

原子能译丛

液态金属载热剂

C. C. 庫达杰拉茲 等著

8

“原子能”編譯委员会 編
科学出版社

原子能譯叢 8

液態金屬載熱劑

C. C. 庫達杰拉茲等著

賀平譯
高進校

“原子能”編譯委員會編

科學出版社

1960

С. С. КУТАТЕЛАДЗЕ, В. М. БОРИШАНСКИЙ,
И. И. НОВИКОВ, О. С. ФЕДЫНСКИЙ
ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛИ
(Приложение № 2 к журналу «Атомная энергия» за 1958 г.)
Атомиздат, Москва, 1958

內 容 簡 介

本书译自苏联“原子能”杂志副刊 1958 年第 2 期。

书中阐述了有关在原子核动力工程中利用液态金属作为载热剂的问题,介绍了液态金属的基本性质,讨论了它的放热问题,并描述了某些装置及测量仪器。此外,书中还综合了作者们自己的和其他研究者们的大量实验资料,制成图表,以供读者们参考。

对于从事反应堆建造、原子核动力工程的人员及其他应用液态金属载热剂的技术部门的科学工作者及工程师,本书都有参考价值。

原子能译丛 (8)
液 态 金 属 载 热 剂
“原子能”编辑委员会编

科学出版社出版 (北京朝阳门大街 117 号)

北京市书刊出版业营业许可出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总经售

1960 年 7 月第 一 版

1960 年 7 月第一次印刷

(京) 0001—8,000

书号: 2225 字数: 174,000

开本: 787 × 1092 1/25

印张: 7 17/25 插页: 6

定价: 1.05 元

原著編者前言

本书是1958年度“原子能”杂志的副刊之一，书中专门討論了在原子核动力工程中应用液态金属載热剂的問題。书中系統地整理和綜合了研究液态金属放热的大量資料，这些資料是近十年来苏联及外国在研究有关原子核动力工程的各种問題时得到的。

本书在叙述方面并不是十分完整的，但是，即使如此，它对于反应堆建造、原子核动力工程以及其他应用液态金属載热剂的各项技术部門的科学工作者及工程师們无疑仍将是有益的。

本书的主要部分是由庫达杰拉茲(С. С. Кутателадзе)、布里山斯基(В. М. Борищанский)、諾維科夫(И. И. Новиков)写的；第一、三、五、八章是与費定斯基(О. С. Федынский)合写的。此外，利亚姆金(Г. М. Лямкин)、普里霍特欽科(Н. А. Приходченко)和柯略金(Ю. И. Корякин)也参加了原稿的准备工作。

目 录

原著編者前言	i
第一章 液态金属的基本性质	1
第二章 液态金属载热剂的应用范围	17
第三章 液态金属流动时的水力学阻力	20
第四章 在液态金属中热的紊流轉移	30
第五章 在管内流动时的放热	38
第六章 纵向流过平板时的放热	88
第七章 横向流过圆柱体时的放热	104
第八章 自由对流时的放热	110
第九章 蒸气凝結时的放热	120
第十章 沸腾时的放热	130
第十一章 热交换设备	153
第十二章 耐热材料在液态金属中的稳定性	162
第十三章 测量仪器	178
参考文献	191

第一章 液态金属的基本性质

液态金属的结构

用X光照相及中子照相研究液态金属的结果表明：原子在液态金属中的排列在一定程度上与晶体结构有关，也就是与该金属在固态时原子的空间排列有关。例如，液态钠、锡及其他金属不仅在接近熔点时保持其原子排列的形式，而且在显著地超过熔点时也是如此。物质的结构由所谓平均配位数来表征，该数就是以某原子为中心、以从它到邻近原子的距离为半径的球面上的平均原子数。从下面列举的资料可以看到，当由结晶态转变到液态时，也就是在熔化以后，所有金属的配位数或者增加，或者保持不变。

