

钠技术和液金属钠回路

邱仁森 编

科学出版社

2.3

内 容 简 介

本书介绍钠回路的有关知识和金属钠的特性,包括钠的物理化学性质、传热特性、分析净化技术,以及某些材料在钠中的行为特性、钠回路的运行技术和安全知识,还简要介绍了金属锂的有关知识。

本书对在核能工业中从事快中子反应堆和核聚变堆的研究、建造和运行工作的科技人员,以及化工、制药工业中的有关人员均有参考价值,还可作为钠技术方面的教材。

钠技术和液金属钠回路

邱仁森 编

责任编辑 杨家福

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987年9月第 版 开本: 787×1092 1/32

1987年9月第一次印刷 印张: 7 1/2

印数: 0001—650 字数: 170,000

统一书号: 15031·857

本社书号: 5314·15-9

定价: 1.80元

序 言

为了解决日益紧迫的能源问题，快中子反应堆和核聚变反应堆作为第二代和第三代的核能应用形式，其研究和发展工作正在世界各国引起广泛的重视。特别是快中子反应堆，它在国际上已经得到很大的发展，快堆电站已接近商用阶段。

我国的快中子反应堆和核聚变反应堆的研究工作也日益受到重视，取得了一定的进展。

由于快中子反应堆采用液态金属钠作为载热剂，核聚变反应堆采用金属锂作为增殖材料，因此在建造反应堆之前必须掌握这些碱金属的物理化学性质、传热特性、分析净化技术、材料行为特性、操作技术和回路运行技术。特别是在设计建造反应堆之前，人们必须建造大量的液金属回路来进行有关的基础性研究和工程模拟试验。为此，了解这些金属的特性，掌握其操作技术和回路运行技术是非常重要的。本书的目的就在于提供这方面的基本知识。

根据科研和工程的实际要求，书的内容以试验回路为主，兼顾反应堆的回路，以金属钠为主，兼顾金属锂，力图较全面地提供有关的知识。

吕应中教授审阅了本书的初稿，并提出了修改意见。杨熙超同志为本书出版付出了辛勤劳动。特此表示感谢。

目 录

序言	(iv)
第一章 钠的基本性质	(1)
§ 1.1 物理性质	(1)
§ 1.2 化学性质	(5)
§ 1.3 核性质	(14)
第二章 钠与材料的相容性	(15)
§ 2.1 质量迁移	(16)
§ 2.2 材料在钠中的磨损和自焊	(31)
第三章 钠的净化	(34)
§ 3.1 钠中杂质的影响	(34)
§ 3.2 液钠的净化技术	(37)
第四章 分析技术	(55)
§ 4.1 取样技术	(55)
§ 4.2 氧分析	(61)
§ 4.3 碳分析	(70)
§ 4.4 氮分析	(73)
§ 4.5 氢分析	(74)
§ 4.6 金属杂质的分析	(75)
第五章 设备的预清洗	(79)
§ 5.1 建造阶段的清洗	(79)
§ 5.2 系统整体的清洗	(81)
第六章 液钠的热工水力特性	(83)
§ 6.1 唧送功率与排热量的比值	(84)
§ 6.2 液钠的普朗特数对传热的影响	(84)
§ 6.3 浸润、氧杂质和卷入气体对液钠传热的影响	(87)

§ 6.4	液钠的传热关系式	(90)
§ 6.5	液钠的流动特性	(94)
§ 6.6	钠冷快堆的热工水力	(96)
第七章	钠回路系统及设备	(105)
§ 7.1	回路系统的一般特点	(105)
§ 7.2	管道和阀门	(109)
第八章	钠回路的测量仪表	(146)
§ 8.1	温度测量	(146)
§ 8.2	流量测量	(148)
§ 8.3	压力测量	(153)
§ 8.4	液位测量	(157)
第九章	覆盖气体	(160)
§ 9.1	覆盖气体的净化	(161)
§ 9.2	覆盖气体的分析	(163)
§ 9.3	覆盖气体的管路	(165)
§ 9.4	真空技术	(166)
第十章	回路系统的运行和维护	(167)
§ 10.1	回路系统充钠	(167)
§ 10.2	浸润问题	(171)
§ 10.3	电磁系的运行	(171)
§ 10.4	机械系的运行	(172)
§ 10.5	不排钠情况下的修理	(173)
§ 10.6	回路停闭后的修理	(174)
§ 10.7	系统的绝热	(175)
§ 10.8	阀门问题	(176)
§ 10.9	阻塞计的运行	(177)
§ 10.10	冷阱的运行	(179)
§ 10.11	样品盒的操作和从系统取样	(180)
§ 10.12	从系统中取出钠设备	(182)
第十一章	回路设备的清洗	(185)

§ 11.1	排钠	(185)
§ 11.2	清洗剂	(187)
§ 11.3	清洗的注意事项	(194)
§ 11.4	清洗步骤	(196)
§ 11.5	干燥	(198)
§ 11.6	沾放射性钠设备的清洗	(199)
§ 11.7	清洗出的流体与残留物的处理	(200)
§ 11.8	清洗中的安全问题	(201)
第十二章	钠的安全和防火	(203)
§ 12.1	钠的运输	(203)
§ 12.2	钠的工作场所	(203)
§ 12.3	防护	(204)
§ 12.4	钠系统操作注意事项	(206)
§ 12.5	钠火及处理办法	(211)
§ 12.6	急救方法	(222)
附录	金属锂的特殊问题	(223)
一、	锂的沾污问题	(223)
二、	锂中氮杂质对材料的腐蚀问题	(223)
三、	锂的净化	(224)
四、	锂的分析	(224)
五、	锂设备的清洗	(226)
六、	锂回路的特殊问题	(226)
参考文献		(227)

