



## 半固态浆料流动性测试方法

目前评价半固态合金浆料的充型能力尚无标准可循。邢书明等参照液态金属充型能力评价标准,提出螺旋线型腔试件。杨湘杰和杨耀升等在各自己的研究中,提出阶梯板试件。

为了使流变成型顺利完成,部分凝固合金的流动性的控制至关重要,因为流动性是影响浆料充型能力的最主要的因素之一,而表观粘度是浆料流动性最重要的指标,所以各种因素对表观粘度的影响值得重视。这些因素主要有固相分数、剪切速率、冷却速度、流变制度和合金成分。

粘度是理解金属半固态加工过程流体力学和动力学作用的一个非常重要的流变参数,如今已经发展多种粘度测量方法,如平板压缩法,毛细管法,旋转法等。

流变性能的测定是指有效测定材料流动和变形性质的技术。目前测浆料表观粘度的方法有:

### 1. 毛细管流变仪测量

毛细管流变仪工作时,其柱塞以恒定的速度向下移动,或以恒压力作用在柱塞上,把装在料筒里已经恒温一定时间的物料从毛细管中挤出.然后通过测量流量、压力和温度等之间的关系,得出熔体在某一状态下的流变曲线和表观粘度。其表观粘度可根据如下公式(1)计算:

$$\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_R} = \frac{\Delta P R / 2 L}{4 Q / \pi R^3} \quad (1)$$

式中的 $\Delta P$ 和 $Q$ 可以用毛细管流量仪测得。其中 $\Delta P$ 为管道两端压力差(Pa), $R$ 为管道的半径(m), $\tau$ 为剪切应力(Pa), $L$ 为管道长度(m), $Q$ 为管道流量( $m^3/s$ ), $\dot{\gamma}$ 为剪切速率( $S^{-1}$ ), $\eta$ 为粘度(Pa.s), $v$ 为流体速度(m/s)。

如图1所示为毛细管粘度计简图:

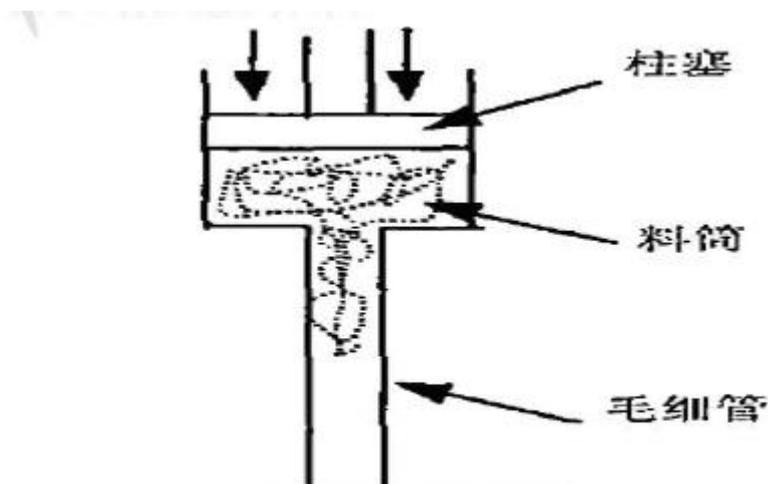


图1. 毛细管粘度计简图

### 2. 转矩流变仪

转矩流变仪国外称为布拉本德(Brabender)转矩流变仪.转矩流变仪测定的参数为转矩、温度、转速和时间的相关数据.通过对转矩等参数的测量,可确定剪应力、剪切速率、粘度等流变参数.该类流变仪在研究半固态合金的半固态流变特性的实验中凡乎未见报道。

