

利用沙漠砂合成硅酸盐材料 ——硅酸盐工业和沙漠治理可持续发展的新方向

史志铭

内蒙古工业大学材料科学与工程学院, 呼和浩特 010051

摘要 为揭示利用沙漠砂合成硅酸盐材料的优势和重要性, 以内蒙古西部库布齐、乌兰布和、腾格里和巴丹吉林4大沙漠为例, 通过实地考察并在沙漠边缘取样, 研究了该沙漠砂的理化性质。总结了国内外沙漠砂材料的研究和应用现状, 分析了利用沙漠砂合成硅酸盐材料的社会效益和经济效益, 指出了其发展前景和面临的主要问题。

关键词 硅酸盐材料; 资源节约; 生态环境; 沙漠治理; 可持续发展

我国沙漠占国土面积的30%以上。在过去的几十年里, 我国已经在西北沙漠地区大规模种植了砂生植物, 有效阻止了沙丘移动和沙漠化倾向^[1-3], 但同时也付出了巨大的人力、物力和财力代价。据报道, 2018年我国沙质荒漠化土地总面积为35.08万km², 主要分布在内蒙古自治区和新疆维吾尔自治区; 2010—2018年, 这些地区荒漠化土地面积减少了0.73万km², 其中, 新疆维吾尔自治区减少0.48万km², 内蒙古自治区减少0.19万km², 有2.78万km²荒漠化程度明显减轻^[4]。此外, 当地居民还在沙滩上成功种植了蔬菜、水果和药材等经济作物, 也产生了很高的经济效益。钱学森早先倡导的“沙产业”主要强调现代化农业的属性, 但随着产业结

构优化和综合发展, 沙产业又拓展到工业生产和服务业领域^[5], 衍生出了诸如太阳能、风能、热能、体育和旅游等项目, 这些措施进一步促进了当地社会和经济的发展。沙产业被认为是沙漠地区实现生态保护、经济发展和人民脱贫致富等多重目标的重要途径^[6]。但是, 由于沙漠覆盖区域非常大, 且大多处于偏远地区, 生态化治理和发展沙产业难度极大, 特别是在绵延起伏的沙丘地带, 交通运输极为困难, 沙漠生态化治理成本很高。因此, 移除沙丘, 平整沙地, 修建道路和供电系统, 可提供更加适合的种植条件以及便利的交通、运输和生活条件, 降低沙漠治理难度和治理成本, 加快沙漠化治理进程。

收稿日期: 2021-11-24; 修回日期: 2022-03-30

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项(ZDZX2018030)

作者简介: 史志铭, 教授, 研究方向为无机非金属材料, 电子邮箱: shizm@imut.edu.cn

引用格式: 史志铭. 利用沙漠砂合成硅酸盐材料——硅酸盐工业和沙漠治理可持续发展的新方向[J]. 科技导报, 2022, 40(19): 95-105; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.19.010

沙漠砂实质上是一种低品质的石英砂,具有与硅酸盐原料类似的化学组分,只不过其比例不同,因此,移除的沙漠砂可用作原料生产硅酸盐材料。目前有些地区已经在沙漠附近建立了工业园区或经济开发区,旨在推动沙漠砂的工业应用,例如内蒙古鄂尔多斯市的达拉特旗、准格尔旗和杭锦旗等,这些工业园区和开发区具有相对完善的基础设施和交通运输条件。目前沙漠砂工业化应用主要有2个方向,一是在工业园区或开发区内生产城市路面透水砖和简易房屋的墙板;但是由于产业配套、生产规模和技术力量等多方面因素的限制,生产效率低、产品档次低,难以形成显著的经济效益和示范作用。二是修筑沙漠地区公路的沙土路基和路面以及生产房屋、桥梁等的混凝土浆料和构件,基本满足沙漠腹地基础建设的需求。另外,就地取材、因地制宜,避免了远距离运输建筑材料的问题,产生了很高的经济效益。而在高附加值的硅酸盐材料如陶瓷、玻璃和散体功能材料等方面,国内外基本处于研究阶段,很少投入工业化生产。

硅酸盐材料是一类重要的工程材料,包括陶瓷、玻璃、水泥、混凝土和散体材料等多种形式,特别是在建筑行业用量巨大。传统硅酸盐材料的原料涉及各种粒度的砂石骨料以及包括石英砂在内的多种黏土矿物^[7-9],为了满足硅酸盐材料日益增长的需求,矿产资源的开采量也在快速增长,导致环境污染、耕地破坏以及矿物原料供应紧张和价格上涨等一系列问题^[10-11]。因此,沙漠砂、海砂和河砂等闲置资源以及粉煤灰、煤矸石、冶金渣等工业固废^[12-14]已成为高品质矿物原料的替代物,一定程度上缓减了硅酸盐材料需求增长和矿物资源减少

之间的矛盾,是硅酸盐工业可持续发展的一个重要方向。在这些闲置资源和工业固废中,沙漠砂无疑是储量最大、理化性质最稳定的原料。因此,加强沙漠砂在硅酸盐材料领域应用的研究,开发高品质、高附加值的硅酸盐材料并将其转化为工业产品,将产生比农业更高的经济效益和社会效益,有效促进硅酸盐工业和沙漠治理的可持续协同发展。

国内有研究团队近年来一直从事利用沙漠砂合成陶瓷的研发工作。本文在考查内蒙古西部4大沙漠的基础上,系统研究以沙漠砂为基础原料合成致密陶瓷、多孔陶瓷、复相陶瓷、颗粒增强复合陶瓷和微晶玻璃等材料的工艺技术,以及从沙漠砂中提取氧化硅、氧化铝和氧化镁等技术。

