铜合金的流变性能①

李德富　林柏年　闫永贵　安阁英
（哈尔滨工业大学铸造教研室，哈尔滨 150001）

摘　要　在自行研制的高温合金流变性能测试装置上，进行了固液共存区铜合金流变性能的研究。测试了合金在不变应力作用下不同温度时的应变-时间曲线，据此曲线建立了铜合金在液固共存态的流变性能模型和本构方程，分析了凝固过程中温度变化时铜合金流变性能与质点间作用力及合金结构的改变之间的关系。

关键词　铜合金　流变性能　液固共存区

近年来为了研究铸造缺陷(如热裂)的形成机理，人们对铝合金固液共存区的流变行为进行了研究。如前苏联学者 Балашин 等研究了 Al-Si 合金的流变性，并在此基础上对铸件热裂形成机理提出了一些观点。哈尔滨工业大学的刘驰、李庆春等人对 Al-Cu 合金流变性能进行了研究，并据此对热裂的形成也进行了分析[1]。然而对铜合金固液态流变性能的研究未见报道。铸造流变学的研究表明，结晶温度范围内合金的流变性能对很多铸造缺陷的形成有着直接的影响[2]。如凝固过程中析出性气孔、偏析的形成，夹杂物的上浮，缩松缺陷的形成过程中都有流动的现象发生，故它们的形成与凝固过程中金属液的流变性能有着密切的关系。为探索这些与金属流动有关的铸件内部流动型缺陷形成的普遍规律，应对铜合金及其它铸造合金的流变性进行研究。本文仅就在自制的高温合金流变性测试装置上对 Cu-Sn 合金固液共存区的流变性能的研究结果进行分析。

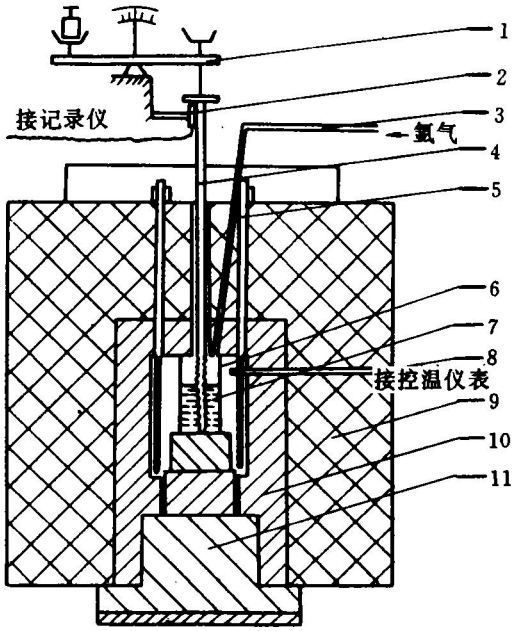

图 1　结晶温度范围内铜合金流变性能测试装置简图

1—天平；2—位移传感器；3—通气瓷管；4—陶瓷杆；5—加热体；6—陶瓷坩埚；7—合金液；8—热电偶；9—保温砖；10—耐火砖；11—炉底座

1　试验方法

图 1 是自行设计的高温合金流变性能测试装置简图，由可控温的加热电炉、试样加载机构、气体保护设施、测试记录仪器等组成。

① 国家自然科学基金资助项目　收稿日期：1994－06－20；修回日期：1994－08－12

测试前先将合金放入坩埚内并采用木炭覆盖，通入氩气进行保护。将螺纹状石墨杆插入液态合金中，在一定温度下使合金保温，调节天平加载端处的载荷，使天平横杆达到平衡状态。而后在天平的左侧托盘内加一定载荷，测杆表面出现切应力并向上移动，加载一定时间后卸去载荷，位移传感器测出该过程中杆的移动情况，信号由 X-Y 记录仪记录，经处理后即得出不变应力作用下合金切应变随时间的变化曲线。据此曲线分析推导出合金的流变参数、流变性能模型并建立本构方程。

本研究采用的铜合金成分(%)为：
82.07Cu、14.54Sn、3.39Pb。

2　试验结果

图 2 是固液共存区内铜合金在 845 ℃不变应力作用下的应变-时间曲线。图 2(a)是在较小应力($\tau = 220.0$ Pa)的情况下测试的；图 2(b)是在较大应力($\tau = 888.6$ Pa)的情况下测试的。

由图 2(a)可知，在加载的瞬间，出现即时的切应变量，然后变形随时间逐渐增大，3 min 后变形量达到稳定值不再发生变化。这时卸去载荷，即时变形量减少，然后变形量随时间消失，由此可推论合金的流变性能模型中含有串联的理想弹性体和弹性后效开尔芬体的成分。