第一章 钠的基本性质

§ 1.1 物理性质

在常温下，钠是有银白色光泽的软质金属，是很强的还原剂，在常温下极易氧化。钠一旦暴露在空气中，由于表面上形成一层氧化膜而迅速失去光泽。钠在98℃左右便熔化。在液态情况下，钠也是银白色的。在熔点以上几十度，钠在空气中就要燃烧，生成 Na_2O 的浓烟。

钠的一些主要物理性质如下：

熔点	97.82℃
沸点	881.4℃
原子量	22.9898
原子半径	1.85埃
离子半径	0.95埃
熔化热	113.04焦耳/克
气化热(沸点时)	3876.98焦耳/克
熔化时体积增长	2.7%
比热(20℃时)	2.01焦耳/克·℃
密度(20℃时)	0.968克/厘米 ³
原子核吸收截面	0.53 巴

钠的蒸气由于温度升高而形成二聚体，在室温下，双原子型的钠是极微量的。在正常沸点时，约有17%(克分子浓度)的双原子型钠存在。

液态钠对中子的吸收和慢化作用比较小。对于快中子反

应堆来说，作为冷却剂，钠在核性能方面虽然次于氦等介质，但也是比较满意的冷却剂。反应堆运行时，液钠流过堆芯会产生放射性的 ^{24}Na ，其半衰期为14.8小时。因此，一次钠的感生放射性成为反应堆运行的一个问题。在热性能方面，与 315°C 的水相比，钠的比热约为水的五分之一，但导热系数高一百倍以上。由于液钠的沸点高，反应堆可以在低压下运行。液钠的粘性系数为水的两倍，比热也小，因而泵消耗的功率要比水高些。