### 3. 同轴圆筒粘度计

同轴圆筒粘度计是测定粘度的基本仪器,主要用于测量聚合物、乳胶、塑料溶液和悬浮



液的流变特性。由于同轴圆筒粘度计制造工艺简单,所以在半固态金属的变特性研究中,大部分实验装置都是基于这种仪器的基本原理设计制作的,并用来测定半固态金属的流变特性。其测试原理是把两个直径不同的圆筒,同轴套在一起,被测金属熔体装在两筒之间的环形空间里,驱动内筒或外筒旋转。在粘性作用下,转筒表面产生切应力,也就产生了转动力矩。通过装在旋转轴上的扭矩传感器记录扭矩和转速,并把力矩转换成切应力,由转速计算出切变速率,就可以根据牛顿粘性定律计算出流体的表观粘度。他有两种类型:外筒静止,内筒旋转的为 Searle 型;内筒静止,外筒旋转的为 Couette 型。通过调整圆筒的转速就可以获得不同的剪切速率,因此用该流变仪可以获得很高而且范围很宽的剪切速率。对于牛顿流体来讲,当受到剪切作用时满足式 (2):

$$\tau = \eta \frac{dv}{dr} \quad (2)$$

其中,  $\tau$  为剪切应力,  $\eta$  为流体的粘度,  $dv / dr$  为流体运动法线方向上的速度梯度。旋转筒受到的扭矩  $M$  与剪切应力满足关系式 (3):

$$M = \tau \cdot S \cdot r \quad (3)$$

式中,  $S$  为流体与测距筒的接触面积,  $r$  为熔体的旋转半径。这样通过上面两式,就可以计算出流体的粘度。若测量的是半固态合金熔体,则计算出来的是半固态合金熔体的表观粘度,即如式(4):

$$\eta_a = \frac{M}{rS} \cdot \frac{dr}{dv} \quad (4)$$

如图 2 所示为同轴圆筒粘度计示意图:

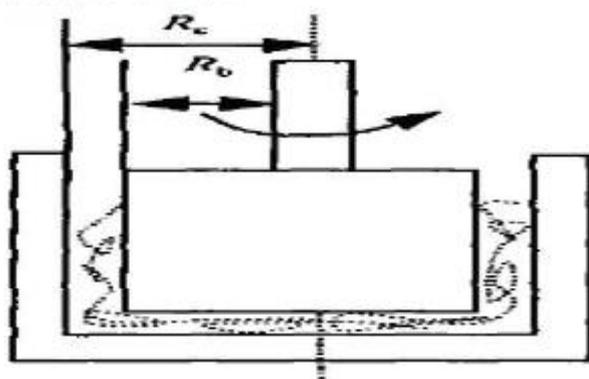


图 2 同轴圆筒粘度计

### (3) 平行平板式粘度计

平行平板式粘度计结构如图,该粘度计较为简单,将样品置于两平行平板之间,上平板、下平板均可转动.一般除用来测定粘度和剪应力外,也可用来测量表征粘弹性流体的弹性的第一法向应力差等。

如图 3 所示为平行平板式粘度计示意图:

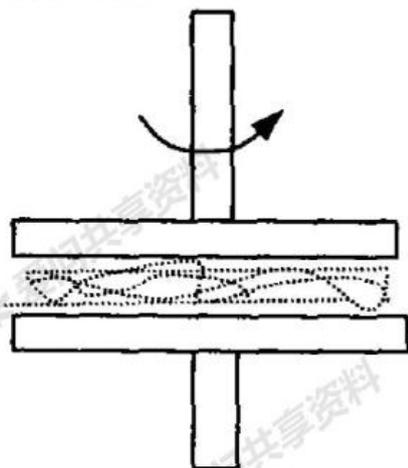


图3 平行平板式粘度计

(4)锥板式流变仪

该流变仪的锥顶部与平板之间的距离很小,将样品放置在圆锥和平板之间.可以是圆锥转动,也可以是平板转动,一般用于测定粘度和法向应力差,也可以用于测定动态性能和触变性等。锥板式流变仪的结构见图 4 所示:

