

液体合金 NaK 的粘滞性*

平一梅 田蔭棠

(西北大学物理系)

提 要

我们曾用振球法在约 300℃ 的温度范围内测定了液体合金 NaK 三种样品 (K: 49%, 51%, 74%) 的粘滞性。结果表明, 此类液体合金相当满意地遵守安德兰规律 ($\eta = Be^{b/T}$)。在本文中, 除对实验设计及测量的叙述外, 并对某些有趣问题作了讨论。

一、引 言

粘滞性是液体的重要物理量之一, 对于各种液体进行粘滞性测定, 在理论上在应用上都有一定的意义。

钾钠合金 NaK 在常温下一般呈液态, 沸点高, 比热和导热系数大, 且吸收中子本领小, 所以在某种反应堆中, 它是一种颇有前途的载热剂。同时, 这种合金具有比较简单的结构。由此可见, 液体 NaK 的粘滞性测定, 一方面是工程技术所需要, 另一方面又可为正在发展的液体理论提供必要的数据。

NaK 液体合金的粘滞性, 由于制备及测量上的困难, 一直缺乏精密可靠的数据。国际上, 一般采用江氏^[1]关于液体的钠和钾的粘滞性数值, 根据经验公式而推算出合金的粘滞性。十年前, Ewing^[2]等人曾用毛细管法进行过三种不同比例的 NaK 合金样品的粘滞性测定, 其结果在 100—200℃ 间似乎还好, 但在 100℃ 以下及 200℃ 以上显然大有问题。

我们用空球法对合金 NaK 的三种样品的粘滞性在 0—350℃ 间进行了测定。所谓空球法^[3], 即把空球装满液体, 悬挂起来让它在真空中作衰减的扭转振动 (因此亦称为振球法), 由所记录的对数衰减来确定液体的粘滞性。这种方法的理论和计算虽则比较复杂, 但它不象毛细管方法, 不需要一些不大可靠的校正, 而且操作比较简单, 装置亦不甚复杂, 达到 200 分之一的精确度并不困难。所以, 空球法测定粘滞性, 特别是对化学活泼的钠钾合金而言, 是既便利又可靠的。

二、实 验 装 置

我们的测量装置与江仁寿^[1]以前测定钠钾的粘滞性时所用的基本相同 (图 1)。

惯量担 NV 以及球 S 等用适当退火的磷铜丝采取双线悬挂法, 挂在一个真空容器中。

* 1965 年 12 月 22 日收稿。

扭转特制的悬头 A 可使悬挂系统作转动的振动。为了得到纯粹的转动振动, 必须调整悬头的顶面 aa 使它严格水平; 另外, 必须仔细设计使整个悬挂系统高度对称。达到后一要求并不简单。第一, 必须挑选合格的玻璃球 S , 半径要均匀 (约在 200 分之一以内), 杆子

要直, 要居中; 第二, 惯量担子 NN 的质量要均匀, 形状要严格对称 (约在 5000 分之一以内)。最后, 也是最麻烦的问题, 是工作时要特别小心。在适当的工作条件下, 我们发现中心摆动很小, 肉眼几乎看不出来; 在最大的振幅时, 用望远镜观察, 中心摆动也不到半毫米。

EE 是蒸汽发生器, 我们利用几种适当的液体的沸点来维持球 S 在一定的温度; 必要时可用电炉代替它。

M 是一个热电偶, 由康铜和铜制成, 可准确到 $\frac{1}{50}^{\circ}\text{C}$ 。

R 是抽气接头, 我们用两个油扩散泵并联着, 和一个机械真空泵作为前级, 一般只要求达到 10^{-4} mm Hg 就够了。在这种情况下, 空球时的衰减 δ_0 同装满液体时的衰减 δ 相比, 只有百分之三左右。

三、计算公式

我们按安^[3]-江的计算方法, 参考安^[4]-道所作的改进, 并结合我们的实际情况, 作了微小的修改而得出如下计算公式:

$$\eta = \frac{1}{16} \frac{\pi \rho}{T} R^2 S a \{1 - (1 - \mu)^{1/2}\}^2, \quad (1)$$

其中

$$S = 1 + T\eta/\pi\rho R^2, \quad (2)$$

$$\mu = 6\delta I/\pi^2 R^5 \rho a^2 S, \quad (3)$$

以及

$$a = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\delta}{2\pi} \right) + \frac{1}{8} \left(\frac{\delta}{2\pi} \right)^2. \quad (4)$$

