

基于高考化学主观题浅议“焙烧、煅烧、烧结与灼烧”

苑凌云^{1,2} 岳文虹²

(1. 华中师范大学化学教育研究所; 2. 山西省大同市煤矿第一中学校)

新高考强调以真实情境作为测试载体、以实际问题作为测试任务,通过考查学生运用化学知识解决实际问题的能力,评价学生学科核心素养的达成水平。其中,主观题往往是由“真实情境”和“实际问题”组成的“情境化的不良结构的真实任务”,能够更加明确细致地探查出学生是否完成了对知识从知道、理解到应用、综合的迁移,能有效评价学生对于化学学科理解和化学学科方法的认知程度,实现“让学生更好、更全面地发展”的化学学科核心素养评价体系的根本追求。通过查阅近年高考化学主观题,我们发现在化工流程题以及实验探究题中多次出现了若干词意相近的名词,即焙烧、煅烧、烧结、灼烧等,它们的浅表语义都有“加热”的意思,但是在真实情境中却代表了不同的含义。并且在2019年全国I卷,26题考查“由碱式碳酸镁制备轻质氧化镁的方法”,很多学生在若干高温操作作用词中犹豫不决,绝大部分老师也不清楚其中的差别。下面本文将结合近年高考主观题辨析“焙烧、煅烧、烧结、灼烧”的具体含义,以期为中学教学提供参考。

1. 焙烧

焙烧是将矿石、精矿(精矿是选矿中分选作业的产物之一,是其中有用目标组分含量最高的部分,操作方法有放射性分选、重力法选矿、浮选等)在空气、氯气、氢气、甲烷、一氧化碳或二氧化碳等气流中不加或配加一定物料,加热至低于炉料熔点

的温度,发生氧化、还原或其他化学变化的过程。焙烧大多为后续的熔炼或浸出等主要冶炼作业做准备,因而在冶炼流程中常常作为炉料准备工序。此外,焙烧有时也可以作为金属矿物精炼的过程。焙烧过程根据反应性质可分为氧化焙烧、还原焙烧、硫酸化焙烧、挥发焙烧、氯化焙烧等,近年来高考主观题多次以上述焙烧操作创设问题情境,考查学生原料预处理反应方程式的书写和影响预处理速率的因素等问题。

1.1 氧化焙烧

氧化焙烧在焙烧操作中应用最为广泛,是指在氧化气氛中温度低于焙烧物料熔点对原料进行处理,目的是把金属元素氧化为金属氧化物,同时除去易挥发的砷、锑、硒、碲等杂质(若砷、锑、硒、碲是目标产物的核心元素,这种将矿石在空气中加热,使提取对象变为挥发性氧化物呈气态分离出来的方法叫做挥发焙烧),以便后续处理,并把矿石中的硫元素转化为二氧化硫等物质,用于工业生产硫酸或生产亚硫酸盐制备造纸厂蒸煮液等。硫铁矿、硫化铜、菱锌矿、辉钼矿(MoS_2)等矿石的预处理主要采取氧化焙烧,例如2022年全国甲卷,26题即采用了氧化焙烧处理菱锌矿。

【例1】(2022全国甲卷,26题节选)硫酸锌(ZnSO_4)是制备各种含锌材料的原料,在防腐、电镀、医学上有诸多应用。硫酸锌可由菱锌矿制备,菱锌矿的主要成分为 ZnCO_3 ,杂质为 SiO_2 以及

Ca、Mg、Fe、Cu 等的化合物。其制备流程如图 1:

