



我国高岭土开发现状及综合利用进展

冯雪茹, 邓建, 严伟平, 李维斯

(中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 高岭土是一种应用广泛的非金属矿产资源。我国是世界上最早发现并利用高岭土的国家, 高岭土储量位居世界前列。虽然我国高岭土储量较大, 但随着其应用领域的扩展, 资源严重紧缺, 价格随之上涨, 尤其是优质的高端高岭土加工产品还远不能满足市场消费的需求。本文综述了我国高岭土的主要开发现状、综合利用领域发展进展, 并对高岭土的开发与利用情况进行了总结, 创建高岭土矿产资源开发与利用新理念, 不断探索高岭土资源的开发应用方式, 提升高岭土利用效率, 促进我国经济可持续高质量发展。

关键词: 高岭土; 开发现状; 综合利用进展

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.06.001

中图分类号: TD97; TF111 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2022)06-0001-10

高岭土又称瓷土, 化学结构式为 $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$ 或 $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, 因其发现于中国景德镇高岭村而得名^[1]。高岭土是一种以化学组成相同且结构类似的高岭石族黏土矿物为主的黏土岩, 其主要由高岭石、埃洛石、水云母、伊利石、蒙脱石以及石英、长石等矿物组成。原矿呈松散的土块状或致密岩块状, 纯净的高岭土呈白色或浅灰色, 含杂质时则带有灰、黄、褐等颜色^[2]。其具有较好的可塑性、粘结性、绝缘性、抗酸性、耐火性等优异的物理化学性质, 被作为原料广泛应用于各个领域, 如: 陶瓷工业、造纸工业、耐火材料、水泥工业、橡胶工业、石油化工、医药纺织以及国防工业等^[3-4]。全球高岭土的探明储量大约在 320 亿 t, 主要分布于美国、英国、中国、巴西等地, 其中美国储量最多, 达 82 亿 t^[5]。我国高岭土查明资源储量为 34.96 亿 t, 位居世界第三, 主要分布在江西、广东、广西、福建、江苏等地^[6]。

我国是世界上最早发现和利用高岭土的国家。高岭土是我国重要的非金属矿产资源, 其应用范围广泛并在不断扩展, 其需求量也逐年增长。高岭土属于不可再生资源, 随着其应用领域的扩展, 资源出现紧缺状态, 价格也随之升高,

尤其是优质、高端的高岭土加工产品还远远满足不了市场消费的需求。目前, 对高岭土的深层次加工与综合利用方面尚存在技术瓶颈, 在当前资源开发与综合利用的新形势下, 通过改进矿产资源开发与利用理念, 不断探索新兴资源运用方式, 加强在节能环保、生物产业和新材料等方面的应用, 提升高岭土利用效率, 保证国家资源安全与高效利用的同时促进我国经济可持续高质量发展。

1 高岭土的开发现状

1.1 高岭土的选矿提纯工艺

对高岭土进行提纯的目的的一方面主要是去除其中的铁矿物、钛矿物和有机质等有害的染色杂质, 以提高产品的白度; 另一方面是去除石英、长石等砂质矿物, 以提升高岭土产品的品质, 进而拓展其应用的广度及深度, 在充分利用高岭土资源的同时获得更好的经济效益。目前采用的提纯工艺主要包括重选、磁选、浮选、浸出、化学漂白和焙烧等。

1.1.1 重选

重选提纯工艺主要是利用高岭土与脉石矿物之间的密度和粒度差异, 去除轻质的有机质和含

收稿日期: 2022-09-18

作者简介: 冯雪茹(1990-), 女, 工程师, 主要从事冶金研究。

铁、钛和锰等元素的高密度杂质,以达到提纯高岭土的目的,减少或去除杂质对其白度的负面影响。重选提纯高岭土是行之有效的,以小锥角旋流器组或离心机替代高岭土提纯流程中的洗涤和筛分作业,既能实现洗涤和分级的目的,还可以去除部分杂质,具有较好的应用价值,但同时也要考虑仅通过重选工艺很难得到符合要求的最终高岭土产品,重选提纯后仍要通过煅烧、磁选和浸出等方法以得到最终合格产品^[7]。

1.1.2 磁选

磁选工艺用于去除高岭土中的赤铁矿、菱铁矿、黄铁矿和金红石等弱磁性染色杂质。磁选不需要使用化学药剂,对环境无污染,因而在非金属矿的提纯过程中使用较为广泛。去除高岭土中的弱磁性杂质颗粒需要较高的磁场磁感应强度和磁场梯度^[8],而磁选技术的发展及设备的升级,使高岭土等非金属矿的磁选提纯得以有效实现。高性能的强磁选设备 SLon 立环高梯度磁选机,新兴的磁分离设备超导磁选机,磁选提纯工艺解决了因含铁量高而不具备商业开采价值的低品质高岭土资源的开发利用问题,但单一的磁选作业也难以获得高品质的高岭土产品,目前还需要配合化学漂白等其他工艺来进一步降低高岭土产品的含铁量^[9-10]。

1.1.3 浮选

浮选提纯工艺可以有效去除高岭土中的含铁、钛和碳杂质,实现回收再利用煤系高岭土等低品级高岭土资源^[11]。高岭土颗粒较细,比脉石矿物更难上浮,因此高岭土浮选提纯工艺多采用反浮选以达到较好的去除杂质的效果,如反浮选除碳、脱硫和除铁。煤油为捕收剂,松醇油为起泡剂,水玻璃为抑制剂,浮选提纯工艺多用来处理杂质较多和白度较低的高岭土原矿,以实现低品级高岭土资源的综合利用。浮选可使高岭土的白度明显提升,其不足之处在于需要添加化学药剂,造成生产成本增高,且易对环境造成污染。螯合捕收剂等新型药剂的研发是浮选提纯研究的主要方向之一^[12-14]。

1.1.4 浸出

浸出是通过适当浸出药剂来选择性地溶解并去除高岭土中的某些杂质组分的方法,如使用盐酸或硫酸的酸法浸出和微生物浸出法。浸出工艺流程简单、节能、可降低生产成本,具有较好的发展潜力。浮选和强磁选提纯效果较差。采用浓度 25% 的硫酸对含铁较高的硬质高岭土进行酸浸

