

综合评述

国内外硅灰石资源现状及应用研究进展

蒋浩东¹, 李树蔚², 丁建¹, 黄聪¹, 王洋¹, 李珍¹

1. 中国地质大学(武汉)材料与化学学院, 湖北 武汉 430078;
2. 中能建绿色建材有限公司, 湖北 武汉 430015

中图分类号: TD985 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)01-0162-07
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.01.016

摘要 随着硅灰石探明资源储量不断增加、应用范围不断拓宽和纵向研究不断深入, 硅灰石产业在国民经济和社会发展中发挥着越来越重要的作用。介绍了国内外硅灰石资源现状, 重点分析了硅灰石在陶瓷、油漆涂料、橡塑、冶金、造纸、建材等应用领域的技术特点, 综述了硅灰石应用进展, 展望了发展前景。

关键词 硅灰石; 资源现状; 应用进展

1 引言

硅灰石(CaSiO_3)是一种偏硅酸盐类的钙类矿物, 结构式为 $\text{Ca}_2[\text{Si}_3\text{O}_9]$, 理论化学成分: CaO 48.3%、 SiO_2 51.7%。纯硅灰石多为亮白色, 部分含杂质时可呈褐色、灰色或黑色(含碳或铁锰), 自然界硅灰石多为纤维状、放射状、羽毛状或块状集合体, 其中最为常见的是纤维状或针状结构。由于硅灰石具有无毒、耐化学腐蚀、烧失量低、良好的助熔性、低吸水性及吸油值低、力学性能及电性能优良等特性, 被广泛应用于陶瓷、橡胶、塑料、冶金、涂料、油漆、造纸及建材等行业^[1]。

我国是世界上硅灰石储量与生产量最大的国家, 但相较于发达国家, 我国硅灰石生产及应用水平仍待提高。因此, 研究并分析硅灰石矿产资源发展及应用现状, 对于改进我国硅灰石生产技术、促进硅灰石相关产业产品的升级以及发挥硅灰石资源优势具有重大意义。本文通过对国内外硅灰石资源现状分析, 重点论证了硅灰石在相关应用领域的技术特点, 为硅灰石相关产业发展提供新思路。

2 硅灰石资源现状

2.1 国外硅灰石资源现状

世界已有 20 多个国家探明有硅灰石资源, 硅灰石矿储量约 1.89 亿 t, 基础储量约 5.59 亿 t, 查明资源

量约 8 亿 t, 主要分布在中国、印度、美国、芬兰、墨西哥、加拿大、西班牙、土耳其和纳米比亚等^[2]。

印度硅灰石资源总量约 1 647 万 t, 产量位居世界第二位, 主要分布在拉贾斯坦邦的栋格尔布尔、巴利、锡罗希、乌代布尔等地区。美国是世界上最早开发利用硅灰石的国家, 其开发利用水平较高, 美国许多州都已经确认有硅灰石矿床分布, 而唯一长期持续开采硅灰石的纽约州总储量仅为 6 000 万 t。芬兰是欧洲最大的硅灰石生产国, 矿床位于芬兰东南部的拉彭兰塔(Lap-*peenranta*), 资源量约 3 000 万 t 以上。墨西哥的硅灰石主要由位于索诺拉州(Sonora)的埃莫西罗(Hermosillo)名为 Pilares 的硅灰石矿产出。加拿大硅灰石矿床的勘探和开发主要集中在魁北克省、安大略省和不列颠哥伦比亚省, 魁北克省 Stonge 镇有一处硅灰石矿床, 矿石储量超过 2 000 万 t, 安大略省的 Seeleys Bay 硅灰石矿, 储量为 3 000 万 t, 已探明储量 900 万 t^[3]。

2.2 中国硅灰石资源现状

我国硅灰石资源丰富, 储量居于世界首位。截至 2018 年底, 我国共有硅灰石矿产地 86 处, 硅灰石查明资源量 2.49 亿 t, 主要分布在江西省、吉林省、辽宁省、云南省、青海省、湖北省等, 其中江西省、吉林省、辽宁省 3 省查明资源储量位居前三, 分别占全国查明资源储量的 29.48%、21.54%、14.86%^[4]。我国硅灰石产量和出口量均位居世界第一, 产品主要出口到日本、

收稿日期: 2022-09-16

基金项目: 江西省新余市硅灰石产业发展规划(2022—2035 年)编制服务项目(2022036389); 针状硅灰石产品应用方案配方研究(2022036367)

作者简介: 蒋浩东(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为矿物材料功能化。

通信作者: 王洋(1992—), 男, 副研究员, 硕士生导师, wyisian@cug.edu.cn; 李珍(1963—), 女, 教授, 博士生导师, zhenli@cug.edu.cn。

韩国及东南亚国家和德国、西班牙等欧洲国家。自 2000 年来, 国外市场对硅灰石的需求剧增, 硅灰石的价格也有所提高, 使得国内硅灰石的年产量增长迅速, 2007 年达到顶峰为 74.5 万 t。2012—2016 年又呈现下降趋势, 2014 年产量减到 30 万 t; 之后稳步上升, 2017 年产量达到 50 万 t; 2018 年为 53 万 t^[5]; 2019 年约为 50.2 万 t; 2020 年约为 53.8 万 t; 2021 年约为 77.1 万 t。目前我国硅灰石行业处于成长期阶段, 未来有广阔的市场容量。

