模拟工艺参数设定

利用 ANYCASTING 铸造过程仿真分析软件进行 半固态触变压铸成形过程的数值模拟,实体模型如图 5 所示,支架材料为 6061 铝合金,热物性参数见表 2, 模具材料为 4Cr5MoSiVl(H13)。本文作者所采用的半 固态流变压铸模拟系统中,需要设置一些初始条件, 包括压射速度、浇注温度、模具预热温度、传热系数、 初始黏度等。这些初始条件共同作用,决定了成形件 的质量,压射速度为本研究所设变量,其他数值固定, 具体设置见表 3。设定浇注温度为 625 ℃,模具的预

Table 2 Physical performances of 6061 Al alloys							
Thermal conductivity/ $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	Density/ (kg·m ⁻³)	Specific heat/ $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	Latent heat/ (J·g ⁻¹)	Solidus/°C	Liquidus/°C		
146	2 650	963	389	582	652		

表 2 6061 铝合金的物理性能

表3 6061 铝合金半固态压铸过程数值模拟参数

Table 3 Constitutive parameters simulation of semi-solid die-casting process of 6061 Al alloy

Mould temperature/ $^{\circ}C$	Interface heat transfer coefficient between casting and mould/ $(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	Interface heat transfer coefficient between mould and air/($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	Acceleration of gravity/($m \cdot s^{-2}$)
220	1 675	42	9.8

热温度为 220 ℃,在充型 60%时进行速度切换,进行 速度切换是为了缩短充型时间,也为终压阶段提供必 要的增压速度,使压铸件在高压下凝固,以获得组织 致密、轮廓清晰、表面光洁的压铸件。

由传统铸造经验可知: 低速一般为 0.3~0.5 m/s, 高速为 2~4 m/s,好的压铸机能达到 10 m/s。由于半固 态浆料中含有一定质量分数的固相,浆料黏度比传统 铸造高,半固态浆料压铸时,低速压射阶段的压射速 度可比液态金属压铸时快些,高速压射阶段的压射速 度要比液态金属压铸时慢些^[23]。为了研究低速压射速 度对充型过程的影响,假设高速压射速度为 2 m/s,低 速压射速度分别为 0.6、0.5、0.4 m/s。在研究高速阶 段压射速度的影响时,低速阶段压射速度为 0.4 m/s, 设定高速阶段压射速度分别为 2、3、4 m/s。



图 5 6061 铝合金半固态压铸过程数值实体模型 Fig. 5 Entity model used for simulation of semi-solid die-casting process of 6061 Al alloy

2.2 模拟结果与分析

2.2.1 压射速度的影响

图 6 所示为高速压射速度为 2 m/s、低速压射速度

分别为 0.6、0.5、0.4 m/s 时半固态金属浆料的充型顺 序图,均是在充型 60%时进行速度切换,已充型 20% 时的模拟结果。当浆料充型填充到零件相同部位(充型 20%)时,充填速度越快所需的时间越短,充型速度为 0.6、0.5 及 0.4 m/s 时,所需的充型时间分别为 0.081 8、 0.0867及0.0882s,如图6(a)、(b)和(c)所示。当压射 速度为 0.6、0.5 m/s 时,金属浆料通过内浇口后速度 增快,金属浆料将向上充填型腔,一部分金属浆料沿 着型腔壁向上充填型腔,另一部分金属浆料将回流向 内浇口处充填,如图 6(a)和(b)中所示,浆料以紊流的 方式充填型腔,充型面非常不平稳,同时浆料发生喷 溅,在内浇口附近产生涡流,这种充填顺序易使回流 的金属浆料包裹气体,不利于型腔内气体的排出,造 成铸件内部夹气、疏松等缺陷,严重影响半固态压铸 件的质量,速度越高,这种现象越明显,如图 6(a)和 (b)所示。

当低速压射速度为 0.4 m/s 时,由于速度较低,金 属浆料通过内浇口后首先在内浇口附近堆积,金属浆 料流动平稳,由下向上顺序充填型腔,这种充填状态 有利于气体的排出,减少了包裹气体的倾向,是比较 理想的充填过程,如图 6(c)所示。

综合以上分析可知,低速阶段的压射速度不能过快,否则,半固态金属浆料将在高速作用下发生喷溅,以紊流的方式充填型腔。低速阶段的压射速度为 0.4 m/s 时,半固态金属浆料充型过程较为理想。

