

反应原理综合题点点突破(二)——反应速率、平衡常数、转化率的计算

一、知识总结&方法技巧

1. 有关化学反应速率计算公式的理解

对于反应 $m\text{A}(\text{g}) + n\text{B}(\text{g}) \rightleftharpoons c\text{C}(\text{g}) + d\text{D}(\text{g})$

$$(1) \text{计算公式: } v(\text{B}) = \frac{\Delta c_{\text{B}}}{\Delta t} = \frac{\frac{\Delta n_{\text{B}}}{V}}{\Delta t}$$

(2) 同一反应用不同的物质表示反应速率时, 数值可能不同, 但意义相同。不同物质表示的反应速率, 存在如下关系: $v(\text{A}) : v(\text{B}) : v(\text{C}) : v(\text{D}) = m : n : c : d$ 。

(3) 注意事项

① 浓度变化只适用于气体和溶液中的溶质, 不适用于固体和纯液体。

② 化学反应速率是某段时间内的平均反应速率, 而不是瞬时速率, 且计算时取正值。

2. 化学平衡计算中常用公式

(1) 对于可逆反应: $a\text{A}(\text{g}) + b\text{B}(\text{g}) \rightleftharpoons c\text{C}(\text{g}) + d\text{D}(\text{g})$ 在一定温度下达到化学平衡时, 其化学平衡常数计算的表达式为

$$K = \frac{c^c_{\text{C}} \cdot c^d_{\text{D}}}{c^a_{\text{A}} \cdot c^b_{\text{B}}} \quad (\text{式中的浓度是指平衡状态的浓度})$$

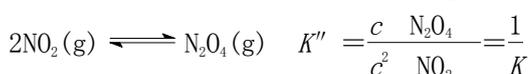
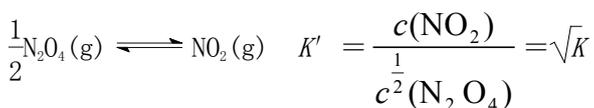
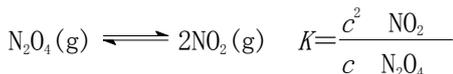
$$K_p = \frac{p^c_{\text{C}} \cdot p^d_{\text{D}}}{p^a_{\text{A}} \cdot p^b_{\text{B}}}$$

其中 $p(\text{A})$ 、 $p(\text{B})$ 、 $p(\text{C})$ 、 $p(\text{D})$ 分别为 A、B、C、D 各气体的分压,

气体的分压 = 气体总压 × 体积分数

气体体积之比 = 气体物质的量之比

(2) 同一化学反应, 化学反应方程式写法不同, 其平衡常数表达式亦不同。例如:



因此书写平衡常数表达式时, 要与化学反应方程式相对应, 否则意义就不明确。

(3) 转化率计算公式

$$\text{转化率}(\alpha) = \frac{\text{反应物转化的物质的量 或质量、浓度}}{\text{反应物起始的物质的量 或质量、浓度}} \times 100\%$$

3. 牢记一个万能模式(“三段式”法)

如 $m\text{A}(\text{g}) + n\text{B}(\text{g}) \rightleftharpoons p\text{C}(\text{g}) + q\text{D}(\text{g})$, 令 A、B 起始物质的量浓度分别为 $a \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $b \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 达到平衡后

消耗 A 的物质的量浓度为 $mx \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。



起始/ $(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$ a b 0 0

变化/ $(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$ mx nx px qx

平衡/ $(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$ $a - mx$ $b - nx$ px qx

$$K = \frac{(px)^p \cdot (qx)^q}{(a - mx)^m \cdot (b - nx)^n}$$

利用第二行(变化)可求反应速率

利用第一行(起始)和第二行(变化)可求平衡转化率

利用第三行(平衡)可求平衡常数

二、巩固提升

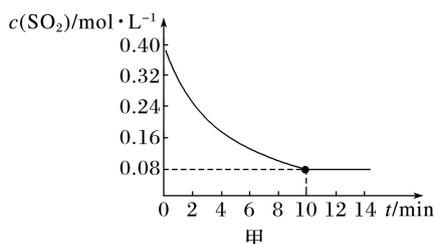
1. [2015·广东理综, 31(3)改编]一定条件下测得反应 $2\text{HCl}(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightleftharpoons \text{Cl}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$ 的反应过程中 $n(\text{Cl}_2)$ 的数据如下:

t/min	0	2.0	4.0	6.0	8.0
$n(\text{Cl}_2)/10^{-3}\text{mol}$	0	1.8	3.7	5.4	7.2

计算 2.0~6.0 min 内以 HCl 的物质的量变化表示的反应速率(以 $\text{mol} \cdot \text{min}^{-1}$ 为单位, 写出计算过程)。