3 硅灰石应用研究进展

硅灰石市场应用主要集中在陶瓷、冶金、塑料、橡胶、油漆涂料、摩擦材料及其他新材料领域。相较于陶瓷和冶金应用领域, 塑料、橡胶、油漆涂料及其他新材料方向的应用中硅灰石产品加工技术要求高, 应用附加值高。我国硅灰石资源丰富, 生产和出口均占世界第一, 但高值化应用较发达国家仍有差距。当前, 我国硅灰石的消费结构主要以陶瓷行业为主, 约

占 50%; 冶金保护渣及电焊条约占 20%; 油漆、涂料约占 10%; 塑料、橡胶、造纸填料约占 10%; 建筑材料、石棉替代品及其他应用占 10%。美国硅灰石消费结构中, 塑料、橡胶为主约占 30%; 陶瓷行业约占 20%; 油漆涂料约占 15%; 冶金行业约占 13%; 摩擦材料约占 12%; 其他约占 10%^[12-5], 如图 1 所示。

硅灰石产品根据粒径大小与长径比主要分为硅灰石普通粉、超细粉、针状粉、超细针状粉、改性粉五类。硅灰石普通粉主要用于陶瓷原料和釉料、电焊条、冶金保护渣、油漆填料等领域。硅灰石超细粉(亦称硅灰石超细精粉), 主要应用于油漆、塑料橡胶等领域。硅灰石针状粉分为针状粉和超细针状粉, 长径比一般大于 10:1, 主要用于橡胶塑料增强剂、汽车等离合器制动器的摩擦材料的纤维状填料等。通过各种偶联剂(如硅烷^[6]、甜菜碱^[7])、相容剂(如马来酸酐(PP-g-MAH)^[8]、malicanhydride^[9]), 以及表面改性剂(如硬脂酸^[10]等改性剂)进行表面改性的硅灰石产品, 主要应用在橡塑、涂料、电子封装剂等领域。

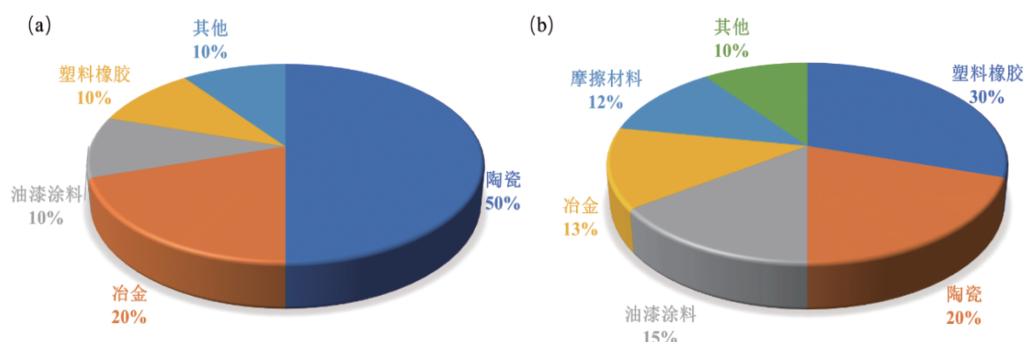


图 1 中国(a)和美国(b)硅灰石表观消费结构

Fig. 1 Apparent consumption structure of wollastonite in China (a) and the United States (b)

3.1 陶瓷行业

硅灰石在陶瓷行业主要用于陶瓷坯体和釉料配料^[11]。陶瓷坯体用的硅灰石产品为硅灰石普通粉和尾矿粉。硅灰石的功能体现在硅灰石粉体具有助熔性, 适当的硅灰石替代长石和石英, 可降低烧结温度, 增大烧结范围, 减少干燥和烧成收缩; 硅灰石引入坯体中, 能提高坯体的抗压性能和压型质量; 硅灰石具有良好的热膨胀特性, 可提高坯体在快速焙烧中抗裂、抗挠曲的能力^[12-14]。此外, 硅灰石的针状结构有利于提高陶瓷坯体的强度及韧性, 减少焙烧中坯体的收缩性和气孔产生, 大大缩短了预热期^[15]。张国涛等^[16]通过在瓷质砖坯体中添加适量的硅灰石, 提升了坯体的物理性能, 降低了烧成收缩。

陶瓷釉料用硅灰石产品为硅灰石精粉。硅灰石的功能体现在能增强釉面白度, 减少或消除釉面针孔, 提高釉面耐磨性、釉层透明度和光泽度, 以及提升制品强度、耐压性和过滤性能, 降低烧结温度和缩短烧

结时间。但用于釉料中的硅灰石要求纯度高, 粒度小, 含铁量低于 0.35%, 成本相对较高, 而且硅灰石在釉料中的添加量要求严格, 过多会产生析晶或无光釉^[17-19]。N. Mazura 等^[20]研究表明, 硅灰石精粉可作为卫生陶瓷不熔结和不透明釉料的主要成分之一, 在所考虑的组分体系中, 当硅灰石精粉含量为 15% 时成品具有良好的铺展性和较高的光泽和白度参数。

3.2 油漆涂料行业

油漆涂料用硅灰石产品有硅灰石超细粉、超细针状粉和改性粉。硅灰石由于其高亮度和白度, 低吸湿性和吸油性, 是涂料应用的首选, 目前主要应用在建筑涂料中^[21]。硅灰石的功能体现在化学稳定性好, 在油漆、涂料中使用能显著提升抗粉化能力, 吸油及吸水率低, 相比较同类产品有更高的充填量, 消耗更少的黏结物质, 大幅度降低涂料的成本。此外, 硅灰石粉膨胀系数小, 在涂料中适当搭配, 会克服诸如膨润土、轻质碳酸钙在涂料中使用过量时产生的开裂脱落