钠的蒸气压与温度的关系如图1.1所示〔1〕。由图可以看

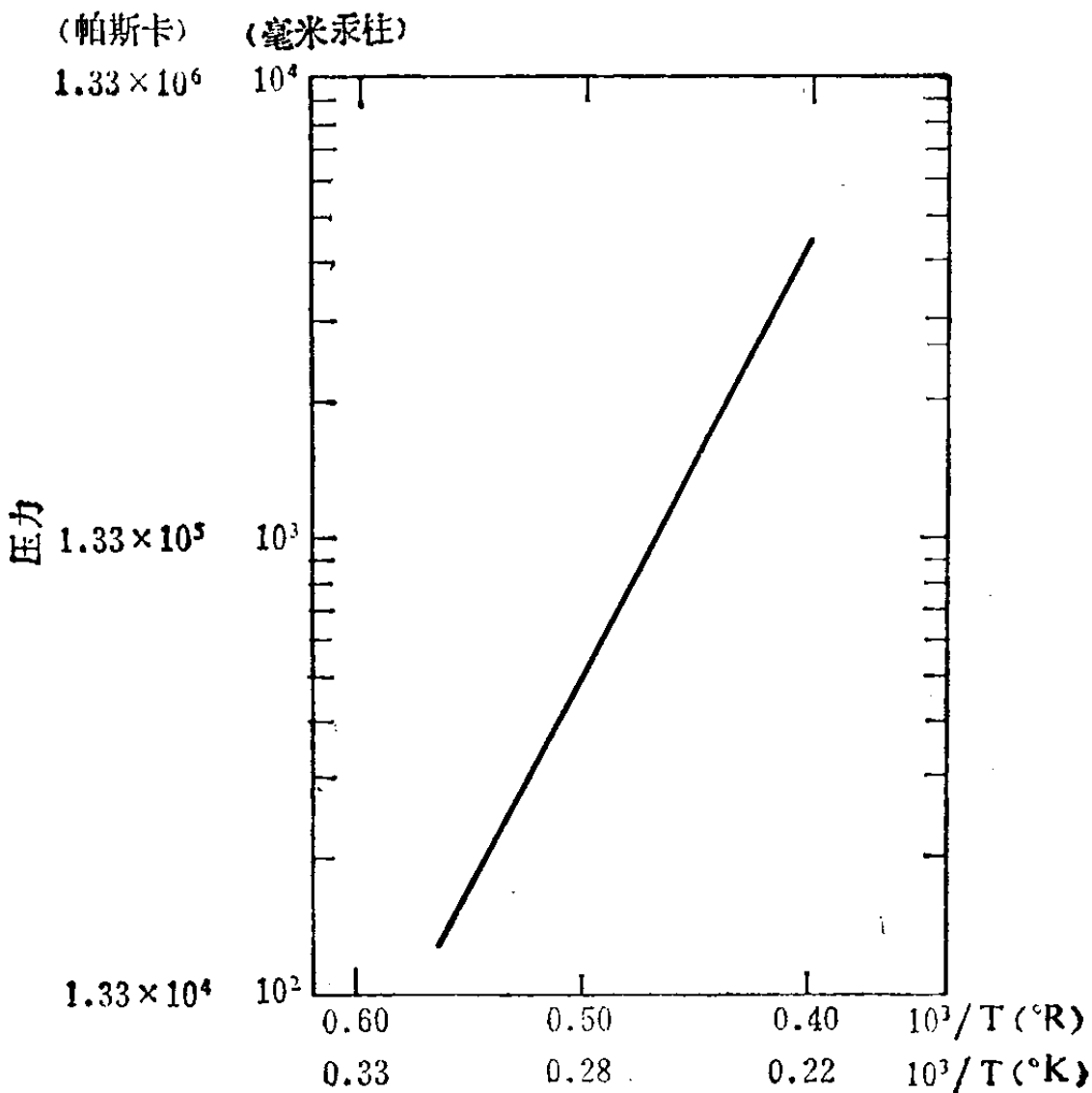


图1.1 钠的蒸气压

出，蒸气压的对数与绝对温度成反比。罗德布什〔2〕(Rodebush)、马肯西〔1〕(Makansi)和鲍尔斯〔3〕(Bowles)等均测量过钠的蒸气压。只有后两人的测量数据一直到沸点以上。图1.1的曲线可以表示成下述关系式：

$$\lg P = 4.521 - 5220/T(K)$$

式中 P (标准大气压) 为蒸气压， $T(K)$ 为温度。

固体钠的密度可以按下式计算〔4〕：

$$\gamma = 0.9725 - 20.11 \times 10^{-5}t - 1.5 \times 10^{-7}t^2 (\text{克/厘米}^3)$$

上式在 $t = 0 \sim 96.6^\circ\text{C}$ 的温度范围内适用。

液体钠的密度可以按下式计算〔5〕：

$$\gamma = 0.9453 - 0.2241 \times 10^{-3}t (\text{克/厘米}^3)$$

式中 $t(^{\circ}\text{C})$ 为温度。

钠的电阻率可以按下式计算〔6, 7〕：

$$\rho = 0.9865 + 5.6020 \times 10^{-3}t + 4.2841 \times 10^{-7}t^2 + 8.2726 \times 10^{-10}t^3 (\text{微欧} \cdot \text{厘米})$$

式中 $t(^{\circ}\text{C})$ 为温度。

钠在各种状态下的导热系数，可以分别按下述各式进行计算〔4〕：对固体钠

$$k = 1.356 - 0.00167t [\text{瓦}/(\text{厘米} \cdot ^{\circ}\text{C})]$$

对液体钠

$$k = 0.918 - 4.9 \times 10^{-4}t [\text{瓦}/(\text{厘米} \cdot ^{\circ}\text{C})]$$

1 标准大气压、1500K 的钠蒸气的导热系数约为 6×10^{-4} 瓦/(厘米·°C)。

液钠的动力粘度可以按下式计算〔9, 10〕：

$$\eta = \gamma^{-\frac{1}{3}} 0.1142 \times 10^{-3} e^{\frac{739.8}{T}} \quad (\text{帕} \cdot \text{秒})$$

式中， $T(K)$ 为温度， γ (厘米³/克) 为比容。

固体钠的定压比热可以按下式计算：

$$C_p = 1.1995 + 6.4940 \times 10^{-4}t - 1.0534 \times 10^{-5}t^2 \text{ [焦耳/ (克} \cdot ^\circ\text{C)]}$$

式中 $t(^{\circ}\text{C})$ 为温度。

液体钠的定压比热可以按下式计算：

$$C_p = 1.4371 - 5.8065 \times 10^{-4}t + 4.6241 \times 10^{-7}t^2 \text{ [焦耳/ (克} \cdot ^\circ\text{C)]}$$

