

氢的温-熵图

丁家强 李清泉 著
赵建荣 王世芬

科学出版社

內 容 簡 介

95%仲氫 + 5% 正氫混合物是有重要应用的工程介質,而溫-熵图对工程設計中的热力計算有重要应用。本书利用文献中的 $p-V-T$ 数据,制作出 95% 仲氫 + 5% 正氫混合物的溫-熵图,并给出了其他成分混合物焓熵性質的換算公式。

本书可供我国工程設計人員参考。

氫 的 溫 - 熵 图

丁家強 李清泉 著
赵建荣 王世芬

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝陽門大街 117 号

北京市书刊出版业营业登记出字第 001 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經銷

*

1964 年 10 月第 一 版 开本: 850 × 1168 1/32

1964 年 10 月第一次印刷 印张: 1/2 插圖: 5

印数: 0001—2,000 字数: 11,000

统一书号: 13031 · 2016

本社书号: 3098 · 11—2

定价: [科七] 1.20 元

氫的溫-熵圖

一、引言

氫是現代工程技術上有重要實用價值的工程介質。有關氫的熱力學性質的資料目前還在陸續發表。在未發現氫的正、仲成分以前，Keesom 和 Houthoff^[1] 曾利用很少的實驗資料繪制了氫的溫-熵圖，他們取正常沸點時液體的熵值為零。1948 年 Woolley 等人^[2] 曾對氫的同位素、異構體的熱力學性質及輸運性質做了詳細的綜述，並收集了大量資料，給出了正常氫（正氫占 75%；仲氫占 25%）的焓和熵的絕對值，但沒有發表氫的液態區及氣態、液態交界區的數據。1961 年 Dean^[13] 根據 Woolley 的焓和熵的結果進行單位換算、平滑、內插，得到了更為實用的數據。Dean 還討論了氣態氫的正、仲成分對焓和熵的影響。關於氫的比熱及 $p-V-T$ 關係，從 1948 年以後還發表了一系列的實驗結果^[3-10, 12-13]。

本文的目的是利用 Johnston 及 Younglov^[5, 7, 16] 的飽和液態氫比熱的實驗結果以及 Scott^[8] 整理的液態氫的 $p-V-T$ 值進行液態氫的焓和熵的計算，並根據 Woolley^[2] 的氣態氫的焓和熵的結果，經過換算，最後繪制出詳細的溫-熵圖（正氫占 5%；仲氫占 95%），溫度範圍是 16—300°K，壓力最高為 60 大氣壓。此外，為了計算其它正、仲比例的氫的焓和熵值，還給出了簡便的換算辦法。

最後，給出了 $p-V-T$ 表。

二、計算原理

計算過程中，我們作了三個基本假定：

第一,假定正、仲氫的 p - V - T 值沒有差別。关于这个假定,后面还要討論。

第二,假定不管是在单相区或两相共存区,正、仲氫比例都不随温度而改变。这样,我們就可以采用平衡的热力学关系进行計算。事实上,由于正、仲氫的差別是核自旋方向的不同,因此,当不存在强磁場或催化劑时,正、仲氫之間的轉化十分緩慢,以致于在一次实验時間內不能夠觉察出这种轉化。

第三,不管是在气态、液态或固态,正、仲氫的混合物都认为是理想的混合物,我們可以利用理想混合物的附加混合熵的公式进行計算。由于正、仲氫的化学性質十分相似,因此,这个假設不会引入多大的誤差。

1. 正、仲比为 5:95 的氫的焓和熵的計算

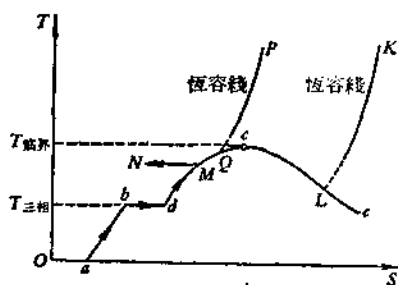


图 1

图 1 是計算路綫示意图。 ab 是飽和固态綫, b 点的温度为三相点温度; bd 表示熔化时的熵增量; 从 d 点开始, 一直到临界点 c 为止是飽和液态綫; ce 是飽和蒸汽綫。順着箭头所指的方向, 我們来分述各部分焓和熵的計算方法。

