



铝灰渣中 AlN 水解行为及其多元非线性回归分析

吕帅帅, 倪威, 倪红军, 朱杨杨

(南通大学 机械工程学院, 南通 226019)

摘 要: 通过对铝灰渣水解反应过程中组分及其含量变化的研究, 提出铝灰渣中 AlN 含量的修正公式; 根据 AlN 含量和悬浊液 pH 值的测定, 考察时间、温度、转速等水解参数对 AlN 水解速率的影响并对其进行多元非线性回归分析。结果表明: 升高温度能降低铝灰渣中 AlN 含量并降低悬浊液 pH 值; 延长可有效促进 AlN 的水解, 同时在 2 h 内悬浊液 pH 值迅速提升至高位; 转速对 AlN 水解速率和悬浊液 pH 值无明显影响。总体而言, AlN 含量比悬浊液 pH 值更能客观表征铝灰渣中 AlN 水解速率。对水解参数及修正后铝灰渣中 AlN 含量进行多元非线性回归分析并二次简化, 发现理论值与实验值相对误差 $\leq \pm 8.65\%$ 。

关键词: 铝灰渣; AlN; 水解; 多元非线性回归分析; 温度; 转速; 时间

文章编号: 1004-0609(2020)-04-0920-07

中图分类号: TF09

文献标志码: A

铝灰渣是铝生产过程中产生的一种废渣, 主要来源于熔炼时漂浮于铝熔体表面的不熔夹杂物、氧化物及各类添加剂^[1-2]。据估计, 每生产 1000 t 原铝约产生 25~50 t 铝灰渣, 按我国 2018 年原铝产量 3365.9 万 t 推算, 仅当年产生的铝灰渣就高达 80~170 万 t 左右。

截至目前, 对铝灰渣进行大规模有效利用的技术只有“炒铝”一种, 即提取铝灰渣中的单质铝以获取一定的经济利益, 剩余铝灰渣在工业净水剂、耐火材料和路基材料等方面得到一定开发与利用^[3-6]。然而, 约 95% 铝灰渣仍无法得到有效利用, 通常被归为固体废弃物进行堆积、填埋处理, 污染并占用了大量土地资源。铝灰渣中除 Al、Al₂O₃ 等相外还含有大量 AlN, 遇水极易发生水解并释放出大量强烈刺鼻性气味^[7-8]。但是, 在铝灰渣处理过程中往往忽视 AlN 的存在, 不仅给产品造成材料性能不稳定、溶液 pH 值变化等严重后果, 还为生态环境和人员健康带来了极大困扰。

为有效解决铝灰渣含氮问题, 众多科研人员进行了大量研究。徐林伟等^[9]提出通过水解过程中 pH 值表征 AlN 的水解程度, 发现随着温度的升高、粒度的减小, AlN 水解明显加快。FUKUMOTO 等^[10]研究了不

同酸性体系下 AlN 粉末的水解行为, 发现 H₃PO₄ 对 AlN 粉末的水解具有阻碍作用, 且大于 77℃ 条件下产物以 AlOOH 为主, 小于 77℃ 条件下产物以 Al(OH)₃ 为主。姜澜等^[11]研究表明, 铝灰渣中 AlN 水解过程中 pH 值随温度和时间增加而变大, 水解程度逐渐增加, 在 373 K 条件下水解 24 h 后, 铝灰渣中 AlN 几乎全部转为 Al(OH)₃。LI 等^[12]对铝灰渣水解体系中的 pH 值及 NH₃-N 浓度进行对比, 结果显示当 pH 值上升到稳定阶段时, 溶液中 NH₃-N 的浓度仍不断上升, 说明 pH 值表征法在铝灰渣水解速率表征方面的应用是不科学的; 同时指出, 铝灰渣中 AlN 水解后最终形成 Al(OH)₃ 相。周长祥等^[13]通过蒸馏分离-中和滴定法研究表明, 温度与时间能明显加速铝灰渣中 AlN 的分解。

