

铁含量控制研究进展

刘延红¹, 王宝冬², 郭昭华¹, 池君洲¹, 王永旺¹, 陈东¹

(1. 神华准能资源综合开发有限公司 研发中心, 内蒙古 鄂尔多斯 010300;
2. 北京低碳清洁能源研究所 煤资源利用重大课题研究中心, 北京 102211)

摘要:在轻工业生产、湿法冶金、水处理等行业,铁含量控制是普遍性问题。本文主要介绍了非金属矿物、金属湿法冶金、以及水处理等行业常用的除铁方法。磁选是非金属矿物和碱性金属湿法冶金首选的除铁方法。但由于非金属矿含铁成分的多样性,以及设备和技术限制,有些产品通过磁选除铁后质量不达标,须结合化学浸出法进一步除铁。酸性湿法冶金除铁主要利用化学沉淀法,以针铁矿法应用最为广泛。氢氧化铁法,多以胶体状态,过滤性能较差。膜分离技术近年来发展迅速,目前以微滤膜(孔径>50 nm)为主,主要应用在生物医药、化工与石化、食品与饮料、特种水处理等领域。地下水除铁,广泛采用锰砂滤料——接触性催化氧化法。无机化工产品进一步提纯到很高纯度,一般通过电化学或物理方法。

关键词:除铁;石英砂;氧化铝;高岭土;湿法冶金;地下水;磁选除铁;化学除铁;沉淀除铁;吸附除铁;膜分离技术;离子交换法;萃取法

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2017.06.005

中图分类号:TD951 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2017)06-0020-07

铁是铝土矿、高岭土、石英砂、有色金属矿等的主要组成元素,其常作为杂质存在,以三价铁或二价铁的氧化物形式。非金属矿物除铁、金属湿法冶金除铁、以及地下水除铁等,是常见问题。

非金属矿中的铁具有含量低、磁性弱、粒度细、等特点,导致去除困难,不同的物料性质需采用不同的除铁方法,磁选是其中应用最广泛、最有效的方法。

表1 Fe²⁺/Fe³⁺沉淀 pH 值与溶解度

Table 1 Fe²⁺/Fe³⁺ precipitation pH value and solubility

	不同浓度下开始 沉淀的 pH 值/ (1 mol · L ⁻¹)(0.1 mol/L ⁻¹)	沉淀完全 的 pH 值/ (1 mol · L ⁻¹)	沉淀开始 溶解的 pH 值	溶解度 (20℃)/ (mg · L ⁻¹)
Fe ³⁺	1.5	2.3	4.1	14.0
Fe ²⁺	6.5	7.5	9.7	13.5

金属湿法冶金中,铁的存在状态与酸碱度有关。Fe³⁺在弱酸性条件下即完全沉淀,Fe²⁺在弱碱性条件下完全沉淀,见表1。而且,Fe²⁺在碱性条件下极易被氧化为Fe³⁺,氧化在水解反应之后^[1]。空气条件

下,pH=7左右时,Fe²⁺即完全水解氧化为Fe³⁺^[2]。因此,pH值低时,铁主要以离子形式存在,溶液中铁含量较高;pH值高时,铁主要以沉淀形式存在,溶液中铁含量较低。

铁的存在状态不同,除铁难度和工艺不同。酸性湿法冶金(Zn/Mn/Cu/Ni/Co等),铁主要以离子形式(Fe²⁺/Fe³⁺)存在,一般通过化学沉淀法去除。氧化铝生产为碱性体系,铁主要以磁性物质存在,通过强磁可以去除。地下水除铁,主要利用锰砂滤料的接触性催化吸附作用,满足饮用水铁含量标准。

另外,Fe₂O₃在碱性介质中稳定性较好,但Fe(OH)₃具有微弱的两性——碱性强于酸性。新生成的Fe(OH)₃可以溶于热浓碱,发生溶解反应Fe(OH)₃+NaOH→FeO₂⁻+Na⁺,或者发生缩合反应形成胶体溶液^[3]。所以,强碱性溶液中的铁含量控制,也是可能遇到的问题。

