

[文章编号] 1004- 0609(2002)03- 0430- 06

液固温区不同初生 α 相形态 A356 合金的流变行为^①

唐靖林¹, 殷雅俊¹, 范钦珊¹, 曾大本²

(1. 清华大学 力学工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 机械工程系, 北京 100084)

[摘 要] 对传统的静态剪切流变实验方法进行了改进, 研究了不同初生 α 相形态半固态 A356 合金的流变规律。通过对实验结果进行分析, 提出用 6 个特征参数描述半固态 A356 合金的静态剪切流变特征: 加载瞬时切变 γ_1 , 卸载瞬时恢复切变 γ_2 , 加载过程总切变 γ_3 , 卸载稳定状态下的切变 γ_4 , 加载时间 t_1 及卸载稳定时间 t_2 。采用回归分析得到流变参数与切变应力、初生 α 相组织以及固相体积分数的关系, 为系统评定半固态 A356 合金的流变行为提供了实验依据。

[关键词] A356 合金; 初生 α 相; 流变行为; 静态剪切

[中图分类号] TG 146.2; TG 115.9

[文献标识码] A

对于半固态合金流变行为的研究, 浸入式静态剪切试验是主要的研究手段之一^[1~4]。迄今为止, 静态剪切流变实验的研究对象仅仅局限于枝晶组织半固态合金, 而对退化枝晶半固态合金的研究还有待于实验方法和实验手段的进一步改进^[2]。以往的研究表明, 随着初生 α 相由枝晶向退化枝晶转变, 半固态合金的流变性能将产生显著变化^[5~9]。因此, 研究不同初生相形态半固态合金的流变行为, 无论是对于丰富流变理论还是指导半固态成形过程都具有十分重要的意义。

本研究对传统静态流变实验方法进行改进, 使之可以考察半固态合金的组织状态对其流变行为的影响, 其主要目的是系统研究不同组织状态半固态 A356 合金在不同固相体积分数下的流变规律, 从而为评定半固态合金流变性能以及确定流变模型提供依据。

1 实验条件和方法

所用实验材料为 A356.2 合金, 其化学成分(质量分数, %) 为 Si 6.74, Fe 0.072, Cu 0.005, Mg 0.26, Mn 0.001, Zn 0.022, Ti 0.18, Sr 0.005, Ca 0.0013, Al 余量。

静态剪切实验装置如图 1 所示。静态剪切实验温度分别为 571, 580 和 590 $^{\circ}\text{C}$ 。由差热分析可知, 对应的固相体积分数 f_s 分别为 0.80, 0.40 和

0.26。采用金属型在室温下凝固, 得到具有枝晶初生 α 相组织的合金; 在合金凝固至液固温区后施加等温搅拌, 通过控制等温搅拌时间得到具有不同初生 α 相形态的退化枝晶组织的合金。当试样加热至液固温区某一温度时进行加载, 使之产生蠕变, 直至蠕变非常缓慢时卸载, 随后试样进入反蠕变恢复阶段, 直至达到平衡态。与此同时, 数据采集系统同

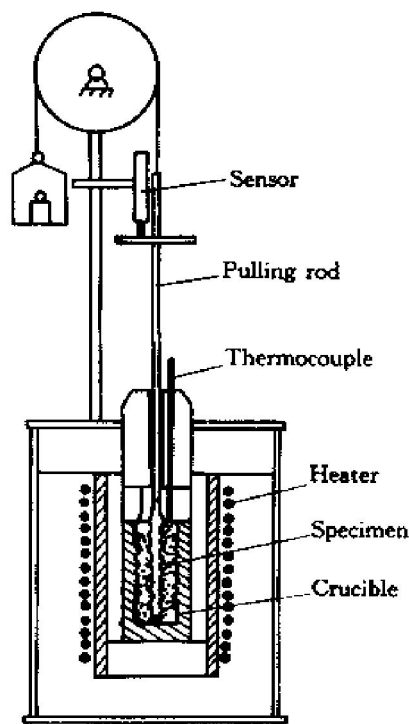


图 1 静态剪切实验原理

Fig. 1 Schematic diagram of static shearing test

① [基金项目] 中国博士后基金资助项目(中博基 2000031)

