

## 《天工开物》化学史料述评

陈亦人

(台州学院 教育学院, 浙江 临海 317000)

**摘 要:**明代宋应星的《天工开物》一书蕴涵着丰富的化学史料,从化学物质及其性质、化学反应和重要化学工艺等角度对该书的史料作出评述。

**关键词:**《天工开物》;化学史料;述评

**中图分类号:**06-09    **文献标识码:**A    **文章编号:**1672-3708(2003)03-0080-05

### 1 《天工开物》蕴涵着丰富的化学史料

1637年(明崇祯19年)宋应星的《天工开物》一书刻板刊行,三百多年来各种版本广为流传,蜚声国内外。《天工开物》全面系统地总结了明代农业和手工业领域内的生产技术,是我国乃至世界科学技术史上一部极有价值的科技著作。虽然它不是一本化学专著,但如果从化学的角度去审视这部百科全书式的古籍,不难发现,书中蕴涵的化学史料极为丰富。全书共18卷,与化学关系比较密切就有12卷,涉及冶金化学、染色化学、酿造化学、炼丹化学、陶瓷化学等方面,它们是:

第2卷《乃粒》:记述农作物生产种植情况涉及土壤改良。

第3卷《彰施》:记述从植物提取染料,颜色配制及拼色。

第5卷《作咸》:记述海盐、井盐等五种食盐的生产,提到用天然气煮井盐。

第6卷《甘嗜》:涉及甘蔗制糖过程的脱色、结晶。

第7卷《陶埴》:介绍陶瓷烧制。

第8卷《冶铸》:记述钟鼎、钱币铸造等工艺。

第10卷《锤锻》:记述铁、铜及其合金的冶炼,金属的冷、热处理。

第11卷《燔石》:记述石灰、煤炭、矾、硫磺等矿物的开采。

第14卷《五金》:记述金、银、铜、铁、锡、铅、锌等金属的开采和冶炼以及合金、分金等技术。首次记述了金属锌的冶炼技术。

第15卷《佳兵》:记述硝石的生产及火药的配制。

第16卷《丹青》:记述墨和朱红的生产过程涉及银朱、水银的炼制。

第17卷《曲蘖》:涉及酒药的培制。

### 2 化学物质及其性质

全书涉及化学物质较多,除金、银、铜、铁、锡、铅、倭铅(即锌)、水银、炭、石亭脂(即硫)10种单质以外,还有大量的化合物、混和物,现将一些比较确定的化合物列于表1中。

宋应星对一些化学物质进行分类,有的分类还有些科学道理。如钢铁的分类:“凡铁分生、熟:出炉未炒则生,既炒则熟。生熟相和,炼成则钢”;煤的分类:按煤的块度和火焰将煤分为明煤、碎煤和末煤;铜合金的分类:按铜和锌不同成分配比为黄铜、低器铜和熟铜。

收稿日期:2003-03-19

作者简介:陈亦人(1951-),男,浙江临海人,副教授。

同时宋应星对化学物质的诸多性质作了比较到位和详细的描述。

延展性:如“凡金箔,每金七厘造方寸金一千片”,据算厚度只有0.14微米,还说“金性又柔,可屈折如枝柳”,突出地说明了黄金良好的延展性和古代黄金加工工艺的精湛水平。

颜色和光泽:如硫酸铜“石胆,故绿色带宝光”。

表1 《天工开物》中的化合物

化合物	主要成分	化合物	主要成分	化合物	主要成分
炉甘石	ZnCO <sub>3</sub>	朱砂、银朱	HgS	皂矾、青矾	FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O
碱水	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	霜粉	HgCl <sub>2</sub>	明矾、白矾	KAl(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 12H <sub>2</sub> O
消石	KNO <sub>3</sub>	轻粉	Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	黄矾	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 9H <sub>2</sub> O
草木灰	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	砒霜	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	红矾	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · nH <sub>2</sub> O
水晶	SiO <sub>2</sub>	砒砂	NH <sub>4</sub> Cl	胆矾、石胆	CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O
食盐	NaCl	井火	CH <sub>4</sub>	密陀僧、黄丹	PbO
石灰	CaO	磷火	PH <sub>3</sub>	硼砂	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> · 10H <sub>2</sub> O
石灰石	CaCO <sub>3</sub>	雄黄、石黄	As <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	芒硝、朴消	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10H <sub>2</sub> O
苦卤	MgCl <sub>2</sub>	雌黄	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	白粉、胡粉	2PbCO <sub>3</sub> · Pb(OH) <sub>2</sub>

