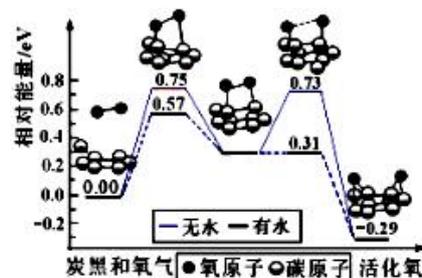


1. 炭黑是雾霾中的重要颗粒物，研究发现它可以活化氧分子，生成活化氧，活化过程的能量变化模拟计算结果如图所示，活化氧可以快速氧化二氧化硫。下列说法错误的是()

- A. 氧分子的活化包括 O—O 键的断裂与 C—O 键的生成
- B. 每活化一个氧分子放出 0.29eV 的能量
- C. 水可使氧分子活化反应的活化能降低 0.42eV
- D. 炭黑颗粒是大气中二氧化硫转化为三氧化硫的催化剂



【答案】C

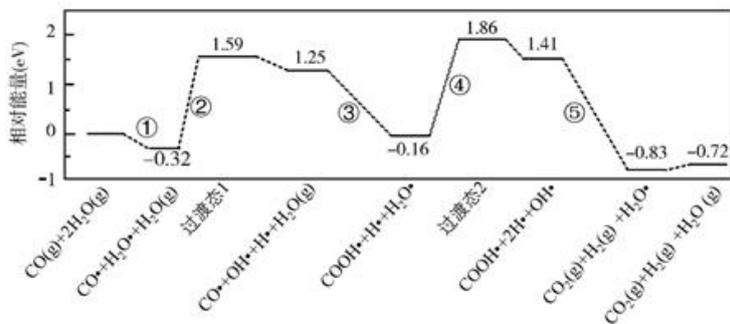
【解析】A 项，由图可知，氧分子的活化是 O—O 键的断裂与 C—O 键的生成过程，正确；

B 项，由图可知，反应物的总能量高于生成物的总能量，因此每活化一个氧分子放出 0.29eV 的能量，正确；

C 项，由图可知，水可使氧分子活化反应的活化能降低 0.18eV，错误；

D 项，活化氧可以快速氧化二氧化硫，而炭黑颗粒可以活化氧分子，因此炭黑颗粒可以看作大气中二氧化硫转化为三氧化硫的催化剂，正确。

2. 水煤气变换反应为： $\text{CO}(\text{g})+\text{H}_2\text{O}(\text{g})=\text{CO}_2(\text{g})+\text{H}_2(\text{g})$ 。我国学者结合实验与计算机模拟结果，研究了在金催化剂表面上水煤气变换的反应历程，如图所示，其中吸附在金催化剂表面上的物种用 ● 标注。下列说法正确的是 ()



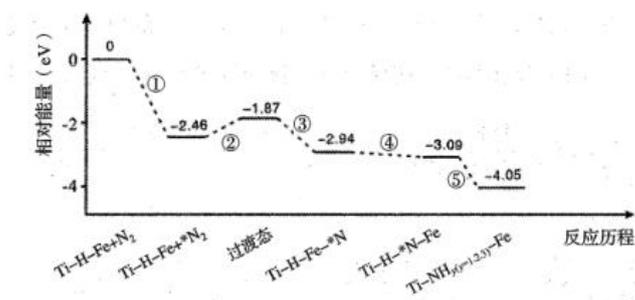
- A. 水煤气变换反应的 $\Delta H > 0$
- B. 步骤③的化学方程式为： $\text{CO}\bullet + \text{OH}\bullet + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) = \text{COOH}\bullet + \text{H}_2\text{O}\bullet$
- C. 步骤⑤只有非极性键 H-H 键形成
- D. 该历程中最大能垒（活化能） $E_{\text{正}} = 1.70\text{eV}$

【答案】B

【解析】A 项，图象分析可知水煤气的生成过程经过了过渡态 1 和过渡态 2，最后生成产物的能量低于反应物，反应的焓变 ΔH 小于 0，错误；B 项，结合此图分析判断，③是发生的过渡反应： $\text{CO}\bullet + \text{OH}\bullet + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) = \text{COOH}\bullet + \text{H}_2\text{O}\bullet$ ，正确；C 项，步骤⑤中 H-O 键原反应物中已经存在，则形成的化学键包括极性键 C=O，非极性键 H-H 键形成，错误；D 项，该历程中最大能垒(活化能) $E_{\text{正}} = 1.86\text{eV} - (-0.16\text{eV}) = 2.02\text{eV}$ ，错误。

3. 热催化合成氨面临的两难问题是：采用高温增大反应速率的同时会因平衡限制导致 NH_3 产率降低。我国科研

人员研制了 Ti-H-Fe 双温区催化剂(Ti-H 区域和 Fe 区域的温度差可超过 100°C)。Ti-H-Fe 双温区催化合成氨的反应历程如图所示，其中吸附在催化剂表面上的物种用*标注。下列说法正确的是 ()



- A. ①为氮氮三键的断裂过程
- B. ①②③在低温区发生，④⑤在高温区发生
- C. ④为 N 原子由 Fe 区域向 Ti-H 区域的传递过程
- D. 使用 Ti-H-Fe 双温区催化剂使合成氨反应转变为吸热反应

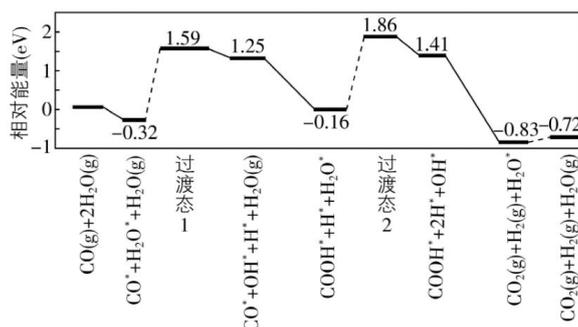
【答案】 C

【解析】 A 项，根据图示，①为氮分子的吸附在催化剂表面的过程，氮氮三键没有断裂，错误；B 项，①②③在高温区发生，提高反应速率，④⑤在低温区发生，促进平衡正向移动，错误；C 项，根据图示④为



，N 原子由 Fe 区域向 Ti-H 区域的传递，正确；D 项，反应的焓变只与反应体系的始态和终态有关，与催化剂无关，错误。

4. 我国学者结合实验与计算机模拟结果，研究了在金催化剂表面上水煤气变换[CO(g)+H₂O(g)=CO₂(g)+H₂(g)]的反应历程，如图所示，其中吸附在金催化剂表面上的物种用*标注。

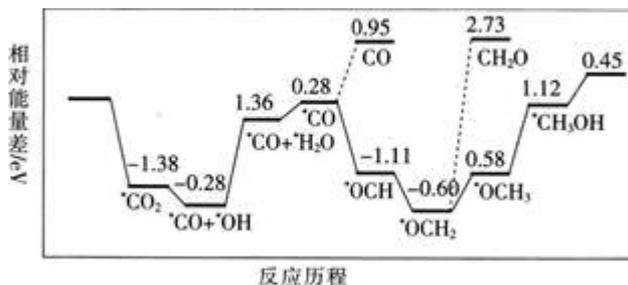


可知水煤气变换的 ΔH _____ 0 (填“大于”“等于”或“小于”)，该历程中最大能垒(活化能) $E_{正}$ = _____ eV，写出该步骤的化学方程式 _____。

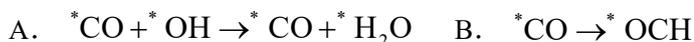
【答案】 小于 2.02 $\text{COOH}^* + \text{H}^* + \text{H}_2\text{O}^* = \text{COOH}^* + 2\text{H}^* + \text{OH}^*$ (或 $\text{H}_2\text{O}^* = \text{H}^* + \text{OH}^*$)

【解析】 根据图示，CO(g)和 H₂O(g)的能量大于 CO₂(g)和 H₂(g)，所以水煤气变换的 ΔH 小于 0；根据图示，正反应活化能的最大值为 1.86-(-0.16)=2.02 eV；该历程为 COOH*+H*+H₂O*生成 COOH*+2H*+OH*，反应方程式是 $\text{COOH}^* + \text{H}^* + \text{H}_2\text{O}^* = \text{COOH}^* + 2\text{H}^* + \text{OH}^*$ 。

5. CO_2 与 H_2 合成甲醇: $\text{CO}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2(\text{g}) \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$. 最近采用真空封管法制备磷化硼纳米颗粒, 在发展非金属催化剂实现 CO_2 电催化还原制备甲醇方向取得重要进展, 该反应历程如图所示.