[收稿日期] 2001- 02- 05; [修订日期] 2001- 10- 20

[作者简介] 唐靖林(1964-), 男, 博士。

步记录下试样在加载和卸载过程中的蠕变量和反蠕变恢复量,最后经过计算得到其应变-时间流变曲线。

2 实验结果

试样的微观组织见图 2,图中黑色部分为初生 α 相,而白亮的基体则为共晶组织。对试样的初生 α 相进行定量分析,并采用以下参数描述初生 α 相的形貌:

$$F_s=\frac{4\pi A_{av}}{l_{av}^2}$$

(1)

式中 F_s —形状系数,当其等于 1 时,初生 α 相的二维形貌为圆形;当其等于 0 时,初生 α 相的二维形貌为发达树枝状;当其介于 0 和 1 之间时,初生 α 相的二维形貌为退化枝晶。 A_{av} —初生 α 相面积的算术平均值。 l_{av} —初生 α 相周长的算术平均值。

初生 α 相的定量分析结果见表 1。对不同实验条件下应变-时间曲线进行分析,可以归纳出不同组织 A356 合金静态剪切流变规律的一般特征(见图 3)。由图 3 可见,流变曲线由加载蠕变曲线和反蠕变恢复曲线两部分组成。加载瞬间首先产生瞬时变形,随后变形进入弹性前效阶段,经过一定时间后曲线进入稳定状态;卸载瞬间将产生瞬时反蠕变