比重:“凡金质至重。每铜方寸重一两者,银照依其则寸增重三钱;银方寸重一两者,金照依其则寸增重二钱;”运用比重法来说明单位体积中的物质质量,已有了密度的初步概念。

比色:在《五金·黄金》讲到黄金“其高下色,分七青、八黄、九紫、十赤,登试金石上,立见分明。”这种用试金石对黄金纯度判别的比色已有比色分析法的原理。

溶解性:“凡盐,见水即化”和消石“以其入水即消溶,故名曰消”,强调了食盐和硝酸盐的易溶性。而“凡石灰,经火焚炼为用。成质之后,入水永劫不坏。”强调了碳酸钙的难溶性。

甚至对倭铅(即金属锌)的外形与铅相似,沸点较低(907℃),易挥发(184℃就开始挥发)和活泼性等都作了较准确的描述:“此物无铜收伏,入火即成烟飞去。以其似铅而性猛,故名之曰‘倭’云。”

宋应星还比较了金、银、铁、铜、铅、锡等金属的不同活泼程度,并提到利用这种差异来分离金属。

金银分离:在提炼金银的过程中,在坩埚里先加入硼砂和铅,将金和银分开。“凡足金参和伪售者,唯银可入,余物无望焉。欲去银存金,则将其金打成薄片剪碎,每块以土泥裹涂,入坩埚中鹏砂熔化,其银即吸入土内,让金流出,以成足色。然后入铅少许,另入坩埚内,勾出土内银,亦毫厘俱在也。”鹏砂即硼砂,熔点较低,起助熔作用。金的熔点为1063℃,银的熔点为961℃,当金银合金熔化时,银先被“吸入土内”,分离出金,再用铅把银从土内勾出。即熔融提取法。

锡中去铅:“售者杂铅太多,欲取净则熔化,入醋淬八九度,铅尽化灰而去。”利用醋酸与铅反应生成醋酸铅而除去锡中的铅。

如何分离银中杂入的铅和铜,宋应星记述道:“撒硝少许,而铜、铅尽滞锅底,名曰银锈,其灰池中敲落者,名曰炉底。将锈与底同入分金炉内,填火土甑之中,其铅先化,就低溢流,而铜与粘带余银,用铁条逼就分拨,井然不紊。”

银中去铜也可采用“然铜入银内,使白色顿成红色,洪炉再鼓,则清浊浮沉立分,至于净尽云”,这是因为铜易被氧化,而银不易被氧化,通过再次熔炼,可将铜分离掉。

### 3 化学反应及现象的描述

《天工开物》中涉及的化学反应主要有:

酸碱中和反应。如在《乃粒·稻宜》中提到酸性土壤宜“骨灰蘸秧根,石灰淹苗足。”即酸性土用磷肥;石灰淹苗足即撒石灰于秧脚,利用石灰的碱性来中和土壤的酸性,是改良土壤的有效措施。在《甘嗜·造糖》中说:“每汁一石,下石灰五合于中”,指的是在酸性的甘蔗汁中,用相当于其二分之一的石灰将其中和。

化合反应。如在《丹青·朱》中记述了水银与硫生成硫化汞的反应：“凡将水银再升朱用，故名曰银朱（即硫化汞）。每水银一斤，入石亭脂（即硫磺）二斤……每升水银一斤，得朱十四两、次朱三两五钱。”再用铅和醋制取胡粉（即碱式碳酸铅）的反应。

分解反应。在《燔石·石灰》中说“凡石灰，经火焚炼为用”，即煅烧石灰石，分解产生氧化钙。在《丹青·墨》提到的蒸油去烟，由松或油分解成碳黑，用朱砂升炼得到水银和硫等都属分解反应。