处理 5 h,其除铁率可达 37.67%。因原矿中铁多以黄铁矿的形式存在,为到达更好的除铁效果,以 H_2O_2 为氧化剂进行氧化酸浸。煤系高岭土中含有黄铁矿、褐铁矿和赤铁矿等杂质,在煅烧过程中黄铁矿会被氧化成黑褐色的铁氧化物,使高岭土的白度有所降低^[15]。氧化亚铁硫杆菌可以通过催化氧化作用分解黄铁矿,因此可以用于去除高岭土中的黄铁矿^[16]。与目前常用的提纯工艺相比,浸出提纯工艺流程简单,可以显著降低生产成本,使低品位高岭土得到有效的开发利用,具有更高的发展潜力。在采用微生物浸出时,必须进行更加严格的环境评估及经济效益评估。

1.1.5 化学漂白

三价铁离子及其氧化物是降低高岭土白度的主要染色杂质,通过化学试剂去除这些有害杂质的方法称为化学漂白法。高岭土的化学漂白法分为氧化法、还原法和氧化-还原联合法等^[17]。氧化漂白法的原理是将还原态的有害着色杂质氧化成可溶性的物质,进而将其去除,例如将黄铁矿氧化成可溶性的硫酸亚铁,然后将有机质氧化后通过水洗去除。常用的强氧化剂有次氯酸钠、高锰酸钾和过氧化氢等^[18]。pH 值、温度、药剂用量、矿浆浓度和漂白时间等对漂白效果均有影响。还原漂白法的原理是将难溶的三价铁氧化物还原为可溶的二价铁盐,使有害元素铁转化为可溶相以溶解,继而通过洗涤流程去除。常用的还原漂白药剂有连二亚硫酸钠 ($Na_2S_2O_4$) 和二氧化硫脲 ($HO_2SC(NH)NH_2$) 等^[19]。化学漂白法可以大幅提升高岭土产品的白度,但其生产成本较高,多用于对经过除杂的高岭土精矿进行进一步提纯。连二亚硫酸钠等药剂的使用会产生酸性废气和废水,对环境污染影响较大,因此采用此方法时需要考虑环保问题和经济合理性,今后的发展趋势应采用更加廉价且无污染的漂白剂。

1.1.6 焙烧

焙烧也是提高高岭土白度的一种重要提纯工艺。高岭土可通过焙烧工艺去除其中的含碳杂质,如通过磁化焙烧加磁选去除磁性杂质,通过氯化焙烧去除某些金属杂质。低温焙烧可脱除表面和层间羟基,而不会破坏高岭石结构,同时使含碳有机质有效分解,使该低品级煤系高岭土达到玻璃纤维原料要求,有效实现对低品级煤系高岭土资源的利用^[20]。磁化焙烧将高岭土中含铁杂质转化为较强磁性或强磁性的含铁矿物,进而通

过磁选进行杂质的去除，磁化焙烧对该高岭土的提纯效果优于传统化学漂白法^[21]。氯化焙烧是在高岭土焙烧过程中添加氯化剂，使某些金属氧化物和硫化物杂质转化为可挥发的氯化物以达到去除该金属元素的目的。焙烧提纯工艺可以使高岭土白度大幅提升而获得高品质的高岭土产品，实现对低品级高岭土资源的利用，可获得较高品质的高岭土产品。但该方法能耗大，生产过程中会对环境造成污染。因此，今后的发展思路是通过优化焙烧流程和设备，不断降低生产成本及污染，其对促进焙烧提纯高岭土及资源综合利用具有重要意义。

1.1.7 联合提纯工艺技术

单一的提纯工艺难以获得高品质的高岭土产品，特别是处理我国储量较大的低品级煤系高岭土以及矿物组成复杂的高岭土。不同类型的高岭土处理工艺有所差异，其中软质高岭土处理工艺包括粉碎、制浆、旋流器、选择性絮凝、漂白，离心、剥片、磁选；硬质高岭土处理工艺包括粉碎、制浆、旋流器、离心机、剥片、漂白或粉碎、焙烧、制浆、旋流器、剥片、离心机；砂质高岭土处理工艺包括制浆、螺旋分级机、沉淀、离心机、剥片、漂白或原矿、制浆、重选除砂、调和、浮选^[22]。

1.1.8 剥片

剥片分为机械剥片和化学剥片，是深加工工艺的重要工序，需要将高岭土剥片成极细的薄片，经过磁选除铁和漂白以达到低磨损和高白度的要求，被广泛应用于造纸、化妆品、医药等方面^[23]。

1.2 高岭土改性技术

目前，有关高岭土的改性研究主要目的是增强其吸附废水中重金属离子、氨氮等污染物，制备高性能复合材料或制备催化材料。

1.2.1 插层改性

高岭土是典型层状硅铝酸盐矿物，层间通过氢键连接。通过一些特殊方法，可以使某些物质克服层间氢键而插入层间空隙，在不破坏高岭土层状结构下增大层间距。由于高岭土层间氢键作用强且无可置换离子，所以可以直接插层的有机小分子不多，主要包括二甲亚砜、胍、甲酰胺、乙酰胺、醋酸钾等。此外，有些分子虽不能直接进入层间，但可以通过取代、夹带的方式间接进入高岭土层间，如甲醇、苯甲酰胺、脂肪酸盐等^[24]。常见的插层方法包括：液相插层、蒸发溶

液插层、机械力化学插层以及一些新型的微波辐射插层和超声波插层等，通常，插层改性方法可以将高岭土的层间距从 7.2 Å 扩大到 10 Å 以上^[25]。

1.2.2 煅烧改性

煅烧是高岭土加工的常见方法，不同使用目的下的高岭土煅烧温度不同，煅烧应为中低温即 450~925℃，一方面实现高岭土脱羟基，一方面使高岭土保持高活性的偏高岭土而避免向尖晶石和莫来石转变。同时，中低温煅烧还可以增加高岭土的孔径、孔容和比表面积，有利于吸附^[26]。合成分子筛和铝盐化工，低温煅烧生成的偏高岭土活性高，有利于硅铝酸盐合成分子筛，煅烧温度 700℃ 左右；PVC 电缆料配料，增加高岭土孔隙，增强复合材料电绝缘性能，煅烧温度 < 850℃；造纸填料和涂料添加成分，去除高岭土中杂质碳增加白度，增加孔隙率增强其吸油性能，煅烧温度 1000℃ 左右；耐火材料填料、玻璃钢增强填料、陶瓷窑具和高级陶瓷胚料的配料以及精密铸件模型，高温后向稳定的莫来石转变，煅烧温度 1300~1525℃^[27]。