1) 飽和态的焓值

在临界温度以下, 正、仲氫几乎都处在最低轉动态(正氫的轉动量子数为 1; 而仲氫为零)。

实验結果指出, 在 12°K 以下, 不同正、仲比例的氫的比热差別很大。Woolley 认为这种差別是由于正氫最低轉动三重态的貢獻所引起的。比这个温度更高时, 轉动三重态上分子的分布是均匀的, 不同正、仲比例的氫的比热都应该相同, 因此, 在三相点以

上, 可以利用 20.4°K 时的平衡氫的比热实验值代替其它正、仲比例的氫的比热值进行熵的计算。

在三相点以下, 我們仍然采用平衡氫的比热来计算熵值, 为了把这个结果换算成为正、仲比例为 5:95 的氫的熵值, 必須加上上述的轉动三重态的贡献, 即 $(0.05 - 0.0021) R \ln 3 \cong 0.05 R \ln 3$ 。此外, 为了得到绝对熵, 还必须加上核自旋三重态的贡献, 在图 1 中以 $0a$ 表示, 它的值等于 $0.05 R \ln 3$ 。

这样, 正、仲比例为 5:95 的氫饱和状态时的熵值可以由下式计算:

$$S_s(T) = \int_0^{T_{\text{三相点}}} \frac{12\pi^4 R}{5} \cdot \frac{T^2}{\Theta_D^3} dT + \frac{L_f}{T} + \int_{T_{\text{三相点}}}^T \frac{C_l'}{T} dT + \\ + 0.05 R \ln 9 + \Delta S_{\text{混合}},$$

其中 Debye 特性温度 $\Theta_D = 91^\circ\text{K}$, 它是由饱和固态氫比热的实验值 (从 2.5—10°K) 确定的; 熔化热 $L_f = 28.00$ 卡/克分子; 三相点温度 $T_{\text{三相点}} = 13.957^\circ\text{K}^{[2]}$; 附加混合熵 $\Delta S_{\text{混合}} = -R \times (0.05 \ln 0.05 + 0.95 \ln 0.95)$; 饱和液体的比热 C_l' 采用 Johnston 等人^[5,7,16] 的实验结果。

由于实验数据的限制, 高于 31°K 时饱和液态氫的熵值由外推气态部分的等容线得到, 在图 1 中以 PQ 表示, 虚线是外推部分。同样地, 氫的饱和蒸汽的熵值也是由气态部分的等容线外推而得到的, 图 1 中以 KL 表示, 虚线是外推部分。

上述方法得到的氫的饱和液体和饱和蒸汽的熵差与实验的结果^[4]比较, 正如 Woolley 的结果一样, 最大差别约为 0.12 卡/克·度。我们没有采用实验结果的原因, 是由于实验值与相应的等容线不能连成平滑的曲线。

2) 液态的熵值

在恒定温度下, 压力为 p 时的熵值为

$$S(p, T) = S_s(T) - R \int_{p_s}^p \left[\frac{T}{p} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p - \frac{Z}{p} \right] dp,$$

其中 p_s 为温度 T 时的饱和压力, $S_s(T)$ 是温度为 T 时饱和液体的熵值, 图 1 中以 MN 表示这个积分的方向。

压缩性数据采用文献[8]的结果。数据经过平滑、图解插值、数值微分, 再利用辛卜森公式进行数值积分, 就得到给定温度和压力下的熵值。

3) 焓值的计算

利用温-熵图上平滑后的恒压线进行数值积分, 热力学关系为

$$H(p, T) = H(p, T') + \int_{S(p, T')}^{S(p, T)} T dS,$$

积分常数 $H(p, T')$ 取在离临界温度较远的气态部分。在本文的计算中, 我们采用 $T' = 36^\circ\text{K}$, 这些 $H(p, T')$ 值由[2]给出。