汞 按热力性质，汞接近于理想液体，也就是说，它有着紧密的原子排列（根据X光照相研究的资料，在高温下汞的配位数等于12）。随着温度的降低，配位数降低到8—10；而当温度接近于熔点时则等于6。由此可知，在接近于熔点时，液态汞的结构与结晶态一样（简单的立方点阵）。

钠 在结晶态下，钠具有体心点阵，其配位数为8。用X光照相对液态钠的研究表明，一直到400℃为止，配位数仍等于8。因此，在钠熔化时，其配位数不变。

钾 与钠一样，在结晶态时具有体心点阵。直到390℃时，液态钾的配位数仍等于8，即体心点阵的结构保持不变。

锂 根据一些没有经过充分验证的资料看来，在200℃时，液态锂的配位数接近于10；在结晶态时，按照体心点阵的结构，其配位数等于8。

铋 在固态时是属于具有所谓疏松原子排列的金属之一。当铋熔解时，显然这种排列就被破坏了，于是配位数由晶体时的6增加到液态时的7—7.5。

镓 与铋一样,当镓熔化时,疏松的原子排列被破坏,而接近于紧密的排列,配位数相应地由6增加到11—12。

铅 对于铅尚缺少可靠的资料,但是有根据假设,当铅熔化时,其配位数不变,即等于12。

液态金属最主要的物理性质

下面的表1.1—1.9中举出了某些液态金属及其合金的主要物理性质,这些资料是由尼古尔斯基(Никольский)、卡拉库茨卡娅(Калакуцкая)、普切尔金(Пчелкин)、克拉辛(Классен)及薇尔齐谢娃(Вельтищева)在米海耶夫院士(М. А. Михеев)的实验室中得到的。

钠、钠-钾合金和铅-铋合金的比重是用在熔化金属中悬挂重物的方法及比重瓶的方法测定的。钾、锂、锡、铅、铋和汞的比重数据是从已发表的各种文献中取得的^{[22], [64]—[69]}。

金属的导热系数用逐次稳定状态的方法来测定^[77]。汞的导热系数在较大的温度范围中,用沿高度补偿侧面热损失的柱法来补充测定的。

金属的比热用直接加热法及比较法测定。对某些金属则应用外插

表 1.1 汞($t_{\text{熔点}} = -38^\circ\text{C}$, $t_{\text{沸点}} = 357^\circ\text{C}$)

t ($^\circ\text{C}$)	γ (公斤/米 ³)	λ (千卡/米·小时· $^\circ\text{C}$)	c_p (千卡/公斤· $^\circ\text{C}$)	$\alpha \times 10^2$ (米 ² /小时)	$\nu \times 10^8$ (米 ² /秒)	$Pr \times 10^3$
0	13,590	6.70	0.0334	1.48	12.4	3.02
10	13,570	6.81	0.0333	1.51	11.8	2.81
20	13,550	6.92	0.0332	1.54	11.4	2.66
50	13,470	7.25	0.0329	1.64	10.4	2.30
100	13,350	7.80	0.0328	1.78	9.4	1.90
150	13,230	8.35	0.0328	1.92	8.6	1.61
200	13,110	8.90	0.0328	2.07	8.0	1.39
250	13,000	9.45	0.0328	2.22	7.5	1.22
300	12,880	10.00	0.0328	2.37	7.1	1.08
350	12,800	10.50	0.0328	2.50	6.8	0.98
400	12,700	10.85	0.0329	2.60	6.6	0.91
450	12,600	11.15	0.0329	2.69	6.4	0.86
500	12,480	11.45	0.0330	2.78	6.2	0.80