和掉屑剥落等缺点,硅灰石还具有与底涂剂的啮合性好、比重小的特性,将其与防腐钝化剂配合,可增强抗腐蚀性能,较其他填料具有更好的初期白度和色度^[22-26]。硅灰石价格相对较低,可替代部分钛白粉、锌钛白、立德粉等,还能提高涂膜的耐洗刷性,同时也具有部分 pH 值调节功能,这对于在低挥发性有机物(VOC)的高性能内墙涂料的应用也有积极的发展意义^[27]。针状硅灰石能提高聚氯乙烯(PVC)内墙乳胶漆的孔隙率,从而提高遮盖力,且针状硅灰石有助于提高耐擦洗性;针状硅灰石用于底漆中,可形成网状结构,具有很好的防渗水性以及改善施工性^[28]。M. Zia-ul-Mustafa 等^[29]通过使用不同质量百分比的硅灰石填料来改善膨胀型防火涂料的防火性能,发现添加硅灰石填料的膨胀涂层增强了其抗氧化性、热稳定性。V I Gots 等^[30]发现与二氧化硅相比,粉末涂料宜采用硅灰石形式的填料,硅灰石的特点是纤维状晶体形状,可提高涂层的力学性能,防止开裂,起到补强剂的作用。

3.3 橡塑行业

橡胶因其特殊的优良性能而广泛应用于汽车、航空、机械制造、建筑、家电、鞋底材料等工业领域。橡塑用硅灰石产品有硅灰石改性粉(改性超细精粉、改性超细针状粉)。橡胶可分为天然橡胶、合成橡胶两类。天然橡胶是从植物中提取出胶质然后进行加工后制得,虽然天然橡胶(NR)表现出许多卓越的性能,但为了使其具有适合特定应用的性能,必须在 NR 中添加补强填料,如改性硅灰石被添加到橡胶化合物中,可以降低材料成本和改善其力学性能等^[31]。此外在合成橡胶领域,改性硅灰石可以提高橡胶热稳定性、分散性且相容性,还能改善其力学性能^[32-34]。H.T.B. Diep 等^[35]就曾研究了硅灰石对 NR 的固化性能、拉伸性能和形貌的影响。结果表明:随着硅灰石掺量的增加,NR 胶料的固化时间、焦化时间、抗拉强度和断裂伸长率降低,而最大扭矩、抗拉模量 M100、M300 均增加。

在以往的研究中,热塑性塑料因其热成型性和可回收性而优于热固性塑料,传统的填料如玻璃纤维^[36]、碳酸钙^[37]也能在生产坚固而轻的材料方面有很好的效果。然而,硅灰石正逐渐成为这些填料的替代品,因为它具有低热膨胀系数的特点,可以提供更少的模具收缩和更好的尺寸稳定性。由于其硬度和高长径比,它还能使得制品拥有更好的硬度,弯曲、拉伸和冲击模量。此外,由于硅灰石的亲水性,需要进行表面改性由亲水疏油性变为亲油疏水性,这样可以使无机硅灰石在有机聚合物中均匀分散,从而获得更好的相容性和更好的力学性能^[38]。关于热塑性塑料的研究有很多,有研究者探究了不同粒径的碳酸钙和硅灰石对聚丙烯(PP)流变性能、力学性能和摩擦性能的影响。发现两种填料掺量的增加均能显著提高复合材料的

硬度、弹性模量和抗拉强度等力学性能,但由于两种复合材料的剪切黏度和流动性的差异造成 PP/硅灰石的弹性模量、拉伸强度和硬度均高于 PP/CaCO₃。作者还认为 PP/硅灰石是一种潜在的汽车表面质量改善材料^[39]。Yuan Xiaowen 等^[40]就曾将硅灰石作为增强材料用来改性聚乙烯(PE),发现硅灰石纤维的加入会使复合材料的抗拉强度提高,但冲击强度降低。作者还研究了偶联剂马来酸对复合材料力学性能和加工性能的影响,发现加入马来酸后,硅灰石纤维与聚乙烯基体之间具有良好的黏附性,从而使最终产品具有更高的抗拉强度。研究者还根据聚乙烯的进一步分类,研究了硅灰石作为填料改性低密度聚乙烯^[41](LDPE)、线性低密度聚乙烯^[42](LLDPE)、超高分子量聚乙烯^[43](UHMWPE)。此外,硅灰石还可以用来增强聚酰胺^[44](PA)、聚甲基丙烯酸甲酯^[45](PMMA)、乙烯-醋酸乙烯共聚物^[46](EVA)、聚醚酮^[47](PEK-C)、聚醚醚酮^[48](PEEK)和聚氯乙烯^[49](PVC)等。

3.4 摩擦材料

摩擦材料用硅灰石产品为硅灰石针状粉,多用作填料应用于刹车片、离合器等。硅灰石的针状特性、无污染性、低膨胀率、不含羟基、化学性质稳定、高温下不存在相转变、熔点高及优良的抗热冲击性等特性,说明其是短纤维石棉理想的代用品,而且与玻璃纤维和石棉等产品相比硅灰石价格更低,一定程度上还可以提高摩擦材料的稳定性、减少开裂、提升耐磨和恢复性能等力学性能,但硅灰石纤维也具有短脆、自身柔韧性较差、硬度较大等劣势,而且硅灰石的质地较硬,虽然能形成较高的摩擦因数,但用量高时会产生摩擦噪声^[50-52]。Tej Singh 等^[52]制备了以硅灰石粉末和纤维形式存在的制动摩擦复合材料,并对其物理、机械和摩擦性能进行了表征。结果表明,硅灰石以粉末形式存在可提高摩擦系数,有效避免因摩擦发热而引发的刹车失灵,硅灰石以纤维形式存在可提高制动摩擦复合材料的磨损和恢复性能。