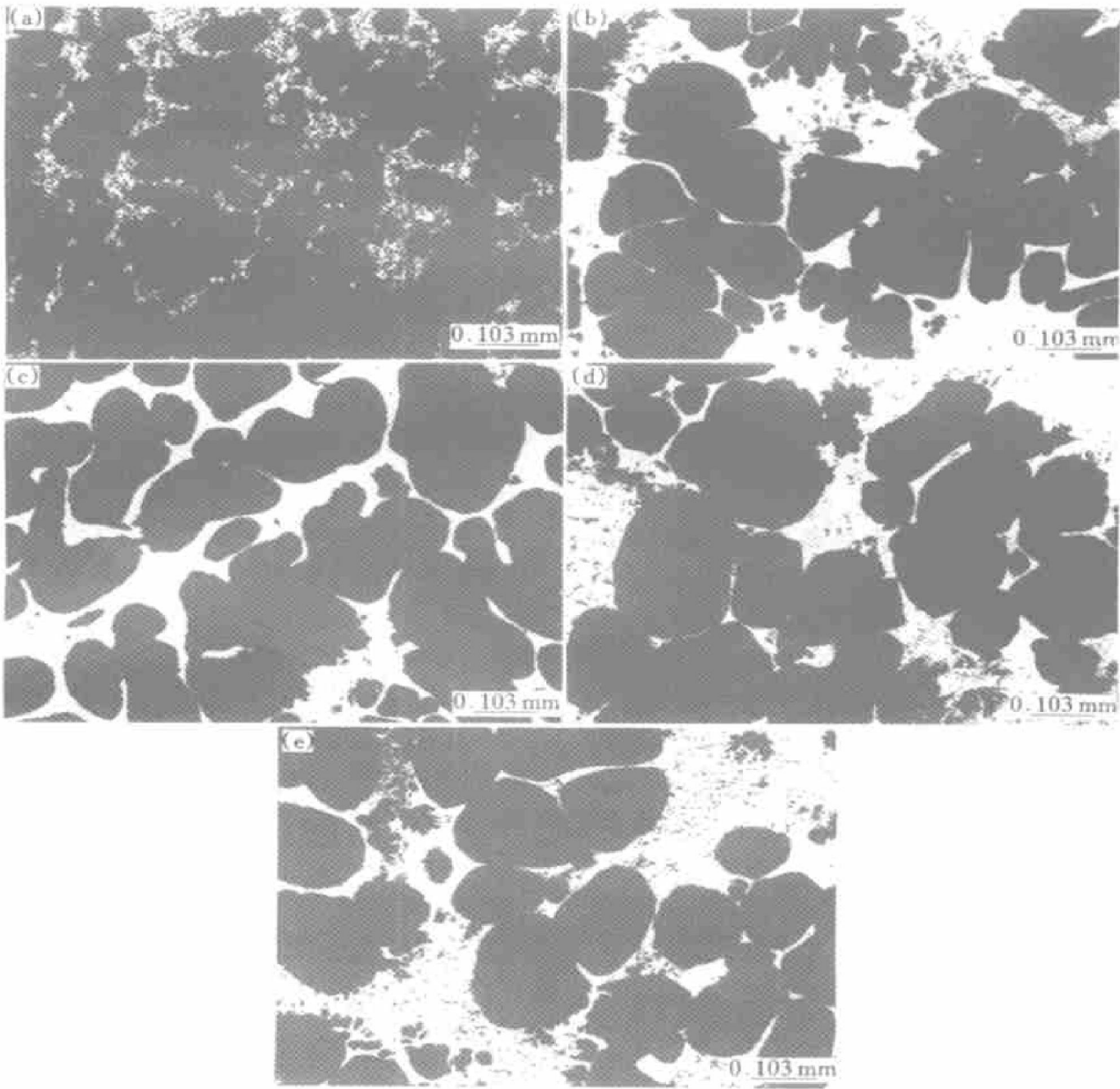


图 2 A356 合金的显微组织(SEM)

Fig. 2 SEM microstructures of A356 alloy

Time of isothermal shearing: (a) —0; (b) —1 200 s; (c) —3 000 s; (d) —5 400 s; (e) —7 200 s

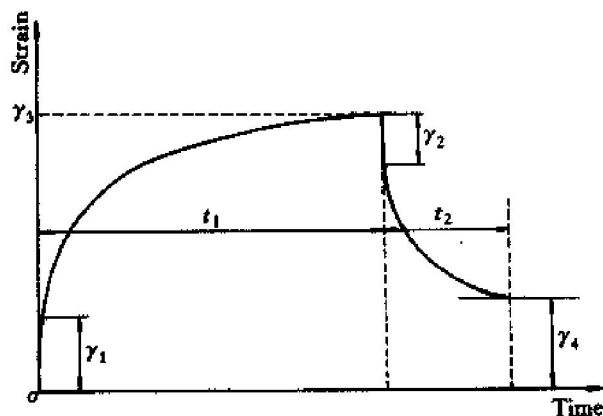


图 3 静态剪切流变曲线的一般形式示意图

Fig. 3 General type of static rheologic curves of A356 alloy

表 1 A356 合金初生相形貌的图像分析结果

Table 1 Result of graphic analysis of primary α phase of A356 alloy

Stirring time/s	0	1 200	3 000	5 400	7 200
F_s	0.06	0.36	0.45	0.86	0.95

恢复变形, 随后进入弹性后效阶段, 经过一段时间后恢复至稳定状态。

可以利用图 3 所示的 6 个特征参数来描述半固态 A356 合金的静态剪切流变特征, 即加载瞬时切变 γ_1 、卸载瞬时反蠕变恢复切变 γ_2 、加载过程总切变 γ_3 、卸载稳定状态切变 γ_4 、加载时间 t_1 及卸载稳定时间 t_2 。

这些特征参数的主要作用是确定流变模型类型和评价材料的流变性能。加载瞬时切变 γ_1 反映了半固态材料在一定切应力作用下的瞬时变形能力; 卸载瞬时反蠕变恢复切变 γ_2 反映了材料在卸载情况下变形反弹的大小; 加载过程总切变 γ_3 反映了材料在一定载荷作用下的总变形能力; 卸载稳定切变 γ_4 反映了材料保持形变的程度, 即残余切变的大小; 加载时间 t_1 为实验加载过程的持续时间; 卸