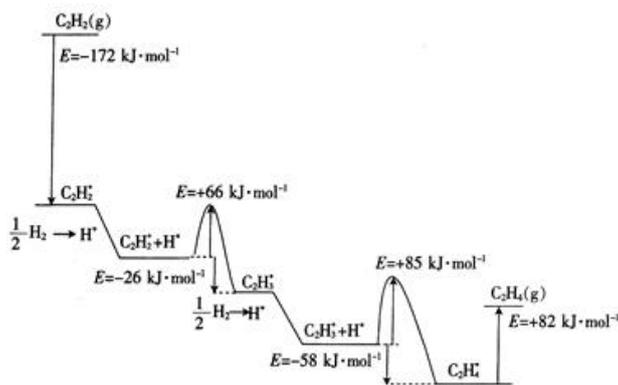
容易得到的副产物有 CO 和 CH_2O , 其中相对较多的副产物为 _____; 上述合成甲醇的反应速率较慢, 要使反应速率加快, 主要降低下列变化中 _____ (填字母) 的能量变化.



【答案】 CO A

【解析】 由图可知生成副产物 CH_2O 的能量变化大, 即能垒高, 反应进行难, 生成的量少, 所以其中相对较多的副产物为 CO ; 由图可知生成甲醇的过程中, 能垒最高的变化为 $^*\text{CO} + ^*\text{OH} \rightarrow ^*\text{CO} + ^*\text{H}_2\text{O}$, 该反应速率最慢, 所以要想提高整个反应速率, 应该降低该反应的能垒, 故选 A.

6. 2010 年 Sheth 等得出乙炔在 Pd 表面选择加氢的反应机理 (如图). 其中吸附在 Pd 表面上的物种用 * 标注.



上述吸附反应为 _____ (填“放热”或“吸热”) 反应, 该历程中最大能垒 (活化能) 为 _____ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, 该步骤的化学方程式为 _____。

【答案】 放热 +85 $\text{C}_2\text{H}_3^* + \text{H}^* \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4^*$

【解析】 由图可知, 吸附时能量降低, 解吸时能量升高, 如 $\text{C}_2\text{H}_4^* \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4$ $\Delta H = +82 \text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, 基元反应中, $\text{C}_2\text{H}_3^* + \text{H}^* \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4^*$ 的活化能最大, 为 $+85 \text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.

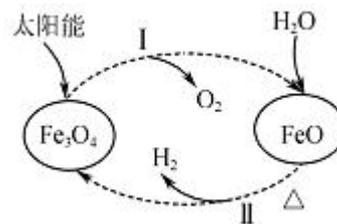
1. 关于下列转化过程分析不正确的是()

A. Fe_3O_4 中 Fe 元素的化合价为+2、+3

B. 过程I中每消耗 58 g Fe_3O_4 转移 1 mol 电子

C. 过程II的化学方程式为 $3\text{FeO} + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\Delta} \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2\uparrow$

D. 该过程总反应为 $2\text{H}_2\text{O} = \text{O}_2\uparrow + 2\text{H}_2\uparrow$



【答案】B

【解析】A. Fe_3O_4 的化学式可以改写为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$, 则 Fe_3O_4 中 Fe 元素的化合价为+2、+3, 故 A 正确;

B. 过程I: $2\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) = 6\text{FeO}(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g})$ 当有 2mol Fe_3O_4 分解时, 生成 1mol 氧气, 而 58 g Fe_3O_4 的物质的量为 0.25mol, 故生成 0.125mol 氧气, 而氧元素由 -2 价变为 0 价, 故转移 0.5mol 电子, 故 B 错误;

C. 过程II中 FeO 与水反应生成四氧化三铁和氢气, 反应化学方程式为 $3\text{FeO} + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\Delta} \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2\uparrow$, 故 C 正确;

D. 过程I: $2\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) = 6\text{FeO}(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g})$ 过程II: $3\text{FeO}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) = \text{H}_2(\text{g}) + \text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s})$ 。则该过程总反应为 $2\text{H}_2\text{O} = \text{O}_2\uparrow + 2\text{H}_2\uparrow$, 故 D 正确。

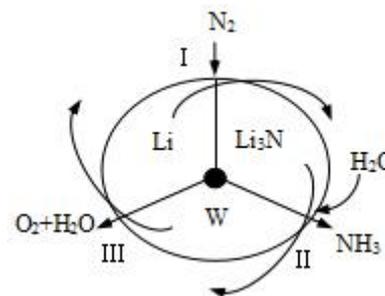
2. 科学工作者研发了一种 SUNCAT 的系统, 借助锂循环可持续合成氨, 其原理如下图所示。下列说法不正确的是()

A. 过程I得到的 Li_3N 中 N 元素为-3 价

B. 过程II生成 W 的反应为 $\text{Li}_3\text{N} + 3\text{H}_2\text{O} = 3\text{LiOH} + \text{NH}_3\uparrow$

C. 过程III中能量的转化形式为化学能转化为电能

D. 过程III涉及的反应为 $4\text{OH}^- - 4\text{e}^- = \text{O}_2\uparrow + 2\text{H}_2\text{O}$



【答案】C

【解析】A. Li_3N 中锂元素的化合价为+1 价, 根据化合物中各元素的代数和为 0 可知, N 元素的化合价为-3 价,

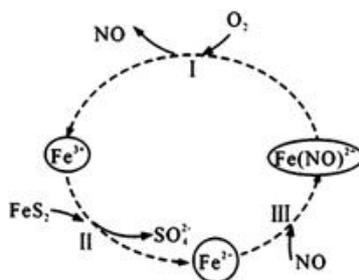
A 项正确;

B. 由原理图可知, Li_3N 与水反应生成氨气和 W, 元素的化合价都无变化, W 为 LiOH , 反应方程式: $\text{Li}_3\text{N} + 3\text{H}_2\text{O} = 3\text{LiOH} + \text{NH}_3\uparrow$, B 项正确;

C. 由原理图可知, 过程III为电解氢氧化锂生成锂单质、氧气和水, 电能转化为化学能, C 项错误;

D. 过程III电解 LiOH 产生 O_2 , 阳极反应为 $4\text{OH}^- - 4\text{e}^- = \text{O}_2\uparrow + 2\text{H}_2\text{O}$, D 项正确。

3. 在酸性条件下, 黄铁矿(FeS_2)催化氧化的反应方程式为 $2\text{FeS}_2 + 7\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$, 实现该反应的物质间转化如图所示。下列分析错误的是()



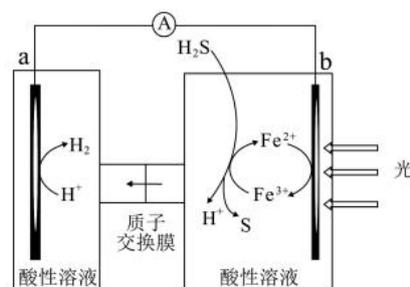
- A. 反应 I 的离子方程式为 $4\text{Fe}(\text{NO})^{2+} + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ = 4\text{Fe}^{3+} + 4\text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$
- B. 反应 II 的氧化剂是 Fe^{3+}
- C. 反应 III 是氧化还原反应
- D. 黄铁矿催化氧化中 NO 作催化剂