表 1.2 钠($t_{\text{熔点}} = 97.3^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{沸点}} = 878^{\circ}\text{C}$)

t ($^{\circ}\text{C}$)	γ (公斤/米 ³)	λ (千卡/米·小时· $^{\circ}\text{C}$)	c_p (千卡/公斤· $^{\circ}\text{C}$)	$\alpha \times 10^3$ (米 ² /小时)	$\nu \times 10^8$ (米 ² /秒)	$Pr \times 10^3$
100	928	74.0	0.331	24.1	77.0	1.15
150	916	72.3	0.324	24.4	59.4	0.88
200	903	70.2	0.317	24.5	50.6	0.74
250	891	67.7	0.311	24.4	44.2	0.65
300	878	64.9	0.306	24.2	39.4	0.59
350	866	61.8	0.304	23.5	35.4	0.54
400	854	59.1	0.304	22.8	33.0	0.52
450	842	56.8	0.304	22.2	30.8	0.50
500	829	54.9	0.304	21.8	28.9	0.48
550	817	53.3	0.304	21.5	27.2	0.46
600	805	52.1	0.305	21.2	25.7	0.44
650	792	51.3	0.305	21.2	24.4	0.41
700	780	50.8	0.305	21.3	23.2	0.39

表 1.3 钾($t_{\text{熔点}} = 63.7^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{沸点}} = 760^{\circ}\text{C}$)

t ($^{\circ}\text{C}$)	γ (公斤/米 ³)	λ (千卡/米·小时· $^{\circ}\text{C}$)	c_p (千卡/公斤· $^{\circ}\text{C}$)	$\alpha \times 10^3$ (米 ² /小时)	$\nu \times 10^8$ (米 ² /秒)	$Pr \times 10^3$
100	818	40.0	0.195	25.1	56.1	0.80
150	807	39.9	0.192	25.8	48.0	0.67
200	795	39.5	0.189	26.3	42.8	0.59
250	784	38.6	0.187	26.3	38.6	0.53
300	773	37.3	0.185	26.1	35.2	0.49
350	761	35.8	0.184	25.6	32.4	0.46
400	750	34.0	0.183	24.8	29.8	0.43
450	738	32.0	0.183	23.7	27.6	0.42
500	727	30.0	0.183	22.6	25.7	0.41
550	716	28.2	0.184	21.4	24.1	0.41
600	704	26.6	0.184	20.5	22.1	0.39
650	692	25.3	0.185	19.8	21.6	0.39
700	681	24.3	0.185	19.3	20.5	0.38

表 1.4 铯 ($t_{\text{熔点}} = 186^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{沸点}} = 1317^{\circ}\text{C}$)

t ($^{\circ}\text{C}$)	γ (公斤/米 ³)	λ (千卡/米·小时· $^{\circ}\text{C}$)	c_p (千卡/公斤· $^{\circ}\text{C}$)	$\alpha \times 10^3$ (米 ² /小时)	$\nu \times 10^8$ (米 ² /秒)	$Pr \times 10^3$
200	515	39.6	0.990	7.77	111.0	5.14
250	510	39.8	1.001	7.80	100.4	4.63
300	505	40.1	1.012	7.85	92.7	4.25
350	500	40.3	1.023	7.88	86.6	3.96
400	495	40.5	1.034	7.91	81.7	3.72
450	490	40.7	1.045	7.95	77.4	3.51
500	484	40.9	1.056	8.00	73.4	3.30
550	479	41.1	1.067	8.04	70.0	3.13
600	474	41.3	1.078	8.08	66.8	2.98
650	470	41.5	1.089	8.11	63.8	2.83
700	465	41.7	1.100	8.15	61.7	2.73

表 1.5 铋 ($t_{\text{熔点}} = 271^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{沸点}} = 1490^{\circ}\text{C}$)

t ($^{\circ}\text{C}$)	γ (公斤/米 ³)	λ (千卡/米·小时· $^{\circ}\text{C}$)	c_p (千卡/公斤· $^{\circ}\text{C}$)	$\alpha \times 10^3$ (米 ² /小时)	$\nu \times 10^8$ (米 ² /秒)	$Pr \times 10^3$
280	10,050	12.5	0.036	3.45	18.0	1.88
300	10,030	12.6	0.036	3.50	17.1	1.76
350	9970	13.0	0.036	3.63	15.4	1.53
400	9910	13.4	0.036	3.76	14.2	1.36
450	9850	13.8	0.036	3.90	13.1	1.21
500	9785	14.2	0.036	4.03	12.2	1.09
550	9720	14.6	0.036	4.17	11.5	0.99
600	9660	14.9	0.036	4.31	10.8	0.91
650	9595	15.3	0.036	4.45	10.3	0.84
700	9530	15.7	0.036	4.59	9.8	0.77

