

多钒酸铵沉淀工艺及动力学行为研究

吴 优

(攀钢集团研究院有限公司 四川 攀枝花 617000)

摘 要:研究了多钒酸铵沉钒最佳工艺条件。结果表明,多钒酸铵的最佳沉淀条件为:焙烧浸出钒液的钒浓度控制在 32~40 g/L,沉淀剂加入系数为 0.8~1.2,加酸前温度大于 65 °C,沉钒 pH 为 1.7~2.1,93 °C 左右的沸腾温度条件下沉淀时间为 52~60 min,在最佳铵盐沉钒条件下的沉钒率可超过 99%。根据最优条件下的多钒酸铵沉淀工艺,研究了多钒酸铵的沉钒动力学行为,利用 Avrami 结晶动力学方程对沉钒过程进行描述,其表观活化能 $E_a = 35.87$ kJ/mol,指前因子 $A = 5.42 \times 10^{20} \text{ min}^{-1}$ 。

关键词: V_2O_5 ; 多钒酸铵; 沉钒; 动力学; 结晶; 铵盐沉钒

中图分类号:TF841.3 文献标志码:A 文章编号:1004-7638(2018)06-0018-07

DOI:10.7513/j.issn.1004-7638.2018.06.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Research on Precipitation Process and Dynamics Behaviors of Ammonium Polyvanadate

Wu You

(Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: The precipitation process of ammonium polyvanadate was studied in this paper. At the optimum conditions of 32~40 g/L for vanadium concentration in the solution by roasting-leaching process, 0.8~1.2 of precipitant addition coefficient, above 65 °C of temperature before the acid addition, 1.7~2.1 of precipitation pH and about 93 °C of boiling temperature for 52~60 min, a precipitation rate of vanadium over 99% can be achieved. Furthermore, the kinetics behaviors for precipitation of ammonium polyvanadate were investigated at the optimum conditions. The precipitation process of ammonium polyvanadate can be described by Avrami crystallization kinetics equation, with the apparent activation energy $E_a = 35.87$ kJ/mol and the pre-exponential factor $A = 5.42 \times 10^{20} \text{ min}^{-1}$, respectively.

Key words: V_2O_5 , ammonium polyvanadate, vanadium precipitation, kinetics, crystallization, vanadium precipitation with ammonium salts

0 引言

钒因具有高强度、高硬度等物理性质,广泛应用于冶金、化工、医药、能源、环保、航空航天等领域。从应用领域占比看,全世界大约有 85% 的金属钒以钒铁的形式用于钢铁行业,约 5%~10% 的金属钒以钒铝中间合金的形式用于钛合金,剩余部分则应用

于化工及其他行业^[1-3]。目前,全球可用于提钒的原料品种众多,比如高品位钒钛磁铁矿、钒渣、含钒碳质页岩(或石煤)、含钒磷铁、钾钒铀矿、石油烧渣、钒铅矿以及废催化剂等,但 80% 以上钒产品的生产原料来自于钒钛磁铁矿。为了将含钒溶液中的目标元素钒与 Na^+ 、 Cl^- 等杂质分离,并形成一种易于进一步处理的物质,需采用合适的沉钒工艺。根据沉

淀剂的不同,可将沉钒工艺分为钙盐沉钒法、铁盐沉钒法、铵盐沉钒法和水解沉钒法^[4-8]。其中,铵盐沉钒法中的酸性铵盐沉淀法凭借药剂消耗少、沉钒流程短且沉钒率高的优势,目前被德国、南非等国的钒厂、我国的攀钢以及大多数钒厂广泛使用。

在以钒钛磁铁矿为提钒原料的基础上,为研究如何提高铵盐沉钒率并尽可能减少新生杂质对后续产品带来影响的问题,笔者拟通过单因素试验得到多钒酸铵从钒溶液中析出的最佳条件,并在该条件下对沉钒过程的动力学行为进行描述,以期进一步探究沉钒机理,找出沉钒过程的限制性环节,从而最大限度地促进沉钒反应的进行。

