

# 纤维矿物粉尘在 Gamble 溶液中的溶解行为\*

董发勤 李国武 霍冀川 迟燕华

(西南工学院, 绵阳 621002)

主题词 矿物 纤维 粉尘 Gamble 溶液 溶解 生物持久性

**提 要** 本文用人工配制的 Gamble 溶液和三个酸度系列, 研究了 6 对粉尘在模拟人体环境下 96 d 的溶解特征和生物持久性。结果表明: 不同粉尘中铁元素的溶解速率多数出现两个峰值区, 三八面体结构型粉尘中铁与镁元素溶解同步。高镁矿物粉尘溶解速率在第一阶段多出现峰值; 沸石、硅灰石的钙溶解速率比较稳定, 硅灰石在低 pH 值区表现出前高后低的特点; Si 在 Gamble 溶液中的溶解峰点在 pH5 体系中出现在 48 d 以前, 在 pH7 体系中出现在 48 d 以后; Al 则表现为在 pH3 和 pH5 体系中易于出溶而在 pH7 体系中难于出溶。纤维矿物粉尘中的所有元素在 Gamble 溶液中的累计溶解总量均随时间的增长而增加; 纤状样品的溶解总量多大于土状样品。溶液作用过程中纤维矿物表面有裂开、凹蚀、脱皮现象并趋向分散或折断; 片状粉尘颗粒溶解速率与台阶步密度或与含铁样品的氧化速率正相关, 溶解总量基本与体系酸度和有机离子的总量成正比。富钙、镁或铝的粉尘溶解速率高于富钾、硅的粉尘。环境的低 pH 值、高溶解氧量或氧化反应、高盐溶液均可促进溶解。

矿物粉尘进入人体后, 肌体内部会以各种方式处理和清除这些尘粒, 如运移、沉淀、溶解、包埋和吞噬等等。人体体液是粉尘主要的运移、沉淀和溶解介质。但人体体液与粉尘的作用是一个非常缓慢和长久的过程, 而且, 人体不同部位的组织体液的组成和特性是有差异的, 这给研究体液的上述作用带来困难。目前常用模拟人体体液(Gamble 溶液)的体外研究方式, 来直接和快速地研究体液与粉尘的作用机制。并用粉尘在 Gamble 溶液中的溶解行为来评估其在体内的生物持久性。

## 1 Gamble 溶液及缓冲对

所选用的 Gamble 溶液(100 ml)的配方如下: NaCl 0.900 g, KCl 0.042 g, NaHCO<sub>3</sub> 0.020 g, CaCl<sub>2</sub> 0.024 g, C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>·H<sub>2</sub>O 0.10 g。

该配方是依据人体心脏外膜区(肺部中心部位)体液的组成选定的, 与血清的主要组成相似。体系中的无机元素对研究对象基本无影响, 较高的 Na<sup>+</sup> 浓度( $\rho_{Na^+} > 0.5 \text{ g/L}$ )可阻止细菌的繁衍。

\* 本文得到国家自然科学基金(编号: 49502025)和 CIDA 联合资助

第一作者简介 董发勤, 男, 1963年生, 博士, 教授, 主要从事材料物理与环境矿物学研究与教学工作。

收稿日期 1999-12-21, 改回日期 2000-07-21

人体的呼吸系统和肺部是最先也是作用面积最大、作用时间最长的承担生物净化过程的场所。由于人体肺部是  $\text{CO}_2$  的交换场所, 因此呈现弱酸性环境。通常的生化实验用 95%  $\text{N}_2$  + 5%  $\text{CO}_2$  来控制模拟肺部和呼吸环境溶液的 pH 值; 而本模拟实验用缓冲对来控制 pH 值, 它的优点是能使 pH 值更稳定(比  $\text{CO}_2$  体系), 而且受温度的影响较小。控制体系溶液 pH 值的缓冲对组成如下:

缓冲系列

pH= 3

pH= 5

pH= 7

缓冲体系中仅含有  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  离子, 与真实体液相同, 基本不影响 Gamble 溶液的配方组成。

缓冲体系(100 ml) 配方

$\text{C}_8\text{H}_5\text{KO}_4$ (邻苯二酸氢钾, 1.020 g)

$\text{C}_8\text{H}_5\text{KO}_4$ (1.020 g) +  $\text{NaOH}$ (0.090 g)