【答案】C

【解析】A. 根据图示，反应 I 的反应物为 $\text{Fe}(\text{NO})^{2+}$ 和 O_2 ，生成物是 Fe^{3+} 和 NO，结合总反应方程式，反应的离子方程式为 $4\text{Fe}(\text{NO})^{2+} + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ = 4\text{Fe}^{3+} + 4\text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$ ，故 A 正确；B. 根据图示，反应 II 的反应物是 Fe^{3+} 和 FeS_2 ，生成物是 Fe^{2+} 和 SO_4^{2-} ，反应中铁元素的化合价降低，氧化剂是 Fe^{3+} ，故 B 正确；C. 根据图示，反应 III 的反应物是 Fe^{2+} 和 NO，生成物是 $\text{Fe}(\text{NO})^{2+}$ ，没有元素的化合价发生变化，不是氧化还原反应，故 C 错误；D. 根据 $2\text{FeS}_2 + 7\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$ ，反应过程中 NO 参与反应，最后还变成 NO，NO 作催化剂，故 D 正确；

4. 科研人员借助太阳能，将 H_2S 转化为可再利用的 S 和 H_2 的工作原理如图所示。下列叙述错误的是 ()

- A. 该电池能实现将光能转化为化学能
- B. a 电极的电极反应： $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2 \uparrow$
- C. 光照后，b 电极的电极反应： $\text{H}_2\text{S} - 2\text{e}^- = 2\text{H}^+ + \text{S}$
- D. a 电极区溶液的 pH 不变

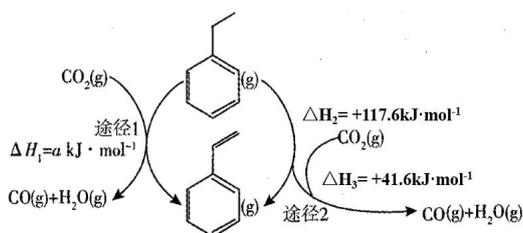


【答案】C

【解析】

- A 项，该电池通过光照发生化学反应，形成原电池，将光能转化为化学能，正确；
- B 项，根据图示，在 a 电极上 H^+ 获得电子变成氢气，a 电极的电极反应为 $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2 \uparrow$ ，正确；
- C 项，根据图示，光照后，b 电极上， Fe^{2+} 失去电子，电极反应为 $\text{Fe}^{2+} - \text{e}^- = \text{Fe}^{3+}$ ，错误；
- D 项，电池工作时，a 极区消耗的 H^+ 的物质的量与通过离子交换膜进入 a 极区的 H^+ 相等，因此 a 极区溶液的 pH 不变，正确。

5. O_2 气氛下乙苯催化脱氢可同时存在以图 2 两种途径：



① a = _____。

② 途径 I 的反应历程如图 3 所示，下列说法正确的是_____。

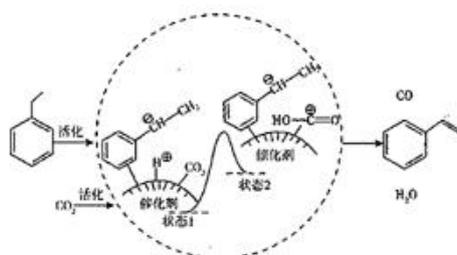
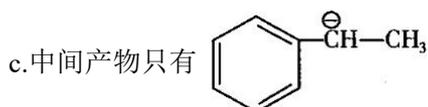


图 3

a. CO₂ 为氧化剂

b. 状态 1 到状态 2 形成了 O-H 键



d. 该催化剂可提高乙苯的平衡转化率

【答案】 159.2 a、b

【解析】 ① 反应过程中能量变化与反应途径无关，只与物质的始态和终态有关，根据图示可知反应热 $\Delta H = 117.6 \text{ kJ/mol} + 41.6 \text{ kJ/mol} = +159.2 \text{ kJ/mol}$ 。

② a. CO₂ 与乙苯反应后变为 CO，C 元素化合价降低，C 获得电子，因此 CO₂ 为氧化剂，a 正确；

b. 根据图示可知由状态 1 到状态 2 形成了 O-H 键，b 正确；

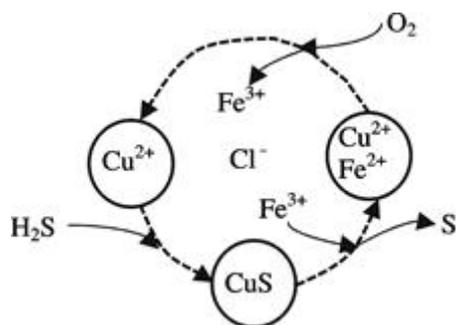
c. 由反应历程可知中间产物除了 ，还有 $\text{HO}-\overset{\ominus}{\text{C}}=\text{O}$ ，c 错误；

d. 催化剂对化学平衡移动无影响，因此不能改变乙苯的转化率，d 错误。

6. 将 H₂S 和空气的混合气体通入 FeCl₃、FeCl₂、CuCl₂ 的混合溶液中反应回收 S，其物质转化如下图所示。

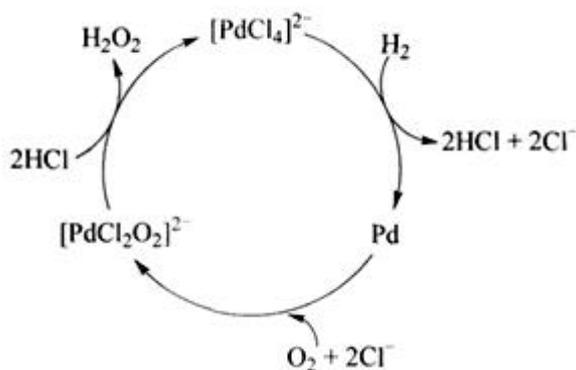
① 在图示的转化中，化合价不变的元素是_____。

② 在温度一定和不补加溶液的条件下，缓慢通入混合气体，并充分搅拌。欲使生成的硫单质中不含 CuS，可采取的措施有_____。



【答案】 Cu 、 Cl 、 H 增加氧气的通入量或增加起始时 $c(\text{Fe}^{3+})$

7. 用 H_2 制备 H_2O_2 的一种工艺简单、能耗低的方法，反应原理如下图所示。总反应的化学方程式为_____。



【答案】 $\text{H}_2 + \text{O}_2 \xrightarrow{[\text{PdCl}_4]^{2-}} \text{H}_2\text{O}_2$

8. 光催化降解过程中形成的羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$) 和超氧离子 ($\cdot\text{O}_2^-$) 具有光催化能力，催化原理如图 2 所示。请写出 NO_3^- 转化为无毒物质的电极反应式：_____。

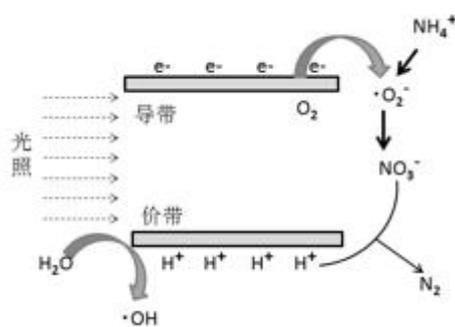


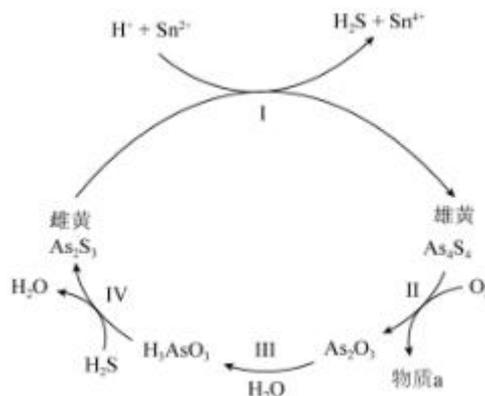
图 2

【答案】(1) $2\text{NO}_3^- + 12\text{H}^+ + 6\text{e}^- = \text{N}_2\uparrow + 6\text{H}_2\text{O}$

【解析】

(1) 从图中可以看出， NO_3^- 在 H^+ 存在的环境中得电子，生成 N_2 等，电极反应式为 $2\text{NO}_3^- + 12\text{H}^+ + 6\text{e}^- = \text{N}_2\uparrow + 6\text{H}_2\text{O}$ 。答案为： $2\text{NO}_3^- + 12\text{H}^+ + 6\text{e}^- = \text{N}_2\uparrow + 6\text{H}_2\text{O}$ ；