1 沙漠砂的化学成分、粒度与微结构特点

在规模化生产中,沙漠砂的粒度、化学成分、形貌、微结构及其随沙漠中地理位置的变化等因素严重影响生产工艺和产品质量的稳定性,因此了解沙漠砂的理化性质显得非常重要。

我国典型的沙漠砂粒径通常分布在几微米到几百微米之间,其化学成分为质量分数70%~90%的 SiO_2 和10%~30%的 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 Na_2O 和 K_2O 等。沙漠砂大体上与石英砂和粘土矿物的粒度和组分种类类似,但具体比例与沙漠所处的地理位置有关^[15]。本研究以内蒙古西部的库布齐、乌兰布和、腾格里和巴丹吉林4大沙漠为例,通过考察并取样(为了安全考虑,取样点离沙漠边缘道路约200 m,取样深度为500 mm)如图1所

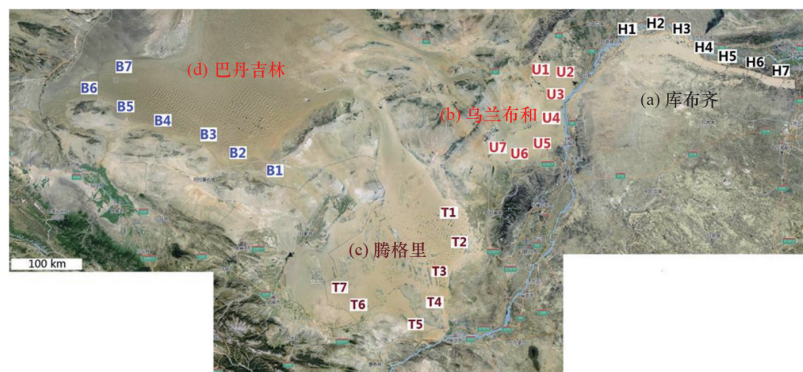


图2 内蒙古4大沙漠取样位置

示,进行分析后发现各沙漠不同位置样品的粒度和化学成分有所不同,但是差异并不大,粒度主要分布在 100~300 μm 之间,平均粒度在 170~280 μm , SiO_2 质量分数在 80% 左右,如表 1 和表 2 所示。以

库布齐沙漠砂为例,其相组成为 α -石英和低熔点的长石相如钙长石、钾/钠长石等(图 2、图 3)。可以预见,内蒙古西部沙漠砂相对稳定的理化性质有利于硅酸盐材料生产工艺和产品质量的控制。

表 1 内蒙古 4 大沙漠取样点沙漠砂的平均粒度

库布齐沙漠							
取样点	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
平均直径/ μm	276.6	251.1	236.0	229.2	201.7	176.3	173.9
乌兰布和沙漠							
取样点	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7
平均直径/ μm	277.5	256.3	244.9	208.6	214.6	223.5	236.8
腾格里沙漠							
取样点	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
平均直径/ μm	232.5	281.9	270.5	270.7	268.2	276.2	269.4
巴丹吉林沙漠							
取样点	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
平均直径/ μm	185.4	249.1	178.3	246.2	221.9	214.1	220.6

表 2 内蒙古四大沙漠取样点沙漠砂的化学成分 (%)

取样点		H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
库布齐沙漠	SiO_2	83.18	81.05	80.26	80.86	79.54	79.62	80.35
	TiO_2	0.21	0.28	0.35	0.25	0.33	0.30	0.36
	Al_2O_3	7.65	8.52	8.54	8.25	9.06	9.42	9.13
	Fe_2O_3	1.87	2.78	2.75	2.85	2.54	2.38	2.24
	CaO	1.65	2.64	3.26	3.26	2.65	2.19	2.90
	K_2O	1.98	1.85	1.89	1.74	2.40	2.43	2.13
	MgO	1.72	0.92	0.98	0.91	1.52	1.76	0.85
	Na_2O	1.74	1.96	1.97	1.88	1.96	1.90	2.04
取样点		U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7
乌兰布和沙漠	SiO_2	80.60	81.68	82.24	79.51	80.24	80.69	79.86
	TiO_2	0.22	0.26	0.24	0.33	0.25	0.27	0.38
	Al_2O_3	9.00	8.47	8.37	9.46	9.78	8.63	9.74
	Fe_2O_3	1.86	2.46	1.74	2.44	2.15	2.07	1.61
	CaO	2.60	1.84	2.32	2.48	2.01	1.65	2.54
	K_2O	1.98	1.97	2.35	2.25	1.82	2.04	1.74
	MgO	1.80	0.84	0.68	1.12	1.61	1.85	2.06
	Na_2O	1.94	2.48	2.06	2.41	2.14	2.80	2.07
取样点		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
腾格里沙漠	SiO_2	80.53	81.25	82.22	81.34	80.20	79.82	81.63
	TiO_2	0.22	0.30	0.26	0.22	0.28	0.35	0.24
	Al_2O_3	9.56	8.50	8.62	9.24	8.76	9.07	8.50
	Fe_2O_3	2.06	2.45	2.32	2.04	2.00	2.53	2.41
	CaO	1.03	1.64	0.96	1.44	2.03	1.65	1.72
	K_2O	2.24	1.96	2.04	2.08	2.10	1.99	2.13
	MgO	1.90	1.92	1.78	1.75	1.86	2.21	1.96
	Na_2O	2.46	1.98	1.80	1.89	2.77	2.38	1.41

表2 内蒙古四大沙漠取样点沙漠砂的化学成分(续)

(%)

取样点	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	
巴丹 吉林 沙漠	SiO ₂	78.69	80.42	79.34	80.12	78.96	78.52	79.43
	TiO ₂	0.36	0.27	0.42	0.37	0.44	0.51	0.42
	Al ₂ O ₃	9.99	9.64	9.48	9.10	8.66	8.79	9.15
	Fe ₂ O ₃	2.62	2.75	3.07	1.95	2.69	2.23	1.99
	CaO	2.74	1.42	1.83	2.94	2.64	2.37	1.78
	K ₂ O	2.19	1.96	2.10	1.75	2.96	2.67	2.31
	MgO	1.27	0.98	1.64	1.70	1.84	2.48	2.75
	Na ₂ O	2.14	2.56	2.12	2.07	1.81	2.43	2.17