式中 $t(^{\circ}\text{C})$ 为温度。

液钠的电阻率如图1.3所示。

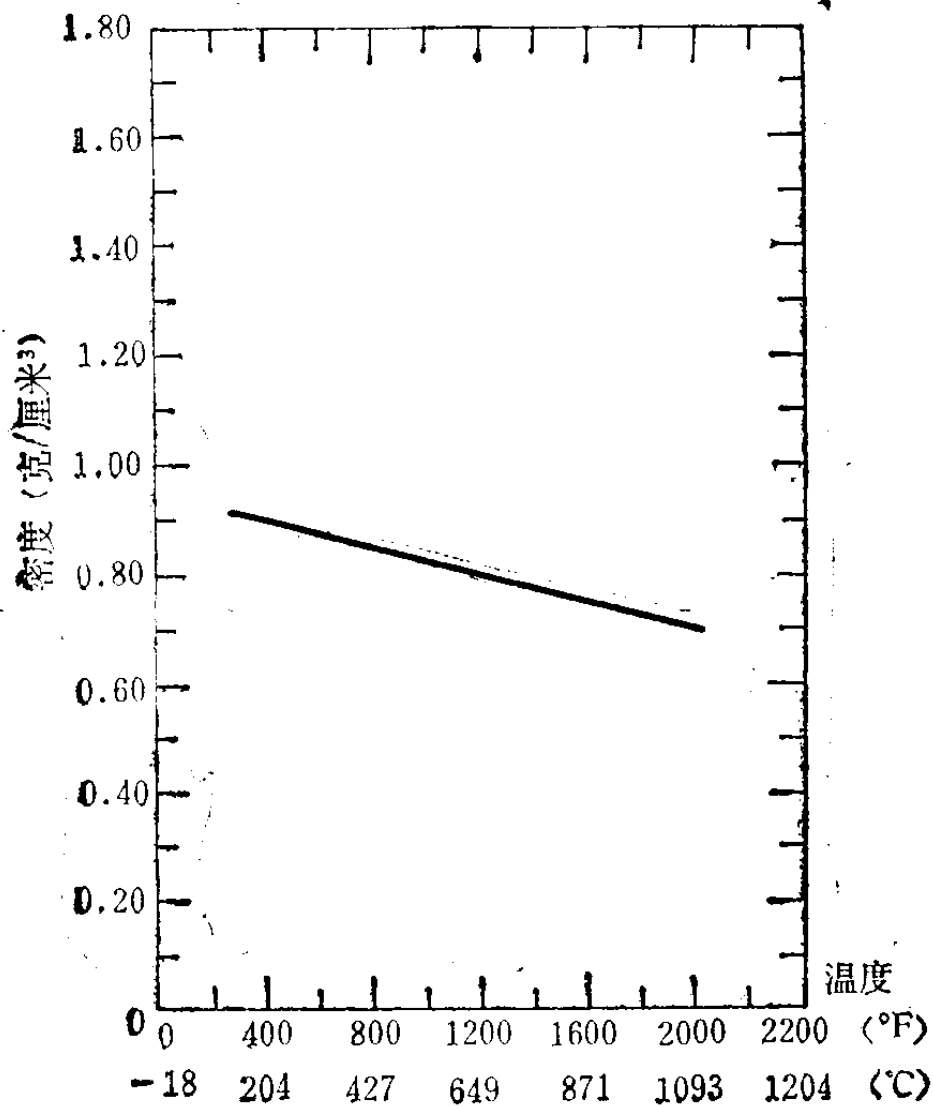


图1.2 钠的密度

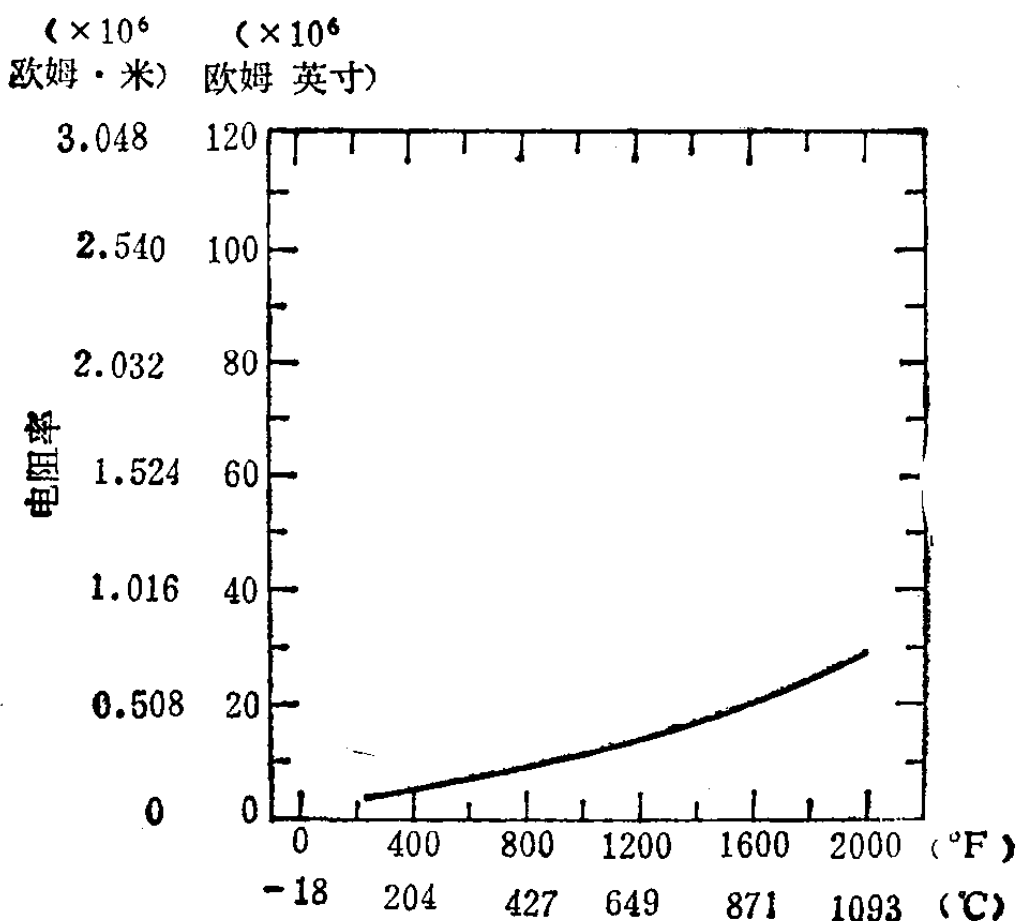


图1.3 液钠的电阻率

§ 1.2 化学性质

1.2.1 一些物质在液钠中的溶解度

在钠中，氧杂质通常以氧化物、氢氧化物和碳酸盐的形式存在，氢杂质通常以氢化钠和氢氧化钠的形式存在，碳杂质通常以原子态的碳和碳酸盐的形式存在。

人们对氧化钠在钠中的溶解度进行了大量的研究^[11~15]。一些典型的实验数据如图1.4所示。图中的直线是依据参考文献^[11]画的。该直线与各个研究结果吻合得较好。