9. 砷元素有+2、+3两种常见价态。一定条件下，雌黄和雄黄的转化关系如图所示。



①I中，氧化剂是_____。

②II中，若 1mol As_4S_4 反应转移 $28\text{mol}e^-$ ，则反应II的化学方程式是_____。

【答案】 As_2S_3 $As_4S_4 + 7O_2 \xrightarrow{\text{一定条件}} 2As_2O_3 + 4SO_2$

【解析】

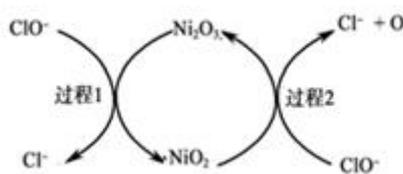
(1)①I中 Sn 的化合价升高，As 的化合价降低，所以 As_2S_3 在反应中得电子作氧化剂；

②II中，若 1mol As_4S_4 反应转移 $28\text{mol}e^-$ ，则反应消耗 7mol 氧气，反应的方程式为： $As_4S_4 + 7O_2 \xrightarrow{\text{一定条件}} 2As_2O_3 + 4SO_2$ ；

10. NaClO 碱性溶液吸收法。工业上常用碱性 NaClO 废液吸收 SO_2 ，反应原理为：

$ClO^- + SO_2 + 2OH^- = Cl^- + SO_4^{2-} + H_2O$ ，为了提高吸收效率，常用 Ni_2O_3 作为催化剂。在反应过程中产生的

的四价镍和氧原子具有极强的氧化能力，可加快对 SO_2 的吸收。该催化过程如下图所示：



a. 过程 1 的离子方程式是 $Ni_2O_3 + ClO^- = 2NiO_2 + Cl^-$ ，过程 2 的离子方程式为_____。

b. $Ca(ClO)_2$ 也可用于脱硫，且脱硫效果比 NaClO 更好，原因是_____。

【答案】 $ClO^- + 2NiO_2 = Ni_2O_3 + Cl^- + 2O$ Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 结合生成微溶的 $CaSO_4$ 有利于反应的进行

【解析】a. 根据图示可知，转化关系中的过程 1 是 Ni_2O_3 和 ClO^- 发生反应生成 NiO_2 和 Cl^- ，反应的离子方程式

为 $Ni_2O_3 + ClO^- = 2NiO_2 + Cl^-$ ；过程 2 为 ClO^- 与 NiO_2 反应生成 Ni_2O_3 、 Cl^- 和 O，该反应的离子方程式为：

$ClO^- + 2NiO_2 = Ni_2O_3 + Cl^- + 2O$ ，故答案为： $ClO^- + 2NiO_2 = Ni_2O_3 + Cl^- + 2O$ ；

b. 由于 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 结合生成微溶的 CaSO_4 有利于反应的进行, 所以 $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ 也可用于脱硫, 且脱硫效果比 NaClO 更好, 故答案为: Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 结合生成微溶的 CaSO_4 有利于反应的进行;

11. CeO_2 是汽车尾气净化催化剂中最重要的助剂, 工作原理如图 1 所示。写出过程 1 发生反应的化学方程式:

_____。

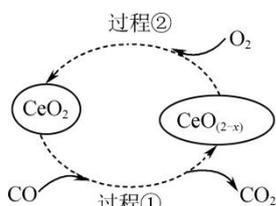
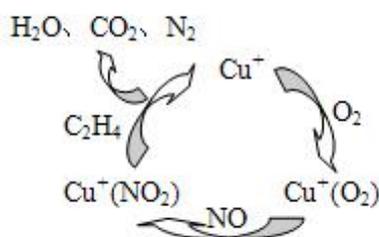


图 1 CO 的消除过程

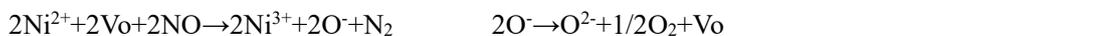
【答案】 $\text{CeO}_2 = \text{CeO}_{(2-x)} + x\text{CO}_2$

【解析】 根据图 1 所示, 过程 1 中 CeO_2 和一氧化碳反应生成二氧化碳 $\text{CeO}_{(2-x)}$, 根据物料守恒, 化学反应方程式为: $x\text{CO} + \text{CeO}_2 = \text{CeO}_{(2-x)} + x\text{CO}_2$;

12. ①以乙烯(C_2H_4)作为还原剂脱硝(NO), 其脱硝机理如图所示, 若反应中 $n(\text{NO}): n(\text{O}_2) = 2 : 1$, 则总反应的化学方程式为_____。



②用 Ni^{2+} 可直接催化 NO 分解生成 N_2 、 O_2 , 将其反应机理补充完整(Vo 代表氧空穴):

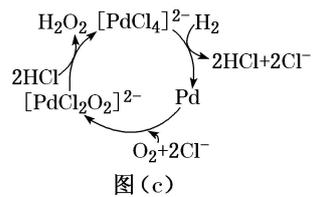


【答案】 ① $6\text{NO} + 3\text{O}_2 + 2\text{C}_2\text{H}_4 \xrightarrow{\text{Cu}^+} 3\text{N}_2 + 4\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$ ② $2\text{Ni}^{3+} + \text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{Ni}^{2+} + \text{Vo} + \frac{1}{2}\text{O}_2$

【解析】 ①根据图示可知, 在催化剂的作用下, C_2H_4 与 NO 、 O_2 反应最终生成 N_2 、 CO_2 、 H_2O , 反应中 $n(\text{NO}): n(\text{O}_2) = 2 : 1$, 反应总方程式为 $6\text{NO} + 3\text{O}_2 + 2\text{C}_2\text{H}_4 \xrightarrow{\text{Cu}^+} 3\text{N}_2 + 4\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$

②用 NO 可直接催化 NO 分解生成 N_2 、 O_2 , 反应的总反应为 $2\text{NO} \xrightarrow{\text{催化剂}} \text{O}_2 + \text{N}_2$, 根据反应原理, Ni^{2+} 为催化剂, 用总反应 - ($2\text{Ni}^{2+} + 2\text{Vo} + 2\text{NO} \rightarrow 2\text{Ni}^{3+} + 2\text{O}^- + \text{N}_2$) - ($2\text{O}^- \rightarrow \text{O}^{2-} + 1/2\text{O}_2 + \text{Vo}$) 得: $2\text{Ni}^{3+} + \text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{Ni}^{2+} + \text{Vo} + \frac{1}{2}\text{O}_2$

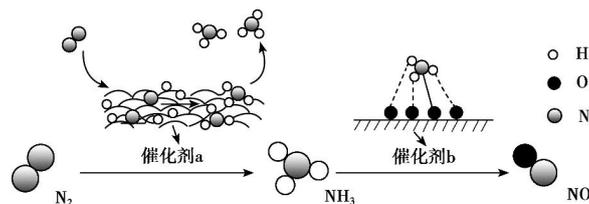
13. 用 H_2 制备 H_2O_2 的一种工艺简单、能耗低的方法, 反应原理如图(c)所示。总反应的化学方程式为



【答案】 $\text{H}_2 + \text{O}_2 \xrightarrow{[\text{PdCl}_4]^{2-}} \text{H}_2\text{O}_2$

【解析】 根据图示，用 H_2 制备 H_2O_2 ， Pd 、 $[\text{PdCl}_2\text{O}_2]^{2-}$ 为中间产物， $[\text{PdCl}_4]^{2-}$ 为催化剂，故总反应的化学方程式为 $\text{H}_2 + \text{O}_2 \xrightarrow{[\text{PdCl}_4]^{2-}} \text{H}_2\text{O}_2$ 。

1. 氮及其化合物的转化过程如图所示。下列分析合理的是 ()