图 4 锥板式流变仪

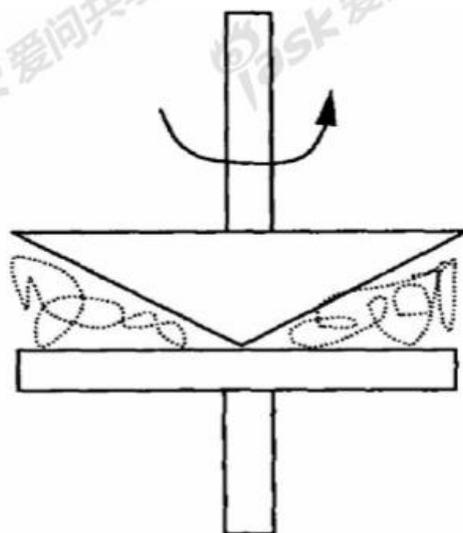


图 4 锥板式流变仪

(5)反向挤压法

反向挤压法将半固态金属坯料放入与之尺寸相同的柱状模型中,加热至一定固相分数,然后由尺寸略小于模腔内径的柱塞从上向下匀速挤压,这样半圆态合金熔体在挤压的作用下就会向上填充柱塞与型腔之间的环缝,并对柱塞产生反作用力,通过安装在柱塞上的传感器记录压力和位移。

半固态合金熔体在此过程中的表观粘度可以通过记录下的压力-时间曲线的线性部分导出,相应关系式如式(5)所示:

$$\eta_a = \frac{R_c^2 - R_p^2}{2\pi R_p C_2^2 C_1 V_r} \cdot \frac{dF}{dt} \quad (5)$$



式中， $V_r$  为柱塞的速度， $F$  为作用在柱塞上的力， $t$  为时间， $R_p$  和  $R_c$  分别为柱塞和型腔的半径， $C_1$  和  $C_2$  分别为相关常数。而柱塞和型腔之间的环缝处的平均剪切速率可以由下式(6)给出：

$$\dot{\gamma} = \frac{C_1 \left[ \ln \left( \frac{-C_1}{2C_2 R_c R_p} \right) - 1 \right] - C_2 (R_c^2 - R_p^2)}{R_c - R_p} \quad (6)$$

该方法目前主要用于测试较高固相分数或是二次重熔的半固态合金试样的流变行为。它是模拟半固态合金熔体充型过程流变行为的一种方法。

以上几流变仪特点比较如下表 1 所示：

表 1. 各种流变仪特点比较

表1. 各种流变仪特点比较

| 测表观粘度方法 | 优点                                      | 缺点                              | 评述                     |
|---------|---|---------------------------------|------------------------|
| 锥板式     | 剪切速率处处相等；数据处理简单；直接测定法向应力差；试样用量少；易清洗恒温快。 | 边缘效应大；仪器精度要求高；转速高时试样甩出悬浮体易发生梗阻。 | 精密流变仪的型式，可测定多种物料函数     |
| 平行平板式   | 直接测定法向应力差；平行板较锥板易于制造；间隙可调，适于悬浮体；易清洗恒温快。 | 剪切速率随半径变化；转速高时试样甩出。             | 锥板式的附体作为补充。            |
| 同轴圆筒式   | 粘度计较易制作；对同粘度流体扭矩较大；可以较高速度；垂直缝隙，适于悬浮体。   | 剪切速率的非牛顿性修正较大；试样用量较多            | 便易粘度计，适合低粘、低弹性流体。      |
| 毛细管式    | 剪切速率范围大；高剪应力范围；易实现宽温度范围；易实现宽温度范围；试样不暴露。 | 实验较复杂、难清洗；实验精度较低                | 宽范围表观粘度测定(尤其适合高速高粘度流体) |

半固态合金熔体的表观粘度直接决定着半固态合金熔体的充型能力和产品性能，而半固态流变成形是一个集熔体制备、输送和充型于一体的复杂过程，要想通过实验方法测得熔体表观粘度在此过程中的变化规律，显然简单的同轴双桶流变仪、平行板压缩流变仪、反向挤压流变仪均不能胜任，这就需要研制新的能模拟熔体制备、输送和充型等流变成形过程的半固态合金智能控制流变仪。