2. 工业制硫酸的过程中, $\text{SO}_2(\text{g})$ 转化为 $\text{SO}_3(\text{g})$ 是一步关键步骤。

(1) 550 °C 时, 向一恒温恒容的容器内充入 2 mol $\text{SO}_2(\text{g})$ 与 1 mol $\text{O}_2(\text{g})$ 进行上述反应, 测得 $\text{SO}_2(\text{g})$ 浓度随时间变化如图甲所示, 则该温度下反应从开始到平衡氧气的平均反应速率 $v(\text{O}_2) =$ _____。



(2) 改变温度, 在 1 L 的恒温容器中, 反应过程中部分数据见下表:

反应时间/min	$\text{SO}_2(\text{g})/\text{mol}$	$\text{O}_2(\text{g})/\text{mol}$	$\text{SO}_3(\text{g})/\text{mol}$
0	4	2	0
5			1.5
10	2		
15		1	

若在起始时总压为 p_0 kPa, 反应速率若用单位时间内分压的变化表示, 而气态物质分压 = 总压 \times 气态物质的物质的量分数, 则 10 min 内 $\text{SO}_2(\text{g})$ 的反应速率 $v(\text{SO}_2) =$ _____ kPa \cdot min $^{-1}$ 。

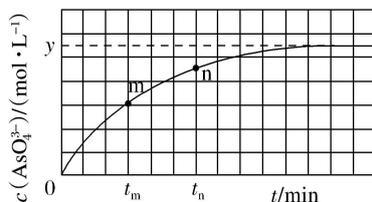
3. [2017·全国卷 I, 28(3)①]近期发现, H_2S 是继 NO 、 CO 之后第三个生命体系气体信号分子, 它具有参与调节神经信号传递、舒张血管减轻高血压的功能。回答下列问题:

H_2S 与 CO_2 在高温下发生反应: $\text{H}_2\text{S}(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g}) \rightleftharpoons \text{COS}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$ 。在 610 K 时, 将 0.10 mol CO_2 与 0.40 mol H_2S 充入 2.5 L 的空钢瓶中, 反应平衡后水的物质的量分数为 0.02。

H_2S 的平衡转化率 $\alpha_1 =$ _____ %, 反应平衡常数 $K =$ _____。

4. [2017·全国卷 III, 28(4)④]砷(As)是第四周期 VA 族元素, 可以形成 As_2S_3 、 As_2O_5 、 H_3AsO_3 、 H_3AsO_4 等化合物, 有着广泛的用途。回答下列问题:

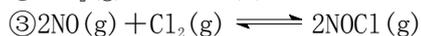
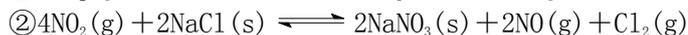
298 K 时, 将 20 mL $3x \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Na}_3\text{AsO}_3$ 、20 mL $3x \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{I}_2$ 和 20 mL NaOH 溶液混合, 发生反应: $\text{AsO}_3^{3-}(\text{aq}) + \text{I}_2(\text{aq}) + 2\text{OH}^-(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{AsO}_4^{3-}(\text{aq}) + 2\text{I}^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$ 。溶液中 $c(\text{AsO}_4^{3-})$ 与反应时间(t)的关系如图所示。



若平衡时溶液的 $\text{pH} = 14$, 则该反应的平衡常数 K 为 _____。

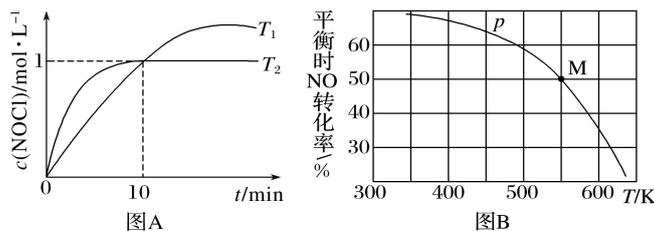
5. 亚硝酰氯(NOCl)是有机合成中的重要试剂, 可由 NO 和 Cl_2 反应得到, 化学方程式为 $2\text{NO}(\text{g}) + \text{Cl}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{NOCl}(\text{g})$ 。