饱和液体的焓值由外推等焓线得到, 将这些值加上相应的蒸发热便得到饱和蒸汽的焓值。蒸发热用蒸发熵来计算。

4) 共存区的数值

由饱和液体和饱和蒸汽的焓和熵值, 应用杠杆规则进行计算。在共存区中, 等温线和等压线合而为一。

2. 正、仲比例对焓和熵值的影响

正、仲比例不同反映在焓和熵值上的差别主要是:

第一, 理想气体的焓和熵值的不同。如果以 H, S 表示正、仲比例为 5:95 的氙的焓和熵值; 以 $H_{x,y}, S_{x,y}$ 表示其它正、仲比例的氙的焓和熵值; 以 $\Delta H_{x,y}, \Delta S_{x,y}$ 表示后者与前者之差值, 则由于这个因素引起的焓和熵的差别各为

$$\Delta H_{x,y} = (x - 0.05)H_0 + (y - 0.95)H_p,$$

$$\Delta S'_{x,y} = (x - 0.05)S_0 + (y - 0.95)S_p,$$

下标“0”及“p”分别表示纯正氙及纯仲氙的量, 这些值可以在文献[2]中查到。

第二, 混合熵的不同。按照上述附加混合熵的表示式, 由这个

因素引起的熵差为

$$\Delta S'_{x,y} = -R[x \ln x + (1-x) \ln(1-x) - 0.05 \ln 0.05 - 0.95 \ln 0.95].$$

第三,正氫基态的轉动和核自旋九重态的貢獻不同。此因素产生的差別为

$$\Delta S''_{x,y} = (x - 0.05)R \ln 9.$$

从計算过程得知,对于焓值,正、仲比例的改变只需要考虑第一个因素,所以

$$H_{x,y} = H + \Delta H_{x,y}. \quad (1)$$

对于气态的熵值必須考虑到第一及第二个因素,所以

$$S_{x,y} = S + \Delta S'_{x,y} + \Delta S''_{x,y}. \quad (2)$$

而对于液体,必須考虑到第二及第三个因素,因而

$$S_{x,y} = S + \Delta S'_{x,y} + \Delta S''_{x,y}. \quad (3)$$

这样,我們能够从正、仲比例为 5:95 的氫的焓和熵值附加上一个修正值,便可得到其它正、仲比例的氫的相应值。由上述討論得知,这个修正值是正、仲氫的比例及温度的函数。

三、結 果

由上述液体部分的計算結果与 Woolley 的气体部分的焓和熵的結果,我們繪制了正、仲比例为 5:95 的氫的温-熵图(图 2)。高于 500 Amagat 的气体部分采用文献[10]的 p - V - T 数据和文献[2]的計算方法而得到。温度从 16—300°K,压力高达 60 大气压,相应的最高密度是 860 Amagat, 1Amagat = 0.089888 克/升。

綜合上述关于正、仲氫比例对焓和熵的影响,图 3 及图 4 分別給出了六种其他正、仲比例的氫与图 2 的焓和熵的差值,曲綫上的百分数为正氫的克分子百分数。可以看到,在轉动态开始激发的温度附近这种差值变化最快。

某一正、仲比例的氫的焓和熵值可以由图 2 的值加上图 3 和图 4 相同温度下的值而得到。图 3 及图 4 未給出的其它的正、仲

比例的氫的焓和熵值，也可以按上述方法进行修正。

在附表 2 和 3 中给出了原始的 p - V - T 表。

四、討 論

由于临界温度附近 p - V - T 值不易测准，因而在温-熵图上气态和液态交界的地方出现衔接不上的现象。图 5 是这一分歧的示意图。等压线与等熵线的实线部分是由实验值计算的结果。考虑到气态和液态之间是连续变化的，我们的结果采用了平滑的虚线，结果等压线及等熵线在气态和液态交界地方的熵值比由气体计算值外推的值略大，而比液体的略小。例如在密度 $\rho = 640 \text{ Amagat}$ 、温度为 33°K 时，这个差值分别为 0.02 和 0.11 卡/克·度。在平滑时，我们使得这些线与饱和线上的密度值吻合。