$\text{KH}_2\text{PO}_4$ (0.680 g) +  $\text{NaOH}$ (0.156 g)

## 2 实验方法

选用 12 种典型样品(1 浙江缙云斜发沸石, 含丝光沸石; 5 河南信阳斜发沸石; 3 广西桂林纤维状硅灰石; 4 吉林磐石针状硅灰石; 18 安徽官山土状坡缕石; 22 重庆奉节纤维状坡缕石; 20 陕西宁强水镁石; 25 陕西宁强纤维状水镁石; 21 湖北广济纤维状海泡石; 24 湖南浏阳土状海泡石; 28 陕西宁强纤维蛇纹石石棉; 29 陕西宁强利蛇纹石), 每种样品各取 3 份, 每份 2 g, 分别放入 36 根塑料管中, 两端用玻璃胶和橡皮塞封闭; 流体用医用导管导入导出, 流速控制阀设在入口前端。样品管置入可控温水浴槽内, 水体温度设为  $37^\circ\text{C}$ 。为防止环境水体渗入流体, 样品管两端口露出水浴槽内水面

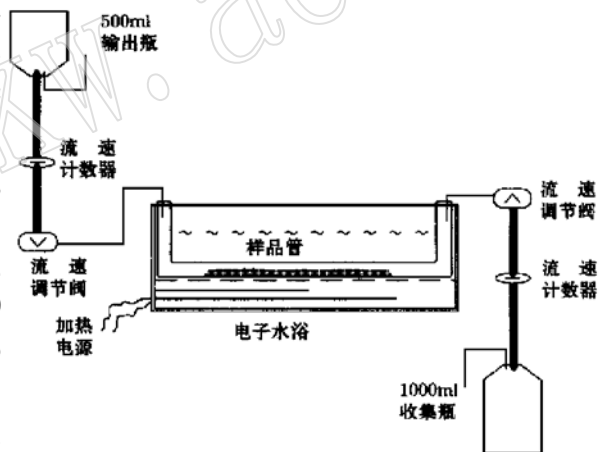


图 1 Gamble 溶液作用过程装置示意图  
Fig. 1 The flowsheet for the process of the Gamble solution action

(见图 1)。调节 pH= 3, 5, 7 的三组 Gamble 溶液以很慢的流速(5 ml/h)流动, 流出端设有三组过滤层阻滞悬浮物质流出。每 16 d 收集残液 1 次, 用 EDTA(乙二胺四乙酸二钠)法测定 Mg 和 Ca 的浓度, 用比色法测定 Fe、Si 和 Al 的含量。连续作用 96 d 后, 过滤、干燥残渣并称重。

## 3 矿物粉尘在 Gamble 溶液中的溶解特征

### 3.1 铁元素的溶解特征

表 1 是矿物粉尘中的铁元素在不同酸度的 Gamble 溶液中的溶解速率, 它是 16 d 溶解速率的平均值。表中结果显示, 不同粉尘中铁元素的溶解速率均表现出不同程度的波动, 多

数出现两个峰值区, 这与铁元素的结构占位以及其他主元素的竞争性溶解有关, 如八面体直接外露的水镁石类、蛇纹石类粉尘, 其铁元素与镁元素溶解同步, 第一个峰值与细粒粉尘的先溶相关, 并且对应不同酸度出现溶解速率梯度。多数粉尘样在 80 d 左右溶解速率达到较大值, 在此之前其溶解速率呈波动状增长。对于沸石类、坡缕石类粉尘, 酸度对溶解速率的影响不甚明显。在第一个 16 d 中 1pH5, 18pH3, 18pH5, 18pH7, 24pH3, 24pH7, 20pH5, 20pH7, 28pH5, 29pH5, 29pH7 中铁的溶解速率即达到第一个峰值。另外, 多数样品表现为低铁特征, 且个别样品的溶解速率与其他系列不同步, 如 1pH7 在 32 d 和 80 d 中溶解速率分别呈现峰值, 还有 4pH3、22pH3、21pH3 等。水镁石、蛇纹石等高铁样品的溶铁速率趋势相近, 一般是 pH3 系列表现为高而稳定, 其他系列多在 80 d 阶段出现最大值, 也有 8 个样品的最大值位于第二阶段(16 d)。

表 1 Gamble 缓冲体系中粉尘铁元素的溶解速率  
Table 1 Dissolution rate of Fe in Gamble buffer solution

样号	Fe 溶解速率/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )							样号	Fe 溶解速率/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )						
	0~ 16d	16~ 32d	32~ 48d	48~ 64d	64~ 80d	80~ 96d	0~ 16d		16~ 32d	32~ 48d	48~ 64d	64~ 80d	80~ 96d		
1 pH 3	0.000	0.000	1.162	1.162	3.209	1.162	20 pH 3	9.213	10.168	7.029	1.026	3.618	2.254		
1 pH 5	0.616	0.434	1.818	1.298	2.936	2.663	20 pH 5	2.014	1.435	2.527	1.703	12.897	5.119		
1 pH 7	0.479	1.844	0.753	0.100	1.981	1.708	20 pH 7	1.162	0.100	2.117	0.479	2.663	2.390		
5 pH 3	1.298	0.207	2.799	1.026	2.936	1.571	25 pH 3	15.763	2.936	7.166	4.028	3.482	2.527		
5 pH 5	0.000	0.343	0.207	1.703	2.663	2.527	25 pH 5	3.072	2.390	2.663	2.390	3.072	2.254		
5 pH 7	1.162	0.170	1.298	1.162	2.117	1.571	25 pH 7	0.616	0.170	1.162	1.298	2.936	2.936		
3 pH 3	1.026	0.207	1.162	1.981	2.936	2.254	21 pH 3	2.390	2.936	3.209	1.162	2.254	3.072		
3 pH 5	2.117	0.100	3.482	1.981	2.117	1.844	21 pH 5	0.343	2.117	0.170	1.162	1.981	0.889		
3 pH 7	0.207	1.708	2.936	0.616	3.072	1.162	21 pH 7	0.000	1.026	1.844	1.162	2.936	2.390		
4 pH 3	2.390	3.072	0.753	1.026	2.117	1.708	24 pH 3	2.663	0.616	0.100	1.708	3.618	1.981		
4 pH 5	1.571	0.170	0.170	3.072	2.254	1.981	24 pH 5	1.162	3.755	1.844	1.298	1.708	2.936		
4 pH 7	1.298	2.390	0.100	1.571	3.209	1.162	24 pH 7	0.889	0.170	1.162	1.571	3.345	2.936		
18 pH 3	1.571	0.343	0.207	1.844	2.936	1.910	28 pH 3	1.298	3.072	4.709	3.345	3.618	2.254		
18 pH 5	1.298	0.100	4.709	1.435	3.755	1.435	28 pH 5	1.844	0.207	1.818	0.753	4.437	3.482		
18 pH 7	1.571	0.100	0.100	0.753	2.663	1.844	28 pH 7	0.000	0.000	1.708	1.703	2.527	2.663		
22 pH 3	1.981	2.254	2.663	1.298	2.254	1.708	29 pH 3	5.119	5.256	4.709	7.574	4.983	4.300		
22 pH 5	1.026	0.889	2.936	1.844	3.006	1.844	29 pH 5	0.889	0.479	2.936	3.755	4.573	3.482		
22 pH 7	1.026	0.207	0.100	2.254	2.390	2.254	29 pH 7	0.616	0.100	0.170	0.207	3.755	5.392		

### 3.2 镁元素的溶解特征

表 2 是高镁矿物粉尘的溶解速率测定结果, 从表中可以看出, 多数样品的出溶率在第一阶段出现最大值, 有少数(8 个样品) 分别在三、四、五、六阶段出现峰值, 除 29 号外, 均为 pH7 系列。在含硅粉尘中 pH7 系列的溶解速率波动稍小, 水镁石和蛇纹石的溶解速率变化趋势非常一致, 仅到后期蛇纹石才呈现逐渐下降的趋势。不同形态的海泡石在溶解速率上呈现明显差异, 纤维状样品 pH3、pH5 系列保持稳定的高溶解率, 只在后期出现下降。坡缕石则表现出较大的波动性, 尤以纤维状样品低 pH 值为甚。

### 3.3 钙元素的溶解特征

由于 Gamble 溶液中含有 0.24 g/L 的  $\text{CaCl}_2$ , 且一些样品中不含  $\text{CaO}$ , 使 Gamble 溶液中

Ca 的溶解度低于水中的溶解度。表 3 结果显示, 沸石、硅灰石的钙溶解速率比较稳定。由于钙占位与矿物结构的关系, 硅灰石在低 pH 值区表现出前高后低的特点, 没有明显的峰值出现。沸石具较大波动性, 且其在 pH5 系列中的溶解速率在 80 d 后期出现峰值。