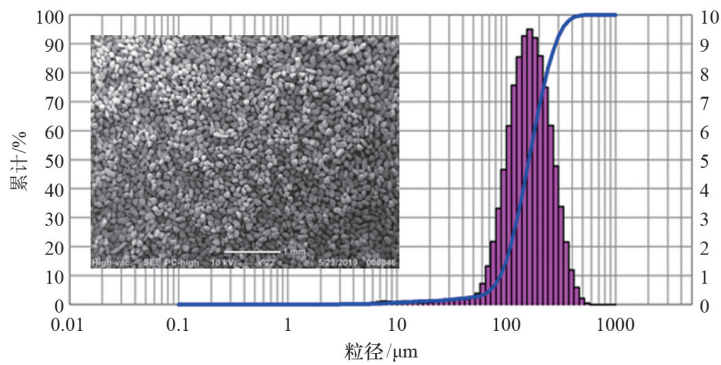


图2 库布齐沙漠砂形貌及粒度分布

粒径点	质量分数/%
10.00	0.60
20.00	1.11
45.00	2.29
75.00	5.70
100.0	15.14
200.0	68.38
300.0	92.50
400.0	98.73
500.0	99.92
600.0	100.00

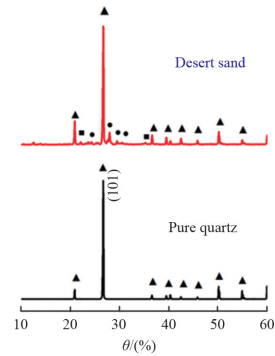
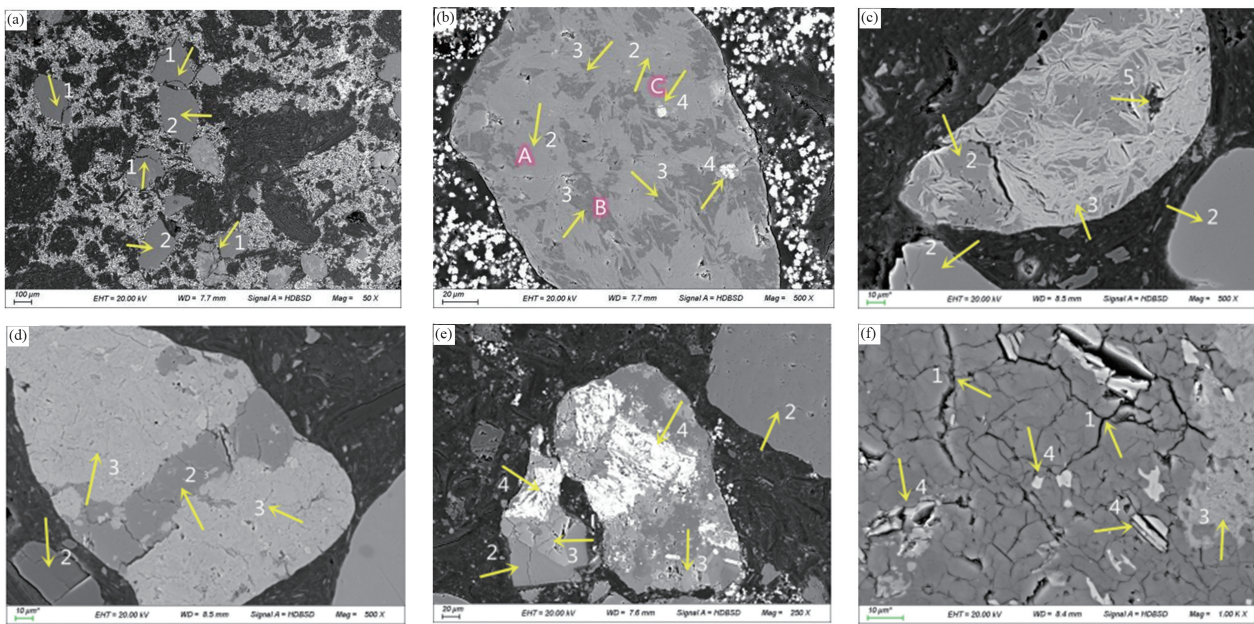


图3 纯石英砂和沙漠砂的相组成(XRD)

沙漠砂不同于石英砂,沙颗粒之间除了化学成分和粒度的差异之外,还存在微结构上的差异(图4)。砂颗粒可以是单相石英(图4(a))、石英—长石相混合(图4(b)~(d)),或者石英—长石—钛铁氧化物相混合(图4(e))等形式,有的颗粒还存在

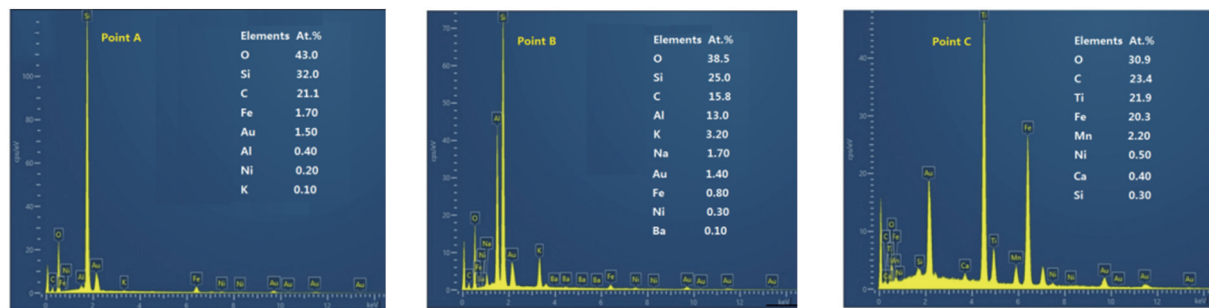
较多的微裂纹(图4(a)和4(f))。另外,由于沙漠的形成与远古的地理和地质环境及其演化过程密切相关,因此,不同地区的沙漠砂必然具有各自的理化性质特点,需要作具体的研究与分析。