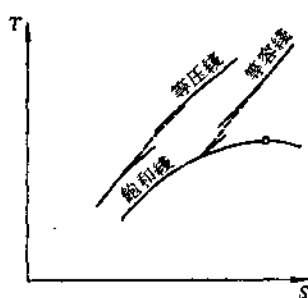


图 5

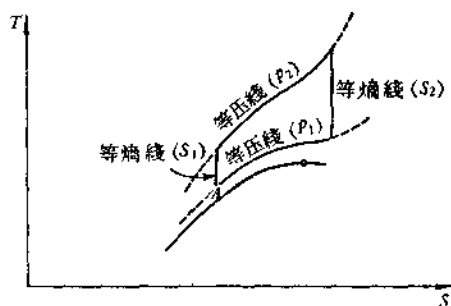


图 6

温-熵图曲线的正确性可以由热力学关系及一些零星的实验数据来验证和比较。

如图 6 所示，从 A 点出发，经过恒压加热，恒熵加热，恒压冷却，恒熵冷却回到原点 A，在这个过程中，总的焓变化为

$$\Delta H = \int_{p=p_1}^{p=p_2} T dS + \int_{S=S_2}^{S=S_1} V dp + \int_{p=p_2}^{p=p_1} T dS + \int_{S=S_1}^{S=S_2} V dp.$$

因为焓值是一个热力学态函数，而整个过程是封闭的，照理说， $\Delta H = 0$ ，所以计算结果不等于零，也就检验了图的精确度。

为了检验交界区数值的可靠性，我們把这个积分迴路扩展到实验结果比较可靠的气体区。表 1 给出的任意三个迴路的结果，足够小的 ΔH 值，说明了温-熵图的正确性。

表 1 ΔH 值

次 数	S_1 , 卡/克·度	S_2 , 卡/克·度	p_1 , 大气压	p_2 , 大气压	ΔH , 卡/克
1	2.43	3.43	10	50	+0.03
2	3.13	4.13	20	60	+0.03
3	3.03	3.73	20	50	-0.19

由 Younglove^[17] 的恒容比热 ($\rho = 569.7 \text{ Amagat}$) 实验值计算的熵值与图 2 的内插值的最大偏差是 0.9%。

由 Goodwin^[18] 的 p - V - T 实验值计算的等温线 ($T = 34^\circ \text{K}$) 与图 2 的结果的最大偏差是 0.5%。

从上述的比较可知，图 2 的焓、熵值的最大误差不超过 1%，这说明了气态和液态交界地方取平滑的曲线是合理的。至于特别靠近临界点的数值的可靠性，尚待实验验证。

不同正、仲比例氙的焓和熵的换算误差的来源在于第一个假设的近似性。从已有的实验结果看到，正、仲氙的 p - V - T 值差别是很小的。Beenakker^[11] 的实验结果指出在 18°K 与 20°K 时，纯仲氙与正常氙的第二维里系数的差别只有 1%，Goodwin^[1] 的实验结果说明在 80°K 时，这两种氙的 p - V - T 值差别大约 0.1%。考虑到 p - V - T 值在焓和熵的计算中只起了附加项的作用，因此，可以认为上述关于正、仲氙具有同样的 p - V - T 值的假定是合理的。当然，随着温度的升高，这种可靠性更高，因为那时正、仲氙的转动动态开始激发，相互间的差别将显得更为微小。文献[11]中对 18°K 及 20°K 两个温度的实验结果证明了这种趋势。

1) 这个结果是 Dean 介绍的^[19]，Goodwin 的原文未发表。

五、結 論

本文給出了氫的精細的溫-熵圖,其中包括等容綫、等壓綫、等焓綫以及共存區的等干度綫。

对不同正、仲比例的氫的焓和熵的計算方法作了詳細的論述,并給出了修正曲綫。

从热力学关系及其它实验数据的分析指出,本文的焓和熵的結果的最大誤差不超过 1%。

致 謝

在本工作进行过程中,曾得到錢希真同志的热情指导,在此表示感謝。

附表 1. 气态氮的 p-V-T 表^[2]

温度 (°K)	压力 (大气压)															
	1	5	10	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60		
30	0.848	5.10														
32	0.791	4.59	12.8													
34	0.742	4.18	10.4	14.9	40.1	49.2	53.1	55.6	57.8	59.1	60.4	61.5	62.6			
36	0.698	3.85	9.09	11.9	21.5	37.6	46.6	50.7	53.4	55.6	57.3	58.8				
38	0.659	3.57	8.11	10.3	16.3	25.1	37.6	44.6	48.8	51.3	53.5					
40	0.625	3.35	7.39	9.22	13.9	19.7	29.1	37.6	43.1	46.9	49.6					
42	0.593	3.16	6.84	8.47	12.3	16.9	23.8	31.2	37.4	42.0	45.5	48.2				
44	0.565	2.99	6.39	7.88	11.2	15.0	20.6	26.6	32.4	37.3	41.3	44.5				
46	0.540	2.83	5.99	7.33	10.3	13.7	18.3	23.4	28.5	33.2	37.2	40.7	43.6			
48	0.517	2.70	5.65	6.83	9.64	12.6	16.6	21.0	25.5	29.8	33.7	37.2	40.2	42.9		
50	0.496	2.57	5.35	6.57	9.05	11.7	15.3	19.2	23.2	27.1	30.7	34.1	37.1	39.8		
52	0.476	2.46	5.10	6.21	8.50	11.0	14.3	17.8	21.3	24.9	28.3	31.4	34.4	37.1		
54	0.458	2.36	4.87	5.89	8.05	10.4	13.4	16.5	19.8	23.0	26.2	29.2	32.0	34.7		
56	0.441	2.26	4.66	5.60	7.63	9.83	12.6	15.5	18.5	21.5	24.4	27.3	30.2	32.5		
58	0.426	2.18	4.46	5.47	7.35	9.36	12.0	14.7	17.4	20.2	22.9	25.6	28.2	30.6		
60	0.412	2.10	4.29	5.19	7.10	8.94	11.4	13.9	16.5	19.1	21.6	24.1	26.6	28.9		
65	0.379	1.92	3.91	4.75	6.37	8.05	10.2	12.4	14.6	16.8	19.0	21.2	23.4	25.4		
70	0.352	1.80	3.60	4.31	5.80	7.35	9.27	11.2	13.2	15.1	17.1	19.0	20.9	22.8		
75	0.328	1.65	3.34	4.05	5.40	6.77	8.52	10.3	12.0	13.8	15.6	17.3	19.0	20.7		

續附表 1

溫度 (°K)	壓力 (大氣壓)		1	5	10	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60
	密度 (克/升)															
80	0.307	1.55	3.11	3.73	4.99	6.29	7.89	9.50	11.1	12.7	14.3	15.9	17.5	19.0		
85	0.289	1.45	2.92	3.51	4.70	5.87	7.36	8.85	10.3	11.8	13.3	14.7	16.2	17.6		
90	0.273	1.37	2.75	3.28	4.35	5.52	6.90	8.29	9.67	11.0	12.4	13.8	15.1	16.4		
95	0.259	1.30	2.60	3.09	4.10	5.20	6.50	7.80	9.10	10.4	11.7	12.9	14.2	15.4		
100	0.246	1.23	2.46	2.96	3.91	4.92	6.15	7.37	8.59	9.80	11.0	12.2	13.4	14.5		
105	0.234	1.17	2.34	2.78	3.71	4.67	5.84	6.99	8.14	9.29	10.4	11.5	12.7	13.8		
110	0.223	1.11	2.23	2.65	3.55	4.45	5.55	6.65	7.74	8.83	9.90	11.0	12.0	13.1		
115	0.214	1.07	2.13	2.52	3.39	4.25	5.30	6.34	7.38	8.40	9.44	10.5	11.5	12.5		
120	0.205	1.02	2.04	2.46	3.23	4.07	5.07	6.07	7.06	8.04	9.02	9.99	11.0	11.9		
125	0.197	0.954	1.96	2.32	3.12	3.90	4.86	5.81	6.76	7.70	8.64	9.56	10.5	11.4		
130	0.189	0.943	1.88	2.23	3.00	3.74	4.67	5.58	6.49	7.40	8.29	9.18	10.1	10.9		
135	0.182	0.908	1.81	2.16	2.89	3.60	4.49	5.37	6.24	7.11	7.97	8.91	9.67	10.5		
140	0.175	0.875	1.75	2.10	2.75	3.47	4.32	5.17	6.01	6.85	7.68	8.50	9.31	10.1		
145	0.169	0.845	1.69	2.00	2.68	3.35	4.17	4.99	5.80	6.61	7.41	8.22	8.98	9.76		

150	0.164	0.819	1.63	1.92	2.58	3.23	4.03	4.82	5.60	6.38	7.15	7.91	8.69	9.43
160	0.153	0.765	1.53	1.80	2.40	3.03	3.78	4.51	5.25	5.97	6.70	7.41	8.12	8.83
170	0.145	0.720	1.44	1.70	2.25	2.85	3.55	4.24	4.94	5.62	6.30	6.97	7.64	8.30
180	0.136	0.680	1.36	1.62	2.13	2.69	3.35	4.01	4.66	5.31	5.95	6.58	7.22	7.84
190	0.129	0.644	1.28	1.50	2.01	2.55	3.17	3.80	4.41	5.03	5.64	6.23	6.84	7.43
200	0.123	0.612	1.22	1.45	1.92	2.42	3.02	3.61	4.19	4.77	5.36	5.93	6.49	7.06
210	0.117	0.583	1.16	1.39	1.82	2.30	2.87	3.44	3.99	4.55	5.10	5.65	6.19	6.73
220	0.112	0.557	1.11	1.32	1.75	2.20	2.74	3.28	3.81	4.34	4.87	5.40	5.91	6.42
230	0.107	0.532	1.06	1.28	1.68	2.11	2.62	3.14	3.65	4.16	4.66	5.16	5.66	6.15
240	0.102	0.510	1.02	1.24	1.61	2.02	2.51	3.01	3.50	3.98	4.47	4.95	5.43	5.90
250	0.098	0.490	0.976	1.19	1.51	1.94	2.41	2.89	3.36	3.83	4.29	4.75	5.21	5.67
260	0.095	0.471	0.939	1.13	1.45	1.87	2.32	2.78	3.23	3.68	4.13	4.57	5.01	5.46
270	0.091	0.453	0.904	1.10	1.41	1.80	2.24	2.67	3.11	3.55	3.98	4.40	4.83	5.25
280		0.437	0.872	1.06	1.37	1.73	2.16	2.58	3.00	3.42	3.84	4.25	4.66	5.07
300		0.408	0.814	1.00	1.30	1.62	2.02	2.41	2.80	3.20	3.53	3.97	4.36	4.74

附表 2. 液态氢的 p - V - T 表^[8]

压力 (大气压)	温度 (°K)	密度 (克/升)	16	18	20	22	24	26	28	30	32
6			75.6	73.8	71.9	69.8	66.8	63.7	59.3		
10			75.8	74.3	72.6	70.4	67.8	64.8	61.4	56.2	
12			75.8	74.4	72.8	70.5	68.1	65.2	61.6	57.4	50.1
16			76.2	74.8	73.2	71.2	68.8	66.1	62.8	59.1	53.8
20			76.8	75.3	73.6	71.7	69.6	66.8	64.0	60.5	56.2
25			77.3	75.8	74.3	72.4	70.3	67.8	65.1	62.0	58.2
30			77.5	76.2	74.7	72.9	70.9	68.5	66.0	63.2	59.8
35			77.8	76.7	75.2	73.4	71.5	69.3	66.9	64.2	61.2
40			78.2	77.0	75.6	74.0	72.0	69.9	67.7	65.2	62.4
45			78.5	77.2	76.0	74.4	72.6	70.6	68.4	66.1	63.6
50			78.8	77.7	76.4	74.8	73.1	71.2	69.2	67.0	64.6
55			79.2	78.1	76.9	75.3	73.6	71.8	69.9	67.7	65.4
60			79.5	78.4	77.3	75.8	74.1	72.3	70.5	68.4	66.2

参 考 文 献

- [1] Keesom W. H. and Houthoff D. J., Diagramme Entropique de L'hydrogen, *Comm. from Phys. Lab. at Leiden*, Supplement N° 65d.
- [2] Woolley H. W., Scott R. B. and Brickwedde F. G., Compilation of Thermal Properties of Hydrogen in its Various Isotopic and Ortho-para Modifications, *J. Res. NBS.*, **41**, 379 (1948).
- [3] Johnston H. L. and White D., Pressure-Volume-Temperature Relation of Normal Hydrogen from Boiling Point to Room Temperatures at Pressures up to 200 Atmospheres, *Trans. ASME*, **72**, 785 (1950).
- [4] White D., Friedman A. S. and Johnston H. L., The Vapor Pressure of Normal Hydrogen from the Boiling Point to Critical Point, *J. A. C. S.*, **72**, 3927 (1950).
- [5] Johnston H. L., Clarke J. T., Rifkin E. B. and Kerr E. C., Heat Capacities, Latent Heats and Entropies of Pure Parahydrogen from 12.7 to 20.7 °K, *J. A. C. S.*, **72**, 3933 (1950).
- [6] Johnston H. L., Keller W. F. and Friedman A. S., The Compressibility of Liquid Normal Hydrogen from the Boiling Point to Critical Point at Pressure up to 100 Atmospheres, *J. A. C. S.*, **70**, 1482 (1954).
- [7] Smith A. L., Hallet N. C. and Johnston H. L., Heat Capacity of Liquid Parahydrogen from the Boiling Point to the Critical Point, *J. A. C. S.*, **76**, 1486 (1954).

- [8] Scott R. B., *Cryogenic Engineering*, 289 (1959).
- [9] Michels A., Degraff W., Wassenaar T. and Levelt J. M., Compressibility Isotherms of Hydrogen and Deuterium at Temperatures Between -175°C and $+150^{\circ}\text{C}$ (at density up to 960 Amagat), *Physica*, **25**, 25 (1959).
- [10] Stewart R. B., Johnston V. J., A Compilation and Correlation of the p - V - T Data of Normal Hydrogen from Saturated Liquid to 80°K , *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 5 (1959).
- [11] Beenakker J. J. M., Verekamp F. H. and Knaap H. E. P., The Second Virial Coefficient of Ortho and Para Hydrogen at Liquid Hydrogen Temperatures, *Physica*, **26**, 43 (1960).
- [12] Dean J. W., A Tabulation of the Thermodynamic Properties of Normal Hydrogen from Low Temperatures to 300°K and from 1 to 100 Atmospheres, PB 161621 (NBS-TN), 1961.
- [13] Van Itterbeek A. and Verbeke O., Measurements of the Pressure-Dependence of Liquid Normal Hydrogen, *Cryogenics*, **2**, 21 (1961).
- [14] Goodwin R. D., Diller D. E., Roder H. M. and Weber L. A., The Density of Saturated Liquid Hydrogen, *Cryogenics*, **2**, 81 (1961).
- [15] Van Itterbeek A. and Van Deal W., The Specific Heats and Compressibilities of Liquid Normal and Para-hydrogen, *Physica*, **27**, 1202 (1961).
- [16] Younglove B. A. and Diller D. E., The Specific Heats of Saturated Liquid Para-hydrogen from 15 – 32°K , *Cryogenics*, **2**, 283 (1962).
- [17] Younglove B. A. and Diller D. E., The Specific Heat at Constant Volume of Para-hydrogen at Temperatures from 15 – 90°K and Pressures to 340 Atm., *Cryogenics*, **2**, 348 (1962).
- [18] Goodwin R. D. and Diller D. E., etc., Pressure-Density-Temperature Relations of Fluid Para-hydrogen from 15 – 100°K at Pressures to 350 Atm., *J. Res. NBS*, Sec. A, **67**, 173 (1963).

統一書號：13031·201

定 价：[科七] 1.20 元

本社書號：3098·13-2