本文主要介绍了非金属矿物、金属湿法冶金、水处理等行业常用的除铁方法,包括磁选法、化学浸出法、化学沉淀法、膜分离技术、吸附材料、离子交换法

收稿日期:2016-06-17;改回日期:2016-07-27

基金项目:国家科技部“十二五”科技支撑计划项目(2011BAA04B05)

作者简介:刘延红(1981-),女,博士,高级工程师,主要从事粉煤灰资源化利用等研究工作。

和萃取法等,分析了不同除铁方法的特点。

1 磁选除铁

非金属矿物材料一般对纯度要求比较高,杂质含量往往决定产品质量等级,特别是铁含量。非金属矿物加工过程中一般都需要进行除铁作业,磁选是其中应用最广泛、最有效的方法,广泛应用于玻璃、陶瓷等行业原料的除铁工艺,目前国内外已开发出各种各样的强磁选设备。结合选矿工艺,可以得到不同纯度要求的矿物材料^[4-5]。本文以硅质原料——石英砂为例,介绍了磁选在非金属矿物除铁中的应用。此外,磁选除铁对铝硅酸盐原料——长石^[5-6]、高岭土^[7-8]、铝土矿^[9-10]等矿物选矿也有很好的效果。

碱性金属湿法冶金中,铁主要以磁性物质存在,且含量较低,也可以通过强磁除铁。本文以氧化铝生产为例,介绍了磁选在金属碱性湿法冶金除铁中的应用。

1.1 石英砂工业

石英砂广泛应用于玻璃、铸造、陶瓷及耐火材料、冶金、建筑、化工、塑料、橡胶、磨料等工业,以及半导体行业的塑封材料和电子基板材料等。根据铁含量不同,可以分为普通石英砂、精制石英砂、低铁石英砂、特纯石英砂、高纯石英砂、超纯石英砂等,见表2。随着集成电路技术的迅速发展,石英砂正向着高纯度、低结晶度、低放射性含量、球形化等方向发展。

普通石英砂($\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3) \leq 0.05\%$),一般是采用

天然石英矿,经破碎、分级而成的水处理滤料。天然石英矿的铁含量可以低至0.03%,经过磁选除铁,杂质含量稍高的普通石英砂可以成为精制石英砂($\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3) \leq 0.02\%$),杂质含量稍少的普通石英砂可以成为低铁石英砂($\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3) \leq 0.01\%$)。低铁石英砂也可通过酸洗除铁工艺得到,但酸洗工艺费用高,对环境污染大,一般只在偏远地区使用。

高纯石英砂($\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3) \leq 0.0004\%$)和超纯石英砂($\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3) \leq 0.0002\%$)的生产原料,是天然水晶石或优质天然石英砂,经过磁选、浮选、酸浸等工序生产而成^[11-12]。从天然岩石矿物直接提取超纯石英砂,是目前世界上生产超纯石英砂的最先进技术。我国还没有彻底解决从天然岩石矿物提取超纯石英砂的工艺技术问题^[13]。

具有高比表面积和吸油值的多孔微细颗粒二氧化硅——白炭黑,可以通过化学沉淀法和气相法制得,产品含铁量分别 $\leq 0.05\%$ 和 $\leq 0.003\%$,见表2。溶胶-凝胶法也可制得高纯纳米二氧化硅,缺点是成本高,工业化价值不高^[14]。化学沉淀法,产品杂质含量较高^[15]。

球形石英砂生产技术,国际上始于20世纪80年代,目前世界上只有美国、日本、德国、加拿大和俄罗斯等少数国家掌握此技术。世界著名公司如德国的迪高沙公司、美国的BASF公司、日本的Aerosil公司和川崎钢铁公司均已投入生产。通常采用二氧化硅高温熔融喷射法、在液相中控制正硅酸乙酯、四氯化硅的水解法等。由于工艺复杂,我国在化学合成方面只停留在实验室阶段^[12]。