3.5 冶金行业

冶金用硅灰石产品为硅灰石精粉。硅灰石可在熔融状态下保护金属表面,防止氧化,润滑模具壁吸附金属杂质,具有良好的工艺稳定性。硅灰石基料保护渣在熔化后的黏度较低,能在铸坯表面形成薄而均匀的玻璃体,起到很好的润滑和保护作用,不影响铸坯的结晶和冷却过程。硅灰石基料保护渣不含游离 SiO₂,可减少污染和对人体的危害。硅灰石的含碳量很低,以硅灰石为基料可以配制出低碳或无碳、冶金性能优良适于多种连铸生产工艺要求的保护渣,提高连铸坯的合格率、成材率、生产效率及降低连铸生产成本^[53-55]。硅灰石基料保护渣对钢种的适应性强,在普

通碳素钢、优质碳钢、低合金钢中都适用^[56]。用硅灰石作电焊条药皮配料,能起到助熔剂和造渣添加剂的作用,抑制焊接时放电,减少飞溅,提高熔渣流动性,使焊缝成型整洁美观,增强机械强度^[57-58]。张明杰等^[59]采用新疆哈密地区硅灰石、长石、萤石等矿产资源,配制了熔点和黏度都适合当地炼钢企业使用的连铸结晶器保护渣。

3.6 造纸行业

造纸用硅灰石产品为硅灰石超细针状粉。硅灰石具有折射率高、白度高等特性,作造纸填料,能增加纸张的不透明度和白度。硅灰石用于造纸,所形成的硅灰石-植物纤维网络具有更多微孔型结构,使纸张的吸墨性能提高,同时由于平滑度提高、透显降低,因而增加了纸张的适印性。硅灰石与植物纤维的结合,使之对湿度不敏感,降低其吸湿性和变形程度,增加了纸张的尺寸稳定性。硅灰石可消除纸张表面的静电、提高纸张匀度、平滑度、不透明度以及适印性。硅灰石对油墨粒子等有机物以及细小的纤维等,具有相对较好的吸附性,有利于减少水中悬浮物,降低造纸废水处理成本。硅灰石的使用能间接减少森林资源的砍伐利用,具有降低生产成本、维护生态平衡的作用^[60-64]。Xue Honglong 等^[65]为了提高硅灰石在造纸工业中的适用性,对硅灰石进行了酸处理和碱诱导再沉积改性。改性过程分为两步:一是将硫酸与硅灰石混合,使硅灰石颗粒部分溶解,接下来,调整混合物的 pH 值,使其变为碱性,使溶解的物质重新沉积在硅灰石颗粒的表面,从而保持其原始的针状形态。诱导再沉积后的样品粉末亮度、体积、拉伸指数、破裂指数比原始样品都要高。

3.7 建材行业

水泥用硅灰石产品为硅灰石普通粉和尾矿粉。硅灰石作为非活性混合材料掺入水泥熟料中,能够提高水泥的白度用来生产白水泥,而且比用普通方法生产白水泥能耗低。硅灰石尾矿可作为纤维水泥板增强纤维使用还能改善水泥基砂浆,在提高材料抗冲击性能、抗折强度、耐久性、耐水性等性能的同时,大大降低生产原料成本^[66-68]。混凝土用硅灰石产品为硅灰石针状粉,硅灰石可以提高混凝土的力学性能以及抗渗、抗裂、抗冻性能等^[69]。Xu Biwan 等^[70]研究了硅灰石对磷酸镁钾(MKP)水泥水化过程和产品性能的影响。硅灰石的存在会产生更多的热量(每克 MKP 水泥),特别是在低水胶比和后期龄期,并降低了水泥孔隙溶液的 pH 值。硅灰石的反应不会导致结晶水合物的形成,试验和热力学结果都表明形成了非晶态羟基磷灰石和镁硅酸盐水合物(M-S-H)。

硅钙板用硅灰石产品为硅灰石针状粉,其主要竞

争产品有钢纤维和玻璃纤维。但硅灰石能降低硅钙板的烧成温度,节约成本,此外还能提高材料的防火、隔热、隔音等性能^[71]。

4 展望

中国硅灰石资源丰富,但并没有实现资源优势到经济优势的有效转化。针对中国硅灰石高值化应用发展缓慢这一现状,企业和科研单位应该从以下三个方面着手,提升硅灰石产业高值化发展。

(1)加大硅灰石资源基础研究。以硅灰石成分、结构、物理化学特性等为突破口,密切关注硅灰石资源应用前沿,积极探索硅灰石资源应用潜力,拓宽硅灰石应用领域。

(2)根据应用领域的不同,提升硅灰石产品的精细化、定制化,将具体应用市场和产品开发相结合。如开展用于橡塑、涂料、冶金等领域的高长径比硅灰石粉、改性硅灰石粉、高性能冶金保护渣材料等,同时关注硅灰石与新能源、新材料等领域的应用结合。

(3)建立研发中心,搭建科技创新平台,配套生产性服务,培养高素质专业人才。这不仅有利于硅灰石行业及企业的技术改造和科技创新,还对我国非金属矿物的充分利用具有十分重要的意义。

未来,随着中国硅灰石产业链的不断延伸,科技创新能力的快速提升,应用领域的拓展,硅灰石将在更多高附加值领域发挥作用,实现硅灰石资源高值化利用。

参考文献:

- [1] 苑金生. 硅灰石的开发利用及其市场动向[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2007(6): 56-57.
YUAN J S. Development and utilization of wollastonite and its market trend[J]. China Non-metallic Mineral Industry Guide, 2007(6): 56-57.
- [2] 李莉, 王怀宇. 世界硅灰石生产消费与国际贸易[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2010(6): 55-58.
LI L, WANG H Y. World wollastonite production and consumption and international trade[J]. China Non-metallic Mineral Industry Guide, 2010(6): 55-58.
- [3] 李渴, 彭春艳, 魏博, 等. 国外硅灰石资源开发利用情况[J]. 建材世界, 2019, 40(5): 12-16.
LI K, PENG C Y, WEI B, et al. Development and utilization of wollastonite in foreign countries[J]. Institute of Technical Information for Building Materials Industry, 2019, 40(5): 12-16.
- [4] 颜玲亚, 焦丽香, 刘海泉, 等. 我国硅灰石矿成矿区带划分及成矿规律[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2022(1): 1-6+36.
YAN L Y, JIAO L X, LIU H Q, et al. Division and metallogenic regularity of wollastonite deposit in china[J]. China Non-metallic Mineral Industry Guide, 2022(1): 1-6+36.
- [5] 欧阳友和. 我国硅灰石矿产资源及勘查开发现状和发展建议[J]. 山东国土资源, 2020, 36(12): 26-31.
OUYANG Y H. Exploration and development condition and development suggestions of wollastonite mineral resources in china[J]. Shandong Land and Resources, 2020, 36(12): 26-31.