载稳定时间 t_2 反映了材料变形恢复的时间。

对于不同组织形态的半固态合金, 可以根据静态剪切应变—时间流变曲线确定各流变特征参数。特征参数与加载应力、初生 α 相形态、固相体积分数之间的关系, 反映了半固态合金流变规律的主要特征, 成为评定半固态合金流变行为以及确定流变模型的基本依据。

2.1 加载时的瞬时切变

对加载瞬时切变与应力之间的关系进行拟合, 得出瞬时切变与加载应力的关系式

$$\gamma_1 = \begin{cases} 0 & (\tau_c \leq b_1/a_1) \\ a_1 \tau_c - b_1 & (\tau_c > b_1/a_1) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $a_1 (> 0)$, $b_1 (> 0)$ —拟合系数; τ_c —加载应力, kPa。

拟合系数 a_1 和 b_1 与半固态合金的初生 α 相形貌系数和固相体积分数的关系见表 2。

2.2 加载过程总切变

对加载过程的总切变 γ_3 与加载应力之间的关系进行拟合, 得出加载过程总切变与加载应力的关系式:

$$\gamma_3 = \begin{cases} 0 & (\tau_c \leq b_3/a_3) \\ a_3 \tau_c - b_3 & (\tau_c > b_3/a_3) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $a_3 (> 0)$, $b_3 (> 0)$ —拟合系数; τ_c —加载应力, kPa。

拟合系数 a_3 和 b_3 与半固态合金的初生 α 相形貌系数和固相体积分数的关系见表 3。

2.3 卸载瞬时恢复切变

卸载瞬时恢复反映了半固态合金的弹性特征, 往往与瞬时加载切变是相互对应的。因此考察加载瞬时切变 γ_1 与卸载瞬时恢复切变 γ_2 的相对大小与加载应力之间的关系是十分必要的, 具体结果见表

表 2 瞬时切变—加载应力拟合曲线系数及其 R 平方值Table 2 Parameters of regression analysis of transient strain—stress and its R -square

F_s	$f_s = 0.80$			$f_s = 0.40$			$f_s = 0.26$		
	a_1	b_1	R^2	a_1	b_1	R^2	a_1	b_1	R^2
0.06	0.003 9	0.000 5	0.959 3	0.098 6	0.037 4	0.953 6	0.154 3	0.059 4	0.950 5
0.36	0.005 4	0.002 2	0.855 8	0.198 9	0.060 8	0.956 1	0.334 6	0.075 0	0.942 2
0.45	0.012 3	0.006 2	0.908 4	0.233 7	0.065 2	0.972 4	0.409 3	0.094 2	0.963 2
0.86	0.017 6	0.007 4	0.944 8	0.269 3	0.074 0	0.967 4	0.680 4	0.095 8	0.925 0
0.95	0.023 0	0.008 8	0.956 8	0.304 1	0.075 0	0.951 0	0.794 4	0.113 9	0.988 9

表 3 加载过程总切变-加载应力拟合曲线系数及其 R 平方值

Table 3 Parameters of regression analysis of total strain-stress and its R-square

F_s	$f_s=0.80$			$f_s=0.40$			$f_s=0.26$		
	a_3	b_3	R^2	a_3	b_3	R^2	a_3	b_3	R^2
0.06	0.009 3	0.001 6	0.982 2	0.115 0	0.010 9	0.885 6	0.268 2	0.033 0	0.991 3
0.36	0.009 6	0.002 2	0.986 6	0.365 3	0.086 3	0.987 1	0.878 9	0.180 3	0.964 5
0.45	0.016 7	0.003 4	0.981 2	0.593 0	0.125 1	0.983 8	1.280 9	0.200 5	0.989 6
0.86	0.030 2	0.005 2	0.990 7	0.948 5	0.129 3	0.990 7	1.825 2	0.240 3	0.959 7
0.95	0.037 5	0.007 3	0.990 2	1.417 5	0.213 9	0.976 4	2.344 2	0.271 2	0.992 7