(a)~(e) 砂颗粒的微观结构

(f) 煅烧后微结构

图4 库布齐沙漠砂的微观形貌和微区化学成分



(g) 指定点(相)的化学成分。1:微裂纹;2:氧化硅;3:长石;4:铁钛氧化物;5:孔洞

图4 库布齐沙漠砂的微观形貌和微区化学成分(续)

2 利用沙漠砂合成硅酸盐材料的研究现状

国内外已经在沙漠砂材料的研发方面做了许多工作,目前开发的沙漠砂材料主要有5大类:建筑材料、玻璃与微晶玻璃、工业陶瓷、散体功能材料以及化学提取的氧化物粉体,这些材料在工业和民用领域都占有极其重要的地位。

2.1 建筑材料

2.1.1 沙土道路材料

沙漠砂最早应用于沙漠地区的道路建设,在这些地区原材料严重短缺而且交通运输极为困难。就地使用沙漠砂作为原料是最为现实的选项。沙漠砂由于粒度小、粒径分布范围窄等问题,用作沙土路基时密实性较差,难以满足路基质量的要求。工程技术人员开发了多种工艺解决这些难题,例如通过调节水含量、黏土比例和振实频率等对乌兰布和沙漠砂的密实工艺进行优化,路面密实度达到96%^[16]。在沙漠砂中添加树脂、NaOH/Na₂CO₃促进剂、沥青、水泥、焚烧灰和水泥粉尘等^[17-19],改善了砂石颗粒间的物理或化学结合力,大幅度改善路基的密实度,获得了符合质量标准的路基材料。在伊朗的亚兹德和马赫沙哈尔沙漠砂中添加质量分数5%膨润土、20%水泥和5%黏土,在水灰比为0.5的条件下养护28 d后抗压强度达到5.86 MPa,该值高于ASTM标准的规定值^[20]。而在道路旁边安装沙漠砂袋形成挡风墙,避免了沙尘暴造成的道路阻塞和车辆金属部件磨损导致的车辆故障,虽然应用形式简单,但起到的作用很大^[21]。采用纳米级砂颗粒和玻璃纤维共增强的环氧树脂复合材料^[22]以及

沙漠砂增强的粉煤灰基聚合物^[23]成功应用于北非和中东国家极度干旱高热地区的建筑工程,显著改善了这些材料的使用性能。

2.1.2 水泥熟料和混凝土

内蒙古蒙西水泥集团以乌兰布和沙漠砂替代黏土,开发了强度达到规范要求的水泥熟料^[24];原材料由沙漠砂、石灰岩、铝基化合物、硅砂、煤矸石和铁粉等组成。将原料混合研磨并煅烧后的水泥熟料配成浆体,老化28 d后抗弯强度为8.9 MPa,抗压强度为61.4 MPa。同样,以新疆沙漠砂、石灰石、硅基化合物和铁基化合物为原料制备的水泥也满足《通用硅酸盐水泥》国家标准(GB 175—2007)的规范要求^[25]。有研究表明,即使添加质量分数3%的细砂就会损害混凝土的表面性质^[26]。但是,由沙漠砂替代天然砂明显改善混凝土的工艺性,只是其强度比标准混凝土有所降低^[27-28]。采用毛乌素沙漠砂制备混凝土时,在标准工艺下混凝土抗压强度为42.7~57.1 MPa^[29],能够满足大多数工程的质量要求^[30]。采用毛乌素沙漠砂替代质量分数50%砂骨料,混凝土抗压强度达到508 MPa^[31]。从经济角度来看,在严重缺乏砂骨料的沙漠地区这种强度损失是完全可以接受的^[32]。此外,通过对含沙漠砂的全尺寸骨料组成的优化、添加氯丁酰氯(CBC)或羧甲基淀粉(CMS)、钢纤维增强相以及使用细沙漠砂烧结后的大颗粒等措施都能改善混凝土的力学性能^[33-35]。

2.2 玻璃与微晶玻璃

硅酸盐玻璃通常含有质量分数50%以上的SiO₂以及其他氧化物成分,组分种类虽然与沙漠砂基本一致,但是其相对比例差别较大。通过熔化中

东沙漠砂并添加黏土等辅料完全可以制成硅酸盐玻璃^[36]。另外,以库布齐沙漠砂,长石、高岭土、氧化镁和氧化铝为原料不仅能制成硅酸盐玻璃,还可以通过后续晶化工艺制成石英质和堇青石质微晶玻璃^[37-38],它们都具有较高的强度和硬度,可用作高档建筑装饰和其它重要的工业零部件。

2.3 工业陶瓷

硅酸盐陶瓷具有高硬度、耐热、耐腐蚀和耐磨损性能,在工业和民用领域得到广泛应用。利用沙漠砂替代石英并且添加其它辅助原料可以制成石英质陶瓷^[39]、镁橄榄石陶瓷($2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$)^[10]、莫来石($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot2\text{SiO}_2$)陶瓷和纤维^[41-42]、假蓝宝石陶瓷($4\text{MgO}\cdot5\text{Al}_2\text{O}_3\cdot2\text{SiO}_2$)^[43]、堇青石陶瓷($2\text{MgO}\cdot2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot5\text{SiO}_2$)^[44-46]等。由于沙漠砂含有质量分数15%~25%的低熔点长石类物质,因此可在不添加烧结助剂的情况下,在较低温度下烧结就能显著提高陶瓷的致密度和强度。一个最基本的例子是,利用分级的沙漠砂颗粒压制坯体经过烧结可直接制成用于过滤、分离、布气和隔热保温的多孔陶瓷^[47]。这种多孔陶瓷充分利用了沙漠砂的颗粒和化学组分特点,陶瓷的孔隙沿袭了砂颗粒间的缝隙,孔隙率可达30%~40%,孔径、孔型和强度取决于颗粒粒度分级和烧结温度。与传统的添加有机造孔剂制备多孔陶瓷的传统工艺相比,烧结排放的气体污染物显著降低。