图 7 所示为高速阶段压射速度分别为 2、3 和 4 m/s,低速阶段压射速度为 0.4 m/s 时半固态金属浆料 充型过程的充型顺序图,均是在充型 60%时进行速度 切换,已充型 90%时的模拟结果。图中左边的颜色条 及数字表示浆料填充到零件各个部位所需的时间,比 如蓝色表示的填充部位为浇注系统料饼部位,所需的 时间大致为 0~0.02 s。红色表示浆料最后到达的部位, 颜色条最上面的数字即表示充型结束的时间(如当速度从 0.4 m/s 切换至 4 m/s 时,充型完成所需的时间为 0.176 05 s,如图 7(a)所示)。图 6 仅表示已充型 20%的模拟结果,浆料还没到达最后填充部位,所以图 6 中显示的浆料颜色没有红色。

当速度从 0.4 m/s 切换至 4 m/s 和 3 m/s 时,如图 7(a)和(b)所示。由于充填速度较快,金属浆料获得较 高的动能,很容易发生喷溅,有包裹气体的现象,半 固态浆料以紊流的方式充填型腔,内部明显有气孔出 现,并且充型速度大对模具的冲击较大,会降低模具 的使用寿命。通过模拟可以看到,随着压射速度的增 大,由于充型过程中浆料内流动引起的剪切作用增强, 使半固态浆料的黏度逐步降低,流动明显加快,浆料 容易出现喷溅现象,并形成卷气,如图 7(a)和(b)所示, 使得零件接近溢流槽的区域在凝固时由于无法得到液 相的补充而形成缩松或缩孔。

图 7(c)所示为速度从 0.4 m/s 切换到 2 m/s 时,半 固态金属浆料首先以低速通过内浇口后,在内浇口附 近堆积充填型腔,金属浆料以层流的方式流动,逐次 充满型腔。从图 7(c)中可以看出,浆料在填充接近溢 流槽的部位没有喷溅现象发生,半固态浆料流动平稳, 模具型腔内的气体能够被顺序排出,金属浆料不易发 生回流,降低了浆料包裹气体的倾向性。这种充填过 程是比较理想的充填过程。

对于半固态压射速度确定的一般原则是: 低速压 射阶段的压射速度可比液态金属压铸时快些, 高速压



图 6 低速压射阶段充型过程





图7 高速压射阶段充型过程

Fig. 7 Filling process during high filling speed: (a) 4 m/s; (b) 3 m/s; (c) 2 m/s

射阶段的压射速度要比液态金属压铸时慢些^[23]。根据 铸造经验值,低速为 0.3~0.6 m/s,高速为 2~4 m/s。分 析结果表明,速度从 0.4 m/s 切换到 2 m/s 时更有利于 气体的排出,半固态金属浆料充型过程较为理想,数 值模拟得出的结果与上述原则相符。

3 结论

1) 对近液相线铸造法制备的 6061 铝合金进行了 热模拟压缩试验,根据实验获得的 6061 铝合金不同温 度下单道次压缩变形的应力—应变曲线,应用多元回 归线性方法建立的能够表征 6061 铝合金半固态变形行 为的本构方程如下: $\sigma = \exp(64.239\,85 - 0.073\,63T) \cdot \varepsilon^{-0.7437} \dot{\varepsilon}^{0.205\,55}$ 。

2) 基于 6061 铝合金半固态变形行为的本构方程 和 Stefan 等研究学者提出的半固态浆料的表观黏度与 热模拟压缩试验中的应变速率等参数间的关系式可 知: 黏度随着剪切速率的升高而降低,温度越高,变 形阻力越低,黏度下降越明显; 6061 铝合金在不同剪 切速率条件下,黏度随着温度的升高而下降,剪切速 率为 0.01 s⁻¹时黏度下降最明显。

3) 在半固态触变充型过程中,由于浆料的入流速 度直接影响充填流态,进而影响半固态制件的成形质 量。压铸温度 625 ℃,模具温度 220 ℃,低速阶段的 压射速度 0.4 m/s,高速阶段的压射速度 2 m/s,在充 型 60%时进行速度切换,半固态浆料将以层流方式充 填型腔,充型完好。

REFERENCES

- 徐平,杨 昆. 金属半固态成型发展现状及展望[J]. 世界科 技研究与发展, 2010, 29(7): 27-33.
 XU Ping, YANG Kun. The development and prospects of semi-solid metal forming[J]. World Sci-Tech R&D, 2010, 29(7): 27-33.
- [2] 路贵民,只立群,马呜图.半固态金属触变成形本构关系的研究现状[J]. 汽车工程,2009,31(5):430-434.
 LU Gui-min, ZHI Li-qun, MA Ming-tu. The current status of research on the constitutive relations of semi-solid metal thixoforming[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(5): 430-434.
- [3] BURGOS G R, ALEXANDROU A N, ENTOV V. Thixotropic rheology of semisolid metal suspensions[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 110(2): 164–176.
- [4] PENG H, WANG K. Steady-state and transient rheological

behavior of a semi-solid tin-lead alloy in simple shear flow[C]//KIRKWOOD D H, KAPRANOS P. Proceeding of 4th International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites. UK: University of Shefheld, 1996: 2–9.