1.2.3 化学改性

一般被分为酸改性和碱改性，酸改性高岭土的作用主要是将偏高岭土中部分 Al 溶出，然后再吸附到残余物表面，从而增大比表面积且形成新的活性位点^[28]。高岭土和煅烧高岭土均不含有 B 酸和 L 酸中心，而酸改性高岭土含有 L 酸中心但不含有 B 酸中心，因此活性高^[29]。碱改性高岭土的作用主要是将煅烧高岭土中部分 Si 溶出，相比之下，Al 较难溶出^[30]。高岭土研究表明与 NaOH 溶液反应时，首先浸出可溶的 Si 和 Al，然后可溶离子间还会发生反应生成霞石和方钠石等沉淀。与酸改性不同的是，碱改性后产物的比表面积降低且酸性中心数量小于酸改性产物，但是酸性中心强度高于酸改性产物^[31]。有关酸碱改性提升高岭土高温吸附性能的研究尚处于初始阶段，缺乏对改性工艺及其参数的广泛研究，此外还需要深入探索改性对吸附的影响机理，为改性方法提供理论指导。

1.2.4 聚合羟基铁改性

高岭土聚合羟基铁改性高岭土吸附量远远大于原高岭土吸附量。而吸附温度对于聚合羟基铁改性高岭土的影响作用较大，当温度越高，其吸附量也会逐渐增加^[32]。在聚合羟基铁溶液当中，高岭土层间铝同溶液中的铁出现了离子交换以及

同晶置换的情况，并且受碳酸钠影响，高岭土中的铝将会被大量脱除，由此增加了高岭土中的含硅量与含铁量，从而大幅提高了聚合羟基铁改性高岭土的吸附性能。

1.2.5 偶联剂改性

在进行有机物质和无机物质复合的过程中，通常使用偶联剂材料作为两者耦合材料，而高岭土物质的表面可以和偶联剂发生反应，在经过偶联剂改性处理之后的高岭土材料能够与有机相拥有更为优良的相容性。应用较为普遍的偶联剂有硅烷偶联剂以及钛酸酯偶联剂等。偶联剂的分子结构之中，其中一端可以与高岭土之中的 Si-O 以及 Al-O 键形成化学结合，而另外的一端则暴露在外，这样便能够确保高岭土的表层结构能够与有机物质拥有更优良相容性。不过，现阶段对于偶联剂改性高岭土的研究之中，仅仅对硅烷偶联剂和钛酸酯偶联剂改性机理较为明确，另外一些偶联剂的改性机理研究依旧不够深入^[33]。

1.3 高岭土尾矿资源现状

高岭土尾矿是高岭土矿经选矿后剩余的废弃物，主要为品位低、被泥土侵蚀的物料。高岭土矿山开采存在大量废弃高岭土尾矿未能被开发利用，侵占了大量的土地，堵塞沟渠，污染水质，破坏环境，综合利用这些尾矿，将其变废为宝，变害为利，有着重要的环保价值和社会价值以及经济价值。

目前，导致高岭土尾矿问题突出的原因一方面来自于区域资源利用观念及执行力层面，另一方面是由于高岭土现有选矿、利用技术的限制性。使得高岭土资源利用尚处于初级阶段，其深层次性质的应用价值长期被忽视，开发及利用技术研究停滞不前，制约着资源的利用效率，不仅造成资源的浪费，新的尾矿库的不断增多对区域生态环境造成污染与危害，一旦发生尾矿库安全问题，必将会对周遭环境及居民生活等造成严重威胁。对尾矿的二次开发与利用是未来国内外矿业发展的重要研究领域，为高岭土开发利用创造新的应用价值。

由于尾矿组成及结构性质上比较复杂，对于高岭土尾矿的综合利用需要以强大的技术性支持为基础，在尾矿处理中例如将高岭土尾矿应用于建筑材料生产中，用高岭土尾矿替代普通河砂作为主要原料生产加气混凝土砌块，实现了废弃物的资源化利用；利用尾矿制作土壤改良剂等，高岭土尾矿中仍然含有大量的可利用矿产成分，这

些共伴生矿物的成分组成及数量也存在较大的差异性，如果能够合理利用尾矿中的铝硅酸盐矿物的物化特性，或者能够以一定的技术性手段改进矿物成分的性质，便可以产生良好的经济、环境等效益。其中大量的微量元素可以被合理地应用到土壤改良过程中，进而提升土壤中所需的微量元素，提升土壤肥力。

尾矿是潜力巨大的未来矿产开发领域、尾矿综合利用可以提升现有资源的利用效率、大力提高尾矿再选综合回收技术、提升尾矿作为建筑材料的生产优势、从管理、利益等层面构建尾矿综合利用激励机制。

2 高岭土的综合利用

高岭土具有良好的可塑性、分散性、耐火性、粘结性和稳定性等特性，我国高岭在陶瓷、造纸、涂料、塑料、耐火材料、橡胶等众多领域的应用，以陶瓷、造纸和涂料三个领域为主，总需求量达 665 万 t。其中陶瓷行业需求量保持较快增长，2020 年需求量为 309 万 t，占比 46.5%。高岭土深加工领域需求量持续增加，医用高岭土由 2016 年的 2 万 t 增长至 2020 年的 16 万 t，年均增长率 51.57%；化妆品用高岭土由 2016 年的 4 万 t 增长至 2020 年的 30 万 t，年均增长率 49.63%；特级精细高岭土主要应用于高级电子原件，被用于 5G 基站、家电、汽车、PC 以及服务器、安防等方面，随着这些产品的普及对特级精细高岭土的需求量在不断增加。2020 年，我国高岭土的消耗结构见图 1^[34]。

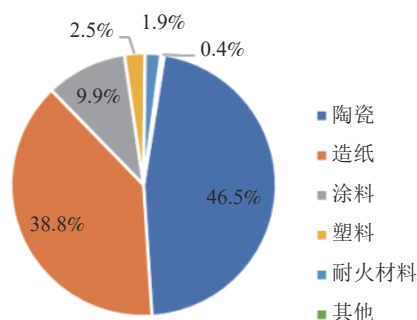


图 1 2020 年我国高岭土的消耗结构

Fig.1 Consumption structure of kaolin of China in 2020

2.1 传统行业的应用

2.1.1 造纸

高岭石黏土的粒度小，剥离后具有良好的鳞片和片状形态，片径与厚度比例大，化学性质稳定，所以被用作造纸填料和纸张涂层以提高纸张

的光泽度、充填纸张纤维之间的空隙、提高不透明度等。用作填料，在改善纸张性能的同时还可以降低成本；用作涂布料，则可以改善纸张对油墨的渗透性、包容性以及纸张的外观。在造纸中对高岭石的主要要求是粒度及杂质含量，要求粒度小于 $2\ \mu\text{m}$ ，白度大于 86%。