4. 结果表明, 随初生 α 相形貌参数 f_s 逐渐增加, 即随着初生 α 相不断退化, 半固态合金的瞬时恢复切变逐渐减小。当初生 α 相为枝晶时, γ_2 与 γ_1 之比近似为 1, 说明加载过程产生的瞬时切变与卸载时的瞬时恢复切变相等, 这是枝晶组织半固态 A356 合金静态剪切流变规律的主要特征之一。当初生 α 相为近似球状($F_s=0.95$) 时, γ_2 与 γ_1 之比为 0, 这是球状初生 α 相组织半固态 A356 合金静态剪切流变规律的主要特征之一。当初生 α 相形态介于上述组织形态之间时, 半固态 A356 合金卸载瞬时恢复切变量 γ_2 小于加载瞬时切变量 γ_1 , 而且 γ_2 与 γ_1 之比近似为常数。

表 4 不同条件下的 γ_2/γ_1 值

Table 4 Values of γ_2/γ_1 under different test conditions

F_s	$f_s=0.80$	$f_s=0.40$	$f_s=0.26$
0.06	0.98	0.98	1.00
0.36	0.79	0.66	0.66
0.45	0.65	0.43	0.54
0.86	0.27	0.18	0.24
0.95	0	0	0

2.4 卸载残余切变

卸载稳定切变 γ_4 反映了材料保持形变的程度, 即残余切变的大小。对实验结果进行拟合, 得出卸载残余切变与加载应力的关系式

$$\gamma_4=\begin{cases} 0 & (\tau_c\leqslant b_4/a_4) \\ a_4\tau_c-b_4 & (\tau_c>b_4/a_4) \end{cases} \quad (4)$$

式中 $a_4(>0)$, $b_4(>0)$ —拟合系数; τ_c —加载应力, kPa。

拟合系数 a_4 和 b_4 与半固态合金的初生 α 相形貌系数和固相体积分数的关系见表 5。

2.5 加载时间 t_1 及卸载稳定时间 t_2

在实验过程中, 加载时间 $t_1=480$ s, 卸载稳定时间可由流变曲线上测量。卸载稳定时间是计算卸载平均切变速率的重要参数, 限于篇幅这里不再赘述。

3 分析讨论

上述实验结果表明了不同固相体积分数条件下, 半固态 A356 合金的流变特征参数与加载应力和初生 α 相形貌参数 F_s 之间的关系。 τ_c 的量纲为 kPa, a_i 的量纲为 kPa^{-1} , 而 b_i 是无量纲量, 只有当加载应力大于 b_i/a_i 时, 半固态合金才能产生相应切变。因此, b_i/a_i 表示半固态合金产生相应切变的最小加载应力, 可以用 $\tau_{i\min}$ 表示。显然, $\tau_{i\min}$ 与半固态合金的固相体积分数以及初生 α 相的形态有关, 分别根据表 2, 3 和 5 可以计算出相应的 $\tau_{i\min}$ 值。 R 平方值称为决定系数, 是取值范围为 0 到 1 的指示器, 它表示拟合曲线的估计值与对应的实际数据之间的拟合程度。当拟合曲线的 R 平方值等于或接近 1 时, 其可靠性最高; 由表 2, 3 和 5 可知, 上述拟合关系式具有较高的可靠性。

由实验结果可知, 半固态 A356 合金的加载瞬时切变量和加载过程总切变量随加载应力和温度的增加而增加。在加载应力相同的条件下, 半固态合金的瞬时切变量随初生 α 相形貌参数 F_s 的增加而增加。结果表明, 随着初生 α 相由枝晶逐渐退化, 半固态合金的切变能力显著增加。

由式(4)和(5)可知, 拟合系数 a_1 和 a_3 是相应切变—加载应力曲线的斜率, 表征加载切变量对加载应力的敏感程度, 可以定义为应力敏感系数, 并且其大小与固相体积分数和初生 α 相形态有关。由实验结果可知, 当半固态合金的初生 α 相由枝晶退化到球状晶时, 应力敏感系数有较大幅度的增加, 表明加载切变量对应力的敏感性越来越显著。由上