表2 铁含量标准

Table 2 Iron content standard

产品	标准	分类	分级	$\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%, \leq$
石英砂	DB34/T 1056-2009	超纯石英砂	1	0.0002
		高纯石英砂	2	0.0004
		特纯石英砂	3	0.005
		低铁石英砂	4	0.01
		精制石英砂	5	0.02
		普通石英砂	6	0.05
		浮选石英砂	3	0.002
玻璃工业用石英砂	QB/T 2196-1996	光学酸洗石英砂	4	0.005
		晶质玻璃石英砂	5	0.02
		仪器玻璃石英砂	6	0.03
		普通石英砂	7	0.04

产品	标准	分类	分级	$\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$, \leq
(冶金级) 氧化铝	GB/T 24487-2009 YS/T 803-2012		AO-1	0.02
			AO-2	0.02
			AO-3	0.03
沉淀法水合二氧化硅	HG/T 3061-2009	粒/粉状 块状		0.05
				0.1
气相 二氧化硅	GB/T 20020-2005		A类	0.003
			B类	0.003

1.2 氧化铝生产

铝土矿是炼铝工业和耐火材料的主要原料,铁含量约10%~12%。氧化铝生产为碱性体系,精液含铁量一般为20~30 mg/L。通过安装在分解溜槽或输送氧化铝皮带上的强磁铁吸附后,铁含量降低至低于4~5 mg/L。此铝酸钠溶液通过二氧化碳或晶种分解,得到冶金级氧化铝($\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3) \leq 0.02\%$)^[16]。若利用种分法生产高白氢氧化铝,产品铁含量 $\leq 0.008\%$ ^[17]。

高纯氧化铝($\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3) \leq 0.002\%$),国内外主要利用硫酸铝铵热分解法生产,硫酸铝铵通过多次重结晶去除杂质^[18]。

2 化学浸出法

磁选是非金属矿物除铁的首先方法。但是,由于非金属矿物含铁成分的多样性,以及设备和技术限制,通过磁选除铁后,有些产品的质量不是很理想,必须结合化学浸出法进行处理。化学浸出法,主要是利用化学药剂对非金属矿中的铁进行溶解,然后过滤洗涤。主要分为简单酸浸法和氧化-还原浸出法等。

2.1 酸浸法

酸浸是高纯石英砂提纯工艺中的重要工序。天然水晶石或优质石英砂通过磁选除铁后,大多数杂

质矿物已被去除,但还有部分在晶界、微裂缝及晶体内,去除有些困难,需要采用长时间酸浸,以去除此类杂质^[19]。水晶或优质石英砂,采用一定比例的HCl和HF混合酸进行浸泡6天后,铁含量可由20.15 mg/kg下降至0.38 mg/kg^[20]。

2.2 氧化-还原浸出法

高岭土中的铁含量较多(一般为0.5%~3.0%)^[21-22],对于一些牢固覆盖在颗粒表面的氧化铁,通过磁选很难将其去除,必须结合化学浸出法进行处理,以提高其利用价值^[22-24]。酸浸法会破坏高岭土的质量,氧化-还原浸出法应用最广。高岭土中含有难溶的三价铁(如褐铁矿)和二价铁(如黄铁矿),先用氧化剂把难溶二价铁氧化为三价铁,再用还原剂将三价铁还原为可溶 Fe^{2+} , Fe^{2+} 在较强的酸性介质中稳定,通过洗涤过滤除去^[25-26]。

化学浸出法应用广泛,效果较好,但污染较重,成本也高。

3 化学沉淀法

酸性湿法冶金,如Zn\Mn\Cu\Ni\Co等,铁主要以离子(Fe^{2+} \text{Fe}^{3+})形式存在,工业上常用化学沉淀法去除。主要包括氢氧化铁法、黄钾铁矾法、针铁矿法和赤铁矿法等。各种方法的特点见表3。