表 1.6 锡($t_{\text{熔点}} = 231.9^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{沸点}} = 2270^{\circ}\text{C}$)

t ($^{\circ}\text{C}$)	γ (公斤/米 ³)	λ (千卡/米·小时· $^{\circ}\text{C}$)	c_p (千卡/公斤· $^{\circ}\text{C}$)	$\alpha \times 10^3$ (米 ² /小时)	$\nu \times 10^8$ (米 ² /秒)	$Pr \times 10^3$
240	6985	26.2	0.061	6.15	27.3	1.60
250	6980	26.4	0.061	6.20	26.7	1.55
300	6940	27.2	0.061	6.42	24.1	1.35
350	6905	28.0	0.061	6.65	21.9	1.19
400	6865	28.9	0.061	6.89	20.1	1.05
450	6830	29.7	0.061	7.13	18.6	0.94
500	6790	30.5	0.061	7.36	17.4	0.85
550	6755	31.4	0.061	7.62	16.5	0.78
600	6720	32.2	0.061	7.85	15.6	0.72
650	6680	33.0	0.061	8.10	15.0	0.67
700	6640	33.9	0.061	8.37	14.3	0.61

表 1.7 铅($t_{\text{熔点}} = 327.4^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{沸点}} = 1740^{\circ}\text{C}$)

t ($^{\circ}\text{C}$)	γ (公斤/米 ³)	λ (千卡/米·小时· $^{\circ}\text{C}$)	c_p (千卡/公斤· $^{\circ}\text{C}$)	$\alpha \times 10^3$ (米 ² /小时)	$\nu \times 10^8$ (米 ² /秒)	$Pr \times 10^3$
400	10,592	13.0	0.0352	3.49	21.0	2.17
450	10,536	13.2	0.0352	3.56	19.1	1.93
500	10,476	13.3	0.0352	3.61	17.5	1.75
550	10,419	13.4	0.0352	3.65	16.3	1.61
600	10,360	13.7	0.0352	3.76	15.3	1.47
650	10,300	14.4	0.0352	3.97	14.5	1.32
700	10,242	15.2	0.0352	4.22	13.7	1.17
750	10,185	16.2	0.0352	4.52	13.1	1.04
800	10,125	17.0	0.0352	4.77	12.5	0.94

法及平均法来确定 c_p 值。

金属的动粘滞度(除锡、汞外)用扭转的阻尼振动法测定;而对于锡、汞,则取自文献[69]—[72]。

关于液态金属的溶解热、蒸发热及蒸气压的资料取自文献[45]。关于在熔化状态的镓、铯及其他金属的物理性质的一些材料取自文献[21]、[45]。

表 1.8 钠-钾合金(25% Na + 75% K)

($t_{\text{熔点}} = -11^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{沸点}} = 784^{\circ}\text{C}$)

t ($^{\circ}\text{C}$)	γ (公斤/米 ³)	λ (千卡/米·小时· $^{\circ}\text{C}$)	c_p (千卡/公斤· $^{\circ}\text{C}$)	$\alpha \times 10^2$ (米 ² /小时)	$\nu \times 10^3$ (米 ² /秒)	$Pr \times 10^3$
20	872	19.0	0.310	7.03	93.0	4.76
50	865	19.5	0.294	7.67	78.5	3.69
100	852	20.0	0.273	8.60	60.7	2.51
150	840	20.5	0.260	9.39	51.7	1.93
200	828	21.1	0.256	9.95	45.2	1.64
250	815	21.6	0.252	10.52	40.3	1.38
300	803	22.2	0.248	11.15	36.6	1.18
350	790	22.7	0.244	11.78	33.4	1.02
400	778	23.3	0.240	12.48	30.8	0.89
450	765	23.8	0.235	13.24	28.2	0.77
500	753	24.4	0.231	14.03	26.7	0.69
550	741	24.9	0.227	14.80	25.2	0.61
600	729	25.5	0.223	15.69	23.7	0.54
650	716	26.0	0.219	16.58	22.5	0.49
700	704	26.6	0.215	17.57	21.4	0.44