表 5 残余切变—加载应力拟合曲线系数及其 R 平方值Table 5 Parameters of regression analysis of residual strain—stress and its R -square

F_s	$f_s = 0.80$			$f_s = 0.40$			$f_s = 0.26$		
	a_4	b_4	R^2	a_4	b_4	R^2	a_4	b_4	R^2
0.95	0.017 3	0.003 3	0.980 5	0.497 4	0.057 6	0.995 8	0.520 1	0.077 3	0.869 2
0.86	0.012 2	0.002 7	0.977 5	0.294 1	0.032 7	0.994 2	0.512 1	0.074 0	1.000 0
0.45	0.005 8	0.002 9	0.950 4	0.163 0	0.045 6	0.973 3	0.328 8	0.051 9	0.996
0.36	0.003 9	0.002 4	0.905 8	0.051 0	0.021 0	0.833 0	0.198 4	0.041 4	0.992 5
0.06	0.002 9	0.002 2	0.813 5	0.003 3	0.002 4	0.835 4	0.012 7	0.006 8	0.834 7

述结果可知, 固相体积分数对应力敏感系数随组织的变化规律也有着显著的影响。

由 2.4 的实验结果可知, 半固态 A356 合金的残余切变量随加载应力增加而增加, 随初生 α 相固相体积分数的增加而减小。在加载应力相同的条件下, 半固态合金的残余切变量随初生 α 相形貌参数 F_s 值的增加而增加, 即随着初生 α 相由枝晶逐渐退化, 半固态合金卸载稳定状态下的残余切变逐渐增加。

随着半固态合金初生相的逐渐退化, 初生相形态逐渐趋近于球状(见图 2)。由文献和实验结果可知, 这种微观组织的不同造成了半固态合金的流变行为的显著差异^[10~13]。由于退化枝晶在剪切过程中的内摩擦力大大降低(流动变形原理见图 4), 从而使退化枝晶半固态合金的流变性能比发达枝晶半固态合金显著提高, 这也使得半固态成形变成可能。

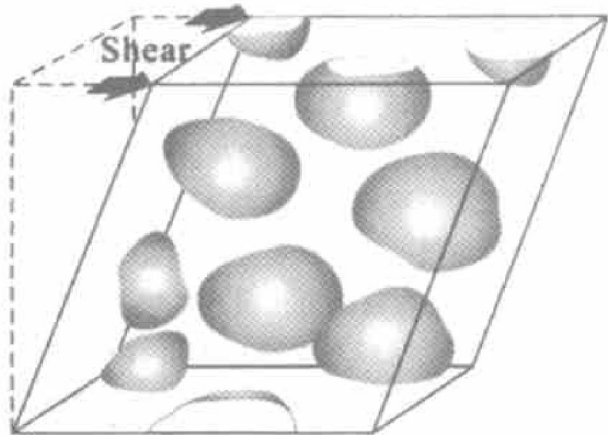


图 4 退化初生相组织半固态合金的流变行为

Fig. 4 Rheological behavior of volume element of semisolid nondendritic alloy

总之, 枝晶组织半固态 A356 合金的静态剪切流变特征与其它文献中的结果是一致的^[1, 2]; 但是, 退化枝晶半固态 A356 合金则呈现出不同的流变特征, 而此流变特征的差异将有助于建立更加精

确的流变模型, 从而为半固态成形过程的预测提供理论依据^[14~16]。

4 结论

1) 在相同固相体积分数条件下, 初生 α 相形态对液固温区 A356 合金的流变行为有显著影响。随着初生 α 相由枝晶逐渐退化, 半固态合金的切变能力显著增加, 卸载后的残余切变量也逐渐增加。

2) 根据流变实验结果, 引入 6 个特征参数来描述半固态 A356 合金的静态剪切流变特征: 加载瞬时切变 γ_1 , 卸载瞬时恢复切变 γ_2 , 加载过程总切变 γ_3 , 卸载稳定状态下的切变 γ_4 , 加载时间 t_1 及卸载稳定时间 t_2 。通过回归分析得到了特征参数与加载应力、半固态合金初生 α 相组织以及固相体积分数之间的定量关系, 成为评定半固态合金流变行为以及确定流变模型的基本依据。