碳在液钠中的溶解度如图1.5所示^[16]。从这些数据可以看出，碳的溶解度与钠中的氧有关。

氢氧化钠在液钠中的溶解度如图1.6所示^[17]。

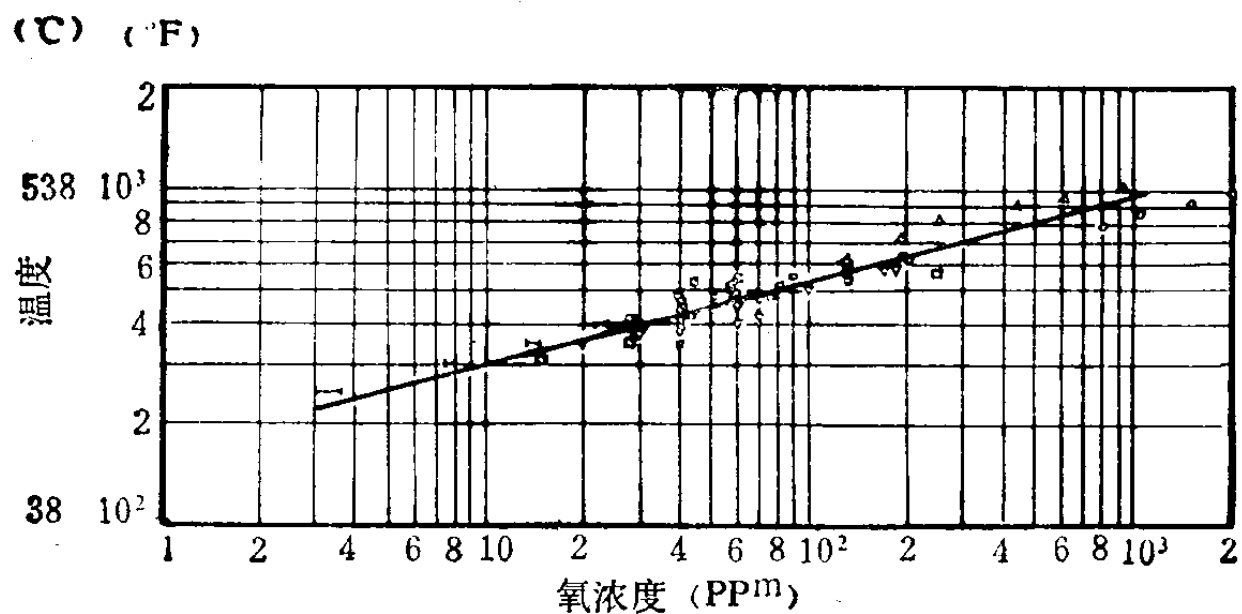


图1.4 Na_2O 在液钠中的溶解度

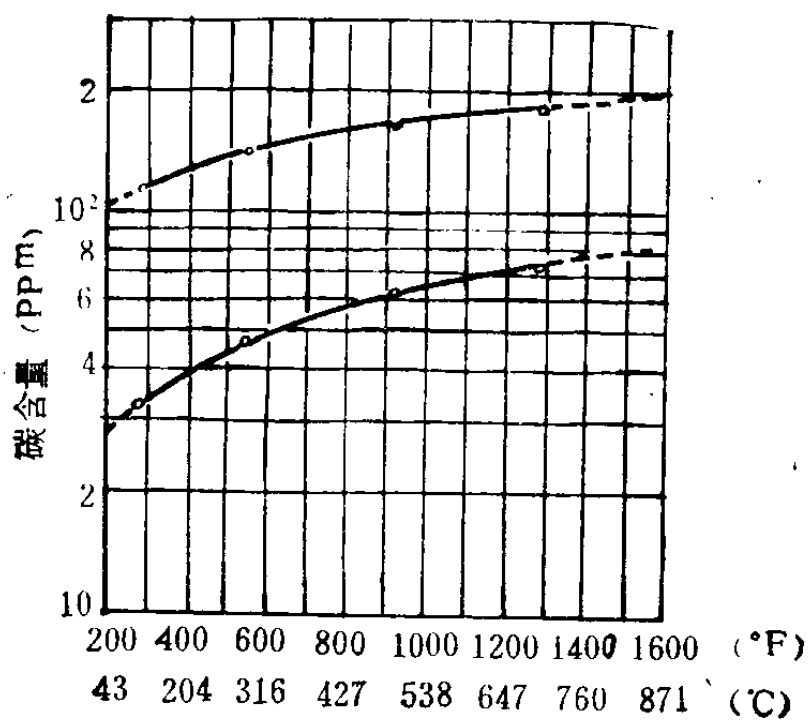


图1.5 碳在液钠中的溶解度

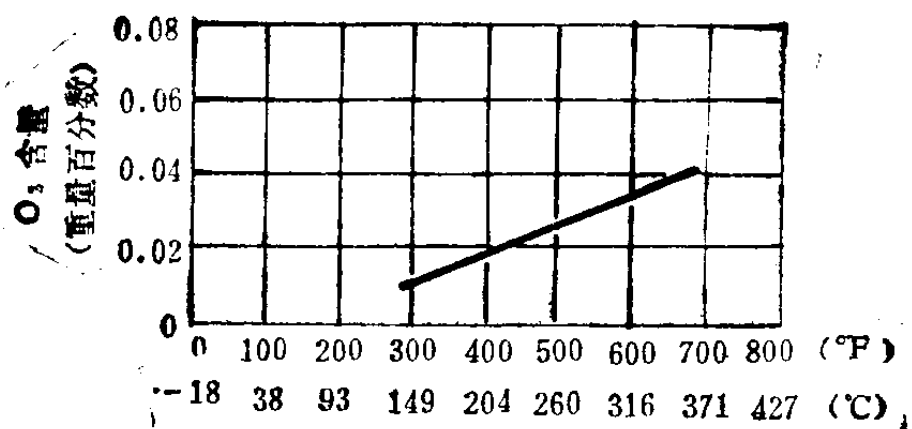


图1.6 氢氧化钠在液钠中的溶解度