利用沙漠砂、高岭土、氧化铝等原料磨成粉末经压坯、烧结还可制成含不同比例石英相的致密陶瓷^[48];当添加质量分数2.0% LiF并在1250℃烧结时,陶瓷的抗弯强度可达80 MPa以上。用沙漠砂制备莫来石晶须也是沙漠砂高值化应用的成功案例。以工业 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 AlF_3 和 V_2O_5 等为反应助剂,当沙漠砂与 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的质量比为35:65,合成温度在1200℃以上时,获得纵横比高达60的莫来石晶须,是一种很好的轻质耐火材料^[42]。具有低热膨胀系数的堇青石陶瓷也可采用沙漠砂、菱镁矿和铝土矿为原料在1300℃的烧结温度下合成^[49],陶瓷的热膨胀系数随沙漠砂加入量的增加出现先减小后增大的趋势。在质量分数55.6%沙漠砂、14.5%菱镁矿和29.9 wt%铝土矿的原料组成下,其热膨胀系数为

$3.78\times10^{-6}/^\circ\text{C}$,抗弯强度为84.21 MPa。

以埃及沙漠砂和再生硅粉为原料,通过1577℃下氮气气氛燃烧可合成氮氧化硅($\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$)粉体,该粉体通过添加5%的氧化钙-氧化铝助剂并制成坯体在1600℃下烧结,获得硬度为18.7 GPa(约1953 HV),抗弯强度为363 MPa的高性能陶瓷,它比普通陶瓷具有更高的硬度和强度,以及优异的耐高温(1500℃)氧化性能和耐腐蚀性能^[50]。在沙漠砂中添加SiC或 ZrO_2 颗粒也可制备出硬度高达800 HV的复合陶瓷^[51-53]。此外,利用沙漠砂和粉煤灰合成的石英-钙长石($\text{SiO}_2\text{-CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)复相陶瓷具有成本低廉、工艺简单和性能稳定的突出优势,是轻质砖瓦和保温/填充材料的又一选项^[54-55],在内蒙古、陕西、宁夏等沙漠地区的煤矿、火力发电厂、煤化工企业煤灰、煤矸石的综合利用方面具有很大潜力。

2.4 散体功能材料

天然沙漠砂具有储热温度高、流动性好、比表面积大、耐腐蚀等优异的物理、化学特性,可用于太阳能、风能和余热回收系统的储热材料。在腾格里沙漠边缘建成的太阳能电站,其热交换器使用了当地特定粒度范围的沙漠砂^[56],气-固热交换效率高,成为沙漠地区推广太阳能的典范。另外,库布齐沙漠砂经过酸洗去掉杂质后,获得较为纯净的石英颗粒,在150~250 μm粒度范围内的砂颗粒被证明具有良好的电学活化、锂储存容量和循环性能,有望作为电池材料使用^[57]。而具有特定粒度(50~1000 μm)的沙漠砂铺层可用于石油开采中油-水乳状液的重力分离,这省去了使用昂贵的氟硅烷超疏水材料^[58],可显著降低生产成本。

2.5 高纯度氢氧化物和氧化物粉体

作为技术战略储备,从沙漠砂中提取Si、Al、Mg、Ca、Fe、Ti等的氧化物或氢氧化物也是可以实现的。比如,通过酸溶法将沙漠砂溶解成多离子溶液,借助电化学方法可以从该混合溶液中提取 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 等高纯度纳米粉体^[59-61],煅烧该氢氧化物又可获得氧化物粉体,这些高纯度的纳米粉体可用于制备高性能材料。酸处理后的不溶粉体中也含有质量分数90%以上的 SiO_2 成分;而多离子溶液电解形成的氯

气和氢气可重复利用。

因此,该方法具有环境污染小,经济效益显著的特点,也适合于从高品位原料以及粉煤灰、煤矸石和冶金渣中提取化合物的场合使用。它与目前从粉煤灰中采用酸法提取氧化铝的工艺相比,原料利用率和酸的循环利用率很高;而与碱法提取氧化铝、氧化硅的工艺相比,无需添加大量碱性助剂,几乎不新增二次废弃物。

3 沙漠砂合成硅酸盐材料的原料成本和效益分析

硅酸盐材料在无机材料中所占比重很大,也并非所有的硅酸盐材料都必须使用优质石英砂或含

SiO₂组分的黏土矿物作为原料。表3是根据部分产品、产量、沙漠砂替代比例等指标估算的产品成本和效益。例如,以修建长100 km、宽20 m、高3 m的高速公路路基为例,用沙漠砂替代常规砂骨料可以移除约472万 m³的沙漠砂,这几乎能在118个足球场的面积(80 m×100 m)上堆积5 m高,节约骨料的成本约为3.8亿元。另以年产2百万 t混凝土为例,以沙漠砂替代砂骨料可移除27万 m³沙漠砂,相当于在6.8个足球场上堆积5.0 m高,节约骨料的成本约为2160万元。再以年产10万 t陶瓷产品为例,用沙漠砂替代石英砂可移除4.4万 m³的沙漠砂,相当于在1.1个足球场的面积上堆积5.0 m高,节约石英砂的成本约为1400万元。