这里所用的符号是: η 表示液体的粘滞性, ρ 是液体的密度, R 是球的半径, I 是系统的转动惯量, T 是振动的

周期, δ 是校正后的对数衰减。

在计算时, 只要猜选一个数值作为 η 的零级近似值, 代入 (2) 式而求出 S , 然后即可由 (1), (3), (4) 式得出 η 的一级近似值。再以所得之值计算 S , 重复以上过程而得二级近似值。实际计算表明, 公式 (1) 收敛很快, 只需算出二级近似就足以满足实验的要求了。

与安-江原来的计算公式比较, 应用我们的公式在计算上要简单方便些, 时间节省, 而二者结果相差不到千分之三。

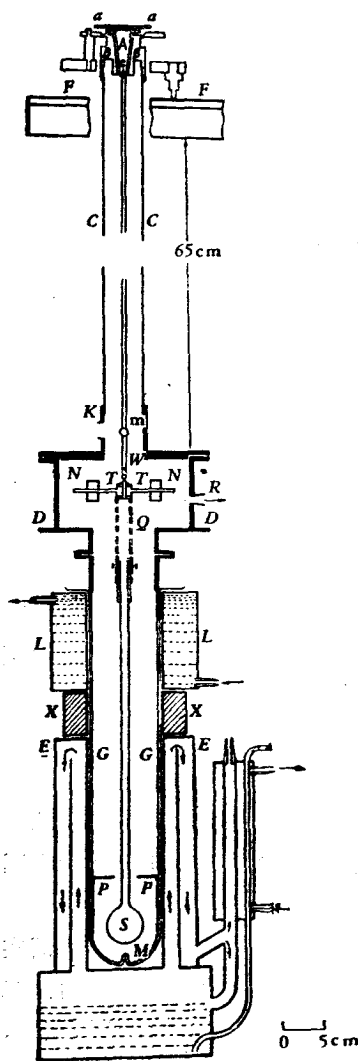


图 1

四、测 量

1. 周期 T 的测定

我们用校正过的停表测量 n 个周期的平均值 $\bar{t}$, 并用下式进行校正:

$$T = \bar{t} \left(1 - \frac{\alpha_1 \alpha_n}{16n} \cdot \frac{1 - e^{-2n\delta}}{\delta} \right), \quad (5)$$

式中 δ 为对数衰减, α_1, α_n 为初振幅和末振幅。我们限制振幅在 $1/10$ 弧度以内, 周期都在 10 秒以上; 所以, 若取 $n = 50$, 则 T 的精确度可达到万分之五左右。

2. 转动惯量 I 的测定

振动系统的转动惯量可分为固定部分 I_0 和可变部分 I_n , 即 $I = I_0 + I_n$, 而 I_n 可由圆盘 N 的质量 M 和它离转轴的距离 x_n 计算出来, 即 $I_n = 2Mx_n^2$ 。由圆盘在两个离轴不同的距离时的周期即可算出 I_0 。我们把盘子放在三种适当的距离, 测得三个不同的周期, 从而算出 I_0 的平均值。

为了保证获得较高的精确度, 除在惯量担的设计和加工上要求严格外, 在测量距离 x 时还须特别注意。我们先将盘子放在比较对称的位置, 然后在移动显微镜下作最可能的调整, 并测出盘子的距离。最后, 用一点点胶水把盘子固定在担子上, 等干后才挂上去。

关于 I 的精确度约为 $1/2000$ 。

3. 衰减系数 δ 的测定

我们采用照相法记录振幅的衰减。使狭缝发出的光线透过聚光镜而射入窗口 K , 经过镀铝小镜 m 反射后, 聚焦于装在正前方的弓形尺上。振动的光条使标尺背面的印相纸感光而得到一条条清晰的迹象, 并把标尺的刻度印在上面。由印相纸上的记录, 经过简单计算, 即得出先后各次的振幅 A_i 。最后, 按下式计算对数衰减 δ :

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left\{ \left(\sum_{i=1}^{2n} A_i \right) / \left(\sum_{i=2n+1}^{4n} A_i \right) \right\}. \quad (6)$$

在一般情形下, 取 $n = 10$ 时, δ 的误差小于 0.3% 。

为了消除悬线的非弹性影响以及残余气体的阻尼作用, 必须对由它们引起的外来衰减 δ_0 进行校正。 δ_0 很小, 约为 δ 的 3% 左右, 可用空球在相同真空情况下测出。由于 δ_0 是较小的量, 所以由 δ 减去它而得出校正的衰减。

4. 球的选择和球半径的测量

所用玻璃球必须仔细选择, 杆子要直并居中, 半径要均匀, 特别要注意在纬度 $\pm 45^\circ$ 间球径的均匀。我们的球是用硬玻璃手吹的, 杆长约 40 cm , 球直径约 4 cm , 要达到要求很不容易。多中挑选, 拣较为满意的几个球来使用。一般说, 它们半径的均匀度都在 $1/200$ 以内。