2.1.2 陶瓷

高岭土在陶瓷工业中应用的时间早，量也大，通常可以占到 20%~30%。高岭土可以使陶瓷中 Al_2O_3 的含量增加，莫来石的生成过程更容易，从而提高陶瓷的烧结强度和稳定性^[35]。烧成陶瓷时，高岭土分解莫来石是形成坯体框架的过程，此过程使陶瓷坯体不容易走样变性，同时使烧成温度范围变宽，并且提高陶瓷的白度。同时，高岭土自身具有的可塑性、粘结性、悬浮性、结合性等特性，使瓷泥瓷釉的成形性得到改善，更利于车坯、注浆、陶瓷成形等加工过程。

2.1.3 橡胶

高岭土填充到橡胶的胶体混合物中，可以增强橡胶的化学稳定性、耐磨性和机械强度，延长硬化时间，还可以改善橡胶的流变性、混炼性、硫化性，提高未硫化制品的粘稠度，防止其凹陷、塌软、下垂、变形、扁管等。高岭土橡胶制品的防水性、通透性、防火抗燃性、化学活性等特性也得到了极大的改善。同时，高岭土在橡胶中还可以作为填料，在不影响橡胶性能的同时可以大幅降低成本。

2.1.4 涂料颜料

高岭土由于其色白、价廉、流动性好、化学性质稳定、表面阳离子交换量大，很早就被用作涂料和油漆的填料。高岭土可以用于改善涂料的涂刷性、涂料体系储存稳定性、涂层的抗吸潮性及抗冲击性等机械性能、颜料的抗浮色和发花性等。随着生产的发展，对涂料的性能和耐久性等方面的要求日益严格，如要求制备低 VOC、高固体涂料、更薄和无疵平滑、光亮的涂膜，此时，需要采用高岭土作添加剂。高岭土几乎可以适应所有的涂料体系，从底漆到面漆，所有的固体成分、涂膜的厚度以及光泽。煅烧高岭土在乳胶漆中可以部分替代钛白粉，并配合钛白粉可提供很好的遮盖力和展色力。由于高岭土粒子可以改善颜料粒子间隔，提高涂层的反射率和颜色强度；又因其吸油量较低，可较大量的添加于配方中而不破坏漆膜性能，在不影响光泽、遮盖力、柔韧

性及其他性能的前提下极大地降低涂料成本。因此，高岭土可广泛用于水性或溶剂型平光漆、半光漆、蛋壳光漆及特种涂料中^[36]。

2.1.5 耐火材料

高岭土具有良好的耐火性，常用来生产耐火材料，其制品能在高温下承受负荷而不变形。以高岭石为主要成分的高岭土，以及膨润土和铝土矿等，据其耐高温的用途，统称为耐火粘土。某些带色的高岭土，不能用于陶瓷和造纸，却是耐火材料的好原料。高岭土用作耐火材料制品主要有两类：耐火砖、硅铝棉。前者耐火度不低于 1730°C ，可根据需要制成各种尺寸与形状的耐火砖。后者是一种轻质耐火保温材料，是高岭土在 $1000\sim 1100^\circ\text{C}$ 焙烧，再用 2000°C 电弧炉将矿石熔融，在高速气流下吹制成棉。

2.1.6 催化裂化催化剂

高岭土可直接或经酸、碱改性作为催化剂基质，也可通过原位晶化技术合成分子筛或含有 Y 型分子筛的催化剂。具有防止催化裂化催化剂重金属中毒、裂化活性高和选择性好、催化剂抗磨和再生性能好等优点^[37]。

2.1.7 电缆材料

生产高绝缘性能电缆需要超量加入电性能改良剂。高岭土作为唯一能制成电性能改良剂的产品，前景自然看好在要求电绝缘性能较高的塑料电缆及绝缘材料中，需添加改性煅烧高岭土。高岭土经适当温度煅烧后有极高的电阻率，不同煅烧温度的高岭土空隙率不一样，空隙对电缆材料中一些较活泼的有害成份有一定的吸附作用，能提高电缆绝缘性；煅烧高岭土再经表面改性，可以提高其在高分子材料中的分散性，增强制品的性能，可在有机高分子材料-改性剂-煅烧高岭土之间产生良好的结合界面，使煅烧高岭土在电缆中能均匀分散，起到更好的桥梁作用^[38]。

2.1.8 润滑领域

高岭土具有层状结构和小颗粒尺寸使其具有较好的润滑性，纳米高岭土的小尺寸效应更是增强了其润滑性能，因此纳米高岭土也被应用于润滑剂中。高传平等^[39]研究了纳米高岭土作为润滑添加剂对基础油摩擦行为的影响，发现在纳米高岭土的质量分数为 1% 时获得最小平均摩擦系数和磨斑直径，分别为 0.072 和 0.76 mm，分别比纯基础油降低了 23% 和 26%，获得更好的润滑性能，对节能及设备保护具有重要意义。

2.1.9 橡胶管填料

在橡胶管制品之中加入改性高岭土材料,能够有效的改善橡胶管材料颗粒分散以及交联程度,可以保障橡胶管制品的性能更为优良,同时确保橡胶管制品质地变得更加均一。高岭土同样属于一种无机填料,能够有效地提升橡胶管制品自身质量。主要是由于粉状的高岭土材料加入之后,能够和橡胶材料之间形成高岭土-橡胶复合材料,这样便可以确保橡胶管制品所拥有的力学性能、耐磨性能、耐腐蚀性能以及稳定性等均有所提升,同时还能显著地改善橡胶材料的可加工性。

2.2 环保领域的应用

2.2.1 重金属污水处理

高岭土储量丰富、来源广泛、价格低廉。天然的二维层状结构使得它具有较大的比表面积和较好的吸附性能。基于此类优点,天然高岭土经过改性可以很好地解决重金属污水处理问题。重金属大气污染处理,汞是一种全球性的污染物,元素汞在大气环境中的排放是最主要的汞污染形式,研究表明高岭土是去除大气中汞元素的较佳黏土矿物^[40]。有机污水处理,改性后的高岭土具有分散性好、分离方便、高效和再生能力强等优点,可以很好地吸附有机污染物,利用高岭土处理纺织废水、对刚果红良好的吸附性能和高效的再生能力,高岭土在有机污水处理领域具有重要的应用前景^[41]。电化学污水处理,制备了高效的 Fe-Cu/高岭土颗粒电极,其性能优于原始高岭土颗粒电极和活性炭颗粒电极,在中性甚至碱性条件下都可以达到预期的罗丹明 B 去除效果^[42]。

