

液-固温区 A356 合金剪切速率阶梯变化的瞬态流变行为*

唐靖林 殷雅俊 范钦珊

(清华大学力学工程系, 北京 100084)

曾大本

(清华大学机械工程系, 北京 100084)

摘要 采用自制的流变装置进行瞬态流变实验, 研究了 A356 合金剪切速率阶梯变化对液-固温区不同初生 α 相形态瞬态流变行为的影响. 初始剪切速率为 367.3 s^{-1} , 剪切速率阶梯变化值分别为: 50.2, 83.7, 118.6, 141.8 和 195.3 s^{-1} . 结果表明, 剪切速率由较低值向初始值阶梯变化时, 剪切应力首先出现瞬时峰值, 并且随着剪切过程的进行剪切应力逐渐降低至稳态. 对实验结果进行曲线拟合, 得出剪切应力与时间的瞬态流变经验方程式 $\tau - \tau_s = \tau_{\Delta p} e^{-kt}$, 以及方程参数与半固态合金初生 α 相形态和剪切速率的关系.

关键词 半固态合金, 瞬态流变行为, 剪切速率阶梯变化, 表观粘度, A356 合金

中图分类号 TG146.2, TG115.9 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2001)10-1031-04

STUDY ON TRANSIENT RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF SEMI-SOLID A356 ALLOY APPLIED WITH STEP VARIED SHEAR RATE

TANG Jinglin, YIN Yajun, FAN Qinshan

Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084

ZENG Daben

Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

Correspondent: TANG Jinglin, Tel: (010)62773639, Fax: (010)62788074,

E-mail: tangjl@mail.tsinghua.edu.cn

Manuscript received 2001-02-12, in revised form 2001-06-11

ABSTRACT The influence of step variation of shear rate on transient rheological behavior of semi-solid A356 alloy with different morphologies of primary α -phase was explored through the use of rest time experiment by a self-designed rheometer. The initial shear rate was 367.3 s^{-1} , the variation values of shear rate were 50.2, 83.7, 118.6, 141.8 and 195.3 s^{-1} respectively. Results indicated that the shear stress changed gradually from the transient peak value to its steady-state value while the shear rate altered from the given value to that of the initial shear rate. Empiric transient rheological equation, $\tau - \tau_s = \tau_{\Delta p} e^{-kt}$, which is used to describe the relations of shear stress, shear time, shear rate and morphology of primary α -phase, was obtained by ways of regression analysis.

KEY WORDS semi-solid alloy, transient rheological behavior, step variation of shear rate, apparent viscosity, A356 alloy

目前, 半固态成形技术正逐渐成为一种有效的近终形的成形方法^[1,2]. 迄今为止, 有关半固态合金流变行为的研究成果绝大部分是在稳态下获得的^[3-5]. 在实际工艺条件下, 充型或施压过程均在极短时间内完成, 因此, 在稳态下获得的研究结果与实际工艺条件下半固态合金的流变行为有较大差距. 深入了解半固态合金的瞬态流变行

为有利于确定合适的过程条件, 有助于对半固态合金的流动和充型过程建立模型.

在等温搅拌过程中, 半固态合金微观结构的变化将导致剪切应力的变化. 在稳定状态下, 半固态合金的微观结构与剪切速率的大小具有对应关系. 如果在某一稳态条件下使剪切速率产生阶梯变化, 在此条件下测量的峰值或谷值剪切应力与稳态剪切应力之间的关系对研究瞬态剪切过程中半固态合金微观结构随剪切速率的变化过程有重要的意义^[6].

本工作对剪切速率阶梯变化条件下半固态 A356 合金瞬态流变行为进行了研究, 为揭示半固态合金瞬态流变

* 清华大学机械工程学院重点基金资助项目

收到初稿日期: 2001-02-12, 收到修改稿日期: 2001-06-11

作者简介: 唐靖林, 男, 1965 年生, 博士后

本构关系提供了实验依据。

1 实验方法

瞬态流变实验设备如图 1 所示。实验材料为 A356 合金。光谱分析的化学成分 (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。瞬态剪切实验温度为 580 °C, 半固态合金的固相体积分数相应为 0.40。将合金熔化后, 采用氮气精炼、Al-Ti-B 合金细化处理及 Al-Sr 合金变质处理。在实验过程中, 计算机数据采集系统同步采集试样温度和搅拌扭矩, 再将扭矩值换算成剪切应力^[6]。等温剪切过程剪切速率 $\dot{\gamma}$ 为 141.8 s^{-1} 。在等温剪切过程中, 分别于 60, 1200, 3000 和 5400 s 时取样后在相应时刻进行瞬态剪切实验。对所取试样的初生 α 相进行定量分析, 并用如下参数描述初生 α 相的二维形态