由此可见, 在铝灰渣水解速率的表征方法及产物类型的研究中出现一定分歧。

本文对铝灰渣中 AlN 水解时温度、时间、转速等参数进行系统性分析, 并探求 pH 值及 AlN 含量表征方式的合理性; 同时, 在大量实验数据的基础上, 对各水解参数及修正后铝灰渣中 AlN 含量进行多元非线性回归分析, 以达到预测、控制铝灰渣中 AlN 的目的。

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目((2018) 87); 江苏省重点研发计划项目(BE2018093); 江苏省墙体材料革新科研项目(201702, 201703); 南通市应用研究计划资助项目(JC2018115, JCZ18024)

收稿日期: 2019-05-20; **修订日期:** 2019-11-19

通信作者: 倪红军, 教授, 博士; 电话: 15962957962; E-mail: 949215056@qq.com

1 实验

1.1 原料及预处理

实验铝灰渣来源于江苏海光金属有限公司,具体为提取单质铝后的铝灰渣,经预处理后进行分析测试与实验研究。预处理过程为:用低目数标准筛对铝灰渣进行初筛并去除大块金属铝,剩余部分进行研磨、均匀化处理,用高目数标准筛进行筛分,取筛下物作为实验原料。经XRD分析结果验证,本实验用原料主要成分为Al、Al₂O₃及AlN。

1.2 实验试剂及仪器

NaOH、盐酸皆为分析纯;甲基红、次甲基蓝皆为指示剂;硼酸,化学纯;超纯水机,EPED-10TH;万用电炉,DK-98-II;数显搅拌器,JB60-SH;水浴箱,WB-4;电热恒温鼓风干燥箱,101A-2。

1.3 测试方法

1.3.1 悬浊液pH值

对酸度计进行标定,向玻璃反应釜加入500 mL去离子水并在一定温度条件下水浴加热;向反应釜内加入125 g铝灰渣,在某转速条件下搅拌;固定时间段后停止搅拌,适当加入少许去离子水以保证固液比不变,开机搅拌并用酸度计检测悬浊液pH值。重复上述步骤。

1.3.2 铝灰渣中AlN含量

1) 测量过程

称量2 g铝灰渣,加入装有150 mL、20% NaOH溶液的锥形瓶中,迅速盖紧瓶塞;对其加热并保持沸腾状态2 h左右进行蒸馏,并用200 mL、40 g/L的硼酸溶液吸收蒸馏出的氨气;蒸馏结束后,以标准甲基红—次甲基蓝作为指示剂,用0.05 mol/L的稀盐酸溶液进行滴定,溶液由蓝色突变为紫红色为滴定终点^[14]。按上述步骤做空白实验。

2) 结果计算

通过消耗的盐酸相对体积计算AlN含量:

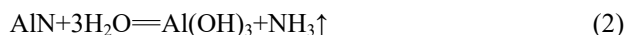
$$Z = \frac{0.041c(V_2 - V_1)}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中: c 为稀盐酸浓度, mol/L; V_2 为滴定过程中消耗的稀盐酸体积, mL; V_1 为空白实验消耗的稀盐酸体积, mL; M 为试样质量, g; Z 为直接测得的铝灰渣中AlN含量, %。

2 结果与讨论

2.1 热力学模型

通过对产物进行XRD分析,可确定铝灰渣中AlN水解反应式为



不同温度下反应(2)的吉布斯自由能 $\Delta G^\ominus$ 如下:

$$\Delta G^\ominus = \sum v_i (\Delta_f H_i^\ominus + \int_{298}^T c_p dT) - T \sum v_i (S_{298}^\ominus + \int_0^{298} c_p d \ln T + \sum \frac{\Delta H_i^t}{T}) \quad (3)$$

式中: v_i 为 i 物质的化学计量数, 无量纲; $H_i^\ominus$ 为 i 物质在温度 T 条件下的焓, kJ/mol; $\Delta_f H_i^\ominus$ 为 i 物质标准摩尔生成焓, kJ/mol; c_p 为等压热容, J/(kg·K); $S_i^\ominus$ 为 i 物质在温度 T 条件下的熵, kJ/mol。参与式(3)反应的各项物质热力学参数如表1所列。