表3 沙漠砂替代传统原料产生的成本和社会效益分析

产品种类	年产量/万 t	替代物	产品中替代物体积分数/%	替代比例/%	消耗沙漠砂体积/万 mm ³	成本节约/万元
砂石路基	1020*	砂骨料	70	100	472.5	37800
混凝土	200	砂骨料	60	20	27.0	2160
水泥熟料	200	黏土	12.5	80	20.0	4800
建筑玻璃	10	石英砂	43.75	100	4.4	1400
建筑陶瓷	10	石英砂	43.75	100	4.4	1400
散体材料	1	石英砂	62.5	100	0.6	200
高纯化合物	1	-	62.5	100	0.6	50000(新增)

注:* 砂石路基尺寸为100 km(长)×20 m(宽)×3 m(高),路基密度1.7 t/m³;① 砂骨料:50元/t;② 黏土:150元/t;③ 石英砂:200元/t;④ 高纯化合物:5万元/t;⑤ 沙漠砂:密度1.6 t/m³,0元/t。

在这3个例子中,移除沙漠砂获得平整的沙地总面积约为1511亩,其中有的原本就是被沙漠吞噬的耕地。这么广大的面积更方便于生态修复缩减沙漠面积,也有利于沙土改良创造农田和基础设施建设。因此,该项目具有很高的经济效益和生态效益,对于加快新农村建设和偏远地区脱贫攻坚步伐以及建设和谐社会都有极为重要的作用和意义。

4 沙漠砂材料研发和应用面临的主要问题及对策

尽管目前沙漠砂材料和技术研发已经取得一定进展,但是总体来看,仍有十分艰巨的工作要做。在思想观念层面上,目前对沙漠砂的工业应用还存

在相当模糊的认识,这直接导致了沙漠砂的开发利用缺乏有效的政策和措施。其原因之一可能与近期部分硅酸盐产品产能过剩导致的对资源、环境问题的重视程度降低有关。这种状况将随着更加严格的资源、环境政策和产品结构的优化调整逐渐改变。在技术层面上也存在诸多问题^[62]。

1) 沙漠砂的物理化学性质对工业化生产的工艺以及产品质量影响很大,但是目前还相当缺乏对国内各地区沙漠砂理化性质的比较研究。更为严重的问题是有的地区沙漠砂根本不能用于工业化开发,比如在埃及东南部沙漠中存在含铀和钍的放射性物质^[63];所以在项目执行前还需要认真评价沙漠砂的可用性。

2) 沙漠砂的理化性质实际上不完全符合硅酸

盐材料生产对原料的要求,需要做更为深入细致的工艺研究。例如沙漠砂粒度小、分布窄,用于制备砂浆或混凝土时,只能替代砂骨料中的细砂部分,而增加微细颗粒的比例又要消耗更多的水和外加剂,这在沙漠地区难度极大。另外,沙漠砂含有碱性/酸性离子,对混凝土耐久性和钢筋的防腐性有不良影响。而沙漠砂颗粒内部的弱界面和微裂纹在服役过程中容易发生开裂,使其丧失强化作用。当用作散体材料时,砂颗粒的破裂也会降低通透性。在制备工业玻璃和陶瓷材料时,过多的长石相等低熔点物质对材料性能特别是耐热和耐腐蚀性能带来负面影响。因此,需要对沙漠砂做预处理,比如分级、纯净化等。

3) 对硅酸盐材料的合成机理、合成工艺和性能的研究还不够深入,对产品质量的评价还不够系统,导致对产品的质量和适用性产生过多疑虑。

此外,与工业生产相关联的沙漠砂开采的规章制度以及生产必需的电力、交通运输、水、天然气等基础设施的配套,大规模生产带来的新的环境影响及监测、与现有沙漠治理方案的衔接等诸多问题,还没有得到应有的重视。这些问题对沙漠砂的工业化应用提出了严峻挑战。

一方面需要从材料与制造科学、生态环境、资源、管理和政策等多个方面进行综合研究与协调,形成全社会共同的认识、明确的发展目标和具体的行动。另一方面,在已经具备条件的工业园区或者企业建立示范生产线,政府以研发经费的方式支持企业开展产品的研发工作,企业自身要积极寻求技术合作,引进人才,加强新产品的研发,解决好原料运输、设备配套、生产组织、产品销售和企业管理等一系列问题,形成畅通的经营渠道。以此为基础,推广生产技术,扩大生产规模和产品门类,拓宽产品的应用范围,形成沙漠砂高值化工业应用的产业链,并将其发展成为新型硅酸盐工业基地。

5 结论

仍然严峻的沙漠化趋势以及硅酸盐材料的巨大需求与矿物资源减少的矛盾决定了沙漠砂工业

应用的必然性,沙漠砂材料及其技术的研发与应用揭示了利用沙漠砂为原料生产硅酸盐材料的可行性。该项目以低成本绿色制造为龙头,将矿物资源节约、土地保护、沙漠生态修复和偏远地区社会经济发展有机结合起来,凸显了利用沙漠砂制造硅酸盐材料的广阔前景和巨大潜力。

利用沙漠砂制造硅酸盐材料有别于以石英砂和黏土等矿物原料生产硅酸盐材料的传统模式。实施该项目可引导硅酸盐工业转移到沙漠附近的欠发达地区。因此,在基础条件具备的沙漠附近建立硅酸盐工业基地,可以将大量闲置的沙漠砂就地转化为如前所述的工业产品,产生显著的经济效益,这有助于改善当地居民的生活水平,也有利于社会的均衡发展。

我国已经在沙漠生态化治理方面走在了世界前列,创新发展工业化沙漠治理新模式,引领硅酸盐工业可持续发展的新方向,可继续为全球提供沙漠治理—硅酸盐材料生产—矿产土地资源节约—生态环境改善—社会经济综合发展的中国方案。

参考文献(References)