2.2.2 二次资源利用

改性高岭土还被用于二次资源利用领域,用于回收金属离子。李霞等^[43]用煅烧酸浸改性高岭土对卤水中的锂离子进行富集,研究表明该酸改性高岭土具有更高的比表面积,且 Al_2O_3 溶出率高,锂离子吸附量达 4.51 mg/g ,使卤水中 45.3% 的锂离子形成沉淀,获得了较好的吸附效果。该方法不仅实现了卤水中锂资源的回收利用,而且具有较好的经济意义及应用前景。

2.2.3 劣化油品处理

目前处理劣化油品最常用的方法是吸附再生法,主要是由膨润土、高岭土等经过处理制成的硅铝吸附剂。改性后的高岭土晶体结构转变成了具有高反应活性的无序非晶质相,比表面积、孔体积和孔径均增加,使得吸附处理劣化油的效果

增强^[44]。

2.3 新能源领域的应用

2.3.1 建筑相变储热材料

以二甲基亚砜 (DMSO) 为插层剂,采用熔融插层方法对煤系高岭土插层改性,并以插层改性后的高岭土为基体,在其层间分别插入相变材料月桂醇 (LAL) 和月桂酸 (LA),成功制备了二元有机/煤系高岭土复合相变储能材料^[45]。插层改性后的煤系高岭土层间插入二元有机低共熔物用来调控室内的温度变化,二元有机/煤系高岭土复合相变储能材料可广泛应用于建筑行业,达到节能的目的。采用真空浸渍法制备的三种高岭土基复合相变材料 (Kb-CPCMs)^[46] 具有良好的蓄热、通风和空调功能,适用于建筑围护结构的采暖、通风和空调。

2.3.2 太阳能储能材料

以高岭土和硬脂酸钠为原料,制备出新型的高岭土/硬脂酸钠相变储热材料^[47]。更适用于太阳能发电站的储热系统。经过 500 次热循环后,相变储热材料熔融温度、冷凝温度、熔融潜热和冷凝潜热等性能变化均不大,而且热循环后相变储热材料吸收峰的位置及形状没有发生明显变化,充分说明高岭土/硬脂酸钠相变储热材料具有优异的热稳定性。

2.4 新材料领域的应用

2.4.1 分子筛

储量丰富、价格低廉、铝硅含量高,使得高岭土可作为制备分子筛的良好原料。不同的改性条件对高岭土合成的分子筛结构有很大的影响。结晶度较高,比表面积大,有效缩短了中间产物的扩散。为原位合成提供活性表面,促进了原位合成的发生^[48]。

2.4.2 高岭石有机插层材料

插层法一般是由有机物分子或层状聚合物插入层状无机物中制备出插层复合材料。由此法制备的复合材料,其力学性能得到改善,同时还获得了其他新的功能特性。高岭土在结构上是具有特殊层状的含水铝硅酸黏土矿物,它的主要矿物组成为八面体层状硅酸盐,层间以氢键结合,不含可交换阳离子;层与层之间具有较强的结合力,很难与有机化合物发生插层反应^[49]。但是一些强极性的有机小分子,可以直接插入到高岭石层间,其他有机分子利用有机小分子与高岭石也可形成夹层复合物作为前驱体,用取代置换法插

入到高岭石层间生成插层材料。

2.4.3 纳米材料

纳米材料由于尺寸特殊而具有许多奇特性能，如能屏蔽紫外线、电磁波，用于军事、通信、电脑等行业；在饮水机、冰箱生产过程中添加纳米黏土，具有抗菌、消毒作用；在陶瓷制作中添加纳米黏土，使陶瓷强度提高50倍，可用来制造发动机零件^[50]。添加纳米材料的塑料，密度低、耐热性好、强度高，特别是耐磨性有大幅度提高，且具有阻燃自熄灭性，可以用来制作管材、汽车机械零件、啤酒和肉类制品包装材料等。未来，由高岭土是否可以开发出功能更多，性能更优的纳米材料，是值得关注的课题。

2.4.4 制备玻璃纤维

高岭土是制备玻璃纤维的重要原料，为玻璃纤维提供 Al_2O_3 和 SiO_2 ，玻璃纤维原料中高岭土和叶腊石的总量超过三分之一，国外以高岭土为主要原料，国内以叶腊石为主要原料。叶腊石开采量的增加，已使其开始贫化，因此高岭土对玻璃纤维产业影响巨大。但玻璃纤维用高岭土不仅对其白度要求较高，而且要求各批次高岭土原料质量稳定^[51]，对高岭土的提纯及加工工艺要求更加严格。

2.4.5 介孔氧化硅材料

介孔材料是孔径2~50 nm的材料，它具有较大的孔隙率、吸附量及比表面积。由于该材料拥有表面效应、小尺寸效应、量子限域效应、介电限域效应、宏观量子隧道效应等方面的性质，使其在吸附、分离、催化裂化、废水处理等行业得到充分利用。二十世纪九十年代，Mobil公司^[52]最先提出制备MCM-41型介孔氧化硅材料，其很快便由于性能和用途方面的优势成为研究的焦点。Dongyuan Zhao等科学家^[53]以两性共聚物EO20PO70EO20作为结构指向剂，制备出结构规整的介孔氧化硅材料SBA-15，它不仅水热稳定性良好，而且孔径可调，这一研究成果极大地推动了介孔材料的发展。高岭土矿藏量大、开采容易、处理简单、硅铝含量高，以其作为原料通过水热法制备介孔材料，具有方法简便、成本较低、无需模板等优点，拓宽了介孔材料的制备途径与研究范围，使其在废水处理及化学催化裂化等领域具有广阔的应用前景。

2.5 生物医药领域的应用

2.5.1 止血材料

创伤后的出血失控，是造成高死亡率的主要

原因。基于天然止血剂代赭石控制出血性能，成功合成一种新型的铁氧化物/高岭土纳米黏土复合材料，其氧化物的形态对其止血效果具有显著影响^[54]。层状硅酸盐（合成水滑石、系列蒙脱石、高岭石）黏土矿物在体外止血过程中不释放热量，且凝血特性广泛，兼有价格低廉，稳定无毒的特性，可作为新型凝血剂代替QC。

2.5.2 药物载体

高岭土属于1:1层状晶体，排列紧密均匀，比表面积大，常作为缓释材料使用，利用高岭土复合材料制备药物载体，对布洛芬等药物进行长效缓释作用来降低药物副作用，增强药效，减轻不良反应^[55]。