1 试验

1.1 试验原料与设备

实验室试验所用钒液系在攀钢生产现场取得的钒渣,经焙烧、浸出(已控制了 P 的析出)后所得,该钒液的主要成分见表 1。试剂为硫酸铵、浓硫酸,规格为分析纯。

表 1 实验室钒液主要成分
Table 1 Main components of laboratorial vanadium solution $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$

V	P	TFe	SiO ₂
20.19	0.019	0.019	0.216

1.2 试验方法

1) 试验流程

① 溶液净化:用精密过滤器/滤纸过滤经浸出后的钒液,除去浸出液中存有的极细微粒(浸出残渣)及胶状悬浮物;

② 预调酸:用浓硫酸将净化后的含钒合格溶液 pH 值进行预调节,一般将 pH 值调节至 5.0~5.5;

③ 溶解铵盐:根据经预调酸的含钒合格溶液中钒浓度及其溶液体积(实验室用 mL 计),在搅拌条件下加入一定量的粉末硫酸铵;

④ 调酸、加热沉淀:在 350 r/min 的搅拌条件下,向已溶解铵盐的溶液中加入浓硫酸,将溶液 pH 值调节至 1.5~2.5,并加热到指定温度区间进行多钒酸铵沉淀;

⑤ 静置沉降—液固分离—水洗—烘干:沉淀后的料浆经液固分离后,得一定量的上层液,送样分析,计算沉钒率;同时用一定量的自来水分 3~5 次对多钒酸铵产品进行水洗,洗涤后的多钒酸铵经烘

干后,对其堆密度进行测量。所得的多钒酸铵产品经煅烧脱铵后得粉状五氧化二钒,计量上层液体积并分析 TV 浓度后计算沉钒率,送样分析其成分。

2) 计算公式

多钒酸铵沉淀率计算公式:

$$\eta = \frac{C_1 V_1 - C_2 V_2}{C_1 V_1} \times 100\% \quad (1)$$

其中 C_1 、 V_1 ——沉钒液的 TV 浓度和体积;

C_2 、 V_2 ——上层液的 TV 浓度和体积。

沉淀剂铵盐的加入系数 K 计算公式:

$$K = \frac{\text{沉淀剂铵盐加入量}}{\text{沉钒液中的 TV 总量}} \quad (2)$$

产品 APV 的堆密度计算公式:

$$\rho = \frac{\text{APV 重量 (g)}}{\text{量筒内 APV 堆积体积 (cm}^3\text{)}} \quad (3)$$

2 结果与讨论

2.1 钒浓度对沉钒率的影响

钒浓度与沉钒率和沉钒上层液的关系见图 1。其它条件:一次性加铵系数 $K=1.2$,加酸前温度(T) = 16 °C,沉淀 pH = 2.1,沸腾沉淀,搅拌速度 380 r/min 沉淀 25 min,再以 220 r/min 转速沉淀 25 min。

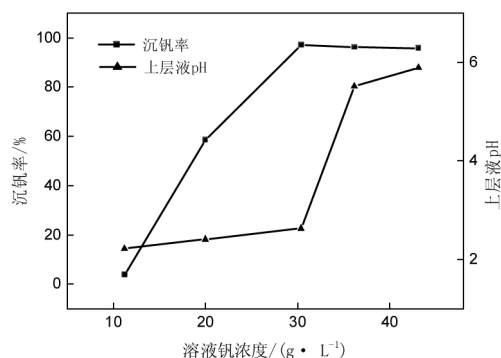


图 1 溶液钒浓度对沉钒率和上层液 pH 的影响

Fig.1 Effect of vanadium concentration on precipitation rate of vanadium and pH of supernatant

由图 1 可知,溶液的沉钒率随钒浓度升高而增大,到一定数值后又缓慢降低;而上层液的 pH 值在溶液钒浓度超过 32.41 g/L 时上升十分明显。为提高沉钒效率,酸性浸出液的钒浓度可以控制在 32~40 g/L,但在沉淀过程中需跟踪上层液的 pH,若上层液 pH 值超过正常水平 2.5 左右时,则需二次补酸。

后再沉淀即可。

2.2 加铵系数对沉钒率的影响

加铵系数与产品 APV 的堆密度、沉钒率的关系如图 2 所示。其它条件: V 浓度 32.41 g/L, 加酸前温度(T) = 16 °C, 沉淀 pH=2.1, 沸腾沉淀, 搅拌速度 380 r/min, 沉淀 25 min, 再以 220 r/min 转速沉淀 25 min。