3) 实验结果表明, 随着初生 α 相不断退化, 半固态合金的瞬时反蠕变恢复切变逐渐减小。枝晶组织半固态 A356 合金的主要流变特征是加载产生的瞬时切变与卸载反蠕变恢复切变相等。球状初生 α 相组织半固态 A356 合金的主要流变特征是卸载反蠕变瞬时恢复切变为零。

[REFERENCES]

- [1] 王启宏. 材料流变学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984. 1-80.
WANG Qihong. Rheology of Materials [M]. Beijing: China Architectural Industry Press, 1984. 1-80.
- [2] 林柏年. 铸造流变学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1991. 50-70.
LIN Bo-nian. Rheology of Foundry [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1991. 50-70.
- [3] Barnes H A, Hutton J F, Walters K. An Introduction to Rheology [M]. Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo:

- Elsevier, 1989. 21– 29.
- [4] Collyer A A, Clegg D W. Rheological Measurement [M]. London and New York: Elsevier Applied Science, 1990. 110– 120.
- [5] Hans J, Heine. Metal casting for the 21st century [J]. Foundry Management & Technology, 1996(12): 31– 33.
- [6] Anon. Semisolid processing moves into industrial era [J]. Powder Metallurgy, 1996, 39(3): 164– 166.
- [7] Flemings M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state [J]. Metallurgical Transactions A, 1991, 22(5): 957– 981.
- [8] Stephen P M, Brissing K. Semisolid casting of aluminum alloys: a status report [J]. Modern Casting, 1997(2): 41– 45.
- [9] Kapronos P. Semisolid metal processing: an environmentally friendly process [J]. Material World, 1994, 9: 465– 467.
- [10] Loue W R, Suery M. Microstructural evolution during partial remelting of AlSi7Mg alloys [J]. Mater Sci Eng, 1995, A203: 1– 6.
- [11] Lee J I, Lee H I, Kim M I. Formation of spherical primary silicon crystals during semisolid processing of hypereutectic Al 15.5wt-percent-Si alloy [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1995, 32(12): 1945– 1949.
- [12] Dahle A, Arnberg L. The rheological properties of solidifying aluminum foundry alloys [J]. JOM, 1996(3): 34– 37.
- [13] Yang Y S, Tsao C Y A. Viscosity and structure variations of Al-Si alloy in the semisolid state [J]. Journal of Materials Science, 1997, 32: 2087– 2092.
- [14] Koc M, Vazquez V, Witulski T. Application of the finite element method to predict material flow and defects in the semisolid forging of A356 aluminum alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 59: 106– 112.
- [15] Alexandrou A, Bardinet F, Loue W. Mathematical and computational modeling of die filling in semisolid metal processing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 96(1– 3): 59– 72.
- [16] Kang C G, Jung H K. Finite element analysis with deformation behavior modeling of globular microstructure in forming process of semisolid materials [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1999, 41(12): 1423– 1445.

Rheological behavior of semisolid A356 alloy with different morphology of primary α phases

TANG Jing-lin¹, YIN Ya-jun¹, FAN Qian-shan¹, ZENG Da-ben²

(1. Engineering Mechanics Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Mechanical Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[Abstract] Traditional static shear tests were revised so as to study the rheological behavior of semisolid A356 alloy with different microstructure morphology. Six characteristic parameters, consisting of transient shear strain γ_1 after loading, transient recovery shear strain γ_2 after unloading, total shear strain γ_3 during the period of loading, residual shear strain γ_4 after unloading, time t_1 of loading and time t_2 between the initial unloading and the steady state after unloading, were put forward on the basis of analysis of different kinds of rheological curves. The relations of characteristic parameters to shear stress, morphology of primary α phases, as well as solid fraction were obtained by regression analysis, so that the rheological behavior of semisolid A356 alloy can be evaluated systematically.

[Key words] A356 alloy; primary α phase; rheological behavior; static shear

(编辑 袁赛前)