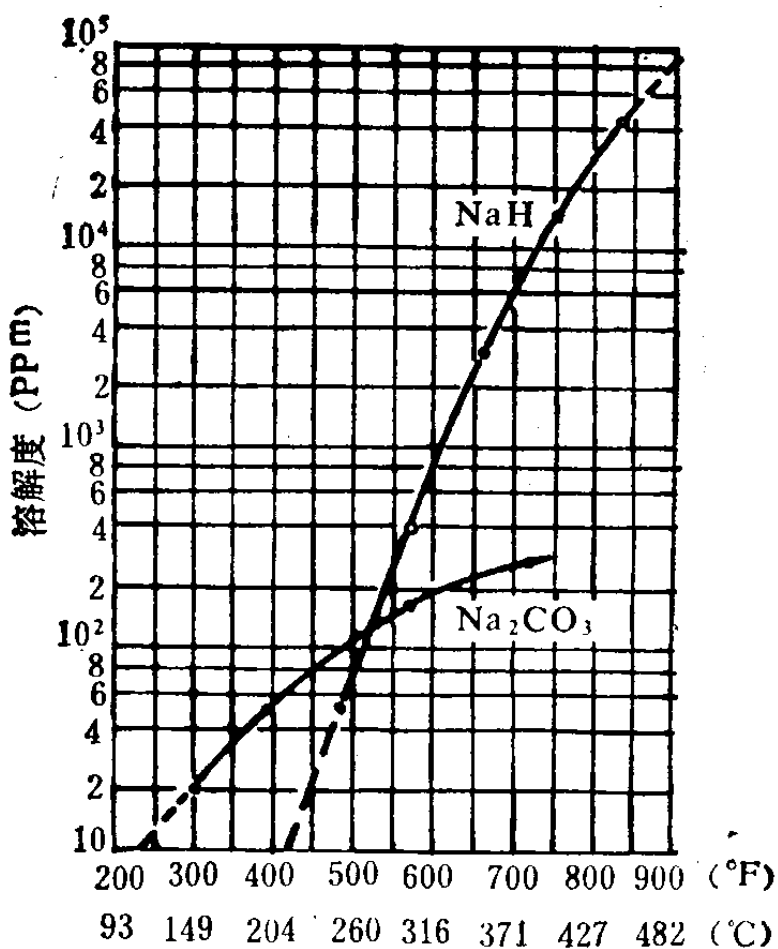


图1.7 氢化钠和碳酸钠在液钠中的溶解度

氢化钠在液钠中的溶解度如图1.7所示^[18]。应当指出，氢化钠是不稳定的，随着温度的变化会发生分解。

碳酸钠在液钠中的溶解度如图1.7所示。

铀在液钠中的溶解度还没研究清楚，参考文献^[19]给出

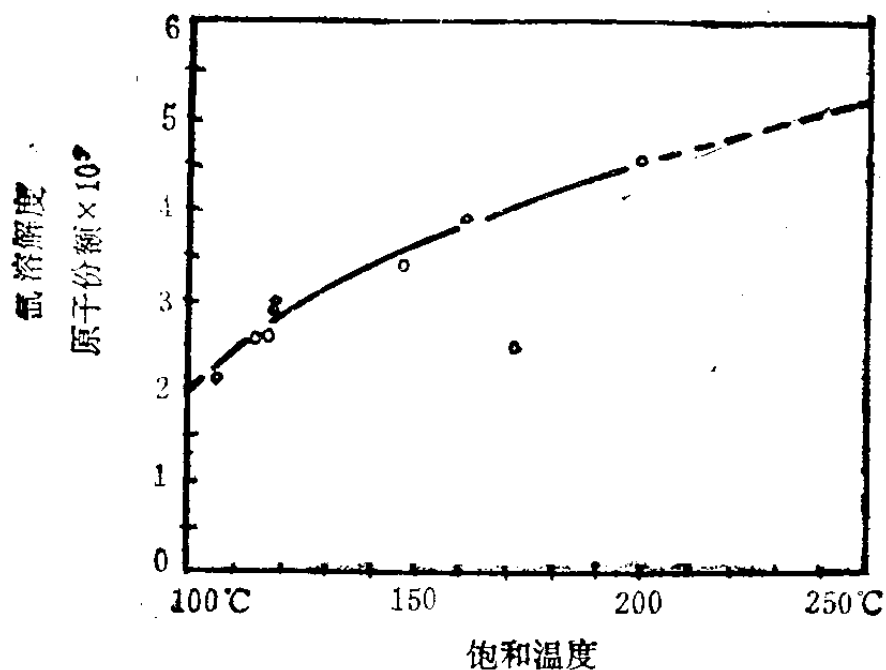


图1.8 氩在液钠中的溶解度

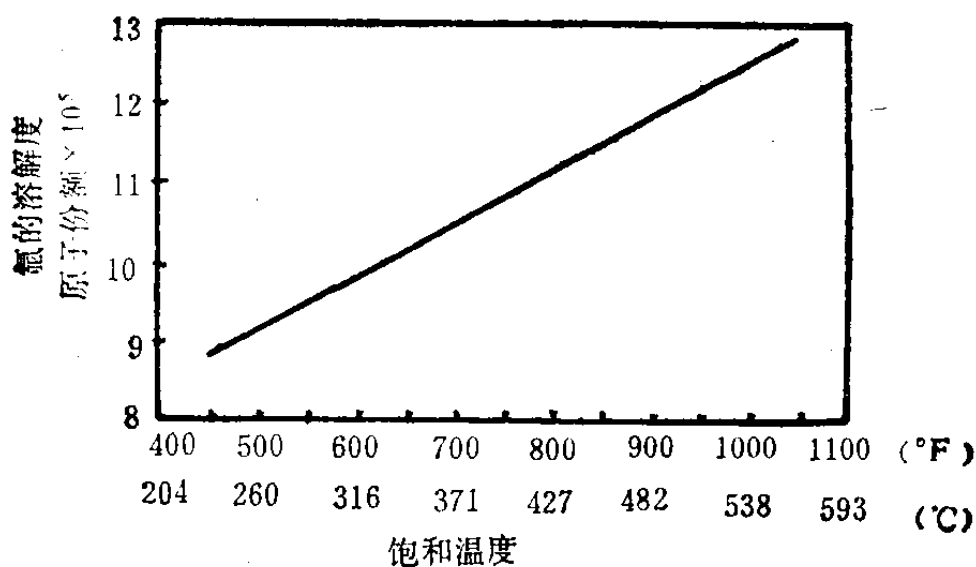


图1.9 氩在液钠中的溶解度

在97.8°C时为0.007%。