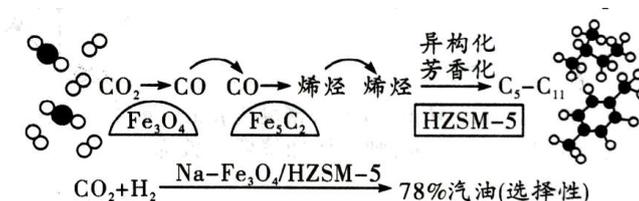


- A. 催化剂 a 表面发生了极性共价键的断裂和形成
 B. N_2 与 H_2 反应生成 NH_3 的原子利用率为 100%
 C. 在催化剂 b 表面形成氮氧键时, 不涉及电子转移
 D. 催化剂 a、b 能提高反应的平衡转化率

【答案】B

【解析】A 项, 催化剂 A 表面是氮气与氢气生成氨气的过程, 发生的是同种元素之间非极性共价键的断裂, 错误; B 项, N_2 与 H_2 在催化剂 a 作用下反应生成 NH_3 属于化合反应, 无副产物生成, 其原子利用率为 100%, 正确; C 项, 在催化剂 b 表面形成氮氧键时, 氨气转化为 NO , N 元素化合价由-3 价升高到+2 价, 失去电子, 错误; D 项, 催化剂 a、b 只改变化学反应速率, 不能提高反应的平衡转化率, 错误。

2. 中科院设计了一种新型的多功能复合催化剂, 实现了 CO_2 直接加氢制取高辛烷值汽油, 其过程如图。下列有关说法正确的是 ()

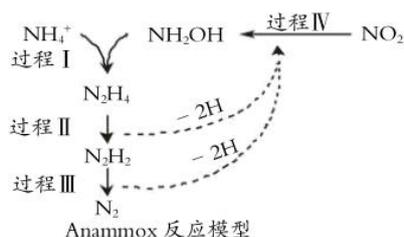


- A. 在 $Na-Fe_3O_4$ 上发生的反应为 $CO_2+H_2=CO+H_2O$
 B. 中间产物 Fe_5C_2 的生成是实现 CO_2 转化为汽油的关键
 C. 催化剂 HZMS-5 可以提高汽油中芳香烃的平衡产率
 D. 该过程, CO_2 转化为汽油的转化率高达 78%

【答案】B

【解析】A 项, 由流程图可知, CO_2+H_2 在 $Na-Fe_3O_4$ 催化剂表面反应生成烯烃, 根据元素和原子守恒可知, 其反应为: $2CO_2+6H_2 \xrightarrow{Na-Fe_3O_4} CH_2=CH_2+4H_2O$, 错误; B 项, 中间产物 Fe_5C_2 是无机物转化为有机物的中间产物, 是转化的关键, 正确; C 项, 催化剂 HZMS-5 的作用是加快反应速率, 对平衡产率没有影响, 错误; D 项, 由图分析 78%并不是表示 CO_2 转化为汽油的转化率, 错误;

3. 厌氧氨化法 (Anammox) 是一种新型的氨氮去除技术, 下列说法中正确的是 ()

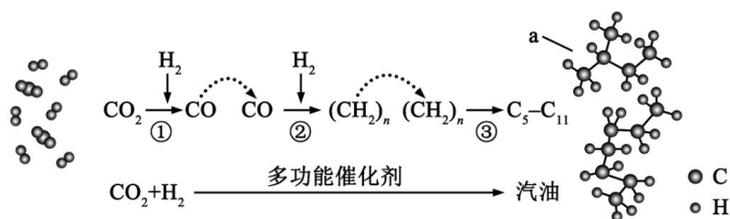


- A. 1mol NH_4^+ 所含的质子总数为 $10N_A$
- B. 联氨 (N_2H_4) 中含有离子键和非极性键
- C. 过程 II 属于氧化反应, 过程 IV 属于还原反应
- D. 过程 I 中, 参与反应的 NH_4^+ 与 NH_2OH 的物质的量之比为 1 : 2

【答案】C

【解析】A 项, 1mol NH_4^+ 所含的质子总数为 $11N_A$, 错误; B 项, 联氨 ($\begin{array}{c} \text{H}-\text{N}-\text{N}-\text{H} \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$) 中含有极性键和非极性键, 错误; C 项, 过程 II 中 N 元素化合价升高, 发生氧化反应, 过程 IV 中 N 化合价降低, 发生还原反应, 正确; D 项, 过程 I 中, 参与反应的 NH_4^+ 到 N_2H_4 化合价升高 1 个, NH_2OH 到 N_2H_4 化合价降低 1 个, 它们物质的量之比为 1 : 1, 错误。

4. 我国在 CO_2 催化加氢制取汽油方面取得突破性进展, CO_2 转化过程示意图如下。下列说法错误的是 ()



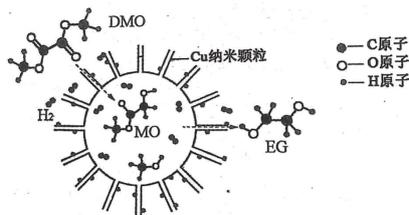
- A. 反应①的产物中含有水
- B. 汽油主要是 $\text{C}_5\sim\text{C}_{11}$ 的烃类混合物
- C. 反应②中只有碳碳键形成
- D. 图中 a 的名称是 2-甲基丁烷

【答案】C

【解析】A 项, 反应①为二氧化碳和氢气反应生成一氧化碳和水, 产物中含有水, 正确; B 项, 汽油是石油的分馏产物, 主要是 $\text{C}_5\sim\text{C}_{11}$ 的烃类混合物, 正确; C 项, 反应②中不仅有碳碳键形成, 还有碳氢键形成, 错误; D 项, 图中 a 主链有 4 个碳原子, 2 号碳上有一个甲基, 所以名称是 2-甲基丁烷, 正确。

5. 我国学者研究出一种用于催化 DMO 和氢气反应获得 EG 的纳米反应器, 下图是反应的微观过程示意图。

下列说法中正确的是

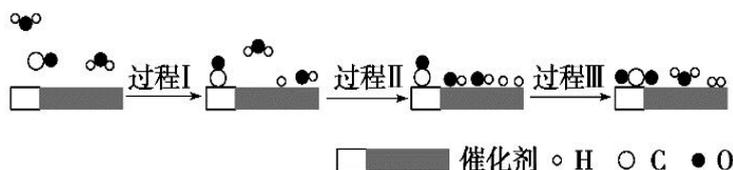


- A. Cu 纳米颗粒是一种胶体
 B. DMO 的名称是二乙酸甲酯
 C. 该催化反应的有机产物只有 EG
 D. 催化过程中断裂的化学键有 H-H、C-O、C=O

【答案】D

【解析】A 项，Cu 纳米颗粒是单质，而胶体是混合物，错误；B 项，DMO 的名称是乙二酸二甲酯，错误；C 项，该催化反应的有机产物只有 EG 还有甲醇，错误；D 项， $\text{CH}_3\text{COO}-\text{COOCH}_3+4\text{H}_2\rightarrow\text{CH}_3\text{OH}+\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ ，由图及反应可知催化过程中断裂的化学键有 H-H、C-O、C=O，正确。

6. 我国科学家使用双功能催化剂(能吸附不同粒子)催化水煤气变换反应： $\text{CO}(\text{g})+\text{H}_2\text{O}(\text{g})=\text{CO}_2(\text{g})+\text{H}_2(\text{g})$ $\Delta\text{H}<0$ ，在低温下获得高转化率与高反应速率。反应过程示意图如下：



下列说法正确的是 ()

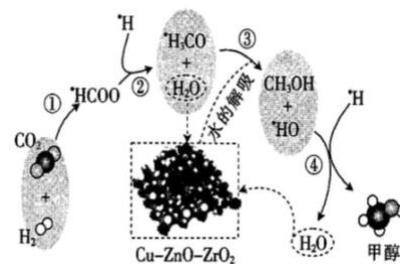
- A. 图示显示：起始时的 2 个 H_2O 最终都参与了反应
 B. 过程 I、过程 II 均为放热过程
 C. 过程 III 只生成了极性共价键
 D. 使用催化剂降低了水煤气变换反应的 ΔH