- [5] MODIGELL M, KOKE J, MECH J. Time-dependent rheological properties of semi-solid metal alloys[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 1999, 3(1): 15–30.
- [6] MCLELLAND A R A, HENDERSON H G, ATKINSON H V, KIRKWOOD D H. Anomalous rheological behavior of semi-solid alloy slurries at low shear rates[J]. Materials Science and Engineering A, 1997, 232: 110–118.
- [7] ATKINSON H V, Modeling the semisolid processing of metallic alloys[J]. Progress in Materials Science, 2005, 50(3): 341–412.
- [8] KOKE J, MODIGELL M. Flow behaviour of semi-solid metal alloys[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2003, 112(2/3): 141–160.
- [9] LASHKARI O, GHOMASHCHI R. Deformation behavior of semi-solid A356 Al - Si alloy at low shear rates: Effect of fraction solid[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 486(1/2): 333-340.
- [10] KUMAR P, MARTIN C L, BROWN S. Constitutive modeling and characterization of the flow behavior of semi-solid metal alloys slurries— I. The flow response[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1994, 42(11): 3595–3602.
- [11] MARTIN C L, KUMAR P, BROWN S. Constitutive modeling and characterization of the flow behavior of semi-solid metal alloy slurries— II . Structural evolution under shear deformation[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1994, 42(11): 3603–3614.
- [12] TURNG L S, WANG K K. Rheological behavior and modeling of semi-solid Sn-15% Pb alloy[J]. Journal of Material Science, 1991, 26(8): 2173–2183.
- [13] QUAAK C J, KATGERMAN L, KOOL W H. Viscosity evolution of partially solidified aluminum slurries after a shear rate jump[C]//KIRKWOOD D H, KAPRANOS P. Proceeding of 4th International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites. UK: University of Sheffield, 1996: 35–39.
- [14] JOLY P A, MERHABIAN R. The rheology of a partially solid alloy[J]. Journal of Material Science, 1976, 11(8): 1393–1418.
- [15] KAPRANOS P, LIU T Y, ATKINSON H V, KIRKWOOD D H. Investigation into the rapid compression of semi-solid alloy slugs[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111(1/3): 31–36.
- [16] FAVIER V, ROUFF C, BIGOT R, BERVEILLER M, ROBELET M. Micro-macro modeling of the isothermal steady-state behavior of semi-solids[J]. Int J Forming Processes, 2004, 7: 177–194.
- [17] 史立峰. ZL201合金半固态触变压铸及数值模拟[D]. 沈阳: 东 北大学, 2005.

SHI Li-feng. Research on the semi-solid thixodie-casting of

ZL201 alloy and numerical simulation[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.

- [18] KIM W Y, KANG C G, KIM B M. The effect of the solid fraction on rheological behavior of wrought aluminum alloys in incremental compression experiments with a closed die[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 447: 1–10.
- [19] 林启权,张 辉,膨大署,林高用,杨立斌. 2519铝合金热压 缩变形流变应力行为[J]. 热加工工艺, 2002, 3: 3-5. LIN Qi-quan, ZHANG Hui, PENG Da-shu, LIN Gao-yong, YANG Li-bin. Flow stress behavior of 2591 aluminum alloy under hot compression deformation[J]. Hot Working Technology, 2002, 3: 3-5.
- [20] YURKO J A, FLEMINGS M C. Rheology and microstructure of semi-solid aluminum alloys compressed in the drop-forge viscometer[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33(8): 2737–2746.
- [21] 崔成林, 毛卫民, 赵爱民, 钟雪友. 半固态触变压射成形过程 模拟及验证[J]. 北京科技大学学报, 2001, 23(3): 237-239.

CUI Cheng-lin, MAO Wei-min, ZHAO Ai-min, ZHONG Xue-you. Verification and numerical simulation for semi-solid modeling the thixoforming process[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2001, 23(3): 237–239.

- [22] 胡亚平,陈国香. 镁合金压铸充型过程的模拟仿真与试验验 证[J]. 模具工业, 2008, 34(7): 49-53.
 HU Ya-ping, CHENG Guo-xiang. Simulation and experimental verification of the casting and filling process of magnesium alloy[J]. Die Industry, 2008, 34(7): 49-53.
- [23] 王 平,康 浩,史立峰,路贵民,崔建忠. ZL201合金半固态成形的AnyCasting模拟与验证[J]. 稀有金属材料与工程,2006,35(6):880-884.
 WANG Ping, KANG Hao, SHI Li-feng, LU Gui-min, CUI

Jian-zhong. AnyCasting simulating validating for the die Casting of semi-solid ZL201 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(6): 880–884.

(编辑 李艳红)