北京交通大学设计了如图 5 所示的半固态合金智能流变仪。该半固态合金流变仪主要有同轴圆桶(搅拌室)、扭矩传感器及信号采集处理系统、熔炼及温度控制系统、电机驱动及控制系统四部分组成。其工作原理是：将半固态合金熔体置于同轴的内外桶间隙内，当内外桶存在速度差时，熔体受到了一个水平旋转的剪切作用，通过测定转速、扭矩或功率来间接计算合金熔体的表观粘度。应用自动化控制系统实时控制温度、剪切速率、冷却速率以及剪切时间，可以模拟半固态合金熔体制备、输送以及充型工况，进而获得不同条件下的流变规律。

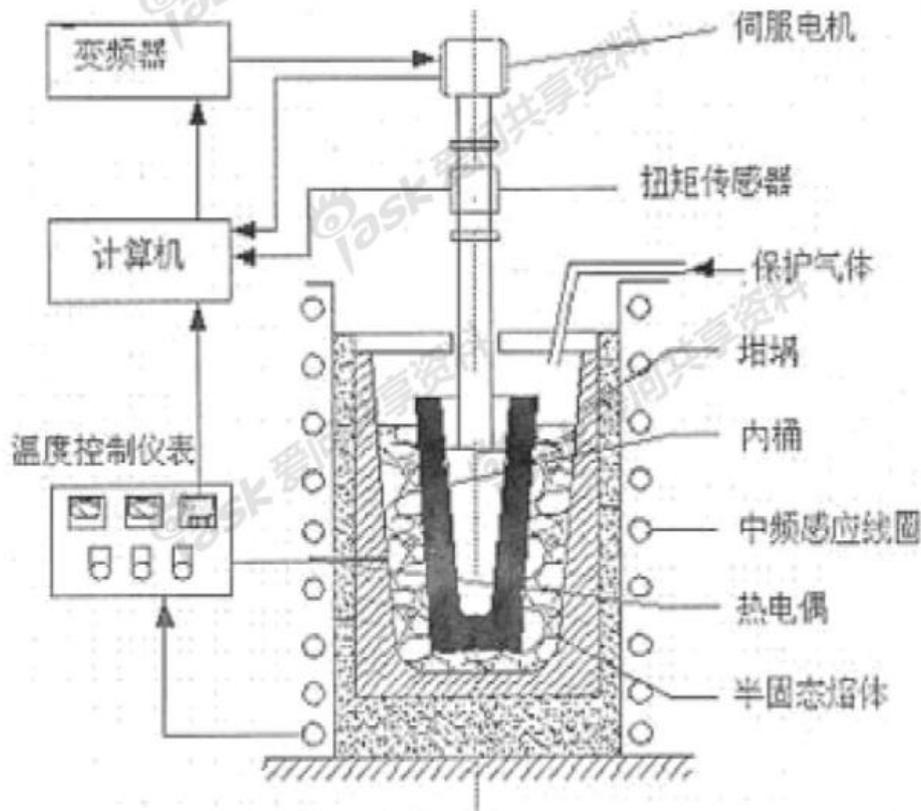


图 5 半固态合金智能流变仪结构示意图

北京科技大学毛卫民在半固态  $\text{AlSi4Mg2}$  铝合金的稳态流变性能一文中实验采用 Couette 型同轴双桶流变仪,设备原理如图 6 所示.流变仪的外桶与下面的电机相连,实验时外桶紧紧拧在电机轴上,扭矩传感器和石墨内桶处于同一轴线上.实验时,电机以不同转速转动从而带动外桶转动,这样就在流变仪的内外桶之间形成了相对运动,处于外桶和石墨内桶之间的合金液或合金浆料就会由此受到一定的剪切作用.由于合金浆料具有一定的表观粘度,这样就会在石墨内桶上产生一定的扭矩.该扭矩由传感器测得并由计算机采集,然后再转换为浆料的表观粘度.外桶内壁和内桶之间的间隙小,约为  $2.5\text{mm}$ ,作用在合金浆料上的力可视为纯剪切力.