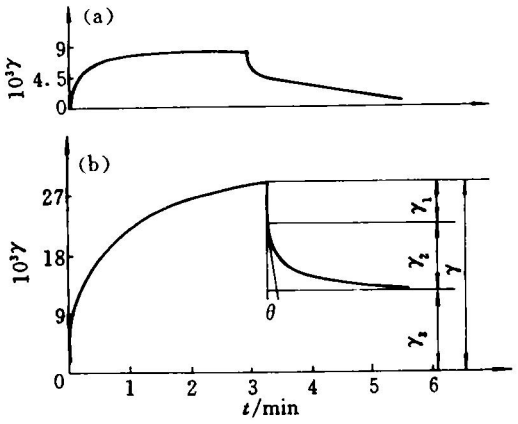

图 2　结晶温度范围内(845 ℃)铜合金的 γ-t 曲线(τ = 常数)

(a)— $\tau = 220.0$ Pa；(b)— $\tau = 888.6$ Pa

将图 2(b)上的曲线与图 2(a)上的曲线相比，图 2(b)上的曲线表明，在加载和卸载的过程中都出现即时的变形量 γ_1，也同样具有弹性后效变形 γ_2，不同的是出现了残余变形 γ_3。这说明铜合金流变性能中含有圣维南体的成分，而且只是在合金上作用的切应力大于圣维南体的屈服极限 τ_S 值后才能出现 γ_3。这可用串联的宾汉体模型予以表现。综合图 2(a)、(b)，可建立合金流变性能模型(图 3)，并用式(1)表示。这种情况与铝合金测试结果[1]类似。

$$T = H_1 - (S|N_1) - (H_2|N_2) \qquad (1)$$

式中　H 为虎克体；S 为圣维南体；N 为牛顿体；T 为合金本身的流变模型代号；“—”表示串联；“|”表示并联。

根据式(1)可建立固液共存区合金的应力-应变本构方程

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{G_1} + \frac{1}{\eta_2}(G_1 + G_2) \cdot \frac{\tau}{G_1} - \frac{G_2}{\eta}\gamma \quad (\tau \leqslant \tau_s) \qquad (2)$$

式中　G_1、G_2 为虎克体和开尔芬体的剪切弹性模量；η_1、η_2 为宾汉体和开尔芬体的粘性系数；τ_S 为宾汉体的屈服极限；γ 为切应变；τ 为切应力。

本研究测定了 9 个温度(940、900、880、

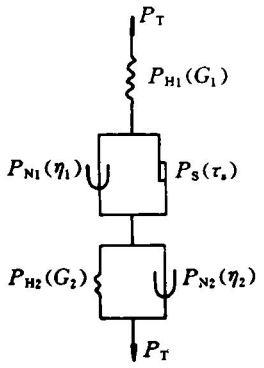

图 3　结晶温度范围内铜合金流变性能模型

875、865、855、845、830、810 ℃）下，较小载荷和较大载荷 的 γ-t 的流变曲线，所得曲线都有与图 2 相似的规律。根据这些曲线按文献[2]所示的原理，经试验数据处理后可得出不同温度下 Cu-Sn 合金的流变参数 G_1、G_2、η_1、η_2、τ_S，见表 1。

表 1　铜合金流变参数

温度 /℃	G_1 /MPa	G_2 /MPa	η_2 /MPa·s	η_2 /MPa·s	τ_s /Pa
940	0.001 25	0.000 208	0.037	0.000 52	0.011
900	0.002 31	0.007 442	0.446	0.279	0.049 35
880	0.005 209	0.008 32	2.186	0.049 38	34.339
875	0.005 541	0.008 33	1.593 2	0.056 11	18.09
865	0.023 679	0.027 891	4.467 8	0.188 26	44.638 6
855	0.041 562	0.096 488	7.071 7	1.085 4	80.742
845	0.143 008	0.368 76	26.93	3.432	443.322
830	1.928	1.157	50.6	81.3	5180.94
810	5.79	4.624	69.684	140.36	142 06

图 4 是根据表 1 数据得出的结晶温度范围内流变参数变化曲线。结晶是合金由液态转变为固态的过程。由图 4 可知，在此过程中，流变参数在一个很大范围内变动。温度在近液相线温度时，各流变参数的数值都很小，随着温度的降低，它们呈增大的趋势。当靠近固相线某一温度时，曲线突然变陡，流变参数急剧增大。此种现象与合金中固相质点急剧增多并长大，它们之间的距离相应迅速变小和相互联结，而阻碍相对运动有关。

3　试验结果分析

在固液共存区内，合金表现出宾汉体串联开尔芬体的流变特性，且随着温度的下降，流变参数按图 4 的规律呈递增的规律变化，这些宏观流变性能的变化都是由于体系结构变化引起的。

液态金属的 X 射线衍射结果表明，在液态时合金只在几个原子半径范围内有序排列[3]，进入固液共存区后随着温度的降低，这种有序排列的原子集团逐渐增多，尺寸也逐渐增大。在凝固过程中，体系有序度增加，至某一时刻体系的状态发生转变。下面以图解说明有序-无序转变及流变性能的关系。

图 5 是在正方形点阵上的座逾渗[4]，以此二维网络的简单逾渗模型为例定性地讨论合金凝固过程中固相率 P 变化，固相尺寸的大小 S 以及三维网络的形成过程对流变性能变化的影响。图 5(a)之前是一张空的点阵，表示液态（$P=0$）时无固相的低密度极限，而在图 5(c)之后表示完全凝固（$P=1$）的高密度极限。