表3 湿法冶金除铁方法比较

Table 3 Comparison of iron removal using hydrometallurgy method^[27-32]

方法	主要沉淀物	介质	pH值	除铁效果<	渣含铁量/%	主要特点
氢氧化铁法	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	硫酸、盐酸	3.5~4.5		9.1	可溶阳极溶液净化系统
黄钾铁矾法	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	硫酸	1.0~2.3	0.05 g/L	32.4	适用于铁含量高的溶液处理
针铁矿法	$\text{FeO}(\text{OH})$	硫酸、盐酸	2.0~4.0	1.0 mg/L	40~42	提高喷淋速率,降低铁渣含锌率
赤铁矿法	Fe_2O_3 、 $\text{Fe}(\text{OH})\text{SO}_4$	硫酸	4.0~4.5	3.5~6 g/L	58~60	成本高

3.1 氢氧化铁法^[27]

Fe^{3+} 与 OH^- 在较高pH值下(碱耗高),形成难

溶的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 或 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$,多以胶体状态,过滤性能较差,且吸附大量有价金属离子造成损失。

工业上为了加速沉淀加入各种絮凝剂, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体析出是湿法冶金除铁工艺中最头痛的问题之一。虽然如此, 氢氧化铁法仍然是当前湿法冶金工艺中普遍采用的除铁方法之一。在铁含量较低条件下, 因其过程简单, 只要小心控制操作条件, 在经济上是合算的。

3.2 黄钾铁矾法^[28]

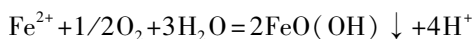
Fe^{3+} 在含有 SO_4^{2-} 、碱金属离子 (K^+ 、 Na^+ 等) 或 NH_4^+ 的溶液中可以沉淀出分子式为 $\text{AFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ 的赭黄色沉淀, 这种化合物分子结构与黄甲铁矾矿相当, 称为黄钾铁矾法。该反应在常压、较高温 ($>90^\circ\text{C}$)、 $\text{pH} = 1.0 \sim 2.0$ 条件下发生, 方程式为: $3\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 12\text{H}_2\text{O} + \text{A}_2\text{SO}_4 = \text{A}_2\text{Fe}_6(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12} + 6\text{H}_2\text{SO}_4$ 。

黄钾铁矾法是澳大利亚雷斯顿电锌厂经过多年实践发展起来, 于 1968 年工业化应用。1985 年, 日本矿业协会调查世界上锌冶炼的生产情况, 指出黄钾铁矾法是最流行的除铁方法。此后黄钾铁矾法经过不断完善, 发展出了低污染黄钾铁矾法, 减少了铅、锌、银、金、锡、铜等有价金属的损失。

黄钾铁矾法适用于铁含量较高的溶液处理, 碱耗低; 设备简单, 维修容易; 需要氧化性强的氯酸钠氧化, 能耗高, 沉矾时间长, 操作条件要求较为严格。不适用于铁含量低、溶液净化量大的生产系统。

3.3 针铁矿法^[29-30]

根据热力学数据, 在 pH 值较小、温度不高于 140°C 、 Fe^{3+} 浓度较低时, Fe^{3+} 的水解产物是针铁矿: 在硫酸介质中为 $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$, 在盐酸介质中为 $\beta\text{-FeO}(\text{OH})$ 。针铁矿法除铁的基本原理是, 控制 Fe^{3+} 浓度足够小, 在合适 pH 值条件下, 使 Fe^{3+} 水解生成针铁矿沉淀。控制 Fe^{3+} 浓度的方法主要有: 还原-氧化法 (V. M.) 和部分水解法 (E. Z.)。V. M. 法是把 Fe^{3+} 还原成 Fe^{2+} , 通过控制 Fe^{2+} 氧化速度, 保证 Fe^{3+} 含量始终 $< 1 \text{ g/L}$, 在 $\text{pH} = 2 \sim 3$ 水解生成针铁矿。E. Z. 法是把较高浓度 Fe^{3+} 溶液注入到搅拌均匀的大反应器中, 通过稀释使 Fe^{3+} 含量始终 $< 1 \text{ g/L}$, 在 $\text{pH} = 1.7 \sim 3.5$ 水解生成针铁矿。反应方程式为:



针铁矿法由比利时老山公司最先研发成功, 1970 年开始工业化应用。多年来, 针铁矿法已得到

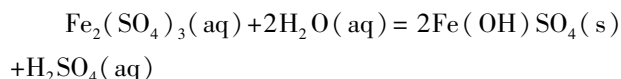
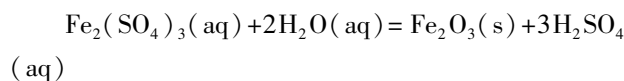
广泛研究及应用。针铁矿法的优点是: 常压、较低温度, 工艺设备简单, 成本较低; 针铁矿渣呈结晶态, 过滤性能好; 渣量较少且含铁量较高, 适当处理可作为炼铁原料。

由于老山公司发展的 V. M. 法存在着还原、氧化两道工序, 操作上较麻烦。为简化工艺, 国内外均在研究和应用由澳大利亚电锌公司发展起来的 E. Z. 法。E. Z. 工艺的关键是喷淋方式与铁渣含锌量的控制, 即如何提高喷淋速率及降低铁渣含锌率。

针铁矿法除铁工艺条件较苛刻, 往往加入一定量晶种作用^[31]。中南大学孙伟教授等研究了类针铁矿法, 以及天然褐铁矿对类针铁矿沉淀结晶的影响^[32]。结果表明, $80 \sim 85^\circ\text{C}$ 、 $\text{pH} = 2.4 \sim 2.8$ 时, 以 8 ml/L 的速度缓慢加入 30% 双氧水, 除铁效果较好。褐铁矿晶种诱导除铁不仅条件容易控制、除铁效率高、渣量少, 而且铁渣中铁品位大于 50%。

3.4 赤铁矿法^[33-34]

高温、高压条件下 (200°C 、 1800 kPa), Fe^{3+} 会水解生成赤铁矿 ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$): 在酸度较低时, 水解生成赤铁矿; 在酸度较高时, 水解生成 $\text{Fe}(\text{OH})\text{SO}_4$ 。故在高温高、压条件下, 当溶液酸度不高时, Fe^{3+} 水解产物以 Fe_2O_3 为主, 并混以 $\text{Fe}(\text{OH})\text{SO}_4$ 沉淀物, 此沉淀物称为赤铁矿渣, 除铁率 $> 90\%$ 。反应方程式为:



世界上只有两家公司采用赤铁矿法建成投产—日本 Iijima (饭岛) 锌厂和德国鲁尔锌厂。实际工艺是, 先将 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} , 在后续工艺调 pH 值后再通入高压反应釜内氧化沉淀。目前, 德国鲁尔锌厂已停产, 报道主要因为是: 生产成本低; 系统工程化问题多。

综上所述, 化学沉淀法除铁, 目前应用最多的是针铁矿法, 其次是黄钾铁矾法, 这两种方法均适用于酸性湿法冶金。氢氧化铁法在酸性和碱性条件下均可采用, 但多以胶体状态、过滤性能差。

4 膜分离技术

20 世纪 60 年代起, 膜分离技术迅速发展, 开始广泛应用在生物医药、化工与石化、食品与饮料、特

种水处理等领域^[35]。膜分离技术与传统分离技术相比,不需要沉淀药剂,在选择性、工作效率、节能和环保等方面具有明显优越性。孔径通常小于 0.2 μm ,可分为微滤膜、超滤膜、纳滤膜、反渗透膜等。按照膜材料不同,有无机膜和有机膜两大类。