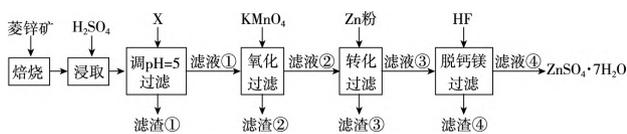


图 1

(1)菱锌矿焙烧生成氧化锌的化学方程式为

_____。

【答案】 $\text{ZnCO}_3 \xrightarrow{\text{焙烧}} \text{ZnO} + \text{CO}_2 \uparrow$

【分析】锌在现代工业中占有举足轻重的地位，大约在 10~11 世纪，我国就开始大规模生产锌，现在锌被广泛应用于钢材结构表面镀层、制备锌合金以及电池材料等。目前大多数湿法炼锌厂在操作前，都先将锌精矿在沸腾炉内通过氧化焙烧将其中的金属元素转化为金属氧化物，以便焙烧结束后湿法浸取然后进行后续处理。

湿法炼锌在进行精矿预处理时，除了氧化焙烧，还通常用到硫酸化焙烧。硫酸化焙烧是指将某些金属硫化物氧化为易溶于水的硫酸盐的焙烧过程，此时闪锌矿主要发生如下反应： $\text{ZnS} + 2\text{O}_2 \xrightarrow{\text{焙烧}} \text{ZnSO}_4$ ，此法可以直接利用精矿中的硫元素形成硫酸盐，水浸后形成水溶液以便后续湿法处理。操作中，通常控制较高的 SO_2 气氛及较低的焙烧温度，有利于生成硫酸盐；反之，则易生成氧化物，成为氧化焙烧。

此外，氧化—钠化焙烧也属于氧化焙烧的一种，是指在氧化气氛中向矿石里添加适量钠化剂（如 Na_2CO_3 、 NaCl 、 Na_2SO_4 等），焙烧后生成易溶于水的钠盐的过程。例如工业上在用湿法炼钒的过程中，常常添加钠化剂在回转炉中进行焙烧，此时三价钒会被氧化成五价的偏钒酸钠形成焙砂，溶于水后再进行进一步处理。

1.2 还原焙烧

还原焙烧是指将氧化矿预热至一定温度，然后用还原性气体（含 CO 、 H_2 、 CH_4 等）或粉煤、焦炭等还原矿物中部分或全部高价金属的过程。2019 年全国 II 卷，26 题即采取了还原焙烧工艺。

【例 2】（2019 年全国 II 卷，26 题节选）立德粉 $\text{ZnS} \cdot \text{BaSO}_4$ （也称锌钡白），是一种常用白色颜料。

(2)以重晶石（ BaSO_4 ）为原料，可按如图 2 工艺生产立德粉：



图 2

①在回转炉中重晶石被过量焦炭还原为可溶性硫化钡，该过程的化学方程式为_____。

【答案】 $\text{BaSO}_4 + 4\text{C} \xrightarrow{\text{焙烧}} \text{BaS} + 4\text{CO} \uparrow$

【分析】重晶石是制取碳酸钡、硫酸钡等钡盐的重要原料，由重晶石制取钡盐最经典的预处理方法是在碳或无烟煤的作用下于回转炉中进行还原焙烧，使重晶石中的主要成分硫酸钡转化为水溶性的硫化钡（俗称黑灰），再进一步加工为各种钡盐产品。此外，也可用氢气、甲烷、天然气等还原性气体代替煤粉进行还原焙烧，在悬浮炉中还原重晶石，该法可强化还原过程。

1.3 氯化焙烧

氯化焙烧是指借助氯化剂（可用氯气、 HCl 等气体作氯化剂，也可用 CaCl_2 、 NaCl 、 MgCl_2 、 FeCl_3 等固体作氯化剂，固体氯化剂在氯化焙烧过程中会全部或大部分转化成氯气或 HCl 等气体氯化剂再起作用）使物料中某些组分转变为气态或凝聚态的氯化物，从而与其他组分分离。通常，矿石中的金

属硫化物、氧化物等在一定条件下都可与化学活性很强的氯发生反应,生成的金属氯化物具有熔点低、易挥发、溶解性好、易被还原等特点,因此工业上往往借助氯化焙烧来有效实现金属的分离、富集、提取与精炼等目的。例如 2022 年湖南卷,17 题即采取了氯化焙烧处理钛渣制备 TiCl_4 ,以便进一步制备 Ti。