表 1.9 铅-铋合金(44.5% Pb + 55.5% Bi)

($t_{\text{熔点}} = 123.5^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{沸点}} = 1670^{\circ}\text{C}$)

t ($^{\circ}\text{C}$)	γ (公斤/米 ³)	λ (千卡/米·小时· $^{\circ}\text{C}$)	c_p (千卡/公斤· $^{\circ}\text{C}$)	$\alpha \times 10^2$ (米 ² /小时)	$\nu \times 10^3$ (米 ² /秒)	$Pr \times 10^3$
130	10,570	9.4	0.035	2.54	31.4	4.45
150	10,547	9.6	0.035	2.60	28.9	4.00
200	10,486	10.1	0.035	2.75	24.3	3.18
250	10,425	10.5	0.035	2.88	21.0	2.62
300	10,354	10.9	0.035	3.00	18.7	2.24
350	10,300	11.3	0.035	3.13	17.1	1.97
400	10,242	11.8	0.035	3.29	15.7	1.72
450	10,180	12.2	0.035	3.42	14.6	1.54
500	10,120	12.6	0.035	3.56	13.6	1.37
550	10,060	13.1	0.035	3.72	12.9	1.25
600	10,000	13.6	0.035	3.88	12.4	1.15
650	9940	14.0	0.035	4.02	11.8	1.06
700	9876	14.4	0.035	4.16	11.4	0.99

实际物质的热力学相似理论

相似理论的意义在各种流体力学及放热问题的研究中已经很清楚。应用相似理论,可以把个别实验的实验数据综合起来,并且将得到的结果推广到所有的相似情况中去,也就是总结研究对象的规律性。

在研究物质的物理性质时,尤其是在研究各种载热剂的参数时,相似理论的意义也不小。在相似理论的基础上,根据某物质热力学相似的已知性质(或者是与其热力学相似的其他物质的性质),可以对这种我们所关心的物质的性质作出十分满意的结论。这一点在比较或找寻新的载热剂时有着相当重要的实际意义。换句话说,用实验方法研究了許多载热剂中的某一种载热剂的物理性质以后,不用进行新的实验,就可以根据这些资料十分准确地确定其他载热剂的这些性质,但这些载热剂必须是在热力学上相似于第一种载热剂的。

下面简短地解释一下什么是热力学相似的概念,以及根据什么样的特征来划分热力学相似的物质。

如果引入新的变数 $\varphi = \frac{v}{v_k}$, $\pi = \frac{p}{p_k}$, $\tau = \frac{T}{T_k}$ (v_k, p_k, T_k ——某物质的临界参数)来代替热参数:比容 v 、压力 p 和物体的温度 T , 则物体的物态方程可以写成无量纲的形式:

$$\pi = f(\varphi, \tau, c). \quad (1.1)$$

对所有物质而言,此方程含有同样的数值系数及某些无量纲的常数 c , 这些常数与物质的性质有关。这种物态方程叫做物态的对比方程,而变数 φ, π, τ 分别称为折合容积,折合压力和折合温度。

物质具有相同的折合参数的状态称为对比态。因为在临界点时这三个折合参数具有同一值,即等于1,所以很明显,所有物质的临界状态都是对比态。

如果二种或几种物质满足同一个对比物态方程,并且在三个折合参数 φ, π, τ 当中有二个相同,则第三个折合参数也将一样,也就是说物质处于对比态中。这叫做对比态定律。