无机膜以陶瓷膜为主,是以 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 TiO_2 、 SiO_2 等材料制成的多孔非对称膜,在高温、酸碱、有机溶剂等有机膜难以承受的苛刻环境下具有良好的竞争力。国际陶瓷膜市场占整个膜市场的 10 ~ 20%,并以年增长 35% 的速度发展着。我国陶瓷膜市场占整个膜市场的 3% 左右,技术最成熟的是微滤膜(孔径大于 50 nm)^[36-38]。超滤膜、尤其是纳滤膜,有待进一步研制,目前通常可以做到 5 nm 孔径。

有机膜从最初的微滤膜、超滤膜发展至今,技术类型多种多样,几乎囊括了包括纳滤、反渗透、电渗析、渗透蒸发等在内的所有膜分离过程^[39]。目前,耐碱膜的(pH < 12)的截留分子量通常可以做到 3000 Da,对应孔径约 2 nm。材质主要有:纤维素(CA)、磺化聚砜(PS)、磺化聚醚砜(SPES)、聚酰胺(PA)、聚乙烯醇(PVA)等^[38]。

目前,膜分离技术以微滤膜为主^[41-42]。在湿法冶金除杂中应用较少。

5 滤料吸附^[44-46]

解决胶态 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 过滤问题的另一种可能途径是吸附材料。地下水(铁含量 5 ~ 10 mg/L,也有高到 20 ~ 30 mg/L)除铁过程中,将 Fe^{2+} 曝气氧化为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 颗粒经混凝沉淀和过滤等工艺去除时,滤后水中往往残存能穿透滤层的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶粒(< 1.2 μm),导致出水总铁超标(《生活饮用水标准》规定 $\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3) \leq 0.3 \text{ mg/L}$)。水中溶解性硅酸与 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 形成络合物,也使 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 凝聚困难。因此,20 世纪 60 年代后,发展了接触催化氧化法。

接触催化氧化法的原理是:锰砂滤料表面吸附形成“铁质活性滤膜”-主要成分是 $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (或 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$),具有很强的催化活性:首先以离子交换方式吸附水中 Fe^{2+} ,当水中有溶解氧存在时,被吸附的 Fe^{2+} 在“铁质活性滤膜”的催化作用下迅速氧化水解,反应生成物又参与催化反应,直至滤膜老化脱水后催化活性降低。

6 离子交换法和萃取法

溶液中的铁离子也可以用离子交换法或萃取法去除。离子交换树脂除铁:酸性条件下,要防止 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} ,去除率高,方法简单,效果明显,但操作繁琐;碱性条件下,树脂成本高。

萃取法除铁主要问题是环境污染和成本较高,在酸性湿法冶金中应用很少。

7 总 结

(1)磁选是非金属矿物和碱性金属湿法冶金^[47]除铁的首选方法。天然水晶石或优质石英砂可以有很高的纯度,通过磁选等技术,可以得到铁含量 $\leq 0.0002\%$ 的超纯石英砂。氧化铝生产精液通过磁选除铁后,铁含量可以降低至低于 4 ~ 5 mg/L,利用种分法生产高纯氢氧化铝,铁含量 $\leq 0.008\%$ 。

(2)但由于非金属矿物含铁成分的多样性,以及设备和技术限制,有些产品(包括石英砂和高岭土等)通过磁选除铁后质量不是很理想,必须结合化学浸出法进行处理。不过,化学浸出法,污染较严重,成本较高。

(3)酸性湿法冶金除铁主要利用化学沉淀法,以针铁矿法应用最为广泛。氢氧化铁法,多以胶体状态,过滤性能较差。膜分离技术近年来发展迅速,以微滤膜(孔径 > 50 nm)应用最多,主要在生物医药、化工与石化、食品与饮料、特种水处理等领域;还没有取代传统分离技术,进入湿法冶金领域。