【例 3】(2022 年湖南卷,17 题节选)钛(Ti)及其合金是理想的高强度、低密度结构材料。以钛渣(主要成分为 TiO_2 ,含少量 V、Si 和 Al 的氧化物杂质)为原料,制备金属钛的工艺流程如图 3:

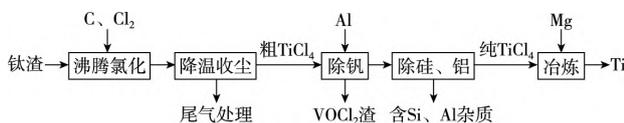


图 3

(2) TiO_2 与 $\text{C}、\text{Cl}_2$ 在 600°C 的沸腾炉中充分反应后,混合气体中各组分的分压如下:

物质	TiCl_4	CO	CO_2	Cl_2
分压/MPa	4.59×10^{-2}	1.84×10^{-2}	3.70×10^{-2}	5.98×10^{-9}

①该温度下, TiO_2 与 $\text{C}、\text{Cl}_2$ 反应的总化学方程式为_____。

【答案】 $5\text{TiO}_2 + 6\text{C} + 10\text{Cl}_2 \xrightarrow{600^\circ\text{C}} 5\text{TiCl}_4 + 2\text{CO} + 4\text{CO}_2$

【分析】氯化焙烧是处理二氧化钛的主要方法,具体操作流程是先用空气在沸腾炉中使干燥的矿粉流态化,然后加入焦炭粉,待温度升至 600°C 时,用氯气替代空气入炉,此时发生如题反应。

2. 煅烧

煅烧是指将物料在低于熔点的适当温度下加热,使其分解并除去所含结晶水、二氧化碳或二氧化硫等挥发性物质的过程,所以煅烧过程的反应物

通常是固体,生成物是另一种固体和气体。煅烧在工业上可用于制备固体(或气体)原料,如煅烧石灰石制备生石灰,同时得到副产物二氧化碳;还可以用于生产产品,如侯氏制碱法最终是通过煅烧碳酸氢钠固体制备碳酸钠等。例如 2022 年北京卷,18 题和 2016 年新课标 III 卷,28 题均采用煅烧法进行化工生产。

【例 4】(2022 年北京卷,18 题节选)白云石的主要化学成分为 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$,还含有质量分数约为 2.1% 的 Fe_2O_3 和 1.0% 的 SiO_2 。利用白云石制备高纯度的碳酸钙和氧化镁,流程示意图如图 4 所示。

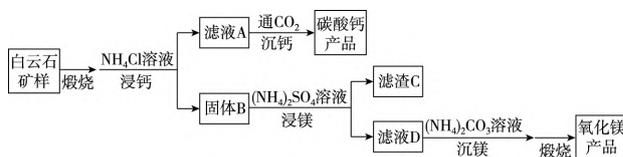


图 4

(1)白云石矿样煅烧完全分解的化学方程式为_____。

【答案】 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \xrightarrow{\text{煅烧}} \text{CaO} + \text{MgO} + 2\text{CO}_2 \uparrow$

【分析】白云石是一种碳酸盐矿物,加热至 $700\sim 900^\circ\text{C}$ 时会发生分解,生成氧化钙、氧化镁和二氧化碳,其中氧化镁和氧化钙的混合物称为苛性镁云石。本题即通过对苛性镁云石进行溶浸处理,分离钙、镁元素,再经后续处理制得目标产物碳酸钙和氧化镁。

【例 5】(2016 年新课标 III 卷,28 题节选)以硅藻土为载体的五氧化二钒(V_2O_5)是接触法生产硫酸的催化剂。从废钒催化剂中回收 V_2O_5 既避免污染环境又有利于资源综合利用。废钒催化剂的主要成分为:

物质	V ₂ O ₅	V ₂ O ₄	K ₂ SO ₄	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
质量分数/%	2.2~2.9	2.8~3.1	22~28	60~65	1~2	<1