- [6] MENG M-R, DOU Q. Effect of pimelic acid on the crystallization, morphology and mechanical properties of polypropylene/wollastonite composites[J]. Materials Science and Engineering:A, 2008, 492(1-2): 177-184.
- [7] LIANG J Z, LI B, RUAN J Q. Crystallization properties and thermal stability of polypropylene composites filled with wollastonite[J]. Polymer Testing, 2015, 42: 185-191.
- [8] CHUAYJULJIT S, KETTHONGMONGKOL S. Properties and morphology of injection- and compression-molded thermoplastic polyurethane/polypropylene-graft-maleic anhydride/wollastonite composites[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2012, 26(7): 923-935.
- [9] SINGH U P, RAY B C. Evaluation of thermal analysis, morphology and FT-IR study of polypropylene filled with wollastonite and silicon rubber[J]. Int J Eng Res Technol, 2012, 1(9): 1-13.
- [10] 李珍, 彭继荣, 沈上越, 等. 机械力化学改性硅灰石/聚丙烯性能的研究[J]. 塑料工业, 2003(9): 35-37.
- LI Z, PENG J R, SHEN S Y, et al. Study on mechanical and mechanochemical modification of wollastonite/polypropylene[J]. Plastics Industry, 2003(9): 35-37.
- [11] 蔡克勤, 张强. 硅灰石在陶瓷工业中的应用[J]. 佛山陶瓷, 2004(9): 11-13.
- CAI K Q, ZHANG Q. Application of wollastonite in ceramic industry[J]. Foshan Ceramics, 2004(9): 11-13.
- [12] 谭训彦. 硅灰石在日用陶瓷坯体中的应用研究[J]. 中国陶瓷工业, 2012, 19(1): 15-17.
- TAN X Y. Research on the application of wollastonite in ceramic blanks for daily use[J]. China Ceramics Industry, 2012, 19(1): 15-17.
- [13] 李晓琴, 孙传敏. 硅灰石质瓷质坯体焙烧过程物相变化研究[J]. 非金属矿, 1999(1): 12-13.
- LI X Q, SUN C M. Study on phase change of wollastonite porcelain billet during roasting[J]. Non-metallic Ore, 1999(1): 12-13.
- [14] BRAGANÇA S, LENGELER H, BERGMANN C P. Wollastonite as a flux for ceramics bodies; proceedings of the Materials Science Forum, F, 2012[C]. Trans Tech Publ, 727: 1016-1021.
- [15] 王晓兰. 针状硅灰石在大规格薄型瓷质砖中的应用[J]. 陶瓷, 2009(2): 35-38.
- WANG X L. Application of acicular wollastonite in large size thin porcelain brick[J]. Ceramics, 2009(2): 35-38.
- [16] 张国涛, 杨景琪, 吉永发, 等. 硅灰石在陶瓷砖的应用以及对瓷质砖坯体物理性能的影响研究[J]. 佛山陶瓷, 2019, 29(4): 12-16.
- ZHANG G T, YANG J Q, JI Y F, et al. Application of wollastonite in ceramic bricks and its influence on physical properties of ceramic bricks[J]. Foshan Ceramics, 2019, 29(4): 12-16.
- [17] 胡善洲. 硅灰石矿物及其在陶瓷工业中的应用[J]. 国外建材科技, 2005(1): 36-38.
- HU S Z. Wollastonite mineral and its application in ceramic industry[J]. Foreign Building Materials Science and Technology, 2005(1): 36-38.
- [18] 钱锦, 余炳烽. 硅灰石在陶瓷釉面砖釉料中的应用试验[J]. 中国陶瓷, 2008(10): 50-52.
- QIAN J, YU B F. Application test of wollastonite in glaze of ceramic glazed tile[J]. China Ceramics, 2008(10): 50-52.
- [19] 郑乃章, 荣京滨. 硅灰石矿物在陶瓷工业中的应用现状[J]. 中国陶瓷工业, 2006(6): 27-29.
- ZHENG N Z, LUAN J B. Application status of wollastonite mineral in ceramic industry[J]. China Ceramic Industry, 2006(6): 27-29.
- [20] MAZURA N, LEVITSKII I. Use of wollastonite in nonfritted zirconium glazes[J]. Glass and Ceramics, 2006, 63(7): 267-70.
- [21] 徐永华, 甘昆秀, 吴平飞, 等. 硅灰石在环氧聚酯粉末涂料中的应用研究[J]. 涂层与防护, 2020, 41(11): 42-45.
- XU Y H, GAN K X, WU P F, et al. Application of wollastonite in epoxy polyester powder coating[J]. Coating and Protection, 2020, 41(11): 42-45.
- [22] 黄敏. 硅灰石粉在涂料中的应用研究[J]. 江西建材, 1998(3): 28-30+12.
- HUANG M. Application of wollastonite powder in coatings[J]. Jiangxi Building Materials, 1998(3): 28-30+12.
- [23] 雷福尧. 硅灰石在涂料生产中的应用[J]. 西安矿业学院学报, 1995(2): 148-151.
- LEI F Y. Application of wollastonite in coating production[J]. Journal of Xi'an University of Mining and Technology, 1995(2): 148-151.
- [24] 庞桂林, 甄卫军, 杨超松, 等. 哈密硅灰石表面改性、表征及其在防火涂料中的应用[J]. 非金属矿, 2008(4): 42-44.
- PANG G L, ZHEN W J, YANG C S, et al. Surface modification, characterization and application of hami wollastonite in fire retardant coatings[J]. Non-metallic Minerals, 2008(4): 42-44.
- [25] 吴平飞, 袁斌, 徐永华, 等. 针状硅灰石在环氧自流平地坪漆中的应用[J]. 涂层与防护, 2019, 40(6): 16-20.
- WU P F, YUAN B, XU Y H, et al. Application of needle-like wollastonite in epoxy self-leveling floor paint[J]. Coating and Protection, 2019, 40(6): 16-20.
- [26] 易敏华, 王贤明, 万众, 等. 改性硅灰石对水性防腐涂料性能的影响[J]. 中国涂料, 2020, 35(11): 30-34.
- YI M H, WANG X M, WAN Z, et al. Effect of modified wollastonite on properties of water-based anticorrosive coatings[J]. China Coatings, 2020, 35(11): 30-34.
- [27] 庄勤川, 霍颖仪, 梁锦豪. 硅灰石在内墙乳胶漆中的应用及影响[J]. 中国涂料, 2012, 27(10): 31-33+68.
- ZHUANG Q C, HUO Y Y, LIANG J H. Application and influence of wollastonite in interior wall latex paint[J]. China Paint, 2012, 27(10): 31-33+68.
- [28] 胡中源, 王德华, 罗先平. 硅灰石的加工及其在涂料中的应用[J]. 上海涂料, 2011, 49(3): 50-51.
- HU Z Y, WANG D H, LUO X P. Processing of wollastonite and its application in coatings[J]. Shanghai Coatings, 2011, 49(3): 50-51.
- [29] ZIA-UL-MUSTAFA M, AHMAD F, MEGAT-YUSOFF P S, et al. The effect of wollastonite filler on thermal performance of intumescent fire retardant coating; proceedings of the Advanced Materials Research, F, 2014[C]. Trans Tech Publ, 970.
- [30] GOTS V, LASTIVKA O, TOMIN O, et al. Fillers for modification of polyester powder coating; proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, F, 2020[C]. IOP Publishing, 907(1): 0125015.
- [31] 陈晓龙, 于福家, 丛国龙, 等. 硅灰石表面改性及其在天然橡胶中的应用[J]. 非金属矿, 2020, 43(5): 8-10.
- CHEN X L, YU J F, CONG G L, et al. Surface modification of wollastonite and its application in natural rubber[J]. Non-metallic Ore, 2020, 43(5): 8-10.
- [32] 肖毓秀, 宋波, 朱严谨, 等. KH-550/SA改性硅灰石及其在顺丁橡胶中的应用[J]. 云南化工, 2022, 49(2): 30-32+53.
- XIAO Y X, SONG B, ZHU Y J, et al. KH-550 /SA modified wollastonite and its application in butadiene rubber[J]. Yunnan Chemical Industry, 2022, 49(2): 30-32+53.
- [33] 杨超松, 庞桂林, 甄卫军, 等. 哈密硅灰石表面包覆改性及在顺丁橡胶中的应用研究[J]. 非金属矿, 2009, 32(1): 35-38.
- YANG C S, PANG G L, ZHEN W J, et al. Study on surface coating