$$F_c = 4\pi S/P^2 \quad (1)$$

式中, F_c 为形状因子; S 为初生 α 相面积的算数平均值, μm^2 ; P 为初生 α 相周长的算数平均值, μm 。

不同条件下取样的微观组织见图 2。图中黑色部分为

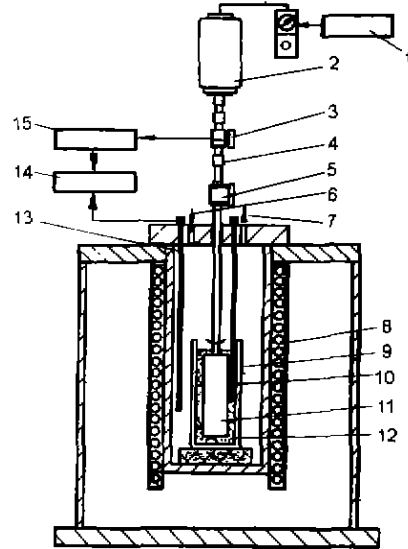


图 1 搅拌式瞬态流变装置示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of rheometer

- 1— speed controller, 2—D.C. motor, 3— torque transducer, 4— flexible coupling, 5— ball bearings, 6— nitrogen in, 7— nitrogen out, 8— heater, 9— crucible, 10— thermocouple, 11— stirrer, 12— semi-solid alloy, 13— thermocouple, 14— chart recorder, 15— torque readout