(1) 氮氧化物与悬浮在大气中的海盐粒子相互作用时会生成亚硝酰氯, 涉及如下反应:



设反应①②③对应的平衡常数依次为 K_1 、 K_2 、 K_3 , 则 K_1 、 K_2 、 K_3 之间的关系为 _____。

(2) 在 1 L 恒容密闭容器中充入 2 mol NO(g) 和 1 mol Cl₂(g)，在不同温度下测得 c(NOCl) 与时间 t 的关系如图 A 所示：



① 反应开始到 10 min 时 NO 的平均反应速率 $v(\text{NO}) = \underline{\hspace{2cm}}$ mol · L⁻¹ · min⁻¹。

② T₂ 时该反应的平衡常数 K 为 。

③ T₂ 时 Cl₂ 的平衡转化率为 。

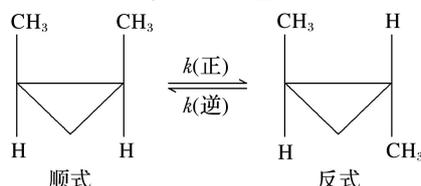
(3) 若按投料比 [n(NO) : n(Cl₂)] = 2 : 1 把 NO 和 Cl₂ 加入到一恒压的密闭容器中发生反应，平衡时 NO 的转化率与温度 T、压强 p(总压) 的关系如图 B 所示：

① 该反应的 ΔH (填 “>” “<” 或 “=”) 0。

② 在 p 压强条件下，M 点时容器内 NO 的体积分数为 。

③ 若反应一直保持在 p 压强条件下进行，则 M 点的分压平衡常数 $K_p = \underline{\hspace{2cm}}$ (用含 p 的表达式表示，用平衡分压代替平衡浓度计算，分压 = 总压 × 体积分数)。

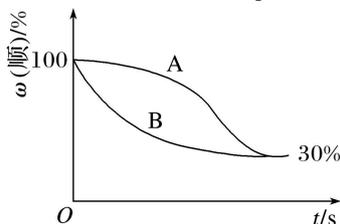
6. (2016 · 海南, 16) 顺-1, 2-二甲基环丙烷和反-1, 2-二甲基环丙烷可发生如下转化：



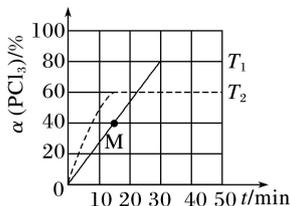
该反应的速率方程可表示为 $v(\text{正}) = k(\text{正}) c(\text{顺})$ 和 $v(\text{逆}) = k(\text{逆}) c(\text{反})$ ， $k(\text{正})$ 和 $k(\text{逆})$ 在一定温度时为常数，分别称作正、逆反应速率常数。回答下列问题：

(1) 已知： t_1 温度下， $k(\text{正}) = 0.006 \text{ s}^{-1}$ ， $k(\text{逆}) = 0.002 \text{ s}^{-1}$ ，该温度下反应的平衡常数 $K_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ；该反应的活化能 $E_a(\text{正})$ 小于 $E_a(\text{逆})$ ，则 ΔH (填 “小于” “等于” 或 “大于”) 0。

(2) t_2 温度下，图中能表示顺式异构体的质量分数随时间变化的曲线是 (填曲线编号)，平衡常数 $K_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ ；温度 t_1 (填 “小于” “等于” 或 “大于”) t_2 ，判断理由是 。



7. 在一定温度下，在 1 L 恒容密闭容器中充入一定量 PCl₃(g) 和 Cl₂(g)，发生如下反应：PCl₃(g) + Cl₂(g) \rightleftharpoons PCl₅(g) ΔH ，测得 PCl₃(g) 的转化率与时间关系如图所示。



其速率方程： $v_{\text{正}} = k_{\text{正}} \cdot c(\text{PCl}_3) \cdot c(\text{Cl}_2)$ ， $v_{\text{逆}} = k_{\text{逆}} \cdot c(\text{PCl}_5)$ (k 是速率常数，只与温度有关)