由相关文献可知^[12], 温度范围在298~373 K间, $S_i^\ominus(T)$ 的变化幅度不大, 通常采用298 K的熵来近似处理。经计算, 不同温度条件下的 $\Delta G^\ominus$ 数值如表2所列。

由表2可知, 标准摩尔生成自由能变在298~373 K的温度范围内数值均为负, 说明铝灰渣中AlN水解反应从热力学角度上而言可自发进行, 且在25℃甚至更低温度下也可发生水解反应。

表1 各物质的热力学参数

Table 1 Thermodynamic parameters of each substance

Component	$c_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$H_{298}^\ominus/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$S_{298}^\ominus/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
AlN	$32.267 + 22.686 \times 10^{-3}T - 7.904 \times 105T^{-2}$	-317.98	20.15
H ₂ O	$29.999 + 10.711 \times 10^{-3}T + 0.335 \times 105T^{-2}$	-241.81	188.72
Al(OH) ₃	$30.602 + 209.786 \times 10^{-3}T$	-1284.49	71.13
NH ₃	$25.794 + 31.623 \times 10^{-3}T + 0.351 \times 105T^{-2}$	-45.94	192.67

表2 不同温度条件下 $\Delta G^\ominus$ 与 T 的关系Table 2 Relations between $\Delta G^\ominus$ and T at different temperatures

T/K	$\Delta G^\ominus /(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$
298	-219.15
323	-211.05
348	-202.86
373	-194.59

2.2 不同水解条件对 AIN 含量的影响

2.2.1 AIN 含量的修正公式

在铝灰渣水解反应过程中, N 元素以 NH_3 形式分离, 并将元素位让给 OH^- 离子, 形成分子量为 78 的 $\text{Al}(\text{OH})_3$, 远大于分子量为 41 的 AIN。此外, 铝灰渣中除 Al 、 Al_2O_3 等难溶性物质外, 还有少量 NaCl 、 K_2CO_3 等可溶性盐^[15]。若直接以式(1)作为 AIN 含量, 既忽略了组分及含量的变化, 也无法精准表征铝灰渣中 AIN 量, 尤其在高氮铝灰渣的测量时误差更大。为解决该问题, 通过对式(2)水解过程的研究, 进行 AIN 含量 Z 的修正:

$$Z = \frac{KM - m}{M - Y + \frac{78}{41}m} \quad (4)$$

式中: K 为原始 AIN 含量, %; M 为原始样品质量, g; m 为水解过程中反应掉的 AIN 质量, g; Y 为水解后滤液中盐的质量, g。经实验验证可溶性盐含量 Y/M 为 3.52%。

$$Z_{\text{re}} = \frac{KM - m}{M} = K - \frac{m}{M} = \frac{78KZ + 41Z - \frac{41ZY}{M}}{78Z + 41} = \frac{78K + 41 - \frac{41Y}{M}}{78 + \frac{41}{Z}} \quad (5)$$

式中: Z_{re} 为修正后铝灰渣中 AIN 含量, %。

2.2.2 时间与转速对铝灰渣中 AIN 水解速率的影响

图1所示为 60 °C、不同转速条件下修正后铝灰渣中 AIN 含量变化趋势图。由图1可见, 无论是低转速(0 r/min、100 r/min、300 r/min)还是高转速(600 r/min 和 1000 r/min)状态下的机械搅拌, 修正后铝灰渣中 AIN 含量变化趋势基本一致, 且各时间点的修正后铝灰渣中 AIN 含量值相差不大, 说明转速对铝灰渣水解速率无显著影响。且在此水解条件下, 经过 24 h 水解反应后修正后铝灰渣中 AIN 含量大约降低一半, 由原始的 12.7% 降至 5.7%~7.0%。更为明显地, 在 0~4 h 阶段, 修正后铝灰渣中 AIN 含量由最初的 12.7% 大幅