氩在液钠中的溶解度如图1.8所示^[20]。这些数据是在氩的压力为1标准大气压时得到的。

氩在液钠中的溶解度如图1.9所示。该曲线适于氩气的分压为1标准大气压的钠-氩气系统。

230°C时氩在液钠中的溶解度为 1.63×10^{-14} (克分子

数), 在480℃时为 1.48×10^{-10} (克分子数)[17]。

图1.10给出钙在液钠中的溶解度。

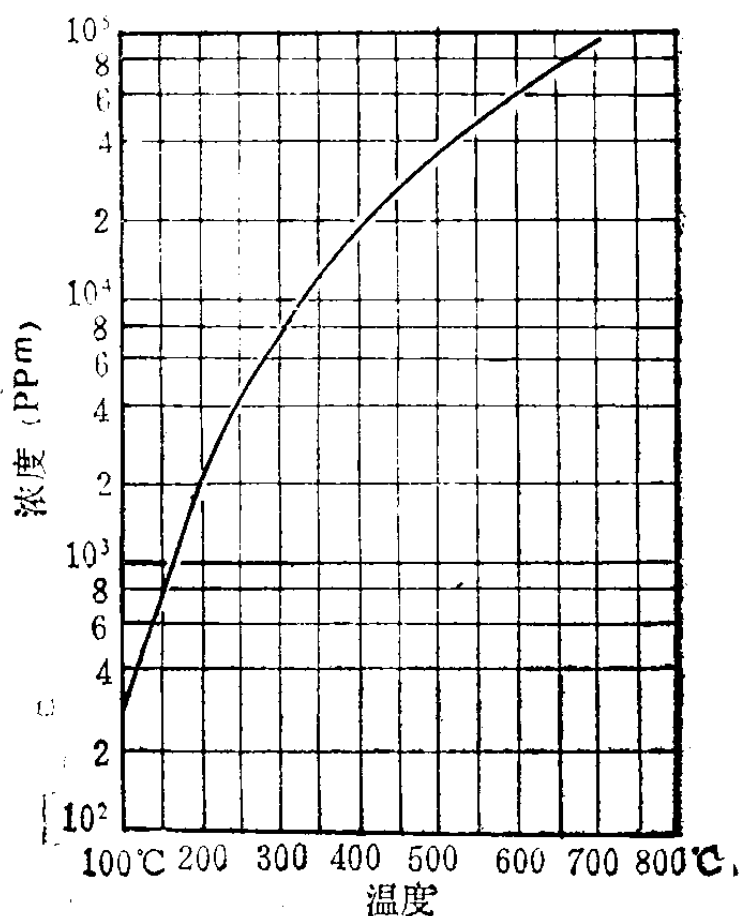
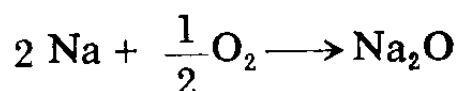