- [1] Che C, Park T, Wang X, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 122-129.
- [2] Zastrow M. China's tree-planting drive could falter in a warming world[J]. *Nature*, 2019, 573(7775): 474-475.
- [3] Bryan B A, Gao L, Ye Y S, et al. China's response to a national land-system sustainability emergency[J]. *Nature*, 2018, 559(7713): 193-204.
- [4] 刘建宇, 聂洪峰, 肖春蕾, 等. 2010—2018年中国北方沙漠荒漠化变化分析[J]. *中国地质调查*, 2021, 8(6): 25-34.
- [5] 王岳, 刘学敏, 哈斯额尔敦, 等. 中国沙产业研究评述[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(4): 17-34.
- [6] 刘恕. 沙产业——跨世纪的沙漠利用战略构想[J]. *科技导报*, 1994, 12(11): 3-6.
- [7] Gutak Ja M. Mineral resources of Novokuznetsk administrative district of Kemerovo region (metallic and non-metallic minerals)[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environment Science*, 2017, 84: 012009.
- [8] Orlova A I, Ojovan M. Ceramic mineral waste-forms for

- nuclear waste immobilization[J]. *Materials*, 2019, 12: 2638.
- [9] Andrzejuk W, Barnat-Hunek D, Siddique R, et al. Application of recycled ceramic aggregates for the production of, ineral-asphalt mixtures[J]. *Materials*, 2018, 11: 658.
- [10] 孙德利. 加强砂石土开采管理, 切实保护矿产资源[J]. *矿产保护与利用*, 2006, 24(5): 15-18.
- [11] 程晓娜, 张博, 董晓方, 等. 我国砂石土矿开采现状及对策研究[J]. *中国矿业*, 2015, 24: 23-26.
- [12] Li Z, Li X, Tang Y, et al. Sintering behaviour and characterisation of low-cost ceramic foams from coal gangue and waste quartz sand[J]. *Advances in Applied Ceramics*, 2016, 115: 377-383.
- [13] Tuna A. Development of lightweight ceramic construction materials based on flyASH[J]. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2017, 53: 109-115.
- [14] Ter T P, Seman A A, Min K C, et al. Recycling of Malaysia's EAF steel slag waste as novel fluxing agent in green ceramic tile production. Sintering mechanism and leaching assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241: 118144.
- [15] Zhao W C, Liu L W, Chen J, et al. Characterization of major elements in desert sediments and implications for the Chinese loess source[J]. *Science of China: Earth Science*, 2019, 62: 428-440.
- [16] 袁玉卿, 王选仓. 风积沙压实特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(3): 360-365.
- [17] 武贤慧, 魏进. 早强剂在石灰粉煤灰稳定沙漠沙中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(24): 4244-4247.
- [18] Mohamedzein Y E A. Stabilization of desert sands using municipal solid waste incinerator ASH[J]. *Geotechnology and Geology Engineering*, 2006, 24: 1767-1780.
- [19] Al-Aghbari M Y, Mohamedzein Y E A, Taha R. Stabilisation of desert sands using cement and cement dust[J]. *Proceedings of Inst Civil Engineering Ground Improvements*, 2009, 162: 145-151.
- [20] Saberian M, Moradi M, Vali R, et al. Stabilized marine and desert sands with deep mixing of cement and sodium bentonite[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2018, 14: 553-562.
- [21] Faccoli M, Petrogalli C, Lancini M A, et al. Effect of desert sand on wear and rolling contact fatigue behaviour of various railway wheel steels[J]. *Wear*, 2018, 396-397: 146-161.
- [22] Tahir A, Rafiq A, Muhammad K, et al. Effect of Thal silica sand nanoparticles and glass fiber reinforcements on epoxy-based hybrid composite[J]. *Iranian Polymer Applied Mechanical Materials (Eng. Edit.)*, 2014, 24: 21-27.
- [23] Chuah S, Duan W H, Pa Z, et al. The properties of fly ash based geopolymer mortars made with dune sand[J]. *Materials and Design*, 2016, 92: 571-578.
- [24] 内蒙古蒙西水泥有限公司. 风积沙替代粘土质原料生产硅酸盐水泥熟料的方法: ZL99110092.1[P]. 1999.
- [25] 刘涛, 刘欢, 刘晓莉, 等. 利用风积沙替代天然资源生产水泥熟料[J]. *中国水泥*, 2013, 27: 61-36.
- [26] Neville A M. *Properties of concrete*[M]. London, Pitman, 1963.
- [27] Luo F J, Li H, Zhu P, et al. Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47: 131-137.
- [28] Al-Harthy A S, Halim M A, Taha R, et al. The properties of concrete made with fine dune sand[J]. *Building Materials*, 2007, 21: 1803-1808.
- [29] Rmili A, Ouezdou M B., Added M, et al. Incorporation of crushed sands and Tunisian desert sands in the composition of self-compacting concretes Part II: SCC fresh and hardened states characteristics[J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2009, 3: 11-14.
- [30] Jin B H, Song J X, Liu H F. Engineering characteristics of concrete made of desert sand from Maowusu sandy land[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 174-177: 604-607.
- [31] 刘海峰, 马菊荣, 付杰, 等. 沙漠砂混凝土力学性能研究[J]. *混凝土*, 2015, 311: 80-83.
- [32] Li X A, Zheng H F, Li X X, et al. Test on the mortar mix ratio with Aeolian sand of Mu Us desert[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 152-153: 892-896.
- [33] Zhang G X, Song J X, Yang J S, et al. Performance of mortar and concrete made with a fine aggregate of desert sand[J]. *Building Environment*, 2006, 41: 1478-1481.
- [34] Che Jialing, Li Quanwei, Lee Minggin, et al. Experimental research on mechanical properties of desert sand steel-PVA fiber engineered cementitious composites[J]. *Function Materials*, 2017, 245: 84-592.
- [35] Neumann Frank, Curbach Manfred. Thermal treatment of desert sand to produce construction material[J]. *MATEC Web of Conference*, 2018, 149: Article number 01030.
- [36] Dir N, Faucett D, Choi C, et al. Slow-crack-growth and