服从这个定律、并且满足同一个对比物态方程的物质称为热力学

相似的物质。

从对比态定律可以得出一个结论：对于所有热力学相似物质而言，在临界点的临界系数 $\frac{RT_K}{p_K v_K}$ 应该有相同的值。

对于一系列的热力学参数而言，从对比态定律中可以得出非常重要的结果。这一点是很容易相信的，例如，克分子熵 S_M （或者更确切地说，差值 $S_M - S_M^0$ ， S_M^0 是 S_M 在 $T \rightarrow 0$ 时的值）、比值 $\frac{U_M - U_M^0}{T}$ 及 $\frac{F_M - F_M^0}{T}$ （其中 U_M 为内能， F_M 为物体的自由能，都是对于 1 克分子物质而言），对于所有热力学相似的物质说来，乃是折合参数的相同的函数和比值 $\frac{c_{v0}}{R}$ 、 $\frac{c_{p0}}{R}$ 的相同函数。这里， c_{v0} 和 c_{p0} 为在该温度下当 $v \rightarrow \infty$ （或 $p \rightarrow 0$ ）时的比热 c_v 、 c_p 的值。大家知道，在物态改变时，例如在相变时，在外部热源或内部摩擦力作用而产生热传播和热转移时，以及在增加或减少物体的表面积时等等，都可以用热力学函数 U 、 S 、 F 来描述能量转化的过程。因此，对比态定律可以推广到能量转化的各种过程中，特别是热传播过程和相变过程等等中去。从这个定律中可以得知，对于热力学相似的物质，在液态或气态下，它们的热容 c_v 和 c_p ，液体的蒸发热 r 、表面张力系数 σ 、粘滞度 μ 及导热系数 λ 应该由以下的普遍关系式来决定：

$$c_M = MR f_1 \left(\pi, \tau, \frac{c_M^0}{MR} \right), \quad (1.2)$$

$$Mr_{\text{кип}} = MR f_2(\tau), \quad (1.3)$$

$$\sigma = \sqrt[3]{MRT_K p_K^2} f_3 \left(\tau, \frac{c_M^0}{MR} \right), \quad (1.4)$$

$$\mu = \frac{\left(\frac{M}{g} \right)^{1/2} p_K^{2/3}}{(MR)^{1/6}} f_4 \left(\pi, \tau, \frac{c_M^0}{MR} \right), \quad (1.5)$$

$$\lambda = \frac{(MR)^{5/6} p_K^{2/3}}{\left(\frac{M}{g} \right)^{1/2} T_K^{1/6}} f_5 \left(\pi, \tau, \frac{c_M^0}{MR} \right). \quad (1.6)$$

在这些方程中，函数 $f_1, \dots, f_5$ 是独立的折合参数的普适函数； M ——

物质的分子量; MR ——普适气体常数, g ——重力加速度。

对于 c 、 r 、 σ 、 μ 和 λ 来说, 可以根据某一物质的已知性质, 利用关系式(1.2)——(1.6)来确定与该物质热力学相似的其他物质的性质, 但必须在相同的条件下, 也就是说, 在有等值的折合参数的情况下。

上面这些 c 、 r 、 σ 、 μ 、 λ 的一般表式以及与此类似的关于其他物理性质的关系式, 可以用不同的方法在对比态定律的基础上导出。我们以后将举其中的一个来说明。

表示物质物理性质的任何一个量与状态参数的关系, 可以写成某个因子与折合参数 π , τ (或 φ , τ) 和比值 $\frac{cM^0}{MR}$ 的无量纲函数的乘积,

这个因子与被研究的量具有相同的量纲, 并且由该物质的基本物理参数(p_k , T_k , M , MR) 所组成。这些参数及其方次的组合应当能够使我们得到所需要的量的量纲, 这样就不难找到对任何一个未知关系式的量纲因子的形式了。