- modification of hami wollastonite and its application in butadiene rubber[J]. *Non-metallic Ore*, 2009, 32(1): 35–38.
- [34] CHATTERJEE A, KHOBRAGADE P S, MISHRA S. Physicomechanical properties of wollastonite (CaSiO_3)/styrene butadiene rubber (SBR) nanocomposites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 132(47).
- [35] DIEP H T, ISMAIL H, AZURA A R, et al. The effect of wollastonite on curing characteristics, tensile and morphology of natural rubber compounds; proceedings of the Advanced Materials Research, F, 2014[C]. *Trans Tech Publ*, 858: 199–204.
- [36] 曾天卷. 玻璃纤维增强热塑性塑料——短纤维粒料和长纤维粒料[J]. *玻璃纤维*, 2008(4): 33–39+42.
- ZENG T J. Glass fiber reinforced thermoplastics - short fiber granule and long fiber granule[J]. *Glass Fiber*, 2008(4): 33–39+42.
- [37] 尚文字, 谢大荣, 刘庆峰, 等. 晶须状碳酸钙填充聚合物材料性能的研究[J]. *中国塑料*, 2000(3): 26–29.
- SHANG W Y, XIE D R, LIU Q F, et al. Study on properties of whisker calcium carbonate filled polymer materials[J]. *China Plastics*, 2000(3): 26–29.
- [38] 陶勇. 硅灰石表面改性研究现状与应用进展[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2008(6): 9–12+8.
- TAO Y. Research status and application progress of wollastonite surface modification[J]. *China Non-metallic Minerals Industry Guide*, 2008(6): 9–12+8.
- [39] HADI N J, AL-KAWAZ A, HAMZA A F, et al. New Approach to Predict Mechanical and Tribological Behaviour Through Rheological Properties of Polypropylene Composites; proceedings of the 2018 9th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE), F, 2018[C]. *IEEE*, 556–560.
- [40] YUAN X, EASTEAL A J, BHATTACHARYYA D. Mechanical performance of rotomoulded wollastonite-reinforced polyethylene composites[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2007, 21(7): 1059–1066.
- [41] YUHAIDA I, SALMAH H, HANAFI I, et al. The effect of acrylic acid on tensile and morphology properties of wollastonite filled high density polyethylene/natural rubber composites[J]. *Procedia Chemistry*, 2016, 19: 401–405.
- [42] 谢刚, 范雪蕾, 杨巍, 等. 硅灰石填料对线性低密度聚乙烯力学性能的影响[J]. *黑龙江大学自然科学学报*, 2006(6): 751–755.
- XIE G, FAN X L, YANG W, et al. Effect of wollastonite filler on mechanical properties of linear low density polyethylene[J]. *Journal of Natural Science of Heilongjiang University*, 2006(6): 751–755.
- [43] 马云海, 佟金, 孙国恩. 硅灰石填充UHMWPE基复合材料的干滑动磨损[J]. *电子显微学报*, 2001(4): 366–367.
- MA Y H, TONG J, SUN G E. Dry sliding wear of wolverite filled UHMWPE matrix composites[J]. *Chinese Journal of Electron Microscopy*, 2001(4): 366–367.
- [44] WANG C, WANG D, ZHENG S. Characterization, organic modification of wollastonite coated with nano-Mg (OH)₂ and its application in filling PA6[J]. *Materials Research Bulletin*, 2014, 50: 273–278.
- [45] YILMAZ C, KORKMAZ T. The reinforcement effect of nano and microfillers on fracture toughness of two provisional resin materials[J]. *Materials & Design*, 2007, 28(7): 2063–2070.
- [46] CECEN V, BOUDENNE A, IBOS L, et al. Electrical, mechanical and adhesive properties of ethylene-vinylacetate copolymer (EVA) filled with wollastonite fibers coated by silver[J]. *European Polymer Journal*, 2008, 44(11): 3827–3834.
- [47] ZHUANG G, YANG Y, LI B. Reinforced effect of wollastonite on phenolphthalein poly (ether ketone)[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1997, 65(4): 649–653.
- [48] MA G, YUE X, ZHANG S, et al. Effect of the addition of silane coupling agents on the properties of wollastonite - reinforced poly (ether ether ketone) composites[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2011, 51(6): 1051–108.
- [49] CHUAYJULJIT S, SIRAPRAPOJ C, BOONMAHITTHISUD A. Effects of poly (butylene succinate) and ultrafine wollastonite on the physical properties of plasticized poly (vinyl chloride)[J]. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 2015, 21(3): 220–227.
- [50] 李国华. 硅灰石在摩擦材料中的应用[J]. *非金属矿*, 1992(4): 49–56.
- LI G H. Application of wollastonite in Friction Materials[J]. *Non-metallic Ore*, 1992(4): 49–56.
- [51] 沈上越, 李珍, 刘新海, 等. 针状硅灰石和纤维状海泡石在摩擦材料中的应用[J]. *矿产综合利用*, 2002(5): 7–10.
- SHEN S Y, LI Z, LIU X H, et al. Application of aciculite and fibrous sepiolite in friction materials[J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, 2002(5): 7–10.
- [52] SINGH T, TIWARI A, PATNAIK A, et al. Influence of wollastonite shape and amount on tribo-performance of non-asbestos organic brake friction composites[J]. *Wear*, 2017, 386: 157–64.
- [53] 甘永年, 谢兵. 连续铸钢用硅灰石保护渣的研制[J]. *非金属矿*, 1988(3): 29–32.
- GAN Y N, XIE B. Development of wollastonite slag for continuous casting steel[J]. *Non-metallic Ore*, 1988(3): 29–32.
- [54] 林功文. 以天然硅灰石为基的连铸用保护渣的研究[J]. *非金属矿*, 1988(4): 42–45.
- LI G W. Study on protection slag for continuous casting based on natural wollastonite[J]. *Non-metallic Ore*, 1988(4): 42–45.
- [55] 韩秀丽, 张韩, 刘磊, 等. 硅灰石对连铸保护渣结晶性能的影响规律[J]. *钢铁钨钛*, 2015, 36(1): 103–108.
- HAN X L, ZAHNG H, LIU L, et al. Effect of wollastonite on crystallization properties of continuous casting slag[J]. *Iron & Steel Vanadium and Titanium*, 2015, 36(1): 103–108.
- [56] 朱立光, 袁志鹏, 许莹, 等. $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ 系保护渣反应热力学分析[J]. *铸造技术*, 2017, 38(4): 866–866.
- ZHU L G, YUAN Z P, XU Y, et al. Thermodynamic analysis of the reaction of $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ slag[J]. *Casting Technology*, 2017, 38(4): 866–866.
- [57] 刘志贤, 赵学君, 韩军, 等. 硅灰石在电焊条工业中的应用研究[J]. *硅酸盐通报*, 1986(4): 22–28.
- LIU Z X, ZHAO X J, HAN J, et al. Application of wollastonite in electrode industry[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 1986(4): 22–28.
- [58] 于滢. 非金属工业矿物在电焊条中的应用[J]. *建材工业信息*, 1994(5): 17–18.
- YU G. Nonmetallic mineral industry in the application of welding electrode[J]. *Journal of Building Materials Industry Information*, 1994(5): 17–18.
- [59] 张明杰, 庞桂林, 甄卫军, 等. 哈密硅灰石在连铸结晶器保护渣中的应用与研究[J]. *非金属矿*, 2011, 34(3): 38–41.
- ZHANG M J, PANG G L, ZHEN W J, et al. Application and research of hami wollastonite in mold slag of continuous casting[J]. *Non-metallic Ore*, 2011, 34(3): 38–41.
- [60] 沈晶晶, 薛飞, 牛保峰. 硅灰石在造纸工业中的应用研究[J]. *华东纸业*, 2020, 50(6): 37–40.