【答案】A

【解析】A 项，根据反应过程示意图，过程 I 中 1 个水分子中的化学键断裂，过程 II 另一个水分子中的化学键断裂的过程，过程 III 中形成了新的水分子，因此起始时的 2 个 H_2O 最终都参与了反应，正确；B 项，根据反应过程示意图，过程 I、II 中水分子中的化学键断裂的过程，为吸热过程，错误；C 项，过程 III 中 CO、氢氧原子团和氢原子形成了二氧化碳、水和氢气， H_2 中的化学键为非极性键，错误；D 项，催化剂不能改变反应的 ΔH ，错误；

7. 我国科研人员研究了在 Cu-ZnO-ZrO_2 催化剂上 CO_2 加氢制甲醇过程中水的作用机理；其主反应历程如图所示 ($\text{H}_2 \rightarrow * \text{H} + * \text{H}$)。下列说法错误的是 ()

- A. 二氧化碳加氢制甲醇的过程中原子利用率达 100%
- B. 带标记的物质是该反应历程中的中间产物
- C. 向该反应体系中加入少量的水能增加甲醇的收率
- D. 第③步的反应式为 $* \text{H}_3\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + * \text{HO}$

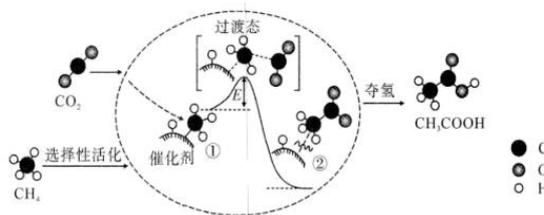


【答案】A

【解析】A 项，从反应②、③、④看，生成 $2\text{molH}_2\text{O}$ ，只消耗 $1\text{molH}_2\text{O}$ ，所以二氧化碳加氢制甲醇的过程中原子利用率不是 100%，错误；B 项，从整个历程看，带标记的物质都是在中间过程中出现，所以带标记的物质是该反应历程中的中间产物，正确；C 项，从反应③看，向该反应体系中加入少量的水，有利于平衡的正向移动，所以能增加甲醇的收率，正确；D 项，从历程看，第③步的反应物为 $* \text{H}_3\text{CO}$ 、 H_2O ，生成物为 CH_3OH 、 $* \text{HO}$ ，所以反应式为 $* \text{H}_3\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + * \text{HO}$ ，正确。

8. 我国科研人员提出了由 CO_2 和 CH_4 转化为高附加值产品 CH_3COOH 的催化反应历程。该历程示意图如下，则下列说法正确的是 ()

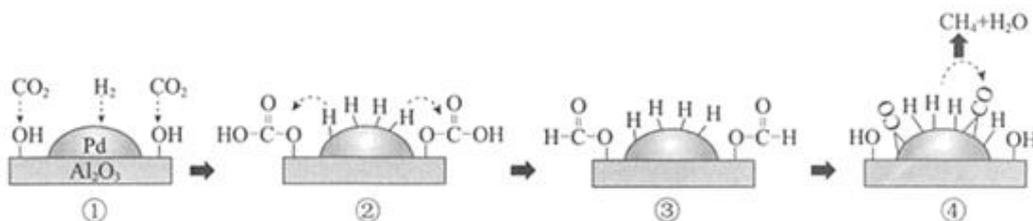
- A. E 为该反应的反应热
- B. ①→②吸收能量
- C. $\text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH}$ 过程中，有极性键的断裂和非极性键的形成
- D. 加入催化剂能改变该反应的能量变化



【答案】C

【解析】A 项，根据图示 E 为该反应的活化能，错误；B 项，①→②的能量降低，过程为放热过程，错误；C 项，该过程中甲烷中的 C-H 键断裂，为极性键的断裂，形成 CH_3COOH 的 C-C 键，为非极性键形成，正确；D 项，催化剂不能改变反应的能量变化，只改变反应的活化能，错误。

9. 中国科技大学改进 $\text{Pd/Al}_2\text{O}_3$ 催化 H_2 还原 CO_2 的生产工艺，其机理如图所示，下列说法错误的是 ()



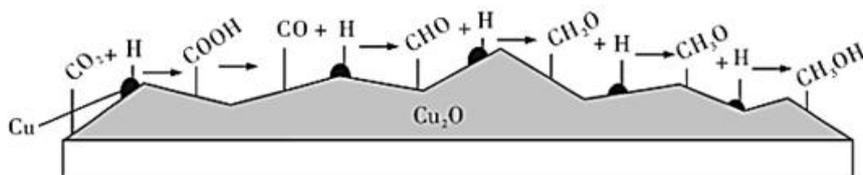
- A. 金属钯是优良的贮氢材料

- B. ①→②为 CO_2 发生加成反应
- C. ④中 CO 被氧化为 CH_3OH
- D. 总反应方程式是 $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \xrightarrow{\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3} \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

【答案】C

【解析】A 项，从图中看出，金属钯既能吸收氢，同时又能释放氢，所以是优良的贮氢材料，正确；B 项，①→②中， CO_2 分子中的一个碳氧双键发生断裂，从而发生加成反应，正确；C 项，④中 CO 被还原为 CH_3OH ，错误；D 项，从①→④， CO_2 与 H_2 在 $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂表面反应，最终生成甲烷和水，则总反应为 $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \xrightarrow{\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3} \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ，正确。

10. 我国科学家在绿色化学领域取得新进展。利用双催化剂 Cu 和 Cu_2O ，在水溶液中用 H 将 CO_2 高效还原为重要工业原料之一的甲醇，其反应机理如图所示。则下列有关说法错误的是（ ）

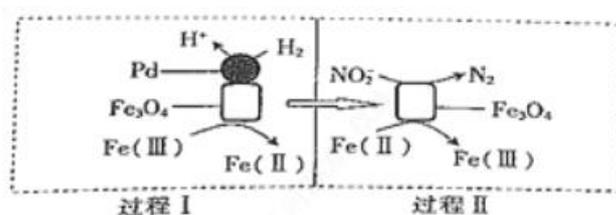


- A. CO_2 生成甲醇是通过多步氧化反应实现的
- B. 该催化反应过程中涉及了化学键的形成及断裂
- C. 有可能通过调节控制反应条件获得甲醛等有机物
- D. 催化剂 Cu 结合氢原子，催化剂 Cu_2O 结合含碳微粒

【答案】A

【解析】A 项， CO_2 生成 COOH ，为还原反应； CO 生成 CHO ，为还原反应； CHO 生成 CH_2O ，为还原反应； CH_2O 生成 CH_3O ，为还原反应； CH_3O 生成 CH_3OH ，为还原反应，所以 CO_2 生成甲醇是通过多步还原反应实现，错误；B 项，该催化过程发生化学反应，所以该反应中有化学键的形成和断裂，正确；C 项， CHO 和 H 生成 CH_2O ，需要 Cu_2O 作催化剂，可以调节控制反应条件获得甲醛等有机物，正确；D 项，根据图知，催化剂 Cu 结合 H 原子，催化剂 Cu_2O 结合含 CHO 微粒，催化剂 Cu 结合氢原子，催化剂 Cu_2O 结合含碳微粒，正确；

11. 用 H_2 消除酸性废水中的 NO_2^- 是一种常用的电化学方法。其反应原理如图所示，下列说法错误的是（ ）



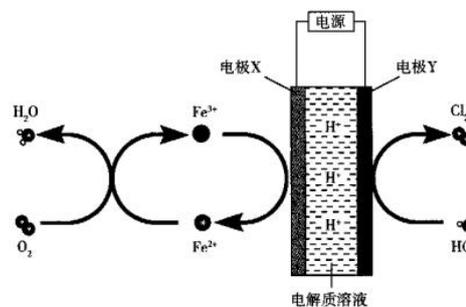
- A. Fe_3O_4 在该反应中作催化剂
 B. Pd 上发生的反应为 $\text{H}_2 - 2\text{e}^- = 2\text{H}^+$
 C. 总反应为 $3\text{H}_2 + 2\text{NO}_2^- = \text{N}_2 + 2\text{OH}^- + 2\text{H}_2\text{O}$
 D. Fe (II) 与 Fe (III) 之间相互转化起到了传递电子的作用

【答案】C

【解析】A 项，由以上分析可知， Fe_3O_4 先消耗后生成，在反应中起催化剂作用，正确；B 项，由过程 I 中的转化关系，可得出 Pd 上发生的反应为 $\text{H}_2 - 2\text{e}^- = 2\text{H}^+$ ，正确；C 项，电解质溶液提供 H^+ ，总反应为 $3\text{H}_2 + 2\text{NO}_2^- + 2\text{H}^+ \xrightarrow{\text{Fe}_3\text{O}_4} \text{N}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$ ，错误；D 项，Fe(II) 和 Fe(III) 通过得失电子发生相互转化，实际上起到传递电子作用，正确。

12. 以 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 作为氧化还原介质，可以在低电位条件下电解 HCl 制取 Cl_2 ，其原理如图所示，下列说法正确的是 ()

- A. X 极上的电势比 Y 极上的低
 B. H^+ 向 Y 极迁移, X 极周围溶液 pH 升高
 C. X 极上发生反应: $2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- = 4\text{H}^+ + \text{O}_2 \uparrow$
 D. 电解总反应为 $4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ = 4\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$



【答案】A

【解析】A 项，根据装置图中 Y 电极上 HCl 失去电子、被氧化生成 Cl_2 可知，Y 电极为电解池的阳极，与电源正极相接，则电极 X 为电解池的阴极，与电源负极相接，所以 Y 极上的电势比 X 极上的高，正确；

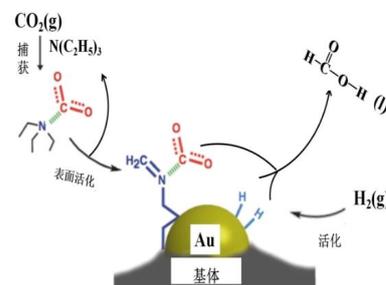
B 项，Y 电极为电解池的阳极，电极 X 为电解池的阴极，阳离子 H^+ 向 X 极迁移，X 极周围溶液酸性增强、pH 减小，错误；

C 项，由图可知，阴极 X 电极发生得电子的还原反应、电极反应式为 $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+}$ ，错误；

D 项，电解时，阳极上反应式为 $2\text{HCl} - 2\text{e}^- = 2\text{H}^+ + \text{Cl}_2 \uparrow$ ，阴极上反应式为 $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+}$ ，生成的 Fe^{2+} 与 O_2 反应生成 Fe^{3+} 、循环转化的方程式为 $4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ = 4\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$ ，所以电解总反应为 $4\text{HCl} + \text{O}_2 = 2\text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ，错误。

13. 二氧化碳捕获技术用于去除气流中的二氧化碳或者分离出二氧化碳作为气体产物，其中 CO_2 催化合成甲酸是原子利用率高的反应，且生成的甲酸是重要化工原料。下列说法错误的是 ()

- A. 二氧化碳的电子式: $:\ddot{\text{O}}::\text{C}::\ddot{\text{O}}:$
 B. 在捕获过程，二氧化碳分子中的共价键完全断裂
 C. $\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ 能够协助二氧化碳到达催化剂表面

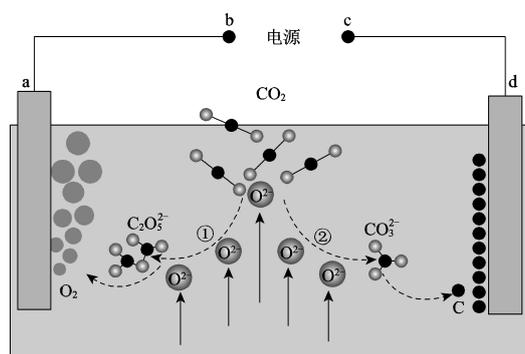


D. CO_2 催化加氢合成甲酸的总反应式: $\text{H}_2 + \text{CO}_2 = \text{HCOOH}$

【答案】B

【解析】A 项, 二氧化碳是共价化合物, 其电子式为 $:\ddot{\text{O}}::\text{C}::\ddot{\text{O}}:$, 正确; B 项, 由二氧化碳和甲酸的结构式可知, 在捕获过程, 二氧化碳分子中的共价键不会完全断裂, 只断裂其中一个碳氧双键, 错误; C 项, $\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ 捕获 CO_2 , 表面活化, 协助二氧化碳到达催化剂表面, 正确; D 项, 由图可知, CO_2 催化加氢合成甲酸的总反应式: $\text{H}_2 + \text{CO}_2 = \text{HCOOH}$, 正确。

14. 我国科学家设计二氧化碳熔盐捕获及电化学转化装置, 其示意图如下:



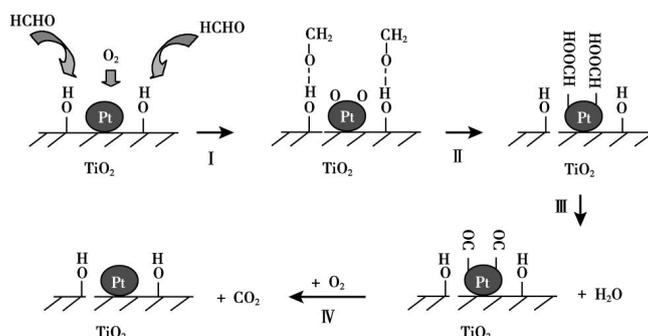
下列说法错误的是

- A. b 为电源的正极
- B. ①②中, 捕获 CO_2 时碳元素的化合价发生了变化
- C. a 极的电极反应式为 $2\text{C}_2\text{O}_5^{2-} - 4\text{e}^- = 4\text{CO}_2 + \text{O}_2$
- D. 上述装置存在反应: $\text{CO}_2 = \text{C} + \text{O}_2$

【答案】B

【解析】A 项, a 电极反应是 $2\text{C}_2\text{O}_5^{2-} - 4\text{e}^- = 4\text{CO}_2 + \text{O}_2$, 发生氧化反应, 是电解池的阳极, 则 b 为正极, 故 A 正确; B 项, ①捕获 CO_2 时生成的 $\text{C}_2\text{O}_5^{2-}$ 中碳元素的化合价仍为 +4 价, ②捕获 CO_2 时生成 CO_3^{2-} 时碳元素的化合价仍为 +4 价, 碳元素的化合价均未发生变化, 故 B 错误; C 项, 由电解装置示意图可知 a 电极反应是 $2\text{C}_2\text{O}_5^{2-} - 4\text{e}^- = 4\text{CO}_2 + \text{O}_2$, 故 C 正确; D 项, 由电解装置示意图可知 a 电极生成 O_2 , d 电极生成 C, 电解池总反应式为 $\text{CO}_2 = \text{C} + \text{O}_2$, 故 D 正确。

15. 去除甲醛有多种方法, 其中, 催化氧化法是一种比较高效的除甲醛方法。Na-Pt/ TiO_2 催化剂催化氧化甲醛的反应机理如下图所示:



下列有关说法正确的是_____ (选填字母序号)。



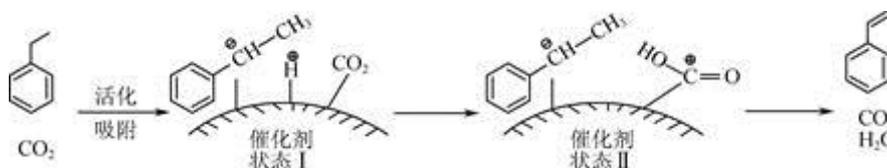
b. Na-Pt/TiO₂ 催化剂能加快甲醛氧化速率，也能提高甲醛的转化率

c. 反应过程中，HCHO 只有部分化学键发生断裂

【答案】a c

【解析】b. 催化剂对平衡移动无影响，可加快反应速率，甲醛的转化率不变，故错误；c. 图中 C=O 未断裂，则反应过程中，HCHO 只有部分化学键发生断裂，故正确；故答案为：ac。

16. 苯乙烯可由乙苯和 CO₂ 催化脱氢制得。其反应历程如下：

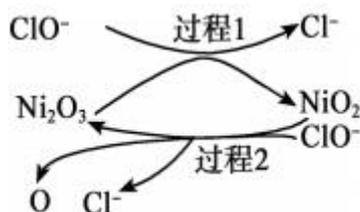


乙苯平衡转化率与 P(CO₂) 的关系如图所示，当 P(CO₂) < 15kPa 时，乙苯平衡转化率随着 P(CO₂) 增大而增大，其原因是_____，当 P(CO₂) > 15kPa 时，乙苯平衡转化率随着 P(CO₂) 增大反而减小，其原因是_____。

【答案】随着 CO₂ 压强增大，反应物浓度增大，促进平衡向右移动 过多的 CO₂ 会造成催化剂表面乙苯的吸附下降

【解析】由反应历程可知乙苯与二氧化碳在催化条件下反应生成苯乙烯和一氧化碳，增大二氧化碳浓度，有利于平衡正向移动，但二氧化碳浓度过大，会造成催化剂表面乙苯的吸附下降。

17. NaClO 碱性溶液吸收法。工业上可用 NaClO 碱性溶液吸收 SO₂。为了提高吸收效率，常用 Ni₂O₃ 作为催化剂。在反应过程中产生的四价镍和原子氧具有极强的氧化能力，可加快对 SO₂ 的吸收。该催化过程的示意图如下图所示：



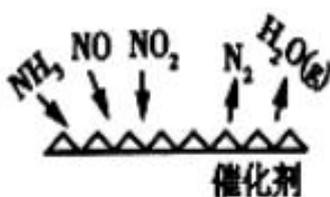
ii.过程 1 的离子方程式是_____。

iii. $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ 也可用于脱硫, 且脱硫效果比 NaClO 更好, 原因是_____。

【答案】 $\text{Ni}_2\text{O}_3 + \text{ClO}^- \rightleftharpoons 2\text{NiO}_2 + \text{Cl}^-$ Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 结合生成微溶的 CaSO_4 有利于反应的进行

【解析】由催化过程的示意图可知, 过程 1 中, Ni_2O_3 与 ClO^- 反应生成具有强氧化性的 NiO_2 , 过程 2 中, NiO_2 与 ClO^- 反应生成具有强氧化性的 O 原子。ii.过程 1 的离子方程式是 $\text{Ni}_2\text{O}_3 + \text{ClO}^- \rightleftharpoons 2\text{NiO}_2 + \text{Cl}^-$ 。iii. $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ 也可用于脱硫, 且脱硫效果比 NaClO 更好, 原因是 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 结合生成微溶的 CaSO_4 有利于反应的进行。

18. NH_3 催化还原氮氧化物(SCR)技术是目前应用最广泛的烟气氮氧化物脱除技术。反应原理如图甲所示。

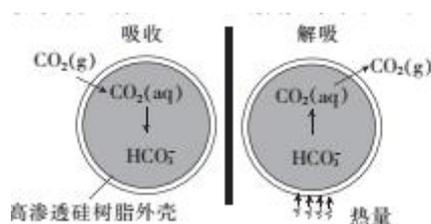


由图甲可知, SCR 技术中的氧化剂为_____, 已知 $c(\text{NO}_2) : c(\text{NO}) = 1 : 1$ 时脱氮效果最佳, 若生成 1molN_2 时反应放出的热量为 QkJ 。此时对应的脱氮反应的热化学方程式为_____。

【答案】 NO 、 NO_2 $2\text{NH}_3(\text{g}) + \text{NO}(\text{g}) + \text{NO}_2(\text{g}) = 2\text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \Delta H = -2\text{Q} \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

【解析】由图甲可知 SCR 技术中 NH_3 与 NO 、 NO_2 反应产物为 N_2 和水, 故氧化剂为 NO 、 NO_2 , 脱氮效果最佳时 $c(\text{NO}_2) : c(\text{NO}) = 1 : 1$, 因此反应的热化学方程式为 $2\text{NH}_3(\text{g}) + \text{NO}(\text{g}) + \text{NO}_2(\text{g}) = 2\text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \Delta H = -2\text{Q} \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

19. 基于新材料及 3D 打印技术, 科学家研制出一种微胶囊吸收剂, 它能将工厂排放的 CO_2 以更加安全、廉价和高效的方式处理掉, 球形微胶囊内部充有 Na_2CO_3 溶液, 其原理如图所示。



这种微胶囊吸收 CO_2 的原理是 _____ (用离子方程式表示), 此过程是 _____ 填“吸收”或“放出”) 能量的过程。

【答案】 $\text{CO}_2 + \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{HCO}_3^-$ 放出

【解析】胶囊内部充有 Na_2CO_3 溶液，通入 CO_2 发生 $\text{CO}_2 + \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{HCO}_3^-$ ；根据图可知解吸过程为吸热过程，则吸收 CO_2 过程为放出能量的过程。

20. NH_3 催化还原氮氧化物是目前应用最广泛的烟气脱硝技术。用活化后的 V_2O_5 作催化剂， NH_3 将 NO 还原成 N_2 的一种反应历程如图 5 所示，则总反应方程式为_____。

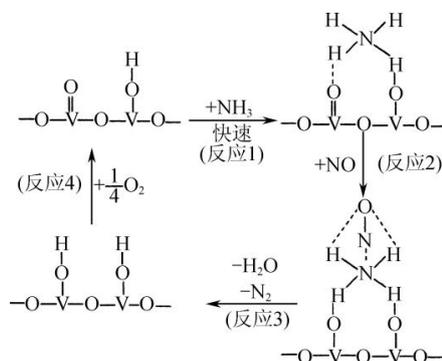
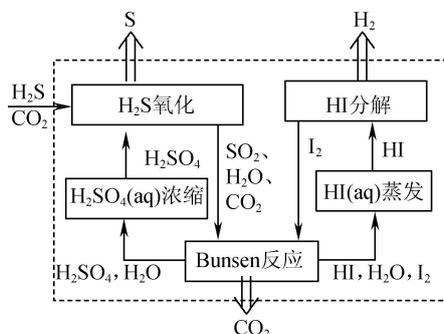


图 5 氨气选择性还原 NO 反应历程

【答案】 $4\text{NH}_3 + 4\text{NO} + \text{O}_2 \xrightarrow{\text{V}_2\text{O}_5} 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$

【解析】用 V_2O_5 作催化剂， NH_3 可将 NO 还原成 N_2 ，结合反应历程图可知反应物还有氧气，生成物为 N_2 和 H_2O ，配平即得反应方程式为 $4\text{NH}_3 + 4\text{NO} + \text{O}_2 \xrightarrow{\text{V}_2\text{O}_5} 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ 。

21. H_2S 存在于多种燃气中，脱除燃气中 H_2S 的方法很多。



2019 年 3 月《science direct》介绍的化学链技术脱除 H_2S 的原理如图所示。

①“ H_2S 氧化”反应中氧化剂与还原剂的物质的量之比为_____。

②“ HI 分解”时，每 1 mol HI 分解生成碘蒸气和氢气时，吸收 13 kJ 的热量，写出该反应的热化学方程式：_____。

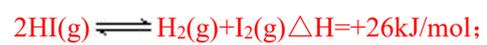
③“Bunsen 反应”的离子方程式为_____。

【答案】① 1 : 1 ② $2\text{HI}(\text{g}) \rightleftharpoons \text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g}); \Delta H = +26 \text{ kJ/mol}$ ③ $\text{SO}_2 + \text{I}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{I}^-$

【解析】①“ H_2S 氧化”为 H_2S 与浓硫酸的反应，由电子守恒可知，反应中氧化剂与还原剂的物质的量之比为

$$\frac{2-0}{6-4} = \frac{1}{1};$$

② 1 mol HI 分解生成碘蒸气和氢气时，吸收 13 kJ 的热量，结合状态及焓变可知热化学方程式为



③“Bunsen 反应”中反应物为二氧化硫、碘、水，生成物为硫酸和 HI，离子反应为 $\text{SO}_2 + \text{I}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{I}^-$