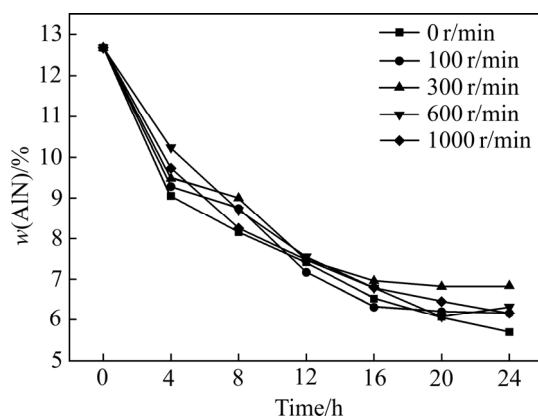


图1 60 °C时不同转速条件下修正后铝灰渣中 AIN 含量

Fig. 1 Modified content of AIN in aluminum dross under different rotational speed at 60 °C

减小至 9.0%~10.2%, 其下降幅度远超其他反应时间段; 随着水解时间的延长, 铝灰渣水解速率逐渐放缓, 20 h 后铝灰渣中的 AIN 含量基本不变。

一方面, 在反应初期阶段铝灰渣颗粒度及其表面积较大, 与水接触的面积就相应较大, 在相同水解条件下参加水解反应的 AIN 则相对更多, 水解速率则更快; 另一方面, 水解反应产物 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 是一种难溶性白色胶状沉淀, 随着时间的延长, 该类产物及其附着物将逐渐堵塞铝灰渣颗粒表面孔隙, 阻碍 AIN 与水接触通道, 从而减缓铝灰渣水解速率。搅拌有利于铝灰渣颗粒悬浮于水解体系中, 防止铝灰渣在水解体系底部堆叠, 但在时间、温度相同的条件下, 转速基本不影响铝灰渣中 AIN 与水的接触面积, 对水解进程的影响也较小。

2.2.3 温度对铝灰渣中 AIN 水解速率的影响

图2所示为 600 r/min、不同温度条件下修正后铝灰渣中 AIN 含量变化趋势图。由图2可见, 随着水解

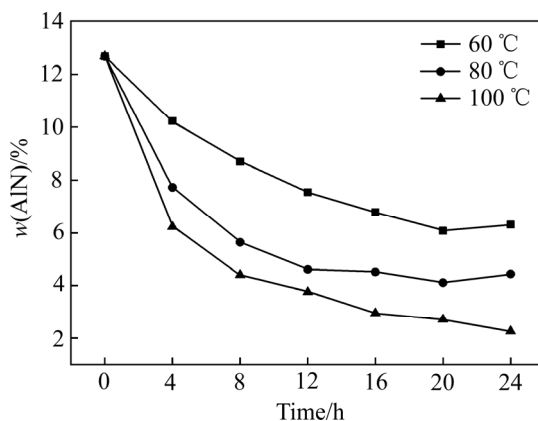


图2 600 r/min 转速时不同温度条件下修正后铝灰渣中 AIN 含量

Fig. 2 Modified content of AIN in aluminum dross under different temperatures and speeds at 600 r/min

温度的提高,在相同水解时间下,100℃的水解体系中修正后铝灰渣中AlN含量明显低于60℃和80℃。经过24 h水解后,100℃水解条件下修正后铝灰渣中AlN含量从原始的12.7%降至2.3%左右,且继续水解后已无明显氨味;80℃时下降至4.5%左右,继续水解后有少量氨味;而60℃时仅降至6.3%左右,对其继续水解后有明显气泡及氨味产生,说明60℃条件下水解进程远未结束。因此,温度的增加可有效促进铝灰渣中AlN的水解。

化学反应在不同温度下的反应速率也不同,温度对反应速率的影响主要表现为对反应速率系数的影响。根据阿伦尼乌斯公式得:

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = \frac{E_a}{R} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right) \quad (6)$$

式中: k 为反应速率系数,无量纲; E_a 为反应活化能,kJ/mol; T 为温度,K; R 为摩尔气体常数,J/(mol·K)。在两个不同温度的反应体系中,设在 $T_1 \sim T_2$ 区间内($T_1 < T_2$), E_a 可作为常量。由于反应活化能 $E_a > 0$ 、 $R > 0$,则 $k_2/k_1 > 1$,即高温状态下的反应速率系数一般大于低温状态下的反应速率系数。所以,增加温度有利于提高铝灰渣中AlN的水解速率。

2.3 不同水解条件对悬浊液pH值的影响

2.3.1 时间与转速对悬浊液pH值的影响

图3所示为60℃、不同转速条件下悬浊液pH值变化趋势图。由图3可见,在0~2 h的反应阶段,各转速条件下的悬浊液pH值急剧上升。随着反应时间的延长,在0 r/min、100 r/min的低转速条件下,悬浊液pH值显著大于300 r/min、600 r/min高转速条件下的悬浊液pH值。这是由于在相同条件下低转速状态

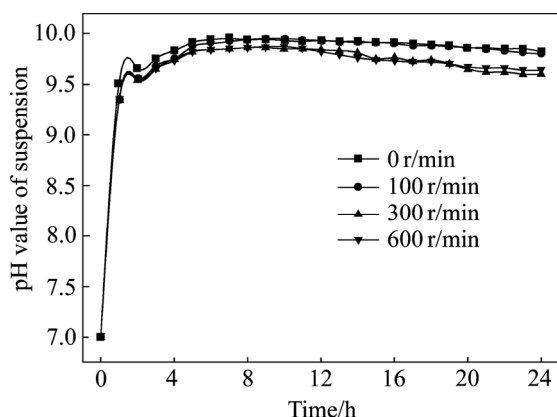


图3 60℃时不同转速条件下悬浊液pH值

Fig. 3 pH value of suspension at different rotational speeds and 60℃

有利于 NH_3 在悬浊液中的滞留,形成的 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 所电离出 OH^- 浓度更大,导致悬浊液pH值略高,但各转速对悬浊液pH值的影响不是特别明显。

2.3.2 温度对悬浊液pH值的影响

图4所示为300 r/min、不同温度条件下的悬浊液pH值变化趋势图。由图4可见,在0~2 h的反应阶段,各温度条件下的悬浊液pH值急剧上升。随着反应时间的延长,悬浮液的最大pH值可以在不同温度下保持一段时间。这是由于反应速率足以维持体系的饱和状态,随着反应速度的下降和氨气的缓释,悬浮液pH值缓慢减小。其中,60℃条件下悬浊液最大pH值较高,约9.8。100℃时最大pH值较低,仅9.0左右。

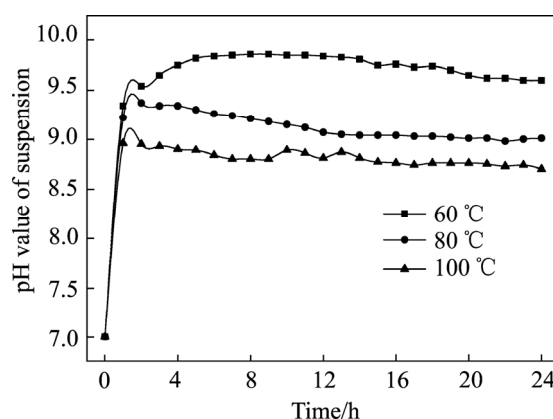


图4 300 r/min 转速时不同温度条件下悬浊液pH值

Fig. 4 pH value of suspension at different temperatures and 300 r/min

根据溶液pH值及溶液电离公式可得:

$$\text{pH} = -\lg[c(\text{H}^+)] = \lg \frac{\sqrt{K_1 \cdot c(\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O})}}{K_2 \cdot c(\text{H}_2\text{O})} \quad (7)$$

式中: K_1 为氨水的电离常数,无量纲; K_2 为水的电离常数,无量纲; $c(\text{H}^+)$ 为水中电离出的 H^+ 浓度, mol/L; $c(\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O})$ 为溶液中未电离的 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 浓度, mol/L; $c(\text{H}_2\text{O})$ 为溶液中未电离的 H_2O 浓度, mol/L。假设反应体系在氨浓度饱和阶段,体系中 $c(\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O})$ 、 $c(\text{H}_2\text{O})$ 值恒定,悬浊液pH值主要与氨水的电离常数 K_1 和水的电离常数 K_2 有关。又因为两项常数和温度 T 相关,结果基本呈非线性分布,所以悬浊液pH值的大小无法准确表征不同温度条件下的铝灰渣水解速率。

2.4 铝灰渣水解参数的多元非线性回归分析

基于上述实验,以温度、转速、时间为自变量、修正后氮化铝含量为因变量,参照相关文献^[8],展开三元二次多项式的非线性回归分析,多元非线性回归分析初步模型为

$$y = ax_1^2 + bx_2^2 + cx_3^2 + dx_1x_2x_3 + ex_1x_2 + fx_1x_3 + gx_2x_3 + hx_1 + ix_2 + jx_3 + k \tag{8}$$

式中： x_1 为铝灰渣水解温度， $^{\circ}\text{C}$ ； x_2 为铝灰渣水解转速， r/min ； x_3 为铝灰渣水解时间， h ； y 为修正后氮化铝含量， $\%$ ；其他为待定常量，无量纲。经上述分析知，自变量“转速”对因变量无显著影响，为简化模型，对转速 x_2 进行“归零”处理，简化模型如下：

$$y = ax_1^2 + cx_3^2 + fx_1x_3 + hx_1 + jx_3 + k \tag{9}$$

表 3 所示为式(8)、式(9)中各项回归系数的值。初步模型中的多重判定系数 R^2 为 0.93682、 F 统计量为 570.37707、 P 值为 0，简化模型中的 R^2 为 0.94126、 F 统计量为 1124.36109、 P 值为 0，说明简化后模型的

因变量与自变量之间的相关程度更高、拟合效果更好。初步模型的具体表达式：

$$y = 0.00118x_1^2 - 1.41841 \times 10^{-6}x_2^2 + 0.01808x_3^2 + 0.27207x_1x_2x_3 + 0.2718x_1x_2 - 163.2424x_1x_3 - 16.32397x_2x_3 - 163.32576x_1 - 16.30661x_2 + 9793.86358x_3 + 9807.667 \tag{10}$$

简化模型的具体表达式：
$$y = 8.88214 \times 10^{-4}x_1^2 + 0.01808x_3^2 - 0.00266x_1x_3 - 0.1906x_1 - 0.52113x_3 + 20.8555 \tag{11}$$

表 4 所示为初步模型与简化模型中实验值与理论值的对比情况。可见，简化处理能保持较好的精度，相对误差值基本可以控制在 $\pm 8.65\%$ 以内，对水解时铝

表 3 回归模型的数值统计

Table 3 Numerical statistics of regression model

Regression coefficient	Regression coefficient		Standard deviation of regression coefficient	
	Preliminary model	Simplified model	Preliminary model	Simplified model
a	0.00118	8.88214×10^{-4}	7.84425×10^{-4}	7.28913×10^{-4}
b	-1.41841×10^{-6}	—	1.168860×10^{-6}	—
c	0.01808	0.01808	0.00181	0.00174
d	0.27207	—	8.03590	—
e	0.27180	—	—	—
f	-163.24240	-0.00266	4821.53740	8.29290×10^{-4}
g	-16.32397	—	482.15374	—
h	-163.32576	-0.19060	—	0.11501
i	-16.30661	—	—	—
j	9793.86358	-0.52113	289292.24424	0.07163
k	9807.66700	20.85550	—	4.34527

Preliminary model: $R^2=0.93682$, $F=570.37707$, $P=0$; Simplified model: $R^2=0.94126$, $F=1124.36109$, $P=0$

表 4 修正后铝灰渣中 AlN 水解过程中实验值与理论值对比情况(部分)