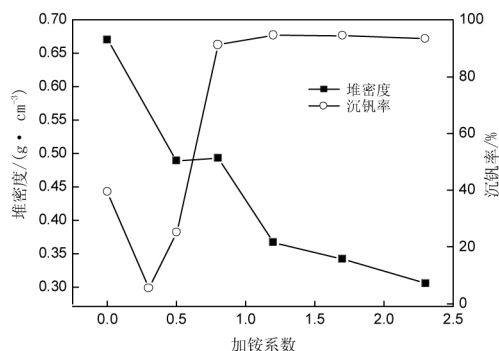


图 2 加铵系数与产品堆密度及沉钒率的关系

Fig.2 Effect of ammonium addition coefficient on bulk density of products and precipitation rate of vanadium

由图 2 可知, 沉钒率随加铵系数的增加而增加(除水解沉钒外), 当加铵系数大于 0.8 时, 沉钒率变化不大。因为在加铵系数为 0.8 左右时, 已趋于动态平衡, 再增加铵盐对沉钒率贡献较小; 但溶液中多余的 NH_4^+ 会逐渐置换出多钒酸盐沉淀物中阳离子, 所以产品质量随加铵系数的增加而提高。产品堆密度随着加铵系数的增加而逐渐下降, 这由于当加铵系数较低时, 反应物浓度低, 沉淀成核速度较高加铵量的慢, 有利于晶核有序生长, 其产品堆密度较大。因此, 浸出钒液沉淀时加铵系数的最优范围为 0.8 ~ 1.2。

2.3 搅拌速度对沉钒率的影响

搅拌强度与产品 APV 的堆密度、沉钒率的关系如图 3 所示。其它条件: V 浓度 32.41 g/L, 加铵系数 $K=1.2$, 加酸前温度(T) = 16 °C, 沉淀 pH=2.1, 沸腾沉淀, 沉淀时间 50 min。

由图 3 可知, 沉钒率随着搅拌强度的增加而略有降低, 这是因为搅拌过快, 容易打碎已生长的晶核颗粒, 使其比表面积增加, 多钒酸铵的溶解度也相应地增加, 造成了多钒酸铵的沉淀率略有下降。产品 APV 的堆密度随搅拌强度的增加而先增后降。如果沉钒过程在慢速搅拌下进行, 会导致溶液中晶核分布不均, 在慢速搅拌条件下的沉钒所得多钒酸铵

颗粒明显较大, 导致产品的堆密度降低。如果沉钒过程在快速搅拌下完成, 则会使已经形成的多钒酸铵晶核颗粒被再次打碎, 进而阻断了该晶核颗粒的继续生长, 最终也会降低产品的堆密度。因此, 控制浸出钒液沉淀过程的搅拌速度为 380 r/min。

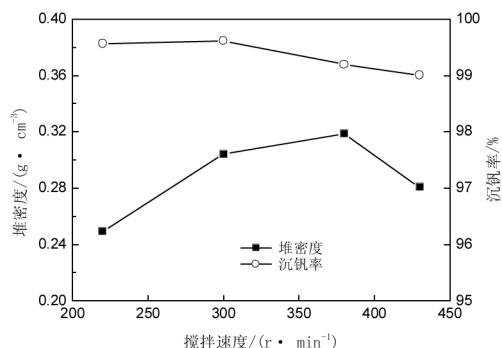


图 3 搅拌强度与产品堆密度及沉钒率的关系

Fig.3 Effect of stirring intensity on bulk density of products and precipitation rate of vanadium

2.4 沉淀 pH 值对沉钒率的影响

沉淀 pH 值与产品 APV 的堆密度、沉钒率的关系如图 4 所示。其它条件: V 浓度 32.41 g/L, 加铵系数 $K=1.2$, 加酸前温度(T) = 16 °C, 沸腾沉淀, 搅拌速度 380 r/min, 沉淀 25 min, 再以 220 r/min 转速沉淀 25 min。