液态时，由于分子热运动的动能很高，质点彼此独立，它们之间的结合力几乎为零。当存在剪应力作用时，高速的布朗运动使原子很快达到能量平衡状态，因而体现出牛顿体流变性能。

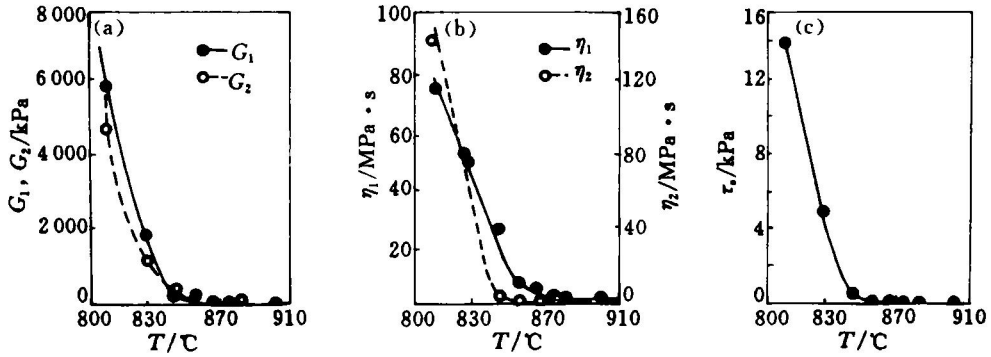

图 4　结晶温度范围内铜合金流变参数与温度的关系

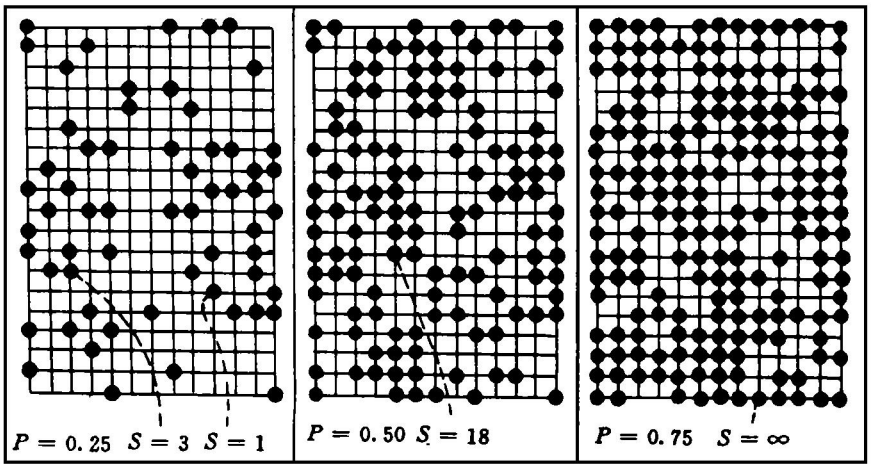

图 5　正方形点阵上的座逾渗[4]

当合金冷却到某一温度时，如图 5(a)所示，此时固相率为 0.25，一些晶粒已具有一定的尺寸，这时由于固相的析出和晶粒长大，使固相间库仑力和范德华力等长程作用明显，形成网络结构，体系表现出粘性、弹性和塑性。

当 P 增加至 0.5 时(见图 5(b))，即图 5(a)中空座的 1/3 被无规则占据。这时晶粒进一步长大，一些晶粒联在一起，可见随着温度降低，固相率 P 显著地增加。由于网络密度增大，故体系的联接强度增大，使体系的 G、η、τ_S 也随之增大。

当 P 增至 0.75 时(见图 5(c))，枝晶充满整个试样。此时固相质点并未占据全部点阵(除非 $P=1$)。

从 $P=0.5$ 至 $P=0.75$ 之间，出现逾渗阈值。枝晶相连结并充满整个试样，使合金流变性能发生很大转变。这种转变从图 4 的各流变参数随温度的变化曲线也可看出，即在某一温度以下，曲线变陡。从以上分析可见，逾渗阈值即对应于图中的这个温度。

综合以上分析可见，由于结晶过程中固相的析出使合金液中出现网络结构，致使固液共存区合金表现出粘性、弹性、塑性；在温度降低的过程中，由于固相率 P 的增大，致使网络键力联系增大，网络密度增加，从而使 G、η、τ_S 按图 4 的规律呈增大趋势。

4　结论

(1) 铜合金由液态转变为固液态，其流变模型由牛顿体转变为宾汉体串联开尔芬体的五元件流变模型，表现出粘性、弹性和塑性，这主要是由于固相晶粒的析出而在合金中形成网络结构所引起的。

(2) 随着温度的降低，固相率增加，体系内联接程度增大，故 G、η、τ_S 按图 4 的规律呈增大的趋势。

参考文献

1　刘　弛. 博士学位论文，哈尔滨工业大学，1987.
2　林柏年. 铸造流变学. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1992.
3　安阁英. 铸件形成理论. 北京：机械工业出版社，1989.
4　[美] 泽仑 R. 非晶态固体物理学. 北京：北京大学出版社，1988.