如图 5 所示是一种废钒催化剂回收工艺路线：

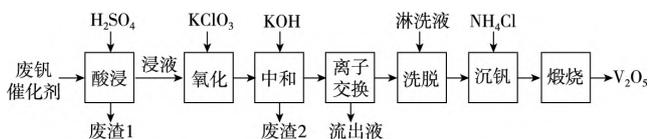


图 5

(6)“沉钒”得到偏钒酸铵(NH₄VO₃)沉淀,写出“煅烧”中发生反应的化学方程式_____。

【答案】2NH₄VO₃ $\xrightarrow{\text{煅烧}}$ V₂O₅ + H₂O↑ + 2NH₃↑

【分析】接触法制硫酸的过程中,钒催化剂由于物理失活、化学失活等原因,运行一段时间后,会发生衰老或中毒现象,进而影响生产效率,所以必须定时更换新的催化剂。弃掉的催化剂中还含有许多有经济价值的金属,可以进行回收利用。本题采用酸浸手段进行废钒催化剂的湿法回收,经过一系列转化后可从溶液中得到偏钒酸铵沉淀,经过煅烧失去 NH₃ 和 H₂O 后即可制得再生钒催化剂。

3. 烧结

烧结是指把粉状物料转变为致密体的过程,是粉末冶金、陶瓷、耐火材料、超高温材料等工业生产的重要工序。通常在固相化学矿物中配加其他氧化剂或还原剂,并添加助熔剂,在高于炉料熔点的适当温度下发生化学反应并促使其结块。例如 2017 年新课标 III 卷,27 题即采取烧结措施进行了原料的预处理。

【例 6】(2017 年新课标 III 卷,27 题节选)重铬酸钾是一种重要的化工原料,一般由铬铁矿制备,铬铁矿的主要成分为 FeO·Cr₂O₃,还含有硅、铝等杂质。制备流程如图 6 所示:

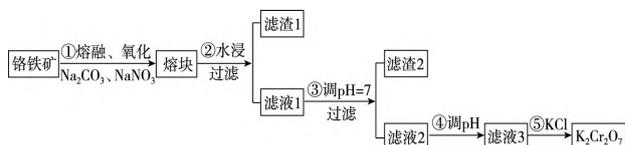


图 6

(1) 步骤①的主要反应为: FeO·Cr₂O₃ + Na₂CO₃ + NaNO₃ $\xrightarrow{\text{高温}}$ Na₂CrO₄ + Fe₂O₃ + CO₂↑ + NaNO₂, 反应配平后 FeO·Cr₂O₃ 与 NaNO₃ 的系数比为_____。

【答案】2 : 7

【分析】铬铁矿指的是自然界里的铬与铁共生形成的铬铁尖晶石(FeO·Cr₂O₃),我国铬铁矿资源中粉矿约占 80%,且品位(指矿石中有用成分或有用矿物的含量)较高。但是粉矿在冶炼过程中会导致炉料透气性差、炉况翻渣等问题,严重影响各项技术经济指标,所以冶炼前需将铬铁矿造块。氧化、钠盐化烧结是铬铁矿造块的主要工业方法。铬铁尖晶石的熔点很高,加入钠盐可以显著降低其熔点,便于熔融结块。且在有钠盐存在的条件下,稳定的铬铁矿极易被氧化,有助于转化为易溶于水的铬酸钠熔块,烧结后的铬铁矿具有强度高、粒度均匀、高温电阻率大等优势,可以有效节约能源、改善炉料透气性等。

4. 灼烧

将固体物质加热到高温以达到脱水、分解或除去挥发性杂质、有机物和铵盐等目的的操作称为灼烧。灼烧通常指的是实验室里对固体进行的高温操作,加热仪器有酒精灯、煤气灯或电炉等,如海带提碘实验中通过灼烧除去有机物,大学实验室里还常用到电加热套、管式炉和马弗炉等。2018 年 4 月浙江卷,27 题即通过灼烧来确定化合物组成。