2.5.3 抗菌材料

哥伦比亚亚马逊黏土（AMZ）富含高岭土和膨润土，远古时期哥伦比亚当地人常吞食AMZ治疗消化不良和腹泻，标准化检验证明该黏土有抗菌性能。将环氧沙星吸附在高岭石表面，1 h后达到了最大吸附量。与蒙脱石相比，高岭石的离子交换能力较弱，故抗菌剂更容易释放，有更好的杀菌效果。

2.5.4 组织工程

以高岭土为黏结剂，采用改性聚氨酯泡沫（PU）模板法，成功制备了一种具有优异力学强度、矿化能力和良好细胞反应的三维MBG支架。加入高岭土后，MBG-10K支架的pH环境更加稳定和理想，蛋白吸附能力增强，具有相似的细胞增殖、穿透能力、增强的细胞附着和成骨能力分化等特点^[56]。

2.5.5 化妆品

高岭土在化妆品中可作为添加剂，能够增强吸油和吸水性，增强化妆品和皮肤的亲着力，以改善润肤机能。

3 展望

高岭土是我国重要的非金属矿产资源，对其高效的开发与综合利用是我国发展绿色低碳循环经济形式下的必然趋势。我国已经形成了较成熟的高岭土选矿提纯技术、改性技术、尾矿综合利用技术，并在不断地完善高岭土综合开发体系。在高岭土的应用上，我国在不断地改革与创新，高岭土在各个领域发挥的重要作用，不仅在造纸、陶瓷和橡胶等传统行业，在环保、新能源、新材料和生物医药等新兴行业中也具有较广泛的

应用。虽然我国高岭土开发工艺成熟,应用领域也在不断地丰富与加强,但仍然存在高品质高岭土产品的开发、生产与应用,在高科技产品领域的应用需进一步加强等问题。我们应该在不断完善当前开发利用技术的同时不断探索新方法、新技术,探索高岭土在新领域的应用,促进高岭土高效开发与综合利用。

参考文献:

- [1] 郭春雷, 马莹, 赵拓, 等. 南方某高岭土除铁增白实验[J]. *矿产综合利用*, 2022, 43(4):183-187.
- GUO C L, MA Y, ZHAO T, et al. Experimental study on iron removal and whitening of a kaolin in South China[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022, 43(4):183-187.
- [2] 汪先三. 我国高岭土开发利用现状及应用前景[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2016(2):8-9,19.
- WANG X S. Exploitation and application prospects of kaolin in China[J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, 2016(2):8-9,19.
- [3] 任伟. 浅谈高岭土的成因类型及开发应用[J]. *西部探矿工程*, 2015, 27(5):105-107.
- REN W. Discussion on genetic types and development and application of kaolin[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2015, 27(5):105-107.
- [4] 刘玉海, 李海明. 四川某煤系高岭土工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*, 2019(4): 94-97.
- LIU Y H, LI H M. Study on process mineralogy of coal-series kaolin from Sichuan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*. 2019(4): 94-97.
- [5] 申继学, 马鸿文. 高岭土资源及高岭石合成技术研究进展[J]. *硅酸盐通报*. 2016. 35(4): 1150-1158.
- SHEN J X, MA H W. Research progress in kaolin resources and kaolinite synthesis technology[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*. 2016. 5(4): 1150-1158.
- [6] 王雪静, 周继红, 黄浪, 等. 不同产地高岭土的组成和结构研究[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2006(1):27-29.
- WANG X J, ZHOU J H, HUANG L, et al. Study on the composition and structure of kaolin in different area[J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, 2006(1):27-29.
- [7] 任瑞晨, 宋金虎, 李彩霞, 等. 旋流器提纯煤泥伴生高岭土及底流浮选试验研究[J]. *非金属矿*, 2015, 38(6):59-61.
- REN R C, SONG J H, LI C X, et al. Experimental study on purification of kaolin by hydrocyclone and underflow flotation test with slime[J]. *Non-Metallic Mines*, 2015, 38(6):59-61.
- [8] 易龙生, 王三海, 冯泽平, 等. 离心氯化焙烧提纯澳大利亚某高岭土实验研究[J]. *非金属矿*, 2014, 37(5):25-27.
- YI L S, WANG S H, FENG Z P, et al. Research on purification of an australian kaolin by centrifugation and chloridizing roasting[J]. *Nonmetallic Minerals*, 2014, 37(5):25-27.
- [9] 陈剑, 李晨. 应用 SLon 立环脉动高梯度磁选机提纯非金属矿[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2013(4):48-50.
- CHEN J, LI C. Application of SLon high-gradient vertical-ring magnetic separator in the field of non-metallic minerals purification the field of non-metallic minerals purification[J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, 2013(4):48-50.
- [10] 屈彬, 柯善军. 高岭土梯度磁分离除铁的研究[J]. *陶瓷*, 2016(9):33-37.
- QU B, KE S J. Study on deferrization of kaoline using the gradient magnetic separation[J]. *Ceramics*, 2016(9):33-37.
- [11] 洪微. 煤尾矿中硬质高岭土选矿提纯试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- HONG W. Study of benefication and purification on hard kaolin from coal tailings [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [12] 曹学鹏. 富黄铁矿高岭土综合回收利用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- CAO X P. Research on comprehensive recovery and utilization of pyrite-rich kaolin[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [13] 余力, 刘全军, 高扬, 等. 四川叙永某高岭土增白实验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(10):3157-3161+3166.
- YU L, LIU Q J, GAO Y, et al. Bleaching test of kaolin from Xuyong in Sichuan[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(10):3157-3161+3166.
- [14] S·A·拉维山卡尔, 李长根, 肖力子. 在高岭土加工中应用螯合类型表面活性剂的优势[J]. *国外金属矿选矿*, 2007(5):14-16+44.
- S. A. LAVISHANKAR, LI C G, XIAO L Z. Application of chelating surfactants in Kaolin processing[J]. *Metal Ore Dressing Abroad*, 2007(5):14-16+44.
- [15] 陈武生, 聂光华, 申少贺. 贵州某高岭土除铁试验研究[J]. *广州化工*, 2013, 41(22):97-99.
- CHEN W S, NIE G H, SHENG S H. Experimental research on certain kaolin deironing in Guizhou[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2013, 41(22):97-99.
- [16] 雷绍民, 龚文琪, 袁楚雄. 微生物浸出煤系高岭土中黄铁矿的初步研究[J]. *武汉工业大学学报*, 2000(2):8-10,14.
- LEI S M, GONG W Q, YUAN C X. Study on compatibility of fiber optical sensor in construct of concrete[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2000(2):8-10,14.
- [17] 孙宝岐. 高岭土的化学漂白提纯[J]. *江苏陶瓷*, 1994(1):2-7.
- SUN B Q. Purification of kaolin by chemical bleaching[J]. *Jiangsu Ceramics*, 1994(1):2-7.
- [18] 吕宪俊. 高岭土中染色物质的赋存形式及其漂白工艺的选择[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2004(4):8-12.
- LV X J. Study on the occurrence form and bleaching process of kaolin[J]. *China Non-Metallic Ore Industry*, 2004(4):8-12.
- [19] 付月华. 二氧化硫脲对高岭土增白试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- FU Y H. Study on bleaching test of kaolin using thiourea dioxide[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.
- [20] 姬梦姣, 雷绍民, 黄腾, 等. 低品位煤系高岭土焙烧脱除碳质物实验研究[J]. *无机盐工业*, 2015, 47(11):53-56.
- JI M J, LEI S M, HUANG T, et al. Research on reduction