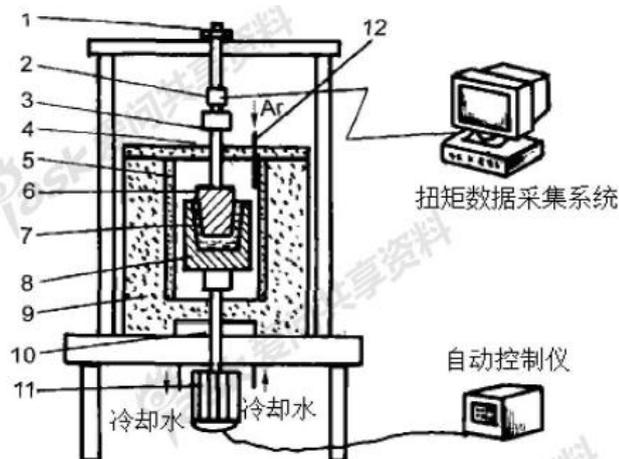


图 6 Couette 型同轴圆桶流变仪示意图



1.高度调剂器, 2.扭矩传感器,3.冷却水, 4.保温桶, 5.加热电阻炉, 6.导热仪 7.半固态浆料, 8.外圆筒, 9.热量导热层, 10.冷却水, 11.电动机, 12.保护气体

其主要的计算公式及原理根据扭矩与表观粘度的关系, 可用下式(6)表示:

$$\eta_a = \frac{M(R^2 - r^2)}{4\pi R^2 r^2 h \omega} = \frac{M(R^2 - r^2)}{4\pi R^2 r^2 h \frac{2n\pi}{6}} \quad (6)$$

式中,  $\eta_a$  为表观粘度,  $M$  为石墨内桶上的扭矩,  $h$  为内桶浸入金属液内的深度,  $\omega$  为电机转动角速度,  $n$  为电机转动转速,  $R$  为外桶内壁半径,  $r$  为石墨内桶的半径。施加在金属液上的平均剪切速率由下式(7)计算:

$$\dot{\gamma} = \frac{z\omega Rr}{R^2 - r^2} = \frac{2Rr}{R^2 - r^2} \cdot \frac{2\pi n}{60} \quad (7)$$

实验时,将 AlSi6Mg2 铝合金在外桶中加热熔化,并在 700℃ 保温 60min 后,将石墨内桶插入合金溶液内,调整石墨内桶的高度,然后使搅拌合金和炉膛以 4℃/s 的冷却速率降温,在降温过程中不对合金进行任何搅拌;当合金温度下降到预定温度(即预定的固相分数)时,再保温 30min,然后以某一剪切速率搅拌合金熔体,同时运行数据采集程序,进行数据采集。

使用 Couette 型流变仪对半固态 AlSi6Mg2 合金的稳态流变行为进行了研究,得到如下结论:

(1)半固态 AlSi6Mg2 合金的稳态表观粘度随着固相分数的增加而增加,并且当固相分数达到某一临界值之后表观粘度迅速增加。

(2)半固态 AlSi6Mg2 合金的稳态表观粘度随着剪切速率的增大而减小,并且随着剪切速率的增加,表观粘度急剧增加所对应的临界固相分数也随着增加。

综合以上方法,可以知道直接测量半固态浆料流动的方法,目前只能用浇注螺旋式样测长度的方法。由于浆料的流动性主要受浆料的表观粘度的影响,所以我们可以测半固态浆料的表观粘度来预测浆料的流动性。至于测半固态浆料的粘度可以借鉴北京交通大学自行设计半固态合金智能流变仪和北京科技大学用的 Couette 型流变仪进行测量。