【例 7】(2018 年 4 月浙江卷, 27 题节选) 某同学用含结晶水的正盐 X(四种短周期元素组成的纯净物)进行了如下实验, 如图 7 所示:

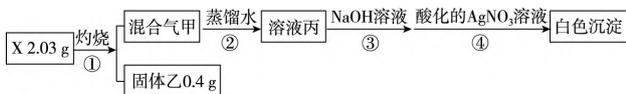


图 7

实验中观测到:混合气甲呈无色并被蒸馏水全部吸收;固体乙为纯净物;在步骤③中,取 $\frac{1}{10}$ 溶液丙,恰好中和需消耗 0.002 00 mol NaOH;另取一定量的溶液丙,加入少量 K_2FeO_4 固体,产生黄绿色气体。

(1)X 的化学式是 _____, 步骤①的化学方程式是 _____。

【答案】 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ $MgCl_2 \cdot 6H_2O \xrightarrow{\text{灼烧}} MgO + 2HCl \uparrow + 5H_2O \uparrow$

2019 年全国 I 卷, 27 题采用热重分析法测定固体中的结晶水含量, 热重分析法是在控制一定温度的条件下测量物质质量与温度间关系的方法, 其本质也是对化合物进行灼烧使其分解。

【例 8】(2019 年全国 I 卷, 27 题节选) 硫酸铁铵 $[NH_4Fe(SO_4)_2 \cdot xH_2O]$ 是一种重要铁盐。为充分利用资源, 变废为宝, 在实验室中探究用废铁屑来制备硫酸铁铵:

(5)采用热重分析法测定硫酸铁铵晶体样品所含结晶水数, 将样品加热到 $150^\circ C$ 时失掉 1.5 个结晶水, 失重 5.6%。硫酸铁铵晶体的化学式为 _____。

【答案】 $NH_4Fe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$

5. 结语

通过上文举例论述, “焙烧、煅烧、烧结、灼烧”

虽均有加热的含义, 用法却并不相同。其中“焙烧、煅烧、烧结”指的是工业生产中的操作, “灼烧”指的是实验室里加热固体除去试样中有机物、铵盐或其他挥发性组分的过程。“焙烧、煅烧、烧结”用法又有所区别, 烧结是物料在熔融状态下的化学转化, 目的是将物料结块, 便于后续操作; 焙烧和煅烧是在低于炉料熔点的高温下进行炉料处理的过程, 其中焙烧指的是原料与空气、氯气、氢气等气体或添加剂发生化学反应, 而煅烧仅是通过高温使物质发生分解, 是一种固体生成另一种固体和若干种气体的过程。

因此, 我们谈回文首提到的高考题:

(2019 年全国 I 卷, 26 题节选) 硼酸 (H_3BO_3) 是一种重要的化工原料, 广泛应用于玻璃、医药、肥料等工业。一种以硼镁矿 (含 $Mg_2B_2O_5 \cdot H_2O$ 、 SiO_2 及少量 Fe_2O_3 、 Al_2O_3) 为原料生产硼酸及轻质氧化镁的工艺流程如图 8 所示:

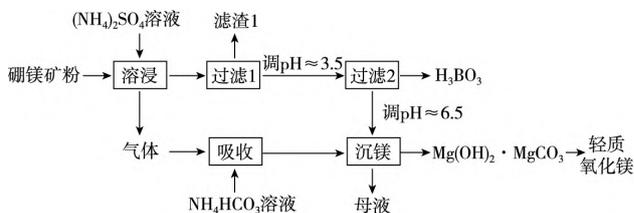


图 8

(4)由碱式碳酸镁制备轻质氧化镁的方法是 _____。

【分析】本题中, 由碱式碳酸镁制备轻质氧化镁的化学方程式为: $Mg(OH)_2 \cdot MgCO_3 \xrightarrow{\text{高温}} 2MgO + H_2O \uparrow + CO_2 \uparrow$, 是一种固体经过高温分解生成其他固体和气体的过程, 所以我们认为此空答“高温煅烧”更为合理。■