- carbonaceous material in low grade coal-series kaolin with roasting[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2015, 47(11):53-56.
- [21] 夏光华, 陈翌斌, 何婵, 等. 磁化焙烧法强化高岭土磁选除铁增白工艺研究[J]. *功能材料*, 2015, 46(3):3144-3147.
- XIA G H, CHEN Y B, HE C, et al. Processes study on magnetization roasting method to strengthen whitening kaolin by magnetic separating removal iron method[J]. *Journal of Functional Materials*, 2015, 46(3):3144-3147.
- [22] 任瑞晨, 陈康, 李成龙, 等. 煤泥伴生高岭土提纯与增白试验研究[J]. *非金属矿*, 2017, 40(2):55-58.
- REN R C, CHEN K, LI C L, et al. Experimental study on purifying and whitening of coal slime associated kaolin[J]. *Non-metallic ore*, 2017, 40(2):55-58.
- [23] 乔炜, 邹伟曦, 陈强. 剥片高岭土的开发与应用[J]. *非金属矿*, 2007(S1):19-20.
- QIAO W, ZOU W X, CHEN Q. Development and application of peeled kaolin[J]. *Non-metallic Ore*, 2007(S1):19-20.
- [24] 曹青, 李奥. 插层剂对高岭土插层改性的研究进展[J]. *中国陶瓷*, 2016, 52(4):6-11.
- CAO Q, LI A. Research Progress on modification of kaolin intercalation[J]. *China Ceramics*, 2016, 52(4):6-11.
- [25] 唐武飞, 谷晓昱, 张胜, 等. 磷酸二氢钾插层改性高岭土复合物的制备与表征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(2):462-465.
- TANG W F, GU X Y, ZHANG S, et al. Preparation and characterization of kaolinite-potassium dihydrogen phosphate intercalation composite[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(2):462-465.
- [26] 张永利, 朱佳, 史册, 等. 高岭土的改性及其对Cr(VI)的吸附特性[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(5):561-568.
- ZHANG Y L, ZHU J, SHI C, et al. Modification of kaolin and its adsorption properties on Cr(VI)[J]. *Research of Environmental Science*, 2013, 26(5):561-568.
- [27] 宋海兵. 煅烧高岭土的生产简述与全干法煅烧工艺制度[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2004(1):19-23.
- SONG H B. Production brief of calcined kaolin and whole dry calcination process[J]. *China Non-Metallic Minerals Industry*, 2004(1):19-23.
- [28] 欧延, 林敬东, 陈文瑞, 等. 酸改性高岭土的结构与性能的研究[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2004(2):272-274.
- OU Y, LIN J D, CHEN W R, et al. A study on structure and characteristic of acid- modified kaolin[J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2004(2):272-274.
- [29] 刘从华, 高雄厚, 张忠东, 等. 改性高岭土性能研究 I 酸性和催化活性[J]. *石油炼制与化工*, 1999(4):34-40.
- LIU C H, GAO X H, ZHANG Z D, et al. Study on the performance of modified kaolin[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 1999(4):34-40.
- [30] JOZEFACIUK G, BOWANKO G. Effect of acid and alkali treatments on surface areas and adsorption energies of selected minerals[J]. *Clays and Clay Minerals*, 2002, 50(6):771-783.
- [31] 郑云锋, 李荻, 陈淑琨, 等. 催化裂化催化剂专用高岭土改性研究进展[J]. *工业催化*, 2012, 20(11):1-5.
- ZHENG Y F, LI D, CHEN S K, et al. Progress in modification research on kaolin used for catalytic cracking catalysts[J]. *Industrial Catalysis*, 2012, 20(11):1-5.
- [32] 李新梅, 吴哈申, 张冬云, 等. 改性煤系高岭土在吸附方面的研究进展[J]. *内蒙古石油化工*, 2013, 39(21):1-3.
- LI X M, WU H S, ZHANG D Y, et al. The research progress of activated coal-bearing kaolinite in adsorption respect[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2013, 39(21):1-3.
- [33] 刘建国. 高岭土在生产橡胶管填料中的应用[J]. *化工管理*, 2018(2):154-156.
- LIU J G. Application of kaolin in rubber tube filler production[J]. *Chemical Management*, 2018(2):154-156.
- [34] 周丽, 冯琦, 李远兵, 等. 煤系高岭土在耐火材料中的应用[J]. *耐火材料*, 2021, 55(3):272-276.
- ZHOU L, FENG Q, LI Y B, et al. Application of coal series kaolin in refractories[J]. *Refractories*, 2021, 55(3):272-276.
- [35] 蔡广超, 马驰, 黄科林, 等. 高岭土综合利用技术研究进展[J]. *大众科技*, 2013, 15(166):111-114,25.
- CAI G C, MA C, HUANG K L, et al. The Research and progress on comprehensive utilization technology of kaolin[J]. *Popular Science & Technology*, 2013, 15(166):111-114,25.
- [36] 亓春英, 刘星, 周跃飞. 高岭土的综合利用与发展前景[J]. *昆明理工大学学报(理工版)*, 2003, 28(2):4-7.
- QI C Y, LIU X, ZHOU Y F. Kaolin' s comprehensive utilization and developing prospect[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science)*, 2003, 28(2):4-7.
- [37] 凤孟龙, 田辉平, 张万弘, 等. 不同高岭土系黏土性质及在催化裂化催化剂中的应用[J]. *工业催化*, 2018, 26(10):20-26.
- FENG M L, TIAN H P, ZHANG W H, et al. Properties of different kaolin clays and their application in FCC catalysts[J]. *Industrial Catalysis*, 2018, 26(10):20-26.
- [38] 王文宗, 黄河. 改性煤系煅烧高岭土在电缆中的应用[J]. *非金属矿*, 2009, 32(S1):24-25.
- WANG W Z, HUANG H. Application of modified coal measure calcined kaolin in cable[J]. *Non-metallic Ore*, 2009, 32(S1):24-25.
- [39] 高传平, 王燕民, 潘志东. 纳米高岭土作为润滑添加剂的减摩行为[J]. *硅酸盐学报*, 2014, 42(4):506-513.
- GAO C P, WANG Y M, PAN Z D. Friction reducing behavior of kaolin clay nanoparticles as lubricating additive[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2014, 42(4):506-513.
- [40] G MAINAK, TAO Y Y, LEE B, et al. Natural kaolin: sustainable technology for instantaneous and energy neutral recycling of anthropogenic mercury emissions[J]. *Chem Sus Chem*, 2019.
- [41] ZHANG Q, YAN Z, O Y J, et al. Chemically modified kaolinite nanolayers for the removal of organic pollutants[J]. *Applied Clay Science*, 2018, 157:283-290.
- [42] Boge Z, Yanping H, Zebin Y, et al. Three-dimensional electro-fenton degradation of rhodamine B with efficient Fe-Cu/kaolin particle electrodes: Electrodes optimization, kinetics, influencing factors and mechanism[J]. *Separation and*