置换反应。在《燔石·胆矾》中说“铁器淬于胆矾水中，即成铜色也。”胆矾水为硫酸铜溶液，将加热的铁放入硫酸铜溶液中，铁就置换出铜。用葱汁（碳）拌入黄丹（氧化铅）还原出铅是置换反应。再如在《五金·锡》中说到用醋除去锡中杂铅：“售者杂铅太多，欲取净则熔化，入醋淬八九度，铅尽化灰而去。出锡唯此道。”即用醋除杂铅，铅与醋酸生成醋酸铅的反应，也属置换反应。

此外《天工开物》中还涉及一些较复杂的反应，如络合反应、聚合反应、酶促反应等。

值得注意的是有些化学现象和化学原理也已被宋应星提到：

有关酸碱平衡移动的利用。在《彰施·诸色质料》中记述了：“象牙色，栝木煎水薄染。”“金黄色，栝木煎水染，复用麻蒿灰淋碱水漂。”即栝木中的黄木素在酸性介质中呈显淡黄色，而在碱性介质中呈显金黄色，这是因为植物染料色素一般是有机弱酸或有机弱碱，具有酸碱指示剂的性质，在不同的酸碱介质中能产生平衡的移动。古代染色工匠凭借经验进行调色，以达到染色的目的。

明矾水解后水溶液呈酸性的性质的利用。在《曲蘖·丹曲》中记述道“凡曲信，必用绝佳红酒糟为料，每糟一斗，入马蓼自然汁三升，明矾水和化。……凡饭拌信后，倾入箩内，过矾水一次……”，介绍了在红曲霉生长过程中用明矾水提供酸性介质，以抑制其他杂菌的生长繁殖。

有关物质质量守恒。宋应星在《丹青·朱》中讲到：“每升水银一斤，得朱十四两，次朱三两五钱，出数借硫质而生。”即一斤水银通过升炼得到好次各等朱砂共是十七两半，比反应物一斤（原制一斤为十六两）水银多出了一两半。宋应星解释了多出的原因的是“出数借硫质而生”。这说明宋应星对化学变化中的物质质量守恒已有一定的认识。

共存现象。在《五金·金》中宋应星记述了铜铅和铜银共存矿及其冶炼：“有与铅同体者，其煎炼炉法，傍通高低二孔，铅质先化，从上孔流出。东夷铜又有托体银矿内者，入炉炼时，银结于面，铜沉于下。”在《燔石·煤炭》中宋应星记述了天然气与煤炭共存的现象：“……然后掘挖，深之五丈许，方始得煤。初见煤端时，毒气灼人。”毒气指的是煤层上方与煤共生的天然气，其中含有剧毒的一氧化碳气体。针对这种状况，“有将巨竹凿去中节，尖锐其末，插入炭中，其毒烟从竹中透上。”当时已采用了去节大竹筒将毒气排空的技术。

注意到了合金的熔点低于组成的金属熔点。“火力已到，砂不即熔，用铅少许勾引，方始沛然流注。或有用人家炒锡剩灰勾引者。”意为在“砂”（即锡矿砂）未熔化时加入少量铅或“炒锡剩灰”，使之成为低熔点的合金，更易于熔流。

宋应星还注意运用不同的词来准确地表达一些化学操作，有的已与当今某些化学专用名词相当。如：

炙——局部微热。“凡宣红器乃烧成之后出火，另施工巧微炙而成者”。（《陶埏·白瓷》）

煅——高温下加热。“其底铺薪，发火煅红”。（《五金·倭铅》）

养——较长时间微热。“养之七日。期足启开，铅片皆生霜粉”（《五金·胡粉》）

飞——挥发或升华。“炉甘石烟洪飞损”。（《五金·铜》）

升——或称升炼，指蒸馏现象或挥发。如升炼倭铅、升炼水银、银复升朱等。

化——溶解或熔融成液态。“将洋糖煎化”（《甘嗜·造白糖》）；“铁化成水”。（《冶铸·釜》）

点加少量的药剂促使大量的物质起反应。如“熔铅成汁，下醋点之。”（《五金·黄丹》）

漉——过滤。“取入缸中，浸三个时，漉入釜中煎炼。”（《燔石·青矾》）

淬——高温金属急速浸入冷却液或溶液中。如“烧铁器淬于胆矾水中”（《燔石·胆矾》）或指淬火：“入清水淬之，名曰健钢、健铁。”（《锤锻·冶铁》）

去——分离。“售者杂铅太多,欲取净则熔化,入醋淬八、九度,铅尽化灰而去。”(《五金·锡》)  
固济——密封。“盐泥固济”。(《丹青·朱》)  
结成——重结晶。“欲去杂还纯,再入水煎炼。……倾入盆中,经宿结成白雪。”(《佳兵·消石》)