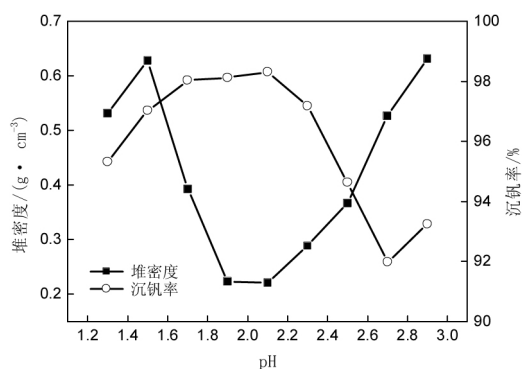


图 4 沉淀 pH 与产品堆密度及沉钒率的关系

Fig.4 Effect of precipitation pH on bulk density of products and precipitation rate of vanadium

由图 4 可知, 在试验 pH 范围内, 沉钒率随着沉钒 pH 的升高而先增加后降低, 当 pH=2.1 时, 沉钒率达最高, 为 98.31%。这主要是因为, 在较低 pH 值时, 在高温沉淀过程中会析出水聚五氧化二钒沉淀, 由于它的溶解度较多钒酸铵的大, 所以其上层液 V 浓度

高, 沉钒率相对较低。而当 $\text{pH} > 2.1$ 时, 沉钒率却随 pH 值的上升而下降, 这是由于随着 pH 值的上升, 多钒酸根离子与 NH_4^+ 结合能力变弱, 而易于与其它高价阳离子结合。同样, 由于多钒酸根的杂质沉淀物溶解度较多钒酸铵小, 故其转浸率有所下降。

产品 APV 的堆密度却随着沉钒 pH 的升高而先降低后增加, 在 $\text{pH} = 1.9 \sim 2.1$ 达最低, 为 0.23 g/cm^3 , 这恰恰与沉钒率的变化规律相反。因为在 $\text{pH} = 1.9 \sim 2.1$ 范围内沉淀时, 主要产物为较单一的多钒酸铵沉淀, 在成核过程中, 其属于初级均相成核类型, 由于反应物浓度达到一定程度后, 在第二介稳区或不稳区大量成核, 导致其细微颗粒增加, 产品堆密度下降。而在较低或较高 pH 条件下, 由于沉淀产物种类较多, 部分沉淀先成核, 而又成为后续沉淀的晶核颗粒, 供其进一步长大, 减缓了集中大量成核速度, 所以其产品堆密度较高。

考虑到产品中 V_2O_5 含量随着 pH 的升高而有所下降, 控制沉淀 $\text{pH} = 1.7 \sim 2.1$ 。

2.5 加酸前温度对沉钒率的影响

酸浸钒液的沉淀加酸前温度与产品 APV 的堆密度、沉钒率的关系如图 5 所示。其它条件: V 浓度 32.41 g/L , 一次性加铵系数 $K = 1.2$, 沉淀 $\text{pH} = 2.1$, 沸腾沉淀, 搅拌速度 380 r/min , 沉淀 25 min , 再以 220 r/min 的转速沉淀 25 min 。

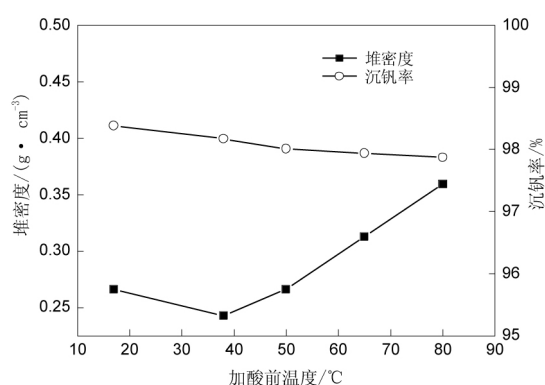


图 5 加酸前温度与产品堆密度及沉钒率的关系

Fig.5 Effect of temperature before acid addition on bulk density of products and precipitation rate of vanadium