表 2 Gamble 缓冲体系中粉尘镁元素的溶解速率  
Table 2 Dissolution rate of Mg in Gamble buffer solution

样号	Mg 溶解速率/(mg·L <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )						样号	Mg 溶解速率/(mg·L <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )					
	0~ 16d	16~ 32d	32~ 48d	48~ 64d	64~ 80d	80~ 96d		0~ 16d	16~ 32d	32~ 48d	48~ 64d	64~ 80d	80~ 96d
18pH3	131.5	31.4	43.1	46.4	24.1	41.1	21pH3	208.6	94.3	98.6	95.9	51.5	43.1
18pH5	131.5	11.4	37.0	23.0	21.0	28.8	21pH5	191.5	84.0	84.5	93.5	44.9	45.2
18pH7	114.3	15.0	37.0	17.2	24.5	26.7	21pH7	131.5	21.7	23.5	56.5	58.0	30.8
22pH3	228.6	11.4	17.3	37.8	46.2	32.8	24pH3	145.8	22.8	37.0	48.3	58.0	61.6
22pH5	234.4	15.0	27.1	33.6	36.2	38.0	24pH5	131.5	14.3	16.2	34.0	25.7	36.0
22pH7	142.9	13.1	9.0	10.4	17.0	29.8	24pH7	125.8	15.0	14.4	15.0	20.5	47.9
20pH3	648.8	257.2	161.6	62.1	59.8	67.3	28pH3	388.7	174.3	144.8	78.5	81.6	86.3
20pH5	408.7	211.4	195.1	112.3	143.0	106.8	28pH5	205.8	68.0	99.2	75.9	66.5	94.5
20pH7	140.1	34.2	38.2	38.8	65.8	98.6	28pH7	137.2	60.0	61.6	51.4	46.0	45.2
25pH3	548.7	151.5	105.8	81.2	111.2	65.7	29pH3	225.8	82.9	80.6	162.1	127.5	125.3
25pH5	500.2	54.3	63.5	71.7	41.3	55.4	29pH5	157.2	57.2	84.2	93.0	57.6	44.2
25pH7	211.49	40.0	61.6	36.6	41.9	88.9	29pH7	114.3	22.8	32.6	35.6	37.6	30.8

表 3 Gamble 缓冲体系中粉尘钙元素的溶解速率  
Table 3 Dissolution rate of Ca in Gamble buffer solution

样号	Ca 溶解速率/(mg·L <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )						样号	Mg 溶解速率/(mg·L <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )					
	0~ 16d	16~ 32d	32~ 48d	48~ 64d	64~ 80d	80~ 96d		0~ 16d	16~ 32d	32~ 48d	48~ 64d	64~ 80d	80~ 96d
1pH3	50.7	35.2	25.0	38.5	53.5	27.0	3pH3	279.0	67.6	57.6	53.5	40.4	25.7
1pH5	69.3	20.9	19.3	27.8	51.8	10.0	3pH5	307.9	73.7	56.4	56.4	37.2	15.6
1pH7	45.0	20.0	11.4	13.7	30.6	7.5	3pH7	33.5	17.5	11.4	8.2	13.6	25.0
5pH3	113.6	40.1	19.2	25.1	20.4	14.2	4pH3	293.6	88.1	51.6	42.6	31.8	24.3
5pH5	42.1	19.8	22.1	10.6	45.8	8.6	4pH5	196.4	84.0	125.0	68.7	25.3	12.9
5pH7	36.4	12.2	17.1	5.0	16.0	14.3	4pH7	27.8	8.6	15.0	5.0	13.1	11.2

### 3.4 硅元素的溶解特征

Si 在 Gamble 溶液中的溶解速率变化呈波浪形, 波形的顶点在 pH5 体系中多出现在 48 d 以前, 在 pH7 体系中多出现在 48 d 以后。对化学活性较大的样品, 如硅灰石, 32 d 以后, 其溶解速率逐渐降低(见表 4)。

### 3.5 铝元素的溶解特征

表 5 数据表明, Al 在 Gamble 溶液中表现为 pH3 和 pH5 体系易于出溶, 而 pH7 体系难于出溶。原样中如果 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量较低, Al 则在体系中不能检出。Al 的溶解曲线特点为第一阶段的 16 d 溶解速率最大或接近最大, 然后逐渐下降。从 Al 的出溶来看, 斜发沸石(5) 的溶解活性高于丝光沸石(1)。

表 4 Gamble 缓冲体系中粉尘硅元素的溶解速率  
Table 4 Dissolution rate of Si in Gamble buffer solution

样号	Si 溶解速率/(mg·L <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )						样号	Si 溶解速率/(mg·L <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )					
	0~ 16d	16~ 32d	32~ 48d	48~ 64d	64~ 80d	80~ 96d		0~ 16d	16~ 32d	32~ 48d	48~ 64d	64~ 80d	80~ 96d
1pH3	4.20	3.46	3.86	27.00	2.90	3.00	20pH3	6.89	1.70	4.78	2.34	3.20	1.70
1pH5	3.52	4.84	7.46	50.20	1.20	2.50	20pH5	1.78	0.65	5.02	2.48	0.50	0.90
1pH7	2.00	5.54	9.41	27.77	7.90	3.30	20pH7	0.84	0.37	3.08	0.96	13.00	5.00
5pH3	14.20	9.56	13.68	7.28	5.20	6.20	25pH3	15.48	25.52	20.64	18.14	12.40	8.60
5pH5	11.98	7.46	57.40	8.18	2.70	5.60	25pH5	3.52	6.48	11.64	39.98	11.60	8.20
5pH7	4.10	5.26	10.75	9.19	10.80	4.70	25pH7	0.96	1.18	17.11	11.10	23.20	21.40
3pH3	37.20	7.94	14.48	7.12	5.10	3.70	21pH3	36.04	60.60	54.26	38.02	27.40	23.10
3pH5	69.12	23.01	47.12	33.36	17.30	12.30	21pH5	57.06	46.72	43.82	22.46	17.50	15.80
3pH7	41.20	11.72	9.47	6.02	22.10	12.00	21pH7	30.28	11.98	13.83	9.97	21.80	7.30
4pH3	41.10	24.18	14.56	13.68	5.70	9.70	24pH3	24.12	21.92	27.84	16.06	11.50	10.35
4pH5	53.04	43.40	40.01	26.92	12.30	12.90	24pH5	13.26	9.44	11.76	7.58	5.10	5.59
4pH7	31.74	31.84	11.47	6.85	26.20	19.10	24pH7	14.26	6.64	7.91	6.45	28.30	10.70
18pH3	18.38	10.76	33.30	21.04	15.30	17.60	28pH3	31.32	22.31	40.32	21.88	15.10	12.91
18pH5	28.08	8.99	16.92	12.34	5.90	7.60	28pH5	19.90	12.64	36.10	19.42	20.60	18.37
18pH7	5.96	3.03	12.51	11.42	10.30	4.50	28pH7	3.52	2.63	11.32	6.18	27.20	2.81
22pH3	29.30	21.75	18.44	16.42	9.40	7.40	29pH3	31.32	14.15	17.68	24.06	19.10	23.07
22pH5	17.44	10.08	13.34	9.04	19.00	5.50	29pH5	13.86	9.33	22.38	14.84	14.50	13.26
22pH7	7.46	4.26	4.35	2.80	10.50	3.73	29pH7	3.86	2.14	5.55	4.55	11.10	5.19

表 5 Gamble 缓冲体系中粉尘铝元素的溶解速率  
Table 5 Dissolution rate of Al in Gamble buffer solution

样号	Al 溶解速率/(mg·L <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )						样号	Al 溶解速率/(mg·L <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )					
	0~ 16d	16~ 32d	32~ 48d	48~ 64d	64~ 80d	80~ 96d		0~ 16d	16~ 32d	32~ 48d	48~ 64d	64~ 80d	80~ 96d
5pH3	278.00	90.00	21.60	19.30	11.30	6.67	22pH5	99.00	88.67	82.00	8.90	2.00	22.67
5pH5	103.67	25.00	19.30	15.67	34.00	35.00	18pH3	63.67	26.00	41.00	20.30	17.00	5.67
22pH3	451.30	134.30	67.00	52.30	44.30	17.00	18pH5	10.70	7.77	22.90	12.17	11.13	9.32