Table 4 Comparison between experimental modified value and theoretical modified value of AlN hydrolysis process in aluminum dross (part)

No.	Experimental value/%	Theoretical value/%		Relative error/%	
		Preliminary model	Simplified model	Preliminary model	Simplified model
1	6.82	6.36	6.23	-6.74	-8.65
2	6.84	6.82	6.69	-0.29	-2.19
3	12.68	12.85	12.62	1.34	-0.47
4	4.51	4.18	4.18	-7.32	-7.32
5	4.11	3.85	3.85	-6.33	-6.33
6	4.44	4.09	4.09	-7.88	-7.88
7	2.94	2.71	2.71	-7.82	-7.82
8	3.75	3.84	3.84	2.40	2.40
9	2.25	2.20	2.20	-2.22	-2.22

灰渣中AlN含量的预测与控制具有一定指导意义。

3 结论

1) 通过对铝灰渣水解过程的热力学模型研究,发现标准摩尔生成自由能变为负值,说明铝灰渣中AlN水解反应从热力学角度上而言可自发进行。同时,针对水解过程铝灰渣组分及含量变化的研究得到AlN含量的修正公式,加强数据处理的科学性与准确性。

2) 温度的增加能降低铝灰渣中AlN含量并降低悬浊液pH值;时间的延长可有效促进铝灰渣中AlN的水解,同时在2 h内迅速将悬浊液pH值提升至高位;转速对铝灰渣中AlN水解速率和悬浊液pH值无明显影响。总体而言,通过AlN含量来表征铝灰渣水解速率明显优于悬浊液pH值。

3) 对水解参数及AlN含量进行多元非线性回归分析并二次简化,得到简化模型,修正后铝灰渣中AlN含量的理论值与实验值相对误差在 $\pm 8.65\%$ 以内,对水解时铝灰渣中AlN含量的预测与控制具有一定指导意义。

REFERENCES

- [1] 刘吉. 铝灰渣性质及其中的AlN在焙烧和水解过程中的行为研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008: 1-3.
LIU Ji. Study on the properties of aluminum dross and the behaviors of AlN in hydrolysis and roasting processes[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008: 1-3.
- [2] 李远兵, 孙莉, 赵雷, 常娜, 周胜, 李亚伟. 铝灰的综合利用[J]. 中国有色冶金, 2008(6): 63-67.
LI Yuan-bing, SUN Li, ZHAO Lei, CHANG Na, ZHOU Sheng, LI Ya-wei. Utilization of aluminum ash[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2008(6): 63-67.
- [3] SINGH U, ANSARI M S, PUTTEWAR S P, AGNIHOTRI A. Studies on process for conversion of waste aluminium dross into value added products[J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2016, 57(4): 296-300.
- [4] SOOKSAEN P, PUATHAWEE P. Properties of unglazed ceramics containing aluminum dross as a major component[J]. Solid State Phenomena, 2017, 266: 182-186.
- [5] 徐强强. 二次铝灰渣免烧砖的研制[D]. 金华: 浙江师范大学, 2016: 15-48.
XU Qiang-qiang. Development of secondary aluminum ash unburned[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University,

2016:15-48.