- indentation damage in calcium magnesium aluminosilicate (CMAS) glass from desert sand[J]. *Ceramics International*, 2018, 44: 2676–2682.
- [37] 王文彬, 宋嘉威, 史志铭, 等. 利用沙漠风积沙合成石英纳米晶微晶玻璃的方法: ZL2021100097045.5[P]. 2021.
- [38] 王子东. 利用风积沙合成堇青石微晶玻璃的工艺原理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021.
- [39] 史志铭, 范文, 王文彬. 利用沙漠风积沙制备石英质陶瓷的技术: ZL2013107433663[P]. 2015.
- [40] Wang W B, Shi Z M, Wang X G, et al. The synthesis and properties of high-quality forsterite ceramics using desert drift sands to replace traditional raw materials[J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2017, 125: 88–94.
- [41] Wang W, Shi Z, Wang Z, et al. Phase transformation and properties of high-quality mullite ceramics synthesized using desert drift sands as raw materials[J]. *Material Letters*, 2017, 21: 271–274.
- [42] 罗婷, 顾幸勇, 吴军明, 等. 利用沙漠沙低温合成高长径比莫来石晶须[J]. *人工晶体学报*, 2018, 47(8): 1607–1611.
- [43] 史志铭, 王文彬, 曹振, 等. 假蓝宝石质陶瓷及其合成方法: ZL201810095084.X[P]. 2017.
- [44] 史志铭, 王文彬, 范文. 利用沙漠风积沙制备堇青石质陶瓷的方法: ZL201310743382.2[P]. 2014.
- [45] Wang W, Shi Z, Wang X, et al. The phase transformation and thermal expansion properties of cordierite ceramics prepared using drift sands to replace pure quartz [J]. *Ceramics International*, 2016, 42: 4477–4485.
- [46] Abdel S, Monem M, Hassan E, et al. Microstructure and phase composition of cordierite-based co-clinker[J]. *Ceramics International*, 2018, 44: 5855–5866.
- [47] 史志铭, 王士刚, 王文彬. 种制备多孔陶瓷的原料及多孔材料的制备方法: CN202010005917.6[P]. 2020.
- [48] 范文. 利用石英砂制备石英质陶瓷的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2014.
- [49] 荣敏. 用沙漠黄沙制备堇青石质低膨胀陶瓷材料的研究[D]. 景德镇: 景德镇陶瓷学院, 2015.
- [50] Radwan M, Kashiwagi T, Miyamoto Y, et al. New synthesis route for $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ ceramics based on desert sand[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2003, 23: 2337–2341.
- [51] 史志铭, 王文彬, 王志旭, 等. 镁橄榄石-碳化硅复合陶瓷材料及其合成: ZL201710404510.9[P]. 2020.
- [52] Shi Z M. Use of desert-sands to synthesize MgSiO_3 -SiC composite ceramics[C]//*Proceedings of 22nd International Conference on Composites Materials*. Australia, Melbourne, 2019: 11–16.
- [53] 张勇. 利用风积沙取代石英砂合成 SiO_2 - ZrO_2 系复相陶瓷的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021.
- [54] 史志铭, 韩超, 王文彬, 等. 一种钙长石-石英-玻璃相复合陶瓷的制备方法: CN20201011436.X[P]. 2020.
- [55] 韩超. 利用风积沙和粉煤灰制备陶瓷的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2020.
- [56] Zhu G, Shuo L, Feng J, et al. Research on distribution performance of desert sand for heat storage in downcomer[J]. *International Journal of Green Energy*, 2018, 15: 106–112.
- [57] Liang C, Zhou C, Chen Z, et al. Electrochemical lithium storage properties of desert sands[J]. *Ionics*, 2017, 12: 1–7.
- [58] Li J, Xu C, Guo C, et al. Electrochemical lithium storage properties of desert sands[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2017, A6: 223–230.
- [59] 史志铭, 殷文迪, 闫华. 一种高效溶解硅酸盐类物质并提取高纯氧化硅的方法: CN202110225826.8[P]. 2021.
- [60] 史志铭, 殷文迪, 闫华, 等. 从多离子混合溶液中分步提取氢氧化物的方法: CN202110207136.X[P]. 2021.
- [61] Shi Zhiming, Yin Wendi, Yan Hua, et al. A method for stepwise extraction of silica and hydroxide from silicate substances: 17331652[P]. 2021–05–27
- [62] 史志铭. 利用沙漠沙合成陶瓷的技术及其产业化前景 [C]//*第十四届全国循环经济与生态工业学术研讨会暨中国生态经济学会工业生态经济与技术专业委员会*, 太原: 2019.
- [63] Abd E N, Hamdy H. High and low temperature alteration of uranium and thorium minerals, Um Araganites, Southeastern Desert[J]. *Egypt. Ore Geology Reviews*, 2009, 35: 436–446.

Use of desert sand to synthesize silicate materials: A new sustainable-development direction of silicate industry and desertization governance

SHI Zhiming

School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China

Abstract In order to clarify the advantages and significance of using desert sand to synthesize silicate materials, the author's team has on-site investigated four deserts, namely Hobq, Ulanbuh, Tengri and Badain Jaran in the western Inner Mongolia of China, collected sand samples around the deserts and studied their basic physical and chemical characteristics. The research and application of desert-sand materials at home and abroad are also summarized, the social and economic benefits of using desert sand to synthesize silicate materials are expounded, and ultimately, the development prospects, main problems and countermeasures are pointed out. It is suggested that existing issues require comprehensive researches in term of the materials and manufacturing science, ecological environment, resource management, and policy to form a clear development goal and specific actions shared by the whole society. The results of this paper have important value for research, development, and application of desert-sand materials, exploitation of mineral resources, and desertization governance.

Keywords silicate materials; saving resources; ecological environment; desert governance; sustainable development ●



(责任编辑 祝叶华)