图1.10 钙在液钠中的溶解度

1.2.2 钠与气体的反应

钠与氧、空气、二氧化碳、一氧化碳和氢都会发生反应。

钠和空气的反应为



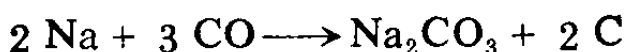
$$\Delta H^\circ_{298} = -4.16 \times 10^5 \text{焦/摩}$$

$$\Delta F^\circ_{298} = -3.76 \times 10^5 \text{焦/摩}$$

式中, H 为焓, F 为自由能。钠在过量的氧中燃烧会产生过氧化物。

钠仅与空气中的氧起反应而生成氧化物，其过程同上述。

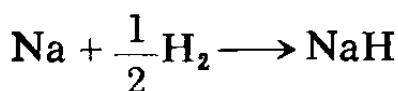
钠与一氧化碳的反应为



$$\Delta H^\circ_{298} = -7.96 \times 10^5 \text{焦/摩}$$

$$\Delta F^\circ_{298} = -6.33 \times 10^5 \text{焦/摩}$$

钠与氢的反应如下：

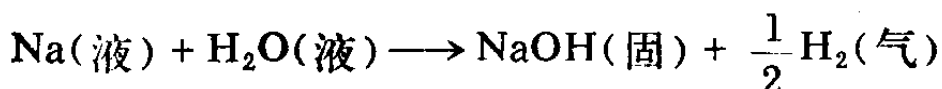


$$\Delta H^\circ_{298} = -5.86 \times 10^4 \text{焦/摩}$$

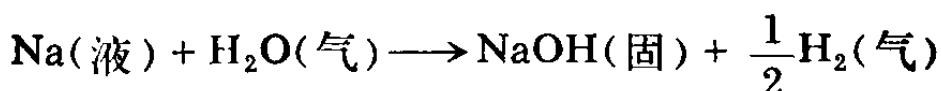
$$\Delta F^\circ_{298} = -3.89 \times 10^4 \text{焦/摩}$$

1.2.3 钠与液体的反应

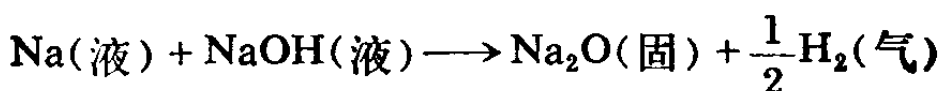
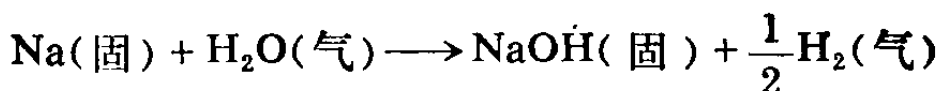
在一定条件下，钠与水之间可以发生下述的化学反应：



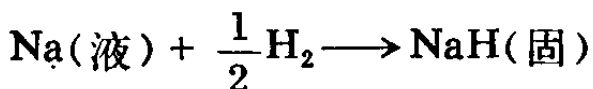
$$\Delta H^\circ_{298} = -1.47 \times 10^5 \text{焦/摩}$$



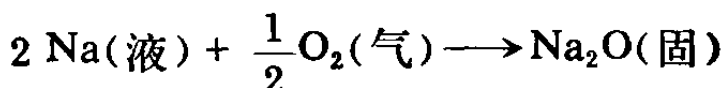
$$\Delta H^\circ_{298} = -1.91 \times 10^5 \text{焦/摩}$$



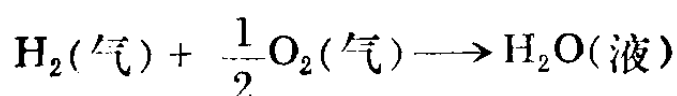
$$\Delta H^\circ_{298} = -6.65 \times 10^3 \text{焦/摩}$$



$$\Delta H^\circ_{298} = -5.74 \times 10^4 \text{焦/摩}$$



$$\Delta H^{\circ}_{298} = -4.22 \times 10^5 \text{焦/摩}$$



$$\Delta H^{\circ}_{298} = -2.86 \times 10^5 \text{焦/摩}$$

前三种反应发生在有过量的水或蒸气，或者钠和水的分子数平衡的情况下。第四种反应在温度高于氢氧化钠的熔点(315°C)并且存在过量的钠的情况下发生。在真空或者氢的分压比较低，温度高于200°C，并且存在过量钠的情况下，第三种反应是不稳定的。在温度低于氢化钠的分解温度(371°C)，并且存在过量钠的情况下，发生第五种反应。

在固体状态，钠与水的反应是很激烈的，有时会爆炸。产生这种破坏性后果的原因通常是由于氢压力的积累，或者氢在空气中燃烧或爆炸。液钠与水的反应更加猛烈，在发生反应时液钠常被加热到着火点。因此，可能与水发生接触的钠系统应当配备压力释放系统和防止氢着火。

在刚性容器中进行的钠-水反应研究表明，当钠与水的分子数平衡时，反应会产生压力和温度峰。反应物中任何一种过量都会降低温度脉冲。实验表明，反应物的混和状况是不定的，比预想的要慢些，因为在初始接触之后，反应产物要起分离作用。如果反应的起始温度在315°C以上，随着反应的进行，产生的气体可以通过安全阀逐渐地释放。如果起始温度在315°C以下，反应热会使温度上升，氢氧化钠熔化，发生前述第三种反应。瞬时的大量氢释放会增大压力脉冲的危险。

在密闭容器中，释放的氢与空气的反应可以被看作定容的热力学问题。钠水反应产生的压力可以按下式计算^[85]：

$$P = 0.0168 + 0.2233R - 0.0392R^2$$

式中， P 为最后的压力(表压，巴)， R 为180°C的钠对25°C的