#### 4 重要化学工艺

宋应星在《天工开物》中详细记录了大量的手工业生产工艺,包括生产原料、生产设备、操作程序等,并绘制了许多插图。其中不少是涉及到冶金、染色、酿造、炼丹、陶瓷等方面的化学工艺。

##### 4.1 冶炼钢铁

《天工开物》对钢铁冶炼记载得应该说是比较丰富和详细,而且比较齐全,古代通过增碳和脱碳两种途径来冶炼钢铁的工艺书中均有记载。

脱碳冶炼法有:

搅拌法炒钢。《五金·铁》中记载:“若造熟铁,则生铁流出时,相连数尺内,低下数寸,筑一方塘,短墙抵之。其铁流入塘内,数人执柳木棍排立墙上,……众人柳棍疾搅,即时炒成熟铁”,以铁水为原料,多人用木棍疾搅铁水使之与空气充分接触,通过氧化还原反应除去铁水中过多的碳,这与近代贝塞麦采用往生铁水中吹空气法炼钢异曲同工,且比西欧早出两三百零年。需要指出的是,原书中说的“炒炼熟铁”,实质产品是钢,笔者曾专题作了论述。<sup>[3]</sup>

铸铁脱碳。《冶铸》记述了大到钟鼎小至铁钱的制造就是通过把生铁铸板经过退火降低了生铁的含碳量使之成为低碳钢。

增碳冶炼法有:

灌钢。也叫团钢,用熟铁盘绕生铁,让高温下先熔化的生铁渗入熟铁,增加碳的含量。《五金·铁》中已记载:“凡钢铁炼法,用熟铁打成薄片,如指头阔,长寸半许,已以铁片束包尖紧,生铁安置其上,又用破草覆盖其上,泥涂其底下。洪炉鼓,火力到时,生钢先化,渗淋熟铁之中,两情投合。取出加锤,再炼再锤,不一而足。俗名团钢,亦曰灌钢者是也。”

生铁淋口。将熟铁锻制成坯件,将生铁熔化后作为渗碳剂淋在坯件的刀刃部位,提高该部位的含碳量。《锤锻》中说:“熟铁锻成,熔化生铁淋口,入水淬健,则成刚劲。每锹、锄重一斤者,淋生铁三钱为率。少则不坚,多则过刚而折。”经过淬火后成为马氏体和渗碳体混合的金属结晶组织非常坚硬,又耐磨。但生铁过多又易折断,必须把握一个度的问题。如宋应星所指出的“少则不坚,多则过刚而折”。

焖钢。如果说生铁淋口是液体渗碳,那么用松木炭、泥土末和豆豉作为渗碳剂进行钢铁表面增碳,应属固体渗碳。在《锤锻·针》中就记载了在钢针的制作过程中运用此法对钢铁表面进行增碳以提高硬度:“用铁尺一根,锥成线眼……后以土末如松末火矢、豆豉三物罨盖,下用火蒸……然后开封,入水健之。”

##### 4.2 冶炼金属锌

最令人瞩目的是《天工开物》一书中关于金属锌的冶炼,因为虽然有朝廷记载的资料表明我国明代已大量使用金属锌,如明代宣德三年(1428年)用铜31680斤,用锌(倭铅)13600斤铸造大量的鼎彝,同时亦有大量的纯锌出口到国外,但有关冶炼金属锌的文字资料却只是在《天工开物》一书中见到,因此宋应星被人们称为“记述了锌的冶炼和锌铜合金的第一人”。他在《五金·倭铅》中分析了锌的化学性质,记录了锌的冶炼方法:“凡倭铅,古书本无之,乃近世所立名色。其质用炉甘石熬炼而成……每炉甘石十斤,装载入一泥罐内,封裹泥固,以渐研干,勿使火拆裂。然后,逐层用煤炭饼垫盛,起底铺薪,发火煅红,罐中炉甘石熔化成团。冷定,毁罐取出,每十耗去其二,即倭铅也。此物无铜收伏,入火即成烟飞去。以其似铅而性猛,故名之曰“倭”云。”在这段文中记述了用炉甘石作原料通过土罐高温蒸馏制取金属锌。