但是, 应当知道, 对比态定律并没有普遍的意义, 它只是对于一定的一组物质是正确的。因此, 对于物理性质的一般关系式也只能相应地应用在这一组热力学相似的物质中。

自然, 这就会产生将物质按组分类方法的问题, 也就是关于热力学相似的判据的问题。

正如对这个问题的分析所表明的, 物质分子的范德瓦耳斯相互作用的位能曲线的形状具有重要的意义。这个原因很明显, 如果考虑到在物态方程中只有那些单个的(与物质性质有关的)常数, 这些常数同时包含在两个分子间范德瓦耳斯相互作用的位能的解析式 $u(r)$ 中, 此函数与这两个分子间的距离 r 有关。假如这些单个常数不超过二个, 那末它们可以从物态方程中除去(在决定临界点的二个条件的帮助下), 此物态方程能推导成无量纲的形式, 并且不包含任何与物质性质有关的常数。在这种情况下, 对比态定律才是一般性的规律, 也就是说, 对于一切物质都是正确的。但事实上, 包含在范德瓦耳斯相互作用的位能函数式中的单个常数多于 2 个。因此, 不存在无例外地适用于一切物质的唯一而又共同的对比状态方程, 对比态定律并没有普遍性的, 而只

具有有限的意义,也就是說,它只有对于热力学相似物质才是正确的。

在实际物质的物态方程的理论基础上可以确立以下的共同条件或热力学相似的判据:

1. 对于两个或数个物质, 假如两个分子的范德瓦耳斯相互作用的位能值成比例, 也就是說, 假如 $u_1(r) = \text{常数} \cdot u_2(r)$ (这里, r ——两分子中心之间的距离), 則它們是热力相似的。这个条件在几何学上表示这些被研究物质的范德瓦耳斯相互作用的位能曲线相似。

2. 假如分子的范德瓦耳斯相互作用的位能存在着下列关系:

$$\text{当 } \frac{r_1}{r_2} = \text{常数时, } u_1(r_1) = \text{常数} \cdot u_2(r_2),$$

則两个或数个物质是热力学相似的。

第一个条件是这个关系式的特殊情况。卡美尔林-奥涅斯 (Каммерлинг-Оннес) 从不很严格的假设出发确定了这个一般关系式的另外一种形式。

上面提到的这些条件具有最普遍的意义, 并且对于任何函数关系式 $u(r)$ 都成立, 也就是說, 在 u 的表式中可以包含着任何数目的单个常数。假如估計到, 在一級近似中, 在 $u(r)$ 中包含着三个表征物质性质的单个常数, 那么就可以确定更局部的, 但也是更实际的热力学相似的第三特征, 它可以叙述如下:

3. 对于二个或数个热力学相似的不同物质, 它們的平衡能 u_0 (也就是在最低点时的分子范德瓦耳斯相互作用的位能值) 与临界温度的比值都相同:

$$-\frac{u_0}{kT_k} = \text{常数}.$$

这一点在表 1.10 中表示得很清楚, 表中包含着比值 $\frac{u_0}{kT_k}$ 及临界系数

$$\frac{RT_k}{p_k v_k}$$

还存在着一些条件, 但它們与第三条件类似。实质上, 所有这些条件都是对这种情况而言的, 即或者某些物质的三个单个常数中的一个具有相同的值, 或者这些物质的两个常数間存在着共同的数值比。那

么三个常数中的一个就不再是单个常数了,而将成为这一组物质的共同常数了。对该组物质中的每个物质而言,单个常数的数目减少到2个,因而,对比态定律在这组的范围中是有效的。

表 1.10 一些物质的热力学特性

物 质	$-\frac{\mu_0}{kT_K}$	$\frac{RT_K}{p_K v_K}$
He	~ 1	3.27
H ₂	0.935	3.28
N ₂	0.767	3.43
Ar	0.766	3.43
O ₂	0.695	3.43
CH ₄	0.657	3.45

