

油基钻井岩屑尾渣制备压裂支撑剂 研究进展

梁 严*, 王肃凯, 王天祥, 韩世豪, 李勇龙, 王立东, 王继峰, 蒲松龄
(中国石油集团西部钻探工程有限公司工程技术研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:油基钻屑制备压裂支撑剂是实现含油固体废物资源化利用的重要方向,对缓解油气钻井和储层改造中的成本与环保压力具有重要意义。系统概括与分析了油基钻屑预处理、油基钻屑烧结制备支撑剂、油基钻屑免烧制备支撑剂和树脂覆膜制备支撑剂的研究现状。研究表明将油基钻屑与铝矾土、二氧化锰、水泥和其他添加剂在适宜配比下混合并通过高温烧结或免烧等方式可制备出整体性能基本满足行业标准要求的支撑剂,但仍存在油基钻屑掺入率低(平均<30%)、支撑剂抗压强度不高(≤ 52 MPa)等问题,需从支撑剂制备核心添加材料与配方组成、制备工艺与设备等方面持续开展研究和攻关。相关分析可为油基钻屑的高效资源化利用与高强度压裂支撑剂制备的有机结合提供重要依据。

关键词:油基钻井;岩屑尾渣;压裂支撑剂;资源化利用

中图分类号:TD989;TE39

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S1-0070-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.013

Research progress on preparation of fracturing proppant using oil-based drilling cuttings residue

LIANG Yan*, WANG Su-kai, WANG Tian-xiang, HAN Shi-hao, LI Yong-long,
WANG Li-dong, WANG Ji-feng, PU Song-ling

(Engineering Technology Research Institute, CNPC Xibu Drilling Engineering Co., Ltd.,
Karamay 834000, China)

Abstract: The preparation of fracturing proppant using oil-based drilling cuttings is an important direction to realize the resource utilization of oily solid waste, which is of great significance to alleviate the cost and environmental protection pressure in oil and gas drilling and reservoir stimulation. This paper systematically summarizes and analyzes the research status of oil-based drilling cuttings pretreatment, oil-based drilling cuttings sintering to prepare proppants, oil-based drilling cuttings non-burning to prepare proppants, and resin coating to prepare proppants. It is shown that, mixing with bauxite, manganese dioxide, cement and other additives under appropriate proportions and sintering at high temperature or non-burning, the oil-based drilling cuttings can be used to prepare proppants whose overall performance basically meets the requirements of industry standards. However, there are still challenges such as low oil-based drilling cuttings incorporation rate (average <30%) and low compressive strength of proppants (≤ 52 MPa). It is necessary to continue to carry out research from the aspects of core additive materials and formula composition, preparation process and equipment for proppant preparation. The correlation analysis can provide an important basis for the efficient resource utilization of oil-based drilling cuttings and the organic combination of high-strength fracturing proppant preparation.

Key words: oil-based drilling; cuttings residue; fracturing proppant; resource utilization

油基钻井岩屑尾渣(简称“油基钻屑”)是油气开发钻井过程中产生的含油固体危险废物,近年来随着深层超深层油气和非常规油气的持续开发,油基钻屑的产生量呈逐年递增的趋势^[1]。目前,油基钻屑主要通过填埋、固化、焚烧、热裂解、生物处理等传统方式进行处置^[2],但均存在处置容量有限、二次污染风险、成本高(1 000~1 400 元/t)^[1]、资源化利用程度低等问题^[3]。因此,实现油基钻屑的减量

化和资源化是极大缓解油气开发中成本压力和环保压力的重要新路径,具有深远的研究价值与广阔的潜在应用前景。

压裂支撑剂是非常规油气储层改造开发中高效支撑人工裂缝进而建立油气高导流通道必须使用的关键材料^[4],目前使用的支撑剂主要为石英砂和陶粒。据不完全统计,我国储层改造每年消耗石英砂和陶粒支撑剂近 550 万 t,其中石英砂占比约 75%,

收稿日期:2026-02-05;修回日期:2026-03-30

基金项目:中国石油天然气集团有限公司关键核心技术攻关项目(2025ZG73)

作者简介:梁严(1988-),男,博士,高级工程师,研究方向为油气田开发功能材料和井筒工作液研制、储层改造应用技术研究,通讯联系人, gyfzly@126.com。

陶粒占比约 20%,平均单井支撑剂费用达 160 万元以上。鉴于此,通过油基钻屑制备压裂支撑剂是一种极具创新性和应用潜力的处置与利用方式^[5],既可解决油基钻屑的处理问题,又可拓宽陶粒支撑剂的制备原料来源,实现变废为宝和高值资源化利用的双重目标。近年来,将油基钻屑作为原料制备压裂支撑剂已成为重要的资源化利用方向,受到业界同行较为广泛的关注与研究。

本文围绕油基钻屑制备压裂支撑剂的核心技术,从油基钻屑预处理、油基钻屑烧结制备支撑剂、油基钻屑免烧制备支撑剂和树脂覆膜制备支撑剂等方面,对现有研究进行了系统概括与分析,并针对性提出存在的不足与未来需进一步攻关方向,为油基钻屑的高效资源化利用与高强度压裂支撑剂制备的有机结合提供重要依据。

1 油基钻屑预处理要求

以油基钻屑制备压裂支撑剂时,其液相影响支撑剂初坯的成型特性,而固相影响成型颗粒的力学性质,需要进一步对液相及固相进行物性分析(密度、含水率、含油率、矿物成分(石英、重晶石、方解石等)、元素组成(Si、Al为主)等分析),评估其作为支撑剂原料的可行性^[1]。

同时,支撑剂的密度是影响其可输送性的关键参数,如何在保证支撑剂强度的前提下,尽可能降低其密度是油基钻屑制备支撑剂必须追求的目标。目前,降低支撑剂密度主要采用 3 种途径:一是直接选用低密度的原料;二是通过烧结产生空心多孔结构;三是对支撑剂进行表面覆膜,使其遇水膨胀而增加悬