Purification Technology, 2018, 210:60-68.

[43] 李霞, 邓昭平, 李晶. 高岭土在盐湖卤水提锂中的应用[J]. *化工进展*, 2017, 36(6):2057-2063.

LI X, DENG Z P, LI J. Application of kaolin in the extraction of lithium from salt lake brine[J]. *Chemical Industry Progress*, 2017, 36(6):2057-2063.

[44] 汪红梅, 周婷婷, 孟维鑫, 等. 改性高岭土处理劣化汽轮机油的研究[J]. *石油化工*, 2017, 46(12):1491-1495.

WANG H M, ZHOU T T, MENG W X, et al. Modified kaolin used in the degradation of turbine oil adsorption process[J]. *Petrochemical Industry*, 2017, 46(12):1491-1495.

[45] 仇影, 吴其胜, 黎水平, 等. 二元有机/煤系高岭土复合相变储能材料的制备及其热性能[J]. *材料科学与工程学报*, 2013, 31(2):268-272.

QIU Y, WU Q S, LI S P, et al. Preparation and thermal properties of binary preparation and thermal properties of binary organic/kaolin composites as shape stabilized phase change material for thermal energy storage[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2013, 31(2):268-272.

[46] S AHMET. Fabrication and thermal characterization of kaolin-based composite phase change materials for latent heat storage in buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 96:193-200.

[47] 陈祉如, 姚兴茂, 尹翔鹏. 应用于太阳能热发电站的高岭土基相变储热材料的制备[J]. *可再生能源*, 2019, 37(3):37-41.

CHEN Z R, YAO X M, YIN X P. Preparation of kaolin based phase change thermal storage materials for solar thermal power plant[J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(3):37-41.

[48] 沈耀生. 利用高岭土制备 4A 分子筛[J]. *云南化工*, 2019, 46(10):8-11.

SHEN Y S. Preparation of 4A zeolite from kaolin[J]. *Yunnan Chemical Industry*, 2019, 46(10):8-11.

[49] 蔡建. 我国高岭土加工技术现状与发展趋势[J]. *非金属矿*, 2005, 28(S1):9-11.

CAI J. Current status and development trend of kaolin processing technology in China[J]. *Non-metallic Ore*, 2005, 28(S1):9-11.

[50] 朱华. 高岭土应用的工业进展及现状[J]. *矿业工程*, 2005, 3(6):25-26.

ZHU H. Status & future of application of kaolin in industrial fields[J]. *Mining Engineering*, 2005, 3(6):25-26.

[51] 韩利雄, 姚远, 刘国斌. 国内外玻璃纤维用高岭土的质量差距及提高我国高岭土质量的对策[J]. *矿产综合利用*, 2011(5):7-10.

HAN L X, YAO Y, LIU G B. Differences of kaolin quality for glass fibers made in China and abroad and improving measures of kaolin quality made in China[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2011(5):7-10.

[52] BECK J S, VARTULI J C, ROTH W J, et al. A new family of fesorporous molecular sieves prepared with liquid crystal templates[J]. *J Am Chem Soc*, 1992, 114(27):10834.

[53] ZHAO D Y, FENG J L, HUO Q S, et al. Triblock copolymer syntheses of mesoporous silica with periodic 50 to 300 angstrom pores[J]. *Science*, 1998, 279:548.

[54] 龙梅. 高岭石基复合材料的性能调控及其生物医学应用探索 [D]. 长沙: 中南大学, 2019.

LONG M. Study on the properties of kaolinite matrix composites and its application in Biomedicine [D]. Changsha: Central South University, 2019.

[55] 吴瑾, 杨喆, 李翔, 等. 高岭土/壳聚糖载药微球的制备及性能研究[J]. *非金属矿*, 2021, 44(5):1-5.

WU J, YANG Z, LI X, et al. Preparation and properties of kaolin/chitosan microspheres[J]. *Non-metallic Ore*, 2021, 44(5):1-5.

[56] TANG W, YUAN Y, LIN D, et al. Kaolin - reinforced 3D MBG scaffolds with hierarchical architecture and robust mechanical strength for bone tissue engineering[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2014, 2(24):3782-3790.

Development Status and Comprehensive Utilization of Kaolin

Feng Xueru, Deng Jian, Yan Weiping, Li Weisi

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: Kaolin is a kind of widely used metalloid mineral resources, China is the first country to discover and make use of kaolin, and kaolin reserves rank front in the world. Although kaolin reserves are large in China, with the expansion of its application field, resources are seriously in short supply, and the price rises accordingly. Especially, high quality high-end kaolin processing products are far from meeting the demand of market consumption. The main development of kaolin in China was reviewed in this paper the present situation, the comprehensive utilization of field development progress, and summarized the development and use of kaolin, booster formation kaolin mineral resources development and utilization of innovative concept, way of exploring the development and application of kaolin resources, promote efficiency of utilization of kaolin to promote China's economic sustainable development of high quality.

Keywords: Kaolin; Development present situation; Comprehensive utilization progress