- [6] MAILAR G, SUJAY R N, SREEDHARA B M. Investigation of concrete produced using recycled aluminium dross for hot weather concreting conditions[J]. Resource-Efficient Technologies, 2016, 2(2): 68-80.
- [7] MURAYAMA N, MAEKAWA I, USHIRO H, MIYOSHI T, SHIBATA J, VALIX M. Synthesis of various layered double hydroxides using aluminum dross generated in aluminum recycling process[J]. International Journal of Mineral Processing, 2012, 110/111: 46-52.
- [8] 张勇, 郭朝晖, 王硕, 肖细元. 响应曲面法对铝灰中AlN的水解行为[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(4): 919-927.
ZHANG Yong, GUO Zhao-hui, WANG Shuo, XIAO Xi-yuan. Hydrolysis behavior of AlN in aluminum dross with response surface methodology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(4): 919-927.
- [9] 徐林伟, 刘盟, 胡党平, 张宇, 洪建明, 唐建成. 氮化铝粉末的水解行为研究[J]. 应用科技, 2009, 36(9): 1-5.
XU Lin-wei, LIU Meng, HU Dang-ping, ZHANG Yu, HONG Jian-ming, TANG Jian-cheng. Hydrolysis behavior of AlN powders[J]. Applied Science and Technology, 2009, 36(9): 1-5.
- [10] FUKUMOTO S, HOOKABE T, TSUBAKINO H. Hydrolysis behavior of aluminum nitride in various solutions[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(11): 2743-2748.
- [11] 姜澜, 邱明放, 丁友东, 苏楠, 姚泉. 铝灰中AlN的水解行为[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(12): 3555-3561.
JIANG Lan, QIU Ming-fang, DING You-dong, SU Nan, YAO Quan. Hydrolysis behavior of AlN in aluminum dross[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(12): 3555-3561.
- [12] LI Qi, YANG Qun, ZHANG Guo-fan, SHI Qing. Investigations on the hydrolysis behavior of AlN in the leaching process of secondary aluminum dross[J]. Hydrometallurgy, 2018, 182: 121-127.
- [13] 周长祥, 王卿, 张文娟, 赵伟. 铝渣灰中氨氮的回收[J]. 矿产保护与利用, 2012(3): 38-41.
ZHOU Chang-xiang, WANG Qing, ZHANG Wen-juan, ZHAO Wei. The recovery of ammonia nitrogen from aluminum slag ashes[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2012(3): 38-41.
- [14] GB 5009.5—2016. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的

测定[S].

GB 5009.5—2016. National food safety standard determination of proteins in foods[S].

[15] SHINZATO M C, HYPOLITO R. Solid waste from

aluminum recycling process: characterization and reuse of its economically valuable constituents[J]. Waste Management, 2005, 25(1): 37–46.

Hydrolysis behavior of AlN in aluminum dross and its multivariate nonlinear regression analysis

LÜ Shuai-shuai, NI Wei, NI Hong-jun, ZHU Yang-yang

(School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: The modified equation of AlN content in aluminium dross was put forward by studying the change of each component and its content in the process of aluminium dross hydrolysis reaction. The effects of hydrolysis parameters such as time, temperature and rotational speed on the hydrolysis rate of aluminium dross were investigated according to the measure of AlN content and pH of suspension. The hydrolysis parameters and the modified content of AlN in aluminium dross were analyzed by multivariate nonlinear regression analysis. The results show that the AlN content in the aluminum dross and the pH value of the suspension reduce with the increase of temperature. The hydrolysis of AlN can be effectively promoted with the prolongation of time, and the pH value of the suspension is simultaneously raised to a high level within 2 h. The rotational speed has no obvious effect on the hydrolysis rate of AlN and the pH value of suspension. Generally speaking, the way of the content of AlN is more objective than the pH value of suspension to characterize the hydrolysis rate of AlN in aluminum dross. Multivariate nonlinear regression analysis and secondary simplification on the hydrolysis parameters and the modified content of AlN in aluminium dross show that the relative error between the theoretical value and the experimental value is within $\pm 8.65\%$, which has a certain guiding significance for the prediction and control of the modified content of AlN in aluminum dross during the hydrolysis process.

Key words: aluminum dross; AlN; hydrolysis; multivariate nonlinear regression analysis; temperature; rotational speed; time

Foundation item: Project((2018) 87) supported by the University Advantageous Discipline Construction Engineering Plan of Jiangsu Province, China; Project(BE2018093) supported by the Key Research and Development Plane of Jiangsu Province, China; Projects(201702, 201703) supported by the Wall Material Innovation Research Plan of Jiangsu Province, China; Projects(JC2018115, JCZ18024) supported by the Application Research Development Plan of Nantong City, China

Received date: 2019-05-20; **Accepted date:** 2019-11-19

Corresponding author: NI Hong-jun; Tel: +86-15962957962; E-mail: 949215056@qq.com

(编辑 龙怀中)