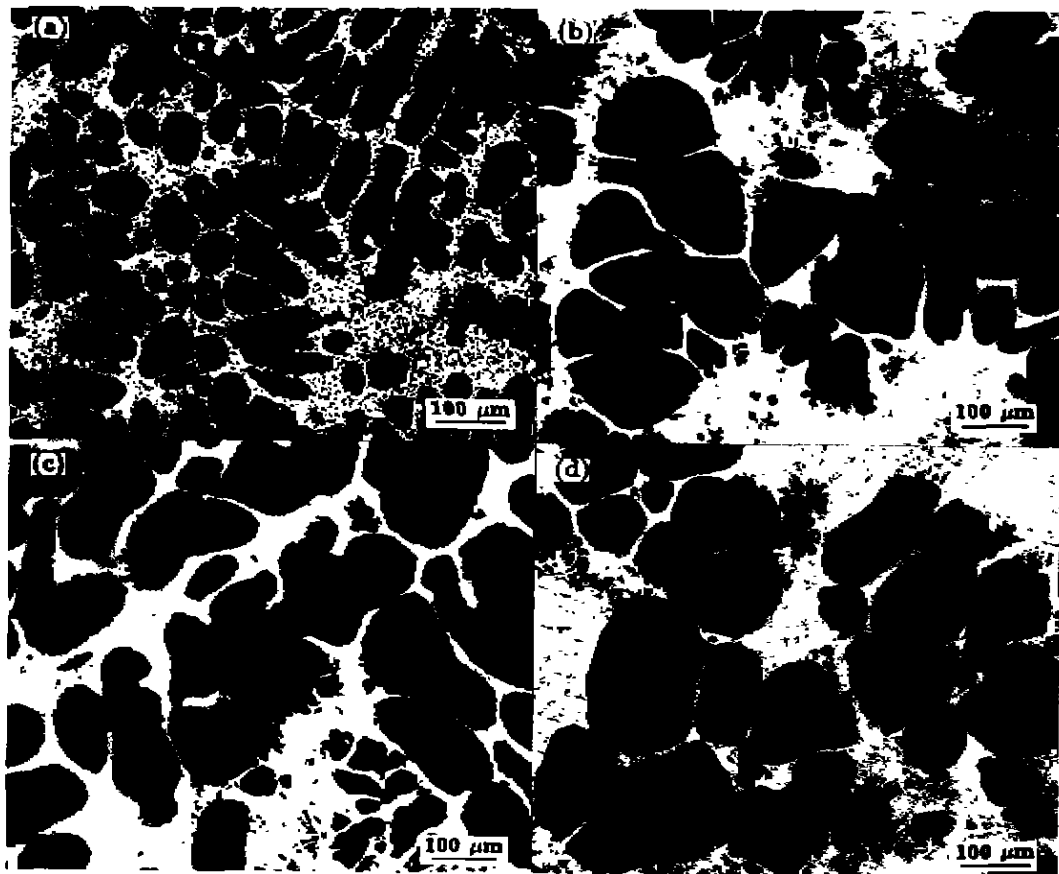


图 2 580 °C 等温剪切不同时间取样的半固态合金初生 α 相形态

Fig.2 Microstructures of semi-solid alloy A356 isothermally sheared at 580 °C for 60 s (a), 1200 s (b), 3000 s (c) and 5400 s (d)

初生 α 相。白亮的基体为共晶组织。根据定量分析和计算可知, 与等温剪切 60、1200、3000 和 5400 s 时取样相对应的 F_c 的统计平均值分别为 0.09、0.36、0.45 和 0.86。

剪切速率阶梯变化实验原理见图 3。实验过程中, 初始剪切速率 $\dot{\gamma}_0$ 为 367.3 s^{-1} , 剪切速率阶梯变化值 $\dot{\gamma}_n (n=1, 2, 3, \dots)$ 分别为 50.2、83.7、118.6、141.8 和 195.3 s^{-1} 。

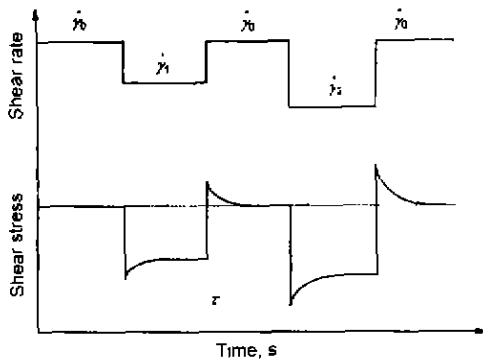


图 3 剪切速率阶梯变化瞬态流变实验示意图
Fig.3 Schematic diagram of step variation of shear rate

2 实验结果与讨论

本文仅讨论剪切速率由阶梯变化值 $\dot{\gamma}_n$ 向初始值 $\dot{\gamma}_0$ 阶梯变化时的瞬态流变过程; 限于篇幅, 对于相反过程不再赘述。由图 3 可知, 剪切速率由阶梯变化值向初始值变化时, 剪切应力首先出现瞬时峰值, 随后逐渐衰减至与初始剪切速率对应的稳态。图 4 的实验结果就是此瞬时峰值应力随时间衰减的过程。

在恒剪切速率、等温剪切过程中, 在进入稳态后的某一时刻, 半固态合金的微观结构状态与剪切速率的大小有直接的对应关系: 如果剪切速率增加, 半固态合金将产生初生相的“结构破坏”现象, 表现为初生相进一步碎化, 直至与新的剪切条件相适应为止; 如果剪切速率减小, 半固态合金将产生初生相的“结构形成”现象, 表现为初生相的团聚和合并, 直至与新的剪切条件相适应为止 [5,6]。如果在此过程中瞬时改变剪切速率的大小, 则与剪切速率变化之前对应的结构状态在新剪切速率作用下会瞬时保持不变, 一定时间后方达到与新剪切条件相对应的稳态。因此可以推知, 当剪切速率由 $\dot{\gamma}_1$ 向 $\dot{\gamma}_2$ 变化时, 剪切应力瞬时变化特点为: 当 $\dot{\gamma}_2 < \dot{\gamma}_1$ 时, 瞬时剪切应力突然降低, 并出现瞬时谷值, 直至半固态合金初生相结构逐渐调整到与新剪切速率相适应的结构状态而达到稳态; 当 $\dot{\gamma}_2 > \dot{\gamma}_1$ 时, 瞬时剪切应力则突然增加, 并出现应力峰值, 直至半固态合金初生相结构逐渐调整到与新剪切速率相适应的结构状态而达到稳态, 后者正是本文所讨论的情况。