由图 5 可知, 沉钒率随加酸前温度的升高而稍有降低, 而多钒酸铵的堆密度却随加酸前温度的升高而呈现出明显的增长, 相对应的沉钒上层液 pH 值逐渐变小。

通过试验发现, 不同加酸前温度也会影响沉钒

过程的 pH 值, 故在相同 pH 值条件下对水和酸性钒液的 pH 值随温度的变化关系进行了测定。溶液 pH 值随温度的变化情况见表 2。

表 2 溶液 pH 值随温度的变化情况
Table 2 Variation of solution pH with temperature

温度/°C	钒液降温 pH	钒液升温 pH	水升温 pH
18	1.70	2.12	2.20
38	1.79	2.43	2.26
50	1.92	2.55	2.31
60	2.07	2.67	2.35
70	2.21	2.79	2.33
80	2.30	2.85	2.28

由表 2 可知, 同种钒溶液的 pH 随温度的升高而变大, 即溶液中的多钒酸根离子随温度升高的过程中可能会存在一个吸氢转化的过程, 推测可能从 $\text{H}_2\text{V}_{10}\text{O}_{28}^{4-}$ 聚合离子与氢离子反应生成高温下的 $\text{H}_4\text{V}_{10}\text{O}_{28}^{2-}$ 聚合离子或是 $\text{H}_6\text{V}_{10}\text{O}_{28}$ 聚合分子。煅烧后粉钒中 V_2O_5 含量随加酸前温度的升高而略有下降。

考虑到提高沉淀加酸前的温度对产品的堆密度影响较大, 控制酸浸钒液沉淀加酸前的温度在 65°C 以上。

2.6 沉淀时间对沉钒率的影响

沉淀时间与产品 APV 的堆密度、沉钒率的关系如图 6 所示。其它条件: V 浓度 32.41 g/L , 加铵系数 $K = 1.2$, 加酸前温度 (T) $= 16^\circ\text{C}$, 沉淀 $\text{pH} = 2.1$, 沸腾沉淀, 搅拌速度 380 r/min , 沉淀 25 min , 再以 220 r/min 的转速沉淀 25 min 。

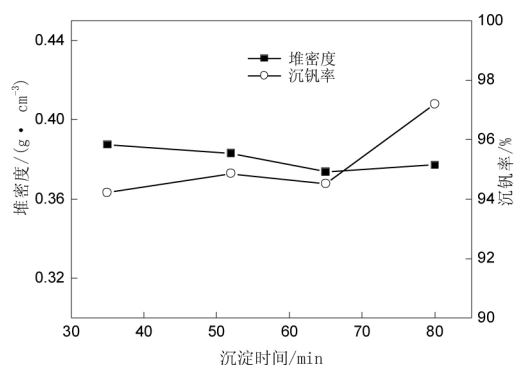


图 6 沉淀时间与产品堆密度及沉钒率的关系

Fig.6 Effect of precipitation time on bulk density of products and precipitation rate of vanadium

由图 6 可知, 沉钒率随沉淀时间的增加而升高,

这是因为酸性沉钒的过程也是 NH_4^+ 置换多钒酸盐中其它阳离子的过程。由于 APV 的溶解度相对其它多钒酸盐小, 随沉淀时间的延长, 置换也越彻底相应地沉钒率也就越高; 而产品 APV 堆密度却随着沉淀时间的增加而降低, 因为沉钒过程大部分在前 35 min 已完成, 随着沉淀时间的延长, 会使已形成 APV 颗粒在搅拌过程中破碎, 以致堆密度变小, 应将浸出钒液沉淀时间控制在 52~60 min。

2.7 沉淀温度对沉钒率的影响

沉淀温度与对沉钒率的影响关系见表 3。其它条件: V 浓度 32.41 g/L, 加钼系数 $K=1.2$, 加酸前温度 (T) = 16 °C, 沉淀 pH = 2.1, 搅拌速度 = 380 r/min, 沉淀 25 min, 再以 220 r/min 转速沉淀 25 min。

从表 3 可以看出, 沉淀温度小于 80 °C 时, 在正常的沉钒条件下, 沉钒率最高也仅为 46.54%, 说明低温不能为多钒酸铵的沉淀创造有利的热力学和动力学条件, 所以沉钒温度须保持在 96 °C 左右, 即沸腾状态。

表 3 沉淀温度与沉钒率的关系
Table 3 Relationship between temperature and precipitation rate of vanadium