(1) 上述反应中， ΔH 0 (填 “>” “<” 或 “=”)，理由是 。

(2) M 点： $\frac{k_{\text{正}}}{k_{\text{逆}}} \frac{c(\text{PCl}_5)}{c(\text{PCl}_3) \cdot c(\text{Cl}_2)}$ (填 “>” “<” 或 “=”)，升高温度， $k_{\text{正}}$ 增大的倍数 $k_{\text{逆}}$ 增大的倍数 (填 “大于” “小于” 或 “等于”)。

(3) T₁ 时，测得平衡体系中 $c(\text{Cl}_2) = 0.25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，则 $\frac{k_{\text{正}}}{k_{\text{逆}}} = \underline{\hspace{2cm}}$ (要求结果带单位)。

8. H₂S 与 CO₂ 在高温下发生反应：H₂S(g) + CO₂(g) \rightleftharpoons COS(g) + H₂O(g)。在 610 K 时，将 0.10 mol CO₂ 与 0.40 mol H₂S 充入 2.5 L 的空钢瓶中，反应平衡后水的物质的量分数为 0.02。

(1) H₂S 的平衡转化率 $\alpha_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ %，反应平衡常数 $K = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

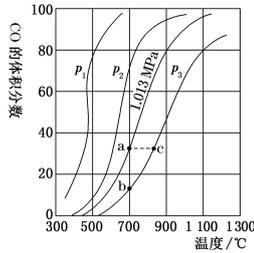
(2) 在 620 K 重复实验, 平衡后水的物质的量分数为 0.03, H_2S 的转化率 α_2 _____ α_1 , 该反应的 ΔH _____ 0 (填 “>” “<” 或 “=”)。

(3) 向反应器中再分别充入下列气体, 能使 H_2S 转化率增大的是 _____ (填标号)。

- A. H_2S B. CO_2 C. CO D. N_2

9. 合成氨工业涉及固体燃料的气化, 需要研究 CO_2 与 CO 之间的转化。为了弄清其规律, 让一定量的 CO_2 与足量碳在体积可变的密闭容器中反应: $C(s) + CO_2(g) \rightleftharpoons 2CO(g) \quad \Delta H$

测得压强、温度对 CO 、 CO_2 的平衡组成的影响如图所示:

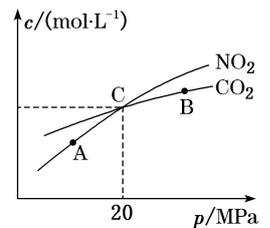


回答下列问题:

(1) p_1 、 p_2 、 p_3 的大小关系是 _____, 欲提高 C 与 CO_2 反应中 CO_2 的平衡转化率, 应采取的措施为 _____。图中 a、b、c 三点对应的平衡常数大小关系是 _____。

(2) 900 °C、1.013 MPa 时, 1 mol CO_2 与足量碳反应达平衡后容器的体积为 V , CO_2 的转化率为 _____, 该反应的平衡常数 $K =$ _____。

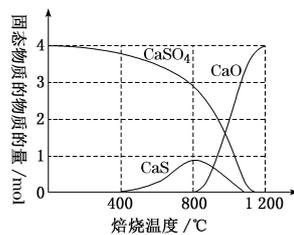
10. (1) 活性炭还原 NO_2 的反应为 $2NO_2(g) + 2C(s) \rightleftharpoons N_2(g) + 2CO_2(g)$, 在恒温条件下, 1 mol NO_2 和足量活性炭发生该反应, 测得平衡时 NO_2 和 CO_2 的物质的量浓度与平衡总压的关系如图所示:



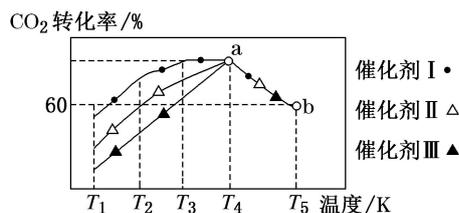
① A、B、C 三点中 NO_2 的转化率最高的是 _____ (填 “A” “B” 或 “C”) 点。