- SHEN J J, XUE F, NIU B F. Study on the application of wollastonite in paper industry[J]. East China Paper Industry, 2020, 50(6): 37–40.
- [61] 雷芸, 晏全香, 刘淑鹏, 等. 硅灰石矿物纤维造纸试验研究[J]. 非金属矿, 2009, 32(S1): 15–18.
- LEI Y, YAN Q X, LIU S P, et al. Experimental study on wollastonite mineral fiber papermaking[J]. Non-metallic Ore, 2009, 32(S1): 15–18.
- [62] 刘淑鹏, 张小伟, 李玉宝. 硅灰石与植物纤维复合造纸研究[J]. 矿产保护与利用, 2010(6): 16–20.
- LIU S P, ZHANG X W, LI Y B. Study on the compound of wollastonite and plant fiber in papermaking[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2010(6): 16–20.
- [63] 罗增智. 硅灰石在造纸工业中的应用研究[J]. 中国包装工业, 2014(16): 24.
- LUO Z Z. Research on the application of wollastonite in Paper Industry[J]. China Packaging Industry, 2014(16): 24.
- [64] 蒲文娟. 探讨硅灰石在造纸行业的应用[J]. 科技资讯, 2017, 15(19): 95–96.
- PU W J. Discussion on the application of wollastonite in paper industry[J]. Science and Technology Information, 2017, 15(19): 95–96.
- [65] XUE H, WANG G, HU M, et al. Modification of wollastonite by acid treatment and alkali-induced redeposition for use as papermaking filler[J]. Powder technology, 2015, 276: 193–199.
- [66] 邓宵, 程宝军. 硅灰石粉对水泥基砂浆力学性能影响的研究[J]. 混凝土, 2014(9): 97–101.
- DENG X, CHENG B J. Study on the effect of wollastonite powder on mechanical properties of cement based mortar[J]. Concrete, 2014(9): 97–101.
- [67] 关丽丽, 戴智强. 硅灰石尾矿对氯氧镁水泥改性的试验研究[J]. 科技创新与应用, 2012(21): 110.
- GUAN L L, DAI Z Z. Experimental study on modification of magnesium chloride cement by wollastonite tailings[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2012(21): 110.
- [68] 苏林强. 硅灰石尾矿在纤维水泥板中的应用研究[J]. 混凝土世界, 2022(6): 66–68.
- SU L Q. Research on application of wollastonite tailings in fiber cement board[J]. Concrete World, 2022(6): 66–68.
- [69] 张红兵. 纤维材料对蒸压混凝土力学性能的影响研究[J]. 四川建材, 2013, 39(6): 51–52+4.
- ZHANG H B. Study on the influence of fiber materials on mechanical properties of autoclaved concrete[J]. Sichuan Building Materials, 2013, 39(6): 51–52+4.
- [70] XU B, LOTHENBACH B, WINNEFELD F. Influence of wollastonite on hydration and properties of magnesium potassium phosphate cements[J]. Cement and Concrete Research, 2020, 131: 106012.
- [71] 曹俊雅, 孙健, 朱干宇, 等. 纤维增强多孔硅酸钙防火板制备及性能调控[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(8): 2416–2424.
- CAO J Y, SUN J, ZHU G Y, et al. Preparation and performance control of fiber reinforced porous calcium silicate fireproof board[J]. Silicate Bulletin, 2020, 39(8): 2416–2424.

Domestic and Foreign Status and Application Research Progress of Wollastonite Resources

JIANG Haodong¹, LI Shuwei², DING Jian¹, HUANG Cong¹, WANG Yang¹, LI Zhen¹

1. Faculty of Materials Science and Chemistry, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China;

2. China Energy Green Building Material CO., LTD, Wuhan 430015, China

Abstract: The wollastonite industry is developing rapidly with the increasing proven reserves, widening application range and deepening longitudinal study of wollastonite. Wollastonite has become an important basic non-metallic ore with huge application market demand and wide development prospect. In this paper, the present situation of wollastonite resources at home and abroad was introduced, the technical characteristics of wollastonite in the application fields of ceramics, paint and coating, rubber and plastic, metallurgy, papermaking, building materials and so on were emphatically analyzed, the application progress of wollastonite was summarized, and the development prospect was forecasted.

Keywords: wollastonite; resource status; application progress

引用格式: 蒋浩东, 李树蔚, 丁建, 黄聪, 王洋, 李珍. 国内外硅灰石资源现状及应用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(1): 162–168.

JIANG Haodong, LI Shuwei, DING Jian, HUANG Cong, WANG Yang, LI Zhen. Domestic and foreign status and application research progress of wollastonite resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(1): 162–168.

投稿网址: <http://hcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn