

# 金属学实验

〔日〕东北大学金属学实验委员会编

机械工业出版社

# 金 属 学 实 验

〔日〕 东北大学金属学实验委员会编

王 健 安 等 译



机 械 工 业 出 版 社

## 金属学实验

著者 东北大学金属学实验委员会

発行者 高 城 元

発行所 日刊工業新聞社

昭和53年 2 月 3 版

\* \* \*

## 金属学实验

〔日〕 东北大学金属学实验委员会编

王健安等 译

\*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行・新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092^{1/32}$ ・印张 7・字数 152 千字

1983 年 2 月北京第一版・1983 年 2 月北京第一次印刷

印数 0,001—10,600・定价 0.89 元

\*

统一书号: 15033・5043

## 前 言

东北大学工学院金属系三个学科（金属工学科、金属材料工学科、金属加工学科）按照多年的愿望已于昭和 44 年（1969 年）完全配齐。在这期间根据将三个学科的教育加以统一的方针，对教学内容重新进行了编排。因为在三年级的一年内，每周三次的全部下午时间学生都进行实验，在这段时间内应该取得最大的教学效果，为此，组成了委员会，经过长期研究后，制定了大致的实施计划，并且从四年前开始执行。因为学生是未来的继续研究者以及现实社会中广泛出现的事物的研究者，而且，对不同的学生，实验的要求亦不同，故在选择实验项目时，必须集中于必需的最低限度的实验技术以及应该体验的是非现象上，为此，付出了很大的精力。由于在这四年里有了新的试验，所以每年都有加以充实、修订的必要。修订版本承蒙日刊工业新闻社出版局的推动而加以出版。为了使本书具有适当的大小，对现在施行的实验项目进行了削减，有的部分也加以简略，但是我们认为，作为金属系学生的实验指导书还是合适的。当然，在执行的过程中，将总括了几个内容的大题目和每个题目适当配置，效果将更好。而且随着金属学的发展本书必须不断地加以修订，因此，如蒙批评，不胜感激。

昭和 48 年 2 月 （1973 年）

编辑委员长 岛田平八

## 执笔人及編輯委員

(以五十音图顺序排列)

- |        |        |       |
|--------|--------|-------|
| ○阿座上竹四 | 飯島嘉明   | 井垣謙三  |
| 井口泰孝   | ○石井不二夫 | 梅津良昭  |
| 江島辰彦   | ○及川洪   | 大出卓   |
| 大橋伸光   | 小野寺幸雄  | 菊池淳   |
| ○桑名武   | 佐久間健人  | ○佐藤有  |
| ○島田平八  | 清水紘治   | 末高洽   |
| 杉本克久   | 高橋裕男   | ○田中熙巳 |
| 千葉昂    | 千葉三正   | ○西沢泰二 |
| ○根本実   | 野田泰稔   | ○万谷志郎 |
| 藤川辰一郎  | 本間基文   | 増田良道  |
| 渡辺融    |        |       |

○編輯委員

## 译 者 的 话

本书译自日本东北大学金属学实验委员会编《金属学实验》1978年2月3版。全书介绍了有关金属材料的冶炼、组织、物理、强度、加工、化学等方面的实验共48个。本书是日本东北大学金属系三个学科（金属工学科、金属材料工学科、金属加工学科）的通用金属学实验指导书。本书内容广泛、全面，既注意了基本技能的训练，也注意了近代实验技术的训练。本书可供高等工科院校有关专业作为教学用书或教学参考用书，也可供有关工程技术人员参考。

参加本书翻译工作的有河北工学院王健安（Ⅱ、Ⅳ）、孟宪玲（前言、Ⅰ-a、Ⅲ）、曾昭义（Ⅰ-b、Ⅴ）、韩文祥（Ⅰ-c、Ⅵ）。全书由王健安校订。责任编辑是一机部教编室张蔼玲。

# VII

|        |                                                                                                       |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 重力加速度  | $g = 9.8067 \text{ m/s}^2$                                                                            |
| 标准大气压  | $1 \text{ atm} = 0.10133 \text{ MN/m}^2$<br>$= 1.0133 \text{ dyn/cm}^2$<br>$= 1.0332 \text{ kg/cm}^2$ |
| 光速     | $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$                                                                  |
| 普朗克常数  | $h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{ J-s}$<br>$= 6.6256 \times 10^{-27} \text{ erg-s}$                  |
| 电子电荷   | $e = 1.6021 \times 10^{-19} \text{ C}$<br>$= 4.8030 \times 10^{-10} \text{ esu}$                      |
| 常压下的冰点 | $T_0 = 273.15 \text{ K} \approx 0^\circ \text{C}$                                                     |

## 单位换算系数

|                      |                                                                                       |         |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 10e                  | $= \frac{1}{4\pi} \times 10^3 \text{ A/m} \ominus$                                    |         |
| 1G                   | $= 1 \times 10^{-4} \text{ Wb/m}^2 = 1 \times 10^{-4} \text{ T}$                      | (磁通密度)  |
|                      | $= 4\pi \times 10^{-4} \text{ Wb/m}^2$                                                | (磁极化强度) |
| 1dyn                 | $= 1 \times 10^{-5} \text{ N} = 1.020 \times 10^{-6} \text{ kgf}$                     |         |
| 1dyn/cm <sup>2</sup> | $= 0.1 \text{ N/m}^2 = 1.020 \times 10^{-3} \text{ kgf/mm}^2$                         |         |
| 1erg                 | $= 1 \times 10^{-7} \text{ J} = 2.390 \times 10^{-8} \text{ cal}$                     |         |
|                      | $= 0.6242 \times 10^{12} \text{ eV} = 1.019 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m}$ |         |
| 1cal/mol             | $= 4.185 \text{ J/mol}$                                                               |         |
|                      | $= 0.6946 \times 10^{-16} \text{ erg(atom}^{-1})$                                     |         |
|                      | $= 0.4343 \times 10^{-4} \text{ eV(atom}^{-1})$                                       |         |
| 1°                   | $= 0.0174533 \text{ rad}$                                                             |         |

---

⊖ 原文为AT (ampere-turn) /m——译注

# 目 录

## 前言

|                       |    |
|-----------------------|----|
| I 金属冶炼实验 .....        | 1  |
| I-a 冶炼工艺学实验 .....     | 1  |
| 1. 流体流量的测定 .....      | 1  |
| 2. 矿石真比重的测定 .....     | 4  |
| I-b 冶炼反应实验 .....      | 8  |
| 3. 反应热的测定 .....       | 8  |
| 4. 碳酸盐的分解平衡 .....     | 12 |
| 5. 金属的氧化速度 .....      | 16 |
| 6. 采用干法从矿石中提取金属 ..... | 19 |
| I-c 电化学实验 .....       | 25 |
| 7. 电极电位的测定 .....      | 25 |
| 8. 离子的迁移率 .....       | 28 |
| 9. 电解制锌 .....         | 31 |
| II 金属组织实验 .....       | 35 |
| II-a 显微镜观察 .....      | 35 |
| 10. 光学显微镜观察 .....     | 35 |
| 11. 电子显微镜观察 .....     | 41 |
| II-b X线分析 .....       | 46 |
| 12. 确定单晶体的取向 .....    | 50 |
| 13. 晶格常数的测定 .....     | 53 |
| 14. 织构的分析 .....       | 56 |
| II-c 组织分析 .....       | 60 |
| 15. 定量的组织观察 .....     | 60 |
| 16. X线微区分析 .....      | 63 |
| III 金属物理实验 .....      | 67 |

## VI

### III - a 相变的物理实验 .....67

17. 用热膨胀法研究相变 .....67

18. 用电阻法研究有序-无序转变 .....70

19. 用比热法研究时效过程 .....74

### III - b 磁性实验 .....77

20. 磁畴的观察 .....78

21. 磁化曲线的测定 .....80

22. 热磁曲线和居里温度的测定 .....84

### III - c 半导体实验 .....88

23. 半导体的霍尔电磁效应和导电率的测量 .....88

### III - d 内耗实验 .....92

24. 斯诺克峰的测定 .....92

## IV 金属强度实验 .....97

### IV - a 应力、应变的测定 .....97

25. 采用电阻应变仪测定应变的分布 .....97

26. 采用光弹性实验测定应力及应变 .....102

### IV - b 强度实验 .....111

27. 利用硬度试验研究沉淀硬化 .....111

28. 利用拉伸试验研究屈服及加工硬化 .....115

29. 利用冲击试验测定低温脆性 .....119

30. 钢的疲劳破坏 .....122

## V 金属加工实验 .....125

### V - a 溶解凝固实验 .....125

31. 金属凝固过程的观察 .....125

32. 缩孔与冒口的作用 .....129

### V - b 焊接实验 .....133

33. 焊口的组织检查 .....133

34. 焊口的缺陷检查 .....136

### V - c 粉末冶金实验 .....141

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 35. 粉末的压缩成形 .....          | 141 |
| 36. 压坯的烧结过程 .....          | 145 |
| V-d 塑性加工实验 .....           | 150 |
| 37. 锻造加工 .....             | 150 |
| 38. 板材成形加工 .....           | 154 |
| VI 金属化学实验 .....            | 159 |
| VI-a 晶体化学实验 .....          | 159 |
| 39. KCl 的精制 .....          | 159 |
| 40. KCl 单晶体的制取 .....       | 164 |
| 41. 离子晶体的着色中心 .....        | 168 |
| VI-b 表面物性实验 .....          | 171 |
| 42. 表面氧化薄膜厚度的测定 .....      | 172 |
| 43. 表面薄膜的红外线吸收光谱 .....     | 176 |
| VI-c 分析化学实验 .....          | 180 |
| 44. 用氧化还原滴定法分析钢铁中的锰 .....  | 180 |
| 45. 采用比色法分析铜合金中的铁 .....    | 183 |
| 46. 采用燃烧失重法分析钢铁中的碳 .....   | 186 |
| 47. 采用极谱分析法分析黄铜中的铜和锌 ..... | 189 |
| 48. 采用真空加热法分析钢铁中的氢 .....   | 194 |

## 基本常数

|           |                                                                                                       |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 阿伏伽德罗常数   | $N = 6.0225 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$                                                           |
| 气体常数      | $R = 8.3143 \text{J/mol-K}$<br>$= 8.3143 \times 10^7 \text{erg/mol-K}$<br>$= 1.9872 \text{cal/mol-K}$ |
| 理想气体的标准体积 | $V_0 = 0.022414 \text{m}^3/\text{mol} = 22414 \text{cm}^3/\text{mol}$                                 |
| 法拉第常数     | $F = 96487 \text{C/mol}$                                                                              |
| 玻尔兹曼常数    | $k = 1.3805 \times 10^{-23} \text{J/K}$<br>$= 1.3805 \times 10^{-16} \text{erg/K}$                    |

# I 金属冶炼实验

## I -a 冶炼工艺学实验

因为在工艺学中要分析研究冶炼反应，所以必须具备有关迁移现象（流动、传热、物质迁移）、迁移常数（粘性、导热率、扩散系数）以及物理常数（密度、表面张力）等的知识。在本节中要掌握有关密度、流动的基本知识。

### 1. 流体流量的测定

#### 目的

在冶金工业中很多工序随着流体（气体或者液体）的流动都要进行传热、物质迁移和化学反应。因此，从要求连续操作的各种装置的控制这一方面来看，流体流量的测定以及温度、压力的测量和成分的分析等，不仅在工业上，而且在科研上也是很重要的问题。

流体的计量仪器种类很多〔1〕〔2〕，其中注流孔流量计、毛细管流量计因具有构造简单、价格低廉等优点而被广泛采用。

对于在本实验中使用的实验室用小型气体注流孔流量计，要掌握其检验方法及使用方法，并研究其特点。

#### 原理

小型注流孔流量计如图

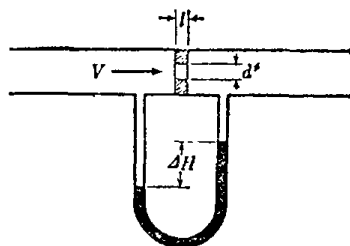


图1-1 孔板流量计

1-1 所示, 在管子中放入一个节流孔板, 使流体压头下降  $\Delta H$  (厘米·液柱), 由  $\Delta H$  可知流体的流量  $V$  ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )。

如果  $\Delta H$  可以用由于管路的缩小、扩大而引起的压头变化  $\Delta H_1$  与因为粘性阻力而产生的压头变化  $\Delta H_2$  之和来表示, 则可得式 (1-1) [1][3]。

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 = \alpha V^2 + \beta V \quad (1-1)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{450\pi^2 c^2 g d^4} \cdot \frac{\rho}{\rho_1} \\ \beta &= \frac{32l}{15\pi g d^4} \cdot \frac{\mu}{\rho_1} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

$\mu$  ——流体的粘度 ( $\text{g}/\text{cms}$ )

$\rho$  ——流体的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$\rho_1$  ——压力表中 (U形管中) 液体的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$g$  ——重力加速度  $980$  ( $\text{cm}/\text{s}^2$ )

$c$  ——流出系数 (—)

当流体为气体, 特别是在标准状态 ( $0^\circ\text{C}$ , 一个大气压) 时, 式 (1-1) 可以用式 (1-3) 的形式表示。由于式 (1-1) 的右边的第二项比右边的第一项小, 故可将  $\beta$  视为定值。

$$\Delta H_0 = \alpha_0 V_0^2 + \beta V_0 \quad (1-3)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \Delta H_0 &= \frac{P}{760} \cdot \frac{273}{T} \cdot \Delta H \\ V_0 &= \frac{P}{760} \cdot \frac{273}{T} \cdot V \\ \alpha_0 &= \frac{760}{P} \cdot \frac{T}{273} \cdot \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

由于式 (1-1) 或式 (1-3) 为所求的关系式, 从而在鉴定某种流体时, 如果已求出  $\alpha$  (或  $\alpha_0$ ) 及  $\beta$ , 则采用式 (1-2) 可以很容易地换算为其他流体。

### 实验方法

图 1-2 为实验装置的简图。首先, 气体 (氮气或者氧气)

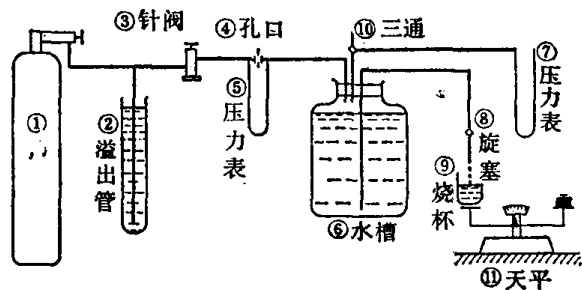


图1-2 实验装置简图

从储气瓶①进入注流孔④, 然后引入水槽⑥。气量采用针阀③进行调节。然后调节旋塞开关⑧将水放出, 使水槽⑥内的气体压力与大气压相等, 同时从压力计⑤上 (内装的液体为水) 读出压差  $\Delta H$ 。根据水流过的时间  $\theta$  (min) 和水量  $W$  (g) 求出气体流量  $V$ 。另外, 每次实验时都要测量室温  $t_1$ , 大气压  $\pi$ , 通过注流孔后的气体压力  $P$ 、温度  $t$ 、以及水温  $t_2$ 。

测量范围在  $\Delta H = 3 \sim 25\text{cm}$  进行。

### 实验结果整理

从式 (1-3) 可得式 (1-5)

$$\frac{\Delta H_0}{V_0} = \alpha V_0 + \beta \quad (1-5)$$

故  $\frac{\Delta H_0}{V_0}$  与  $V_0$  成比例。然后, 在普通方格纸上划出各点实验结果。实验进行到得到一条直线为止。采用最小二乘法等

方法计算出  $\alpha_0$  及  $\beta$ 。另外，在方格纸上表示出  $\Delta H_0$  与  $V_0$  的关系。

### 问题讨论

(i) 气体的体积随温度的变化较大。因此，气体温度  $t$  和水温  $t_2$  必须相等，这个问题的解决办法是，如果  $t \neq t_2$  时，假定以  $t$  为标准已求出气体的流量。误差的大小用一个例子表示。但是，为了简化，认为水槽内的温度为  $t_2$ ，而且其他条件不变。

(ii) 列举你认为的造成实验数据误差的其他因素，并加以说明。

(iii) 根据适用于氮气的检验式，求出适用于  $\text{CO}_2$ 、混合气体（氮气 50%，二氧化碳 50%）以及水的检验式。

### 参 考 文 献

- 1) 八田，前田：化学工学概論，共立出版（1966）
- 2) 流量，化学工学協会：化学工学便覧，改訂3版（1968），344
- 3) 八田ら：工業化学雑誌，39，841，845（1936）

## 2. 矿石真比重的测定

### 目的

矿石的真比重是矿石的各种物理常数中最重要的常数之一，不仅是计算矿石的气孔率等所必需的数据，而且在鉴定矿石的质量上也具有重要意义。例如，表2-1及表2-2中所列即为典型的铁矿石及球团矿的真比重的数值<sup>[1]</sup>，矿石的种类及组成不同，这些数值也不同。因此，在我国已根据工业标准规定了各类矿石（矿石、烧结矿以及团球矿）真比重

的测量方法（比重瓶法以及空气比较式比重计法）。

表2-1 典型的铁矿石的真比重

| 种 类 | 化 学 式                                               | 组 成  |                                        | 结 晶   | 真 比 重   |
|-----|-----------------------------------------------------|------|----------------------------------------|-------|---------|
|     |                                                     | Fe   | H <sub>2</sub> O<br>(CO <sub>2</sub> ) |       |         |
| 磁铁矿 | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>                      | 72.4 | —                                      | 等轴晶系  | 4.9~5.2 |
| 赤铁矿 | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                      | 70.0 | —                                      | 六方晶系  | 4.5~5.3 |
| 褐铁矿 | 2Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 3H <sub>2</sub> O | 59.9 | (H <sub>2</sub> O)<br>14.4             | 非 晶 体 | 3.6~4.0 |
| 菱铁矿 | FeCO <sub>3</sub>                                   | 48.3 | (CO <sub>2</sub> )<br>37.9             | 六方晶系  | 3.7~3.9 |

表2-2 团球矿的真比重及组成

| 商 标     | 真比重  | 组 成 分 析 值 (%) |      |                                |                  |                                |      |       |
|---------|------|---------------|------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|
|         |      | T·Fe          | FeO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | P     |
| マルコナ A  | 5.21 | 66.27         | 0.22 | 93.77                          | 1.50             | 0.19                           | 0.26 | 0.027 |
| マルコナ S  | 5.0  | 66.91         | 5.38 | 88.57                          | 0.97             | 0.26                           | 微量   | 0.084 |
| 精 选     | 4.91 | 61.78         | 0.35 | 86.86                          | 9.00             | 0.31                           | 0.25 | 0.036 |
| C. C. I | 4.71 | 62.90         | 0.36 | 89.44                          | 7.98             | 0.68                           | 0.09 | 0.032 |

其中比重瓶法由于具有价格便宜，使用试样的数量少，测量精度高等优点，因此，对于普通的固体铁矿石，使用非常广泛〔3〕。

在本实验中，要学习掌握用比重瓶法测量各类铁矿石的真比重的方法（按照大致的工业标准〔2〕），以マルコナ 球团矿 A 的真比重的测量作为一个例子。

### 原理

一般，比重是以物质的质量和同体积的 4℃ 的纯水的质量之比来定义，现在用相同条件下测出的两者的重量比来表示。

但是，在固体条件下，根据物质的聚集状态，分为真比重、表观比重等各种比重，本实验所求的真比重是除去在试样中含有的液体和气体以外的部分的比重，通常是在细粉末状态下测量的。

现在，如假设试样在空气中的重量为  $M_1(g)$ ，在  $t^\circ\text{C}$  的液体（比重为  $\rho_t$ ）中的试样重量为  $M_2(g)$ ，和试样同体积的液体（ $t^\circ\text{C}$ ）的重量为  $(M_1 - M_2)(g)$ ，按照定义，试样的比重  $d$  可用下式表示。

$$d = \frac{M_1}{(M_1 - M_2)} (\rho_t) \quad (2-1)$$

## 实验

### （1）试样

首先，将マルコナ团球矿 A 在乳钵内研碎，用标准筛制成  $44\mu\text{m}$  (325 目) 以下的细粉。然后在干燥器 ( $105 \pm 5^\circ\text{C}$ ) 内将细粉烘干 2 小时以上，再将其放在真空干燥器里冷却至室温。再有，每次测量比重约需试样 20g。

### （2）使用的液体

采用在低压下 (15~20mm 汞柱) 能保持 20 分钟以上的二甲苯（特级）以及除去了所溶气体的蒸馏水。

### （3）比重瓶

采用容积为 50ml 的比重瓶。比重瓶预先用铬酸混合溶液按常法洗净，然后放于真空干燥器中。

### （4）操作

顺序如下：

(a) 称出比重瓶的干燥重量 ( $W_1$ )。 (b) 称出放入试样后的比重瓶的重量 ( $W_2$ )。 (c) 往放有试样的比重瓶内倒入约 20ml 的二甲苯，轻轻地摇动比重瓶以除去气泡。

然后,放入真空干燥器内,在低压下(15~20mm 汞柱)脱气约 30 分钟。(d)将比重瓶由真空干燥器中取出,再在装满二甲苯的恒温水槽( $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$ )中浸泡一个小时。(e)二甲苯的表面与比重瓶的标线重合后,将比重瓶由水槽中取出,将其外面很好地擦净,放置到室温。然后,称出其重量( $W_3$ )。(f)由比重瓶中取出试样,将比重瓶洗净干燥后,装满二甲苯再进行与上述(d)、(e)相同的操作,求出其重量( $W_4$ )。(g)用蒸馏水进行上述的(f)操作。求出其重量( $W_5$ )。

### (5) 真比重的计算

采用由(2-1)式导出的下式,计算到小数点以下三位数。

$$d = \frac{W_2 - W_1}{(W_2 - W_1) - (W_3 - W_4)} \times \frac{W_4 - W_1}{W_5 - W_1} \times \rho_w \quad (2-2)$$

此处 $\rho_w$ 为  $30^\circ\text{C}$  蒸馏水的比重( $= 0.9746$ )。

## 实验结果的整理

### (1) 测量次数

一般测量两次。测量值和算术平均值的差小于 0.01 时,可以采用平均值作为比重。如果差值大于 0.01,再重新测量两次,采用前后四次测量值的算术平均值作为比重。

### (2) 测量结果

按上述(1)求出的平均值,四舍五入取小数点后两位<sup>[4]</sup>。

## 问题讨论

(i) 说明密度、比重以及比重量(单位体积重量)的差别。

(ii) 叙述并讨论固体的各种比重的表示方法。