##### 4.3 冶炼铜及铜合金

在《燔石·胆矾》中提到湿法炼铜:“石胆,一名胆矾者,……烧铁器淬于胆矾水中,即成铜色也。”

石胆胆矾为五水硫酸铜,胆矾水即硫酸铜溶液,将加热的铁放入硫酸铜溶液中,铁就置换出铜。

在《五金·铜》中提到铜合金的原料以及冶炼:“以炉甘石或倭铅参和,转色为黄铜;矾、硝等药炼为青铜;广锡参和为响铜;倭铅和写为铸铜”。

#### 4.4 升炼汞及汞化物

朱砂红色,古代常用来绘画和写字。一种是氧化汞,一种是硫化汞。《丹青·朱》记录了水银蒸气与空气中的氧气化合制取氧化汞以及硫化汞的制取:“每水银一斤,入石亭脂(硫磺制造者)两斤。”

#### 4.5 配制颜色

《彰施》中记述了十几种颜色的拼色工艺。如:用石灰提取蓝靛,用麻杆灰淋出的碱水漂洗提取金黄色。用明矾和青矾(硫酸铁)等盐和五倍子、杨梅皮(含单宁)等有机物作为媒染剂,借助媒染剂,使色素具有各种鲜明的色彩和形成不易溶解的金属络合物,牢固地染在织物上。

#### 4.6 制食盐

采用皂角结盐法,放入卤水加速结晶:“凡煎卤未即凝结,将皂角椎碎,和粟米糠二味,卤沸之时,投入其中搅和,盐即顷刻结成。盖皂角结盐,犹石膏之结腐也。”(《作咸·海水盐》)

#### 4.7 制火药

在《佳兵·火药料》中:“凡火药,以消石、硫磺为主,草木灰为辅。消性之阴,硫性之阳,阴阳两神物相遇于无隙可容之中,其出也。”明确了配方中的草木灰指的是炭:“其佐使之灰,则青杨、枯杉、桦根、箬叶、蜀葵、毛竹根、茄秸之类,烧使存性,而其中箬叶为最燥也。”同时又说“凡消性主直,直击者消九而硫一;硫性主横,爆击者消七而硫三。”说明不同的配方的火药有不同的用途。

#### 4.8 造纸

《杀青》中记述了石灰浆处理竹穰,柴灰处理纸浆和纸浆中加入纸药水汁等三项关键性化学工艺,这些工艺原理有的一直沿用到今天。

#### 4.9 开发利用天然气

《天工开物》中有关火井的记载是我国古代天然气开发和利用的重要史料。在《作咸·井盐》一卷中记述得非常生动和详细:“西川有火井,事甚奇,其井居然冷水,决无火气,但以长竹剖开去节,合缝漆布,一头插入井底,其上曲接,以口紧对釜脐,注卤水釜中,只见火意烘烘,水即滚沸,启竹而视之,决无半点焦炎意。未见火形而用火神,世间大奇事也。”并附有“蜀省井盐图”,十分具体形象。用火井中的天然气来煮盐井中的卤水,反映了人们对自然资源的开发和综合利用,文中提到“未见火形”,也表明四川地区天然气纯度较高,因为纯甲烷燃烧时呈现的浅蓝色火焰不甚明显,不易被觉察。

#### 参考文献:

- [1]杨维增.天工开物新注研究[M].南昌:江西科学技术出版社,1987.
- [2]赵匡华,周嘉华.中国科学技术史化学卷[M].北京:科学出版社,1998.
- [3]陈亦人.天工开物搅拌法炼钢极其意义初探[A].丘亮辉.天工开物研究[C].北京:中国科学技术出版社,1988, 146~152.

## A Review of Chemistry Historical Data in *Tiangong Kaiwu*

CHEN Yi-ren

(School of Education, Taizhou University, Linhai 317000, China)

**Abstract:** Based on the chemistry historical data in *Tiangong Kaiwu*, this paper gives a systematic review of chemical properties, chemical reactions and important chemical technology.

**Key words:** *Tiangong Kaiwu*; chemistry historical data; review