## 4 讨论与结论

在 Gamble 溶液中检出的纤维矿物粉尘硅、铁、铝、钙、镁元素的累计溶解总量均随时间增长而增加。大多数可溶元素在溶解第一阶段出现第一峰值,这与粉体中较细颗粒的快速溶解有关,其结果是残粉粒度趋于一致(照片 1)。沸石的溶解总量与水镁石、坡缕石、海泡石、蛇纹石的出溶总量有较大差异,以水镁石、蛇纹石为最大,沸石最小。多数粉尘的溶解总量与体系的 pH 值成反比(例如图 2 所示)。对硅灰石而言,以 pH5 系列的溶解总量高于另两系列为特点(见图 3)。除海泡石外,同 pH 值系列中纤维状样品的溶解总量大于土状样。总体而言,动态流体培养液中溶解元素的量大于在静态竖直浸取体系中的量<sup>[1]</sup>,这与 L. Kirsi 等人<sup>[2]</sup>查明的人造岩棉、玻璃纤维在细胞培养液中的溶解趋势是一致的。

在 Gamble 溶液作用过程中,矿物纤维表面发生变化,如裂开、凹坑、刻蚀、脱皮等现象(见照片 2),柔性纤维在溶解的同时更趋向分散(见照片 1),脆性纤维则更趋向折断。

层片状矿物粉尘的溶解主要发生在解理和层面剥离的台阶区,溶解速率与台阶密度

(step densities) 正相关。溶解速度的非线性度取决于阶密度。溶解过程受表面形态控制, 开始多发生在台阶边缘, 以单层方式推进, 一层一层地推移, 尽管表面有时会出现深的蚀坑(见照片 3), 这与 G. Jordor 等人<sup>[3]</sup>在 pH= 2.7, 温度介于 21~ 25 °C 条件下所研究的水镁石的溶解行为是一致的。层状矿物粉尘, 如蛇纹石、水镁石等表现出相似的规律。

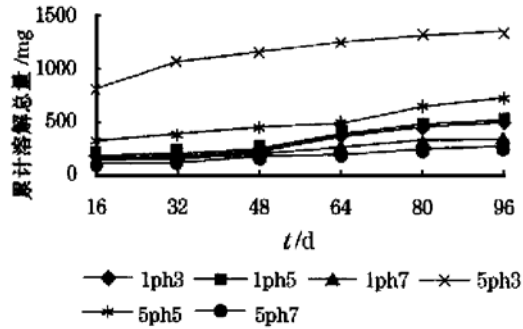


图 2 沸石在不同 pH 值系列中溶解总量变化趋势

Fig. 2 Tendency of variation of the total dissolved amount of zoelite in different pH series

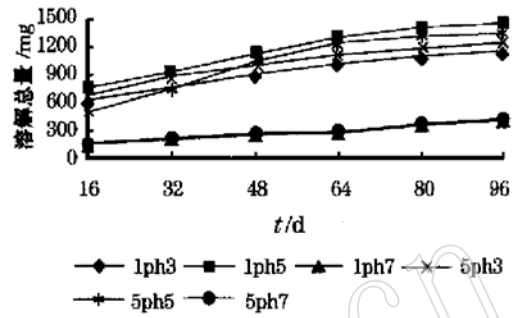


图 3 硅灰石在不同 pH 值系列中溶解总量变化趋势

Fig. 3 Tendency of variation of the total dissolved amount of wollastonite in different pH series



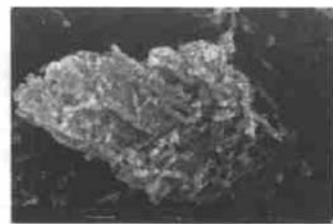
照片 1 坡缕石溶解后更趋分散(SEM, × 5000)

Photo 1 Polygorskite tends to be more dispersed after dissolution



照片 2 纤状水镁石裂开、凹蚀 (SEM, × 5000)

Photo 2 Fibrous brucite cracks and is etched



照片 3 水镁石在(001)面上的台阶状溶蚀 (SEM, × 10000)

Photo 3 Step-shaped corrosion of brucite on the (001) plane

A. R. Hoch 等人<sup>[4]</sup>研究了辉石在 25 °C、pH = 5.8 (CO<sub>2</sub>)、流速 5 ml/h、0.01 mol/L KHCO<sub>3</sub> 的有氧条件下的溶解作用, 发现在 60 d 后其溶解速率就完全基于自身硅的释放速度, 而且有氧环境比封闭环境溶解速率高出 3 倍; 但对透辉石, 其溶解速率不依赖于溶解氧的多少<sup>[4]</sup>, 这与本文所研究样品的溶解行为也是一致的。如含硅的硅灰石等, 其后期的溶解速度主要与硅的出溶速率呈正相关。含变价元素(如二价铁)的样品, 如水镁石、蛇纹石等, 有氧环境有助于溶解, 而且溶解速度与铁的氧化速率呈正相关。在贫铁的样品中氧化作用则不明显, 总溶解速率要远慢于有铁样品<sup>[5]</sup>。