沉淀温度/°C	沉钒率/%
96	99.20
90	98.83
80	46.54
70	1.40

2.8 最优条件试验

根据以上试验, 得出最优条件: 焙烧浸出钒液的钒浓度应该控制在 32~40 g/L, 沉淀剂的加入系数为 0.8~1.2, 加酸前温度大于 65 °C, 沉钒 pH 为 1.7~2.1, 93 °C 左右的沸腾温度条件下沉淀时间应为 52~60 min, 此条件下试验结果与产品质量指标如表 4 所示。

由表 4 可见, 在最优条件下试验所得 APV 的堆密度及产品质量均符合控制要求。

表 4 APV 堆密度及煅烧后粉钒成分分析
Table 4 Bulk density of APV and chemical compositions of product after calcination

	APV 的堆密度/ (g · cm ⁻³)	煅烧后粉钒的成分分析/%				
		V ₂ O ₅	P	TFe	Si	Ca
试验数据	0.83	98.87	0.01	0.055	0.054	0.042
控制指标	≥0.50	≥98	≤0.05	≥0.3	≥0.25	

3 多钒酸铵沉淀过程动力学行为研究

3.1 动力学模型建立

根据多钒酸根阴离子在沉钒过程中对碱金属盐的选择性顺序大致是 $\text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{H}^+$, 因此, 在上述最佳试验条件下的沉钒为铵盐沉钒。由于在该条件下的搅拌速率较高, 溶液中的主体扩散阻力很小, 这说明多钒酸铵的结晶过程中表面反应占据了主导地位。由在最佳沉淀条件下所得的多钒酸铵表征情况来看, 结晶形态属于球形和椭球形, 晶核为无规律分布。结晶动力学研究实际上是一个动态过程, 即建立结晶过程中时间与状态变量之间的关系。该沉钒过程的动力学过程可用 Avrami 动力学模型来描述, 该模型假设晶核为无规律分布, 且每个晶核形成一个晶粒。其方程式如下:

$$\varphi = 1 - \exp(-kt^n) \quad (4)$$

其中 φ 为时间 t 时结晶部分占样品重量的体积分数; k 为结晶速率常数; n 为 Avrami 指数, 与成核机理与

晶体生长方式相关的常数, 取值范围一般为 1~4。

在考虑各种情况 (二维晶核、三位晶核) 后, 可用下列算式来阐述结晶过程中非晶部分含量与结晶时间的关系:

$$1 - X(t) = \exp(-kt^n) \quad (5)$$

其中 t 为结晶时间; $X(t)$ 为 t 时间的结晶程度; k 为动力学速率常数; n 为 Avrami 指数。将公式 5 两边取对数, 可得:

$$\lg[-\ln(1 - X(t))] = n \lg t + \lg k \quad (6)$$

以等式左边 $\lg[-\ln(1 - X(t))]$ 对 $\lg t$ 作图, 可以得到直线。根据所得直线的斜率可以确定 Avrami 指数 n ; 截距可以确定结晶速率常数 k 。

根据最优条件组中划定的多钒酸铵沉淀温度要求, 选取 70、80、90、96 °C 四组数据, 采用 Avrami 方程对不同沉钒时间下的沉钒率进行拟合, 得到图 7。由图 7 可以看出, 在最佳沉淀时间范围内, 多钒酸铵结晶生长过程于 90~96 °C 时, 能由 Avrami 方程很好地描述, 这与在实验室最佳多钒酸铵沉淀条

件下得到的沸腾条件下沉钒率最佳的结论相吻合。

从各曲线的斜率和截距可计算出动力学参数, 见表 5。由表 5 可见, 随沉钒温度升高, 结晶速率常数 k 不断增长。随着温度的不断升高, 在 90、96 °C 时的 Avrami 指数 n 为 0.809 1、0.453 5, 这说明多钒酸铵的结晶过程开始向复杂状态转化。

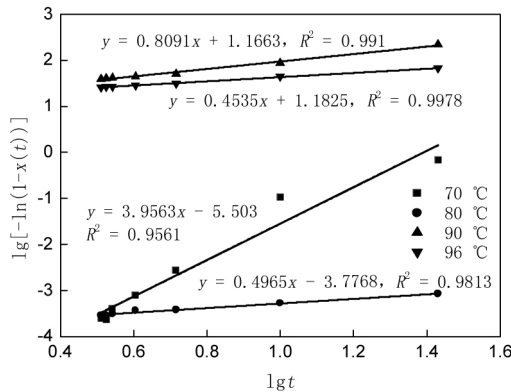


图 7 不同沉淀温度下 $\lg[-\ln(1-X(t))]$ 与 $\lg t$ 的关系
Fig.7 Relationship of $\lg[-\ln(1-X(t))]$ and $\lg t$ at different precipitation temperatures

表 5 不同温度下的动力学参数
Table 5 Kinetics parameters at different temperatures

温度/ °C	R^2	Avrami 指数 n	$\ln k$	结晶速率 常数 k
70	0.956 1	3.956 3	-12.671 1	0.000 003 140 51
80	0.981 3	0.496 5	-8.696 4	0.000 167 186
90	0.991 0	0.809 1	2.685 505	14.665 605 55
96	0.997 8	0.453 5	2.722 807	15.222 991 33

3.2 表观活化能的计算

通常情况下, 化学反应的表观活化能数值范围为 42 ~ 420 kJ/mol, 若表观活化能小于 42 kJ/mol 时, 化学反应十分快速; 若表观活化能大于 420 kJ/mol 时, 化学反应十分迟缓。

根据阿伦尼乌兹方程 $k = A \exp[-E_a/(RT)]$, 可以得出反应速率常数 k 与温度 T 的线性关系如式 (7) 所示:

$$\ln k = \ln A - E_a/(RT) \quad (7)$$

其中 k 是反应速率常数; A 是指前因子或频率因子, 为一常数; E_a 是反应表观活化能; R 是气体常数, 取

8.314; T 为反应温度。

根据公式 (7), $\ln A$ 和 $-E_a/R$ 均为常数, 是形如 $y = ax + b$ 的直线方程。其中, $y = \ln k$, $a = -E_a/R$, $x = 1/T$, $b = \ln A$ 。

结合采用 Avrami 方程对最优条件组中选取的 70、80、90、96 °C 四组温度条件对不同沉钒时间下的沉钒率数据, 将 $\ln k$ 与 T^{-1} 做图可以得到图 8, 显示为 $y = -4315x + 47.742$ 的直线。由图中拟合该直线的斜率 $-E_a/R$ 和截距 $\ln A$ 得出反应表观活化能 $E_a = 35.87$ kJ/mol, 指前因子 $A = 5.42 \times 10^{20} \text{ min}^{-1}$ 。

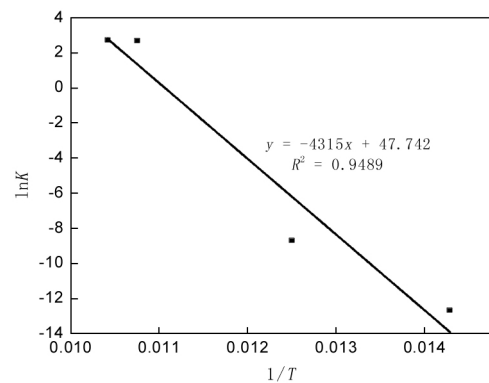


图 8 反应 $\ln k$ 与 $1/T$ 的关系
Fig.8 Relationship between $\ln k$ and $1/T$

4 结论

1) 试验结果表明, 钒浓度、加铵系数、沉钒 pH 值和沉淀温度对沉钒率和产品质量的影响较为显著。

2) 多钒酸铵的最佳沉淀条件为: 焙烧酸浸钒液的钒浓度应该控制在 32 ~ 40 g/L, 沉淀剂的加入系数 0.8 ~ 1.2, 加酸前温度大于 65 °C, 沉钒 pH 为 1.7 ~ 2.1, 93 °C 左右的沸腾温度条件下沉淀时间为 52 ~ 60 min, 在此条件下的沉钒率可超过 99%。

3) 通过沉钒动力学研究, 在 70 ~ 96 °C 条件下的多钒酸铵沉淀过程可由 Avrami 模型进行描述。随着温度的逐渐升高, 多钒酸铵的结晶速率常数 k 大致成增长态势, 最终的反应表观活化能 $E_a = 35.87$ kJ/mol, 指前因子 $A = 5.42 \times 10^{20} \text{ min}^{-1}$ 。