(4)地下水除铁广泛采用锰砂滤料,滤料表面吸附形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 膜, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 膜催化吸附铁离子分解成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$,从而去除铁离子和铁的颗粒。离子换法和萃取法除铁,化工生产中应用较少。

此外,湿法冶金通过化学法(包括沉淀法、离子交换法、萃取法等)提纯,只是制取高纯物质的基础。进一步提纯到很高的纯度,一般通过电化学或物理提纯,利用电解精炼,或者蒸发、凝固、结晶、扩散、电迁移等物理过程除去杂质^[48]。

参考文献:

- [1]武焯霞. 亚铁粒子在空气中氧化速度问题的探讨[J]. 内蒙古石油化工, 2007(3): 36.
- [2]徐绍龄,段维恒,刘时杰,等. 空气氧化水溶液中亚铁离子的研究[J]. 云南大学学报, 1986(2): 191-197.
- [3]张浩勤,叶学军,王亚辉,等. 五水偏硅酸钠生产技术研

- 究 I 含铁杂质的去除[J]. 日用化学工业,1996(6):49-50.
- [4]冉红想,卢刚. 强磁选设备在非金属矿除铁中的应用[J]. 有色金属:选矿部分,2011(增刊):150-154.
- [5]刘艳杰. 永磁盘式强磁选机磁场分布优化设计及钾长石除铁试验研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.
- [6]周奇珍. 新型超精细高梯度湿式磁选机在长石除铁中的应用[J]. 佛山陶瓷,2012(1):14-17.
- [7]彭世英. 高梯度磁选在我国高岭土工业中的应用[J]. 矿产保护与利用,1994(3):27-32.
- [8]莫长录,韦献鹏. 北海高岭土超导磁选应用研究[J]. 非金属矿,2009(增刊):9-10.
- [9]周国华,薛玉兰,何伯泉. 铝土矿选矿除铁研究进展概况[J]. 矿产保护与利用,1999(4):44-47.
- [10]廖国平,钱枝花,黄会春. SLon 磁选机在氧化铝产业链中的应用[J]. 现代矿业,2010(8):118-119.
- [11]刘希良. 高纯二氧化硅的制备与应用[J]. 化工管理,2014(11):88-89.
- [12]雷清普,郑典模. 高纯二氧化硅的制备与应用[J]. 江西科学,2008(6):915-918.
- [13]申士富. 高纯石英砂研究与生产现状[J]. 中国非金属矿工业导刊,2006(5):13-16.
- [14]宋曦婷,刘连利. 高纯二氧化硅的制备研究进展[J]. 渤海大学学报:自然科学版,2012(2):129-132.
- [15]杨妮. 硅石制备高纯超细二氧化硅的研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2011.
- [16]顾松青. 冶金级氧化铝的质量问题[C]. 中国工程院化工、冶金与材料学部第五届学术会议论文集. 海南:中国工程院,2009. 957-961.
- [17]吴长河. 高白氢氧化铝的研制、开发及产业化[D]. 长沙:中南大学,2005. 5.
- [18]游玉萍. 高纯氧化铝中痕量杂质元素的标准分析方法研究[D]. 长沙:中南大学,2005. 6.
- [19]韩宪景. 超高纯石英砂深加工生产[J]. 国外金属矿选矿,1998(7):31-32.
- [20]程尚栩,苗雪原,薄雷明. 高纯石英砂工艺流程分析研究[J]. 中国高新技术企业,2013(28):13-15.