热力学相似理论在研究液态金属性质中的应用

在每组热力学相似物质的范围内,物质的物理性质(粘滞度、热导率、表面张力等等)可以用同样的函数表示,即由一定的有量纲的量(分子量及临界参数)所组成的有量纲因子乘以一个对于该组所有物质都相同的折合参数的函数。具体地说,粘滞度与状态参数的关系如下:

$$\mu = \left(\frac{M}{g}\right)^{1/2} \frac{p_K^{2/3}}{(MR)^{1/6}} f\left(\pi, \tau, \frac{c_M^0}{MR}\right). \quad (1.7)$$

液态时,在远远小于 T_K 的温度下,粘滞度与压力的关系极小,而 c_M^0 的影响也很小,因此,

$$\mu = \left(\frac{M}{g}\right)^{1/2} \frac{p_K^{2/3}}{(MR)^{1/6}} f(\tau). \quad (1.8)$$

液态金属的粘滞度已有很多人研究过。索洛维耶夫(A. H. Солоньев)曾完善地研究过液态碱金属的粘滞度^{[22], [27]}。由于这些研究的结果,已经确定,不同的液态金属可按其热力学相似的特征分为几个组。例如,钠、钾、铷及铯(门捷列夫周期表第一周期左边分族元素)具有体心点阵和差不多相等的配位数,这些元素成为一组。而镓、铋、锑、汞与锡(门捷列夫周期表第一周期右边分族元素)组成第二组,这里还应该包括铊,因为它在液态时的配位数接近于10。

为了确认这一点,我们来看一下图 1.1。纵坐标为在某温度时粘滞度 μ 对于在熔点时粘滞度 $\mu_{\text{融化}}$ 比的对数值,横坐标是比值 $\frac{T}{T_{\text{融化}}}$ 。把熔点 $T_{\text{融化}}$ 看成对比温度是足够准确的。因此,可以将比值 $\frac{T}{T_{\text{融化}}}$ 来代替比值 $\frac{T}{T_{\infty}}$,这样,由 μ 的普遍式可得

$$\frac{\mu}{\mu_{\text{融化}}} = \psi \left(\frac{T}{T_{\text{融化}}} \right).$$

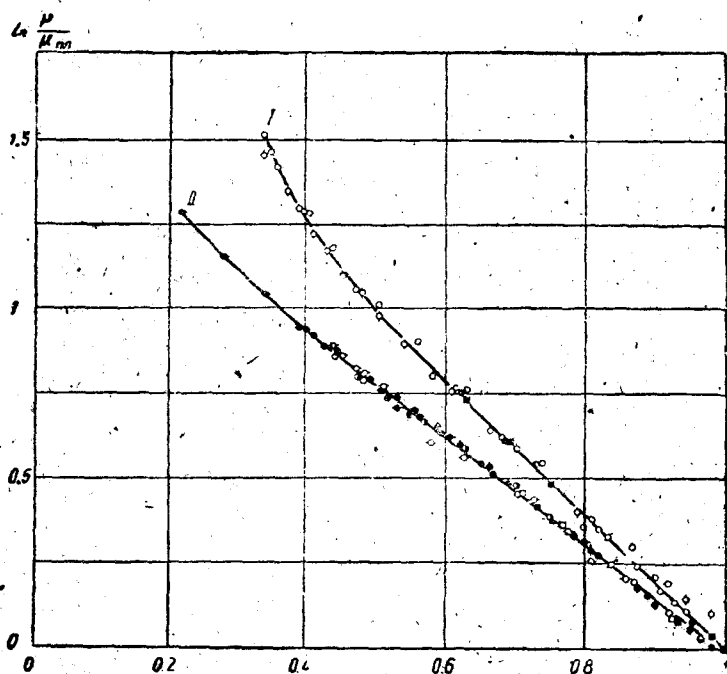


图 1.1 各种液态金属粘滞度的实验数据的综合

- I: ○—钠, ○—钾, ⊗—铷, ●—铯.
 II: ●—铊, ⊙—汞, ⊗—铟, ●—铊, ●—铋, —●—铋, —○—铋