粉尘在 Gamble 溶液中的溶解趋势与在水中和巨噬细胞培养液中的是一致的, 甚至与地表天然矿物的风化溶解或土壤中矿物的离解也有类似之处, 但溶解总量基本与体系酸度和有机离子的总量成正比<sup>[6]</sup>。富钙、镁或铝的粉尘溶解速率高于富钾、硅的粉尘; 纤状样品

的局部活性高于土状样品, 这与其自身成尘过程中的活化有关( 纤状样品的天然结晶度均高)。环境的低 pH 值、高溶解氧量或氧化反应、高盐溶液均可促进溶解。粉尘在 Gamble 溶液中的溶解行为和趋势可以反映其生物持久性。

#### 参 考 文 献

- 1 Dong F, John H, Wan P. The solubility and human body health of fibrous brucite. Abstracts of 30th IGC, 1996, Beijing: A46.
- 2 Kirsi L, Mikko H, Juhani K, et al. Dissolution of short and long rockwool and glasswool fibers by macrophages in flow-through cell culture. Environmental Research, 1998, 78(1): 25~ 37.
- 3 Jordor G, Rammensee W. Dissolution rates and activation energy for dissolution of brucite(001): a new method based the microtopography of crystal surfaces. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(24): 5055~ 5062.
- 4 Hoch A R, Reddy M M, Drever J I. The effect of iron content and dissolving O<sub>2</sub> dissolution rates of clinopyroxene at pH5.8 and 25 °C: preliminary results. Chemical Geology, 1996, 132(1- 4): 151~ 156.
- 5 Dong F, Wan P, Li G, et al. The biochemistry feature and environmental significance of industrial mineral fibers in Gamble solution and organic system. Abstracts of 17th IMA, 1998, Toronto: 46.
- 6 Welch S A, Ullman. Feldspar dissolution in acidic and organic solution: composition and pH dependence of dissolution rate. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 60(16): 2939~ 2948.

## Dissolving Behavior of Fibrous Mineral Dusts in Gamble Solution

Dong Faqin, Li Guowu, Huo Jichuan, Chi Yanhua  
(Southwest Institute of Technology, Mianyang 621002)

**Key words:** mineral; fiber; dust; Gamble solution; bio\_resistance

### Abstract

The dissolving characters and bio\_resistance of 6 pairs of mineral dusts in a simulated human body environment for 96 days were studied by using Gamble solution and three acid series. The results show that the iron dissolving rates in most mineral dusts have two peaks, and that magnesium is dissolved simultaneously with iron in dusts with tri\_octahedral structure. Most of the dissolving rates of high\_magnesium mineral dusts display peaks in the first dissolving stage. The calcium dissolution rates of zoelite and wollastonite are relatively stable, and wollastonite show the feature of being high in the front and low in the rear in the low\_pH area. The dissolution peak of Si appeared in the first 48 days in Ph5 Gamble solution, but after 48 days in the pH7 series. Al dissolution is easy in the pH3 and pH5 series and difficult in pH7. The cumulate dissolution amount of all elements in Gamble solution of fibrous mineral dusts increases with time, and the total dissolution amount of fibrous samples is mostly larger than that of the clayey

(下转第 233 页) (to be continued on p. 233)

www.yskw.ac.cn

(上接第 205 页)(Continued from p. 205)

ones. There are phenomena of cracking, etching and peeling on the surface of fibrous minerals and fibers tend to be scattered or break during dissolution. The dissolving rate of flaky dusts is positively correlated to the step densities and oxidizing rate of iron-bearing samples. The total dissolution amount is basically positively proportional to the system acidity and total organic ions. The dissolving rate of Ca-, Mg- or Al-rich mineral dusts is higher than that of K- or Si-rich dusts. The low pH, high solubility of O<sub>2</sub> or oxidizing reaction and high salinity solution of the environment may accelerate the dissolution of dusts.