② 计算 C 点时该反应的压强平衡常数 $K_p =$ _____ (K_p 是用平衡分压代替平衡浓度计算, 分压 = 总压 \times 物质的量分数)。

(2) 以 CO 作还原剂与磷石膏反应, 不同反应温度下可得到不同的产物。向盛有 $CaSO_4$ 的真空恒容密闭容器中充入 CO , 反应体系起始总压强为 0.1a MPa, 不同温度下反应后所得固体成分的物质的量如图所示。在低于 800 °C 时主要反应的化学方程式为 _____; 1 150 °C 下, 反应 $CaSO_4 + CO \rightleftharpoons CaO + CO_2 + SO_2$ 达到平衡时, $c_{平衡}(SO_2) = 8.0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot L^{-1}$, CO 的转化率为 80%, 则 $c_{初始}(CO) =$ _____ $\text{mol} \cdot L^{-1}$, 该反应的压强平衡常数 $K_p =$ _____ (用含 a 的代数式表示; 用平衡分压代替平衡浓度计算, 分压 = 总压 \times 物质的量分数; 忽略副反应)。



11. (2019 · 河南滑县联考) 氢是人们公认的清洁能源, 作为低碳和零碳能源正在脱颖而出, 氢的获得及以氢为原料的工业生产工艺成为科技工作者研究的重要课题。



(1) 已知: CO_2 和 $H_2(g)$ 制备甲醇 (1) 的热化学方程式为 $CO_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons CH_3OH(l) + H_2O(l) \quad \Delta H = -93.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。将一定量的 CO_2 和 H_2 充入某恒容密闭容器中发生上述反应, 测得在不同催化剂作用下, 相同时间内 CO_2 的转化率与温度的关系如图所示。催化效果最好的催化剂是 _____ (填 “I” “II” 或 “III”), 该反应在 a 点达到平衡

状态, a 点的转化率比 b 点的高, 其原因是_____。

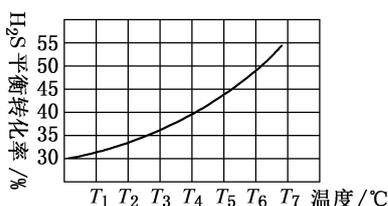
(2) 利用 CO 和水蒸气可制备 H_2 , 反应的化学方程式为 $CO(g) + H_2O(g) \rightleftharpoons CO_2(g) + H_2(g)$ 。将不同量的 CO(g) 和 $H_2O(g)$ 分别通入体积为 2 L 的恒容密闭容器中进行上述反应, 得到的三组数据如下表所示:

温度/ $^{\circ}C$	起始量		达到平衡		
	$n(CO)/mol$	$n(H_2O)/mol$	$n(H_2)/mol$	CO 转化率	时间/min
650	4	2	1.6		6
900	3	2		$\frac{1}{3}$	3

①该反应的正反应为_____ (填“放热”或“吸热”) 反应。

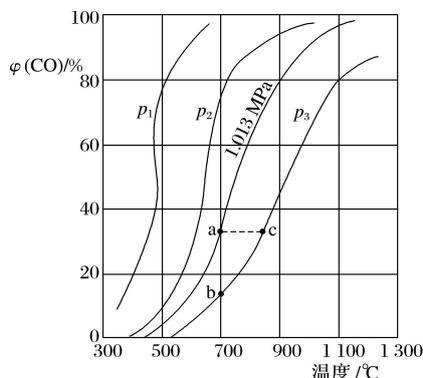
②900 $^{\circ}C$ 时, 0~3 min 内反应的平均速率 $v(H_2O) =$ _____, 达到平衡时 $c(H_2) =$ _____ (保留 2 位小数)。

(3) 利用废弃的 H_2S 的热分解可生产 H_2 : $2H_2S(g) \rightleftharpoons 2H_2(g) + S_2(g)$ 。现将 0.20 mol $H_2S(g)$ 通入某恒压 (压强 $p = a$ MPa) 密闭容器中, 在不同温度下测得 H_2S 的平衡转化率如图所示:



已知: 对于气相反应, 用某组分 (B) 的平衡压强 (p_B) 代替物质的量浓度 (c_B) 也可表示平衡常数。温度为 $T_4^{\circ}C$ 时, 该反应的平衡常数 $K_p =$ _____ (用含 a 的代数式表示)。

12. (2018 · 太原诊断) 合成氨工业涉及固体燃料的气化, 需要研究 CO_2 与 CO 之间的转化。为了弄清其规律, 让一定量的 CO_2 与足量碳在体积可变的密闭容器中反应 $C(s) + CO_2(g) \rightleftharpoons 2CO(g) \quad \Delta H$, 测得压强、温度对 CO、 CO_2 的平衡组成的影响如图所示:



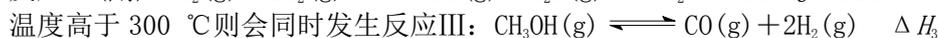
回答下列问题:

(1) p_1 、 p_2 、 p_3 的大小关系是 _____, 欲提高 C 与 CO_2 反应中 CO_2 的平衡转化率, 应采取的措施为 _____。图中 a、b、c 三点对应的平衡常数大小关系是 _____。

(2) 900 $^{\circ}C$ 、1.013 MPa 时, 1 mol CO_2 与足量碳反应达平衡后容器的体积为 V , CO_2 的转化率为 _____, 该反应的平衡常数 $K =$ _____。

(3) 将 (2) 中平衡体系温度降至 640 $^{\circ}C$, 压强降至 0.101 3 MPa, 重新达到平衡后 CO_2 的体积分数为 50%。条件改变时, 正反应和逆反应速率如何变化? _____, 二者之间有何关系? _____。

13. (2018 · 广东佛山质检) 甲醇水蒸气重整制氢 (SRM) 系统简单, 产物中 H_2 含量高、CO 含量低 (CO 会损坏燃料电池的交换膜), 是电动汽车氢氧燃料电池理想的氢源。反应如下:



(1) 计算反应 III 的 $\Delta H_3 =$ _____。

(2) 反应 I 能够自发进行的原因是 _____, 升温有利于提高 CH_3OH 转化率, 但也存在一个明显的缺点是 _____。

习题答案

$$1. v(\text{HCl}) = 2v(\text{Cl}_2) = 2 \times \frac{\Delta n_{\text{Cl}_2}}{\Delta t} = \frac{2 \times (5.4 - 1.8) \times 10^{-3} \text{ mol}}{6.0 - 2.0 \text{ min}} = 1.8 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{min}^{-1}.$$

$$2. (1) 0.016 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} (2) \frac{p_0}{30}$$

$$3. 2.5 \quad 2.8 \times 10^{-3}$$

$$4. \frac{4y^3}{x-y^2}$$

$$5. (1) K_2 \cdot K_3 = K_1^2 \quad (2) \textcircled{1} 0.1 \quad \textcircled{2} 2 \quad \textcircled{3} 50\% \quad (3) \textcircled{1} < \quad \textcircled{2} 40\% \quad \textcircled{3} K_b = \frac{5}{p}$$

$$6. (1) 3 \quad \text{小于}$$

$$(2) \text{B} \quad \frac{7}{3} \quad \text{小于} \quad \text{该反应是放热反应, 升高温度平衡向逆反应方向移动}$$

$$7. (1) < \quad T_2 \text{ 大于 } T_1, \text{ 温度升高, 平衡转化率降低, 说明正反应是放热反应}$$

$$(2) > \quad \text{小于}$$

$$(3) 16 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$8. (1) 2.5 \quad 2.8 \times 10^{-3} \quad (2) > \quad > \quad (3) \text{B}$$

$$9. (1) p_1 < p_2 < p_3 \quad \text{升高温度、降低压强} \quad K_a = K_b < K_c \quad (2) 66.7\% \quad \frac{16}{3V}$$

$$10. (1) \textcircled{1} \text{A} \quad \textcircled{2} 4 \quad (2) \text{CaSO}_4 + 4\text{CO} \rightleftharpoons \text{CaS} + 4\text{CO}_2 \quad 1.0 \times 10^{-4} \quad 0.32a$$

$$11. (1) \text{I} \quad \text{该反应为放热反应, 温度升高, 平衡逆向移动}$$

$$(2) \textcircled{1} \text{放热} \quad \textcircled{2} 0.17 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \quad 0.50 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$(3) \frac{2a}{27} \text{ MPa}$$

$$12. (1) p_1 < p_2 < p_3 \quad \text{升高温度、减小压强} \quad K_a = K_b < K_c$$

$$(2) 66.7\% \quad \frac{16}{3V}$$

$$(3) \text{正反应和逆反应速率均减小} \quad v_{\text{正}} < v_{\text{逆}}$$

$$13. (1) +90 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \quad (2) \text{反应 I 为熵增加的反应} \quad \text{CO 含量升高, 破坏燃料电池的交换膜}$$