确定球半径均匀度可用之后, 我们再用体积测量法求出 R 的平均值。

5. 密度的测定

关于 NaK 液体合金的密度, 似乎还缺乏成套可靠的数据。在我们实验室中, 和我们测量粘滞性的同时, 刘春贤^[5]同志曾进行有关合金的密度测量。他采用膨胀计方法, 所用的样品就是我们的样品。因此, 这里计算所需的密度数据是刘春贤同志所提供的。

6. 水的粘滞性的测定

为了考验装置的可靠性和掌握其性能,我们曾在四个不同温度下(22—57℃)对水的粘滞性进行测定。由所测水的结果同它的标准数据比较,可以肯定说测量的精确度可达到 1/200 以上(见表 1)。无疑地,对合金 NaK 的粘滞性测定亦会有同样的精确度。

表 1 水的粘滞性

t (°C)	ρ (g/cm ³)	$\eta_{\text{实}}$ (mp)	$\eta_{\text{算}}$ (mp)	误差 (%)
22.5	0.9977	9.486	9.468	+0.18
32.7	0.9948	7.604	7.570	+0.45
43.8	0.9907	6.138	6.119	+0.31
57.5	0.9845	4.894	4.870	+0.49

五、温度的控制

我们采用以下三种方法获得恒温: 1) 水浴恒温器, 温度起伏约在 $\pm 0.05^\circ\text{C}$, 温度范围小(0—50℃); 2) 用管状电炉, 可以得到 200℃ 以上温度, 仔细地不断调节电压可使管内温度的起伏在 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 以内; 3) 蒸气发生器, 如图 1 中 EE 所示, 使用不同液体可得各种相当稳定的温度。最后一个方法比较简便, 所得温度场既恒定又均匀。

为了保证球内液体的温度恒定, 并且和腔内热电偶所测温度一致, 套管 GG 内壁张贴了一个涂黑的铜管, 并用领圈 PP 同管子上节隔开, 让球如同悬在黑体腔中一般。抽气后加热, 四小时后我们才开始观察。每隔半小时, 照相求 δ 一次。前后三次的 δ 在数值上相差不超过 1/500。

六、样品的配制

我们所用的钾和钠, 根据产品出厂的鉴定, 其杂质含量均在万分之一左右。经过除油过滤和蒸馏等提纯步骤, 首先得到纯净的钾和钠, 然后取一定重量的钾和钠在真空中混合而得到所需要的合金样品(关于配制的详细过程, 请参阅刘春贤的文章^[5])。

我们配制了三种 NaK 合金样品, 其中 K 的重量百分比分别为 49.55%, 51.18%, 74.47%。

七、实验结果及讨论

我们用振球法, 在温度 0—350℃ 的范围内测定了液体 NaK 合金三种样品的粘滞性, 所得结果分别列在表 2—4 内。这三种合金(K: 49.55%, 51.18%, 74.47%)的粘滞性 η 随温度 $t^\circ\text{C}$ 变化的曲线如图 2 所示。由于样品 1, 2 中 K 的含量相差小, 为了避免它们的曲线显得很挤, 我们把直角坐标对不同的样品作适当位移, 图中直坐标上的指标是指有关样品的曲线。

我们的计算表明, 这三种液体合金, 在所测的温度范围内, 相当满意地遵守安德兰规律, 即

$$\eta = Be^{b/T}, \quad (7)$$

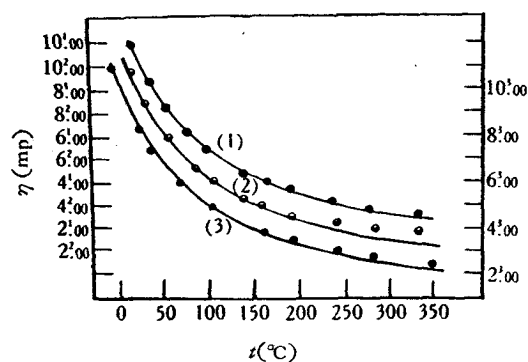


图 2

表 2 合金 NaK (1) 的粘滞性

合金成分	温 度 t (°C)	密 度 ρ (g/cm ³)	实 验 值 η (mp)	计 算 值			
				η_1^* (mp)	误 差 (%)	η_2^* (mp)	误 差 (%)
(1) K 49.55%	18.7	0.9035	9.971	9.625	-3.30	9.859	-1.13
	35.8	0.8994	8.320	8.325	+0.06	8.370	+0.60
	53.3	0.8951	7.211	7.276	+0.89	7.239	+0.39
	75.7	0.8897	6.151	6.241	+1.44	6.165	+0.23
	95.2	0.8849	5.414	5.545	+2.36	5.466	+0.95
	137.6	0.8746	4.386	4.455	+1.55	4.409	+0.52
	159.0	0.8694	4.061	4.058	-0.07	4.033	-0.69
	189.8	0.8619	3.615	3.600	-0.42	3.610	-0.14
	235.2	0.8508	3.180	3.098	-2.06	3.155	-0.79
	275.4	0.8420	3.001				
	328.8	0.8304	2.618				