- [21]方邺森,方金满. 中国主要类型制瓷高岭土的特征[J]. 景德镇陶瓷学院学报,1985(1):57-74.
- [22]蔡丽娜,胡德文,李凯琦,等. 高岭土除铁技术进展[J]. 矿冶,2008(4):51-54.
- [23]王振宇,刘滢. 高岭土选矿除铁工艺研究现状[J]. 甘肃冶金,2012(1):52-55.
- [24]顾雪. 高岭土选矿除铁工艺及其应用现状研究[J]. 化工管理,2016(1):151.
- [25]袁延英. 高岭土的几种除铁方法[J]. 国外金属矿选矿,2000(9):19-22.
- [26]黎艳,郭新锋,王娟芳,等. 膨润土氧化还原法除铁试验研究[J]. 中国非金属矿工业导报,2008(1):31-32.
- [27]丰驰,但勇,杨永忠,等. 镍湿法冶炼中几种除铁方法比较[C]. 中国有色金属学术铜镍湿法冶金技术交流及应用推广会,2001,181-183.
- [28]黄震海. 低污染黄钾铁矾法除铁的生产实践[J]. 大众科技,2012(1):171-172.
- [29]吴远桂,谈定生,丁伟中,等. 针铁矿法除铁及其在湿法冶金中的应用[J]. 湿法冶金,2014(2):86-89.
- [30]周桂英,刘美荣. 湿法冶金过程净化除铁的研究进展[C]. 中国采选技术十年回顾与展望,2012. 6. 1,69-76.
- [31]邓永贵. 硫酸锌浸出液针铁矿法除铁研究[D]. 长沙:中南大学,2008:12-15.
- [32]刘润清,常晓然,韩海生,等. 类针铁矿沉淀结晶的研究[J]. 矿冶工程,2015(6):57-60.
- [33]张成松,赵婷. 赤铁矿除铁法在湿法炼锌工艺中的应用[J]. 湖南有色金属,2014(2):39-41.
- [34]岳明,孙宁磊,邹兴,等. 锌浸出液三价铁直接水解赤铁矿法除铁的探讨[J]. 中国有色冶金,2012(4):80-85.
- [35]漆虹,曹义鸣. 2014 年我国陶瓷膜应用新进展[J]. 膜科学与技术,2015(3):131-133. 32.
- [36]曹义鸣,徐恒泳,王金渠. 我国无机陶瓷膜发展现状及展望[J]. 膜科学与技术,2013(2):1-6.
- [37]庾晋,周洁. 陶瓷膜技术及应用现状[J]. 现代技术陶瓷,2004(2):35-38.
- [38]张小波,张乃慧. 试析陶瓷膜过滤器、西恩过滤器的工艺与设备[J]. 江苏氯碱,2007(3):1-5.
- [39]田岳林. 无机膜与有机膜分离技术应用特性比较研究[J]. 过滤与分离,2011(1):45-48.
- [40]高从塔,陈益棠. 纳滤膜及其应用[J]. 中国有色金属学报,2004(5):310-317.
- [41]王志高. 膜分离技术在湿法冶金中的应用. 第四届全国膜分离技术在冶金工业中应用研讨会论文集. 2014. 6: 54-61.
- [42]姚志春,胡晓东,段雅峰. 陶瓷膜分离技术在湿法冶金中的应用研究. 膜科学与技术,2011(1):97-100.
- [43]王永辉,王志高,徐国钻,等. 陶瓷膜技术在钨溶液过滤中的应用. 湿法冶金,2015(6):519-523.
- [44]唐朝春,叶鑫,陈惠民,等. 地下水除铁除锰技术与应用的研究进展[J]. 华东交通大学学报,2016(1):136-142.
- [45]马恩,王刚. 地下水除铁除锰技术的研究进展[J]. 环境保护与循环经济,2008(7):36-39.
- [46]王振兴,王鹤立,李向全,等. 地下水除铁除锰技术研究进展[J]. 环境工程,2012(增刊):48-51.
- [47]赵由才,张承龙,蒋家超. 碱介质湿法冶金技术[D]. 北京:冶金工业出版社. 2009.
- [48]郭学益,田庆华. 高纯金属材料[D]. 北京:冶金工业出版社,2010.