对图 4 的实验曲线进行回归分析, 得出剪切应力 τ (单位为 Pa) 与剪切时间 t (单位为 s) 的关系式如下

$$\tau - \tau_s = \tau_{\Delta p} e^{-kt} \quad (2)$$

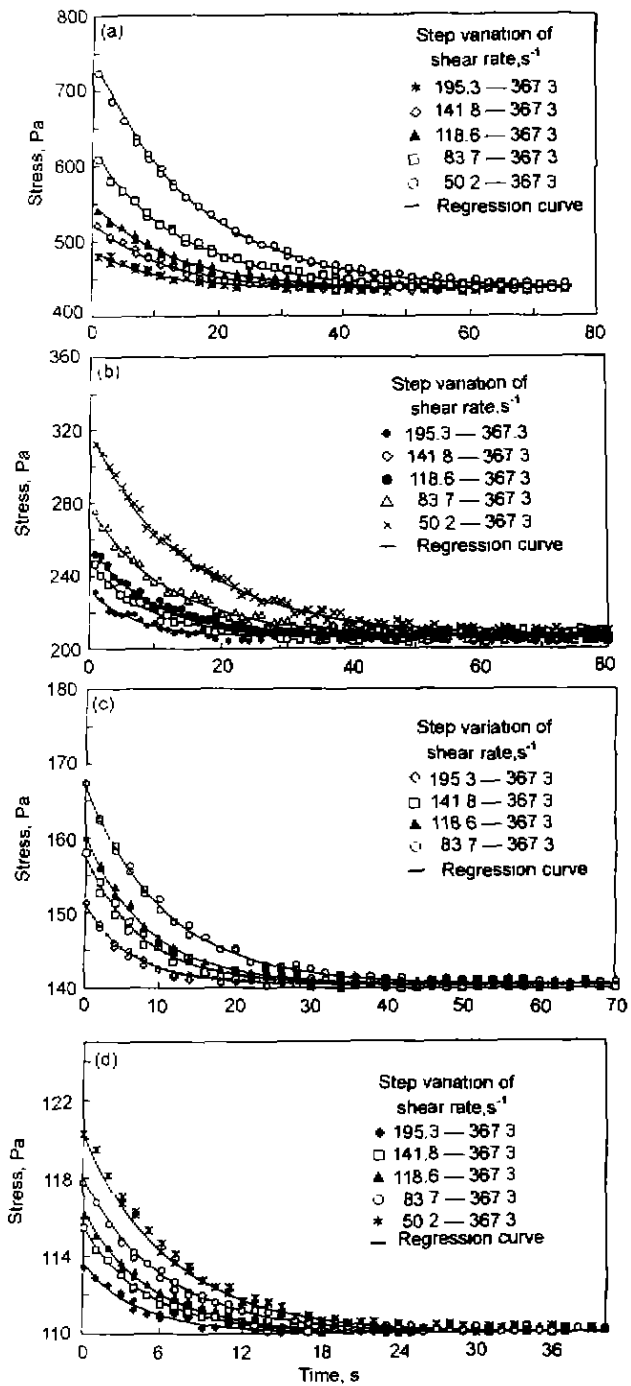


图 4 不同剪切速率阶梯变化时的 $\tau-t$ 实验曲线
Fig.4 Experimental curves of shear stress-shear time for different step variation shear rates and different shear times (shape factors of α phase F_c)
(a) 60 s, $F_c=0.09$ (b) 1200 s, $F_c=0.36$
(c) 3000 s, $F_c=0.45$ (d) 5400 s, $F_c=0.86$

表 1 剪切速率阶梯变化剪切应力-时间拟合方程参数
Table 1 Fitted parameters in regressed equation of shear stress vs time applied with step varied shear rates

$\dot{\gamma}_n$ s^{-1}	$F_c=0.09$ ($\tau_s=436.1$ Pa)			$F_c=0.36$ ($\tau_s=206.8$ Pa)			$F_c=0.45$ ($\tau_s=140.5$ Pa)			$F_c=0.86$ ($\tau_s=110.0$ Pa)		
	$\tau_{\Delta p}$ Pa	k s^{-1}	R^2	$\tau_{\Delta p}$ Pa	k s^{-1}	R^2	$\tau_{\Delta p}$ Pa	k s^{-1}	R^2	$\tau_{\Delta p}$ Pa	k s^{-1}	R^2
195.3	53.3	0.099	0.90	26.0	0.146	0.89	10.5	0.155	0.88	3.61	0.22	0.86
141.8	92.3	0.090	0.91	43.0	0.115	0.89	17.0	0.130	0.90	5.46	0.20	0.84
118.6	118.0	0.079	0.89	51.0	0.104	0.93	19.5	0.117	0.87	6.33	0.19	0.92
83.7	187.0	0.070	0.89	72.0	0.081	0.90	26.4	0.094	0.86	7.98	0.16	0.90
50.2	312.0	0.062	0.94	112.0	0.065	0.93	-	-	-	10.20	0.15	0.83

Note: $\dot{\gamma}_n$ —step variation of shear rate; F_c —shape factor of primary α phase; τ_s —stable shear stress; $\tau_{\Delta p}$, k —regression parameters

式中, τ_s 为与初始剪切速率对应的稳态剪切应力, Pa; $\tau_{\Delta p}$ 和 k 均为拟合参数, $\tau_{\Delta p}$ 的意义是剪切速率阶梯变化所引起的瞬时峰值应力与稳态应力之差 (单位为 Pa), k 则反映了峰值应力恢复到稳态的快慢程度 (单位为 s^{-1}), k 值越大则剪切应力恢复越快, $\tau_{\Delta p}$ 以及 k 值见表 1。

由表 1 可知, $\dot{\gamma}_0/\dot{\gamma}_n$ 越大, $\tau_{\Delta p}$ 值越大, 而 k 值则随之减小, 说明剪切速率阶梯变化的幅度越大, 则由此而引起的瞬时峰值剪切应力越大, 而且其恢复到稳态的时间也增长。这种情况亦适用于出现瞬时谷值剪切应力的情况。由表 1 亦可知, 随形貌参数 F_c 值的增大, $\tau_{\Delta p}$ 值显著减小, 而 k 值有较明显的增大, 因此可以得出: 随着发达枝晶初生 α 相逐渐退化, 剪切速率阶梯变化使半固态合金产生的瞬时峰值剪切应力显著降低, 并且能够很快得以恢复。同理, 这种情况也适用于出现瞬时谷值剪切应力的情况。根据表 1 的实验结果, 还可以得到剪切应力、剪切速率和初生 α 相形貌参数之间的关系。

表 1 中通过计算得到的 R^2 值接近 1, 说明拟合关系式 (2) 可以比较理想地描述不同初生 α 相形态半固态 A356 合金剪切速率阶梯变化的瞬态流变行为, 有助于为揭示半固态合金瞬态流变本构关系提供实验依据。

3 结论

(1) 对剪切速率阶梯变化瞬态流变行为的研究表明, 剪切速率阶梯变化时, 剪切应力首先出现瞬时峰值或谷值; 随着剪切过程的进行, 剪切应力逐渐恢复至稳定态。

(2) 剪切速率的阶梯变化幅度越大, 由此而引起的半

固态合金的瞬时峰值 (或谷值) 剪切应力越大; 同时, 瞬时峰值 (或谷值) 剪切应力恢复到稳态的时间增长。

(3) 随着初生 α 相由发达枝晶逐渐退化, 剪切速率阶梯变化所导致的半固态合金的瞬时峰值 (或谷值) 剪切应力显著降低, 并且能够很快得以恢复。

(4) 对实验结果进行回归分析, 得出剪切应力与时间的瞬态流变经验方程: $\tau - \tau_s = \tau_{\Delta p} e^{-kt}$, 同时得到经验方程拟合参数与半固态合金初生相形态以及剪切速率的关系。

参考文献

- [1] Flemings M C. *Metall Trans*, 1991; 22A: 957
- [2] Kirkwood H, Kapranos P. *Met Mater*, 1989; 11(1): 16
- [3] Mirai M, Takebayashi K, Yoshikawa Y. *ISIJ Int*, 1993; 33: 1182
- [4] Kamado S, Yuasa A, Hitomi T, Kojima Y. *J Jpn Inst Light Met*, 1992; 42: 734
(镰土重晴, 由 浅明, 人见高久, 小岛 阳. 轻金属, 1992; 42: 734)
- [5] Mirai M, Takebayashi K, Yoshikawa Y, Yamaguchi R. *Testu Hagané*, 1992; (6): 58
(平居正纯, 竹林可浩, 吉川雄司, 山口隆二. 铁と钢, 1992; 58)
- [6] Tang J L. *Study on rheological behavior of semi-solid A356 alloys*. Beijing: Tsinghua University, 2000
(唐靖林. 半固态 A356 合金流变行为的研究. 北京: 清华大学机械系, 2000)
- [7] Tang J L, Zeng D B. *J Mater Eng*, 2000; (8): 43
(唐靖林, 曾大本. 材料工程, 2000; (8): 43)