* η_1 是由公式(8)算出的粘滞性数值, η_2 是由公式(9)算出的。

表 3 合金 NaK (2) 的粘滞性

合金成分	温 度 t (°C)	密 度 ρ (g/cm ³)	实 验 值 η (mp)	计 算 值			
				η_1 (mp)	误 差 (%)	η_2 (mp)	误 差 (%)
(2) K 51.18%	16.8	0.9004	9.791	9.630	-1.65	9.779	-0.12
	32.0	0.8966	8.448	8.418	-0.36	8.443	-0.06
	56.0	0.8907	6.944	6.982	+0.54	6.925	-0.27
	76.3	0.8858	5.952	6.080	+1.12	6.008	+0.93
	98.3	0.8804	5.241	5.322	+1.52	5.262	+0.40
	138.0	0.8706	4.338	4.342	+0.09	4.326	-0.28
	158.4	0.8656	4.002	3.969	-0.83	3.978	-0.60
	190.5	0.8577	3.550	3.502	-1.37	3.550	0.00
	239.5	0.8465	3.250				
	282.0	0.8366	2.969				
	324.6	0.8267	2.678				

表 4 合金 NaK (3) 的粘滞性

合金成分	温 度 t ($^{\circ}\text{C}$)	密 度 ρ (g/cm^3)	实验值 η (mp)	计 算 值			
				η_1 (mp)	误 差 (%)	η_2 (mp)	误 差 (%)
(3) K 74.47%	0	0.8770	10.916	10.487	-4.09	10.739	-1.65
	20.9	0.8720	8.549	8.615	+0.87	8.640	+1.05
	34.4	0.8687	7.598	7.701	+1.33	7.659	+0.80
	55.8	0.8635	6.474	6.564	+1.37	6.480	+0.09
	76.1	0.8585	5.652	5.745	+1.62	5.660	+0.14
	97.8	0.8534	5.007	5.006	+1.16	4.998	-0.18
	159.2	0.8386	3.782	3.796	+0.37	3.804	+0.58
	194.2	0.8301	3.432	3.330	-3.06	3.380	-1.54
	235.6	0.8206	3.075				
	276.4	0.8112	2.853				
	344.4	0.7956	2.531				

其中 B 和 b 为常数, T 为绝对温度 (具体数值见表 4)。最明显的是取 η 的对数同 T 的倒数作图。按安氏公式(7)应得到直线关系,即

$$\ln \eta = \ln B + b/T. \quad (8)$$

这样作出的图如图 3 所示。

在图 2 和图 3 中,实线是按公式(7)或(8)绘出的,点子或圈表示实验值。

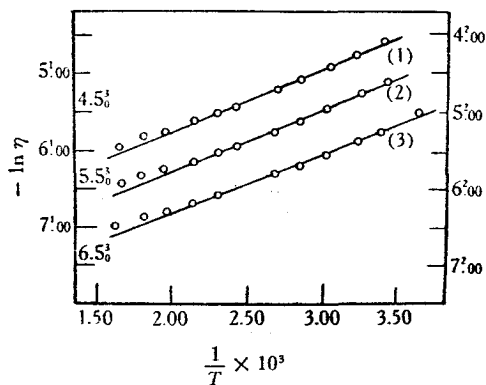


图 3

按定律(7)算出的数值 η_1 同实验值 η 比较 (见表 2—4), 其偏差一般约在 2% 左右; 在 200 $^{\circ}\text{C}$ 以上偏差较大, 可能由工作条件不够好或其它原因所引起。众所周知, 这条规律是大多数液体 (特别是简单液体) 所遵守的。江仁寿^[1]、安德兰和道波斯关于碱金属液体粘滞性的实验很满意地证实了这一规律。Ewing 等人关于 NaK 合金的粘滞性数据, 在 100—200 $^{\circ}\text{C}$ 间与此定律亦符合颇好, 但在 100 $^{\circ}\text{C}$ 以下符合不佳, 最大偏差竟达 4% 以上。在高温下 (200 $^{\circ}\text{C}$ 以上), Ewing 的精

确度只有 $\pm 10\%$, 此时出现更大的偏差不足为怪。

我们发现, 对于合金 NaK 而言, 把 $\ln \eta$ 表示为 $1/T$ 的二次式, 要比(8)式的线性关系似乎更符合于实验结果。我们假定

$$\eta = B e^{c/T + d/T^2}, \quad (9)$$

则得

$$\ln \eta = \ln B + \frac{c}{T} + \frac{d}{T^2}. \quad (10)$$

用最小二乘法求出常数 B , c 和 d , 其数值如表 5 所示。用公式(9)算出的粘滞性数值 η_2 和实验结果显得符合好些 (见表 2—4), 最大偏差约为 $\pm 1.5\%$ 。

表 5

样 品	$10^4 B$	c	d
1. K 49.55%	1.047	434.2	64180
2. K 51.18%	1.049	428.2	63390
3. K 74.47%	1.057	418.1	58750

关于钾钠液体合金的粘滞性与组分的关系,我们发现它可近似地用下式来表示:

$$1/\eta = W_{Na}/\eta_{Na} + W_K/\eta_K, \quad (11)$$

式中 W_{Na} , W_K 和 η_{Na} , η_K 分别表示钠钾重量的百分数和它们各自的粘滞性。我们的实验数值与(11)式的计算结果相比约小 5% 左右。

最后,我们想指出,液体合金 NaK 的粘滞性,对所测的三种成分和所用温度范围而言,相当满意地符合安氏定律,可说是一个很有趣的现象。液体钾和液体钠是简单的液体,这是肯定的。根据我们的实验结果,似乎也可以说,液体合金 NaK 的结构也是简单的。关于这一点,实验数据同经验公式(11)近似符合这一事实,又可作为很好的根据。因为这一公式所表示的是,混合体的流性 $1/\eta$ 为组成分量的流性之和,若混合体的结构有显著的改变,这是不可能的。

安德兰公式(7)中的常数 b , 研究其意义,它同液体分子结构的关系以及它同温度的关系,也是颇有启发的^[6]。关于碱金属及三种 NaK 合金的 b 值如表 6 所示。我们这里仅指出这一有趣的事实,即在液体合金 NaK 中, b 的数值随着 K 的含量的增加而下降,而 K 的 b 值在碱金属中又是最小的。

表 6

液 体	$10^4 B$	b
锂	13.86	664
钠	9.16	752
钾	9.99	564
铷	9.27	617
铯	10.14	576
Na K (1) K 49.55%	6.70	778
Na K (2) K 51.18%	6.47	782
Na K (3) K 74.47%	6.64	753

严格地说, b 应是温度的函数。如果假定 $b = c + d/T$, 则随即得到公式(9)。由计算来看,这一假定似乎有一定道理。

以上所述只是我们的初步报告。对较多的不同比例的 NaK 合金,在较大的温度范围内(特别在熔点附近),进行粘滞性及其它性质的测定,我们的实验室工作正在这个方向进展。

最后,我们向我校的党组织对我们的关怀鼓励表示衷心的感谢。在工作进行中,承江仁寿教授热心指导,亦在此致谢。

参 考 文 献

- [1] Chiong, Y. S., *Proc. Roy. Soc., A* 157 (1936), 264.

- [2] Ewing, C. T., *J. Am. Chem. Soc.*, **73** (1951), 1168; *J. Phys. Chem. Soc.*, **58** (1954) 1086.
[3] Andrade and Chiong, *Proc. Phys. Soc.*, **48**(1936) 27; 江仁寿, “液体滞性测定方法的研究”, 西北大学学术论文集, 物理分册 (1963).
[4] Andrade and Dobbs, *Proc. Roy. Soc.*, **A 211** (1952), 12.
[5] 刘春贤, 物理学报, **22** (1966), 757.
[6] Andrade, *Phil. Mag.*, **17**(1934), 698; *Endeavour*, **13** (1954), 117.

ON THE VISCOSITY OF LIQUID ALLOY NaK

PING Y. M. TIAN Y. T.

(Department of Physics, Northwestern University)

ABSTRACT

By the method of the oscillating sphere, as developed by Andrade and Chiong, we have determined the viscosities of three samples (K: 49%, 51%, 74%) of the liquid alloy NaK, the temperature range being about 300°C. The result showed that the liquid alloys in the temperature range measured follow the Andrade's law $\eta = Be^{b/T}$ quite satisfactorily. In the paper, in addition to descriptions of apparatus design and new improvements made, some salient points of interest are discussed.