参考文献

- [1] Du Guangchao. Research progress of vanadium materials used in non-steel fields [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2015, 36

- (2): 49-56.
(杜光超.钒在非钢铁领域应用的研究进展[J].钢铁钒钛 2015 36(2): 49-56.)
- [2] Ren Xueyou. Application status and market prospect of vanadium metal [J]. World Nonferrous Metals 2004(2): 34-36.
(任学佑.金属钒的应用现状及市场前景[J].世界有色金属 2004(2): 34-36.)
- [3] Duan Lian ,Tian Qinghua ,Guo Xueyi. Review on production and utilization of vanadium resources in China [J]. Hunan Nonferrous Metals 2006 (6): 17-20.
(段炼,田庆华,郭学益.我国钒资源的生产及应用研究进展[J].湖南有色金属 2006 (6): 17-20.)
- [4] Li Dabiao. Experiment of acidic precipitation of vanadate-leaching solution [J]. The Chinese Journal of Process Engineering 2003 (1): 53-56.
(李大标.酸性铵盐沉钒条件实验研究[J].过程工程学报 2003 (1): 53-56.)
- [5] Tang Xianqing ,Li Ke. Study on efficient-low consumption green vanadium precipitation technology [J]. Ferro-alloys 2014 45 (6): 25-29.
(唐先庆,李科.高效低耗绿色沉钒技术实验研究[J].铁合金 2014 45(6): 25-29.)
- [6] Dai Wencan ,Sun Shuiyu. Research on new process of vanadium extraction from stone coal by wet leaching [J]. Hunan Nonferrous Metals 2009(3): 22-25.
(戴文灿,孙水裕.石煤湿法提钒新工艺研究[J].湖南有色金属 2009(3): 22-25.)
- [7] Ying Zhaoqian ,Guo Jike ,Chen Xiangquan *et al.* Study on vanadium precipitation from solution containing high concentration sodium vanadate by hydrolysis [J]. Iron Steel Vanadium Titanium 2015 36(3): 16-20.
(殷兆迁,郭继科,陈相全,等.钠化钒液水解沉钒的研究[J].钢铁钒钛 2015 36(3): 16-20.)
- [8] Zhao Shuangyan. Research on calcified technology of vanadium extraction from vanadium slag [D]. Shengyang: Northeastern University 2012.
(赵双艳.钒渣钙化提钒技术研究[D].沈阳:东北大学 2012.)

编辑 张继东

青海聚能钛业自主研制 EB 炉取得成功

2018 年 12 月 3 日,青海聚能钛业股份有限公司自主研制的 3 号电子束冷床熔炼炉(EB 炉),成功产出一根直径为 380 mm、重量为 1.5 t 的纯钛铸锭。该设备的投产,标志着聚能钛业具备了通过“EB+VAR”熔炼工艺路线生产高品质、高稳定性钛合金的能力,也表明该公司 EB 炉成套设备国产化项目取得预期成果。

聚能钛业是青海水电集团子公司,系省属唯一一家专业从事钛及钛合金研发、生产、加工和销售的企业。公司分别从美国和乌克兰引进两台大型 EB 炉,设备技术水平居国际先进水平。在此基础上,通过近年来的自主创新,又研制出熔炼功率为 1 350 kW 的第三台小型 EB 炉,打破了国外企业的技术垄断。目前,聚能钛业 EB 炉设备总装功率为 9 300 kW、设计年最大产能 12 100 t、单锭最大重量 20 t,三项指标位居全国 EB 炉熔铸行业之首。

据了解,3 号 EB 炉也是聚能钛业承接工业转型升级强基工程项目——新型耐 650 ℃ 以上高温钛合金材料试生产线建设的核心熔炼设备。其炉体加工制作、真空系统配套等均由聚能钛业自主完成,特别是该 EB 炉核心部件——“电子枪”与“大功率高频高压直流电源”,均为聚能钛业通过近几年不断攻坚克难突破核心技术瓶颈后研制的国产设备。

<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1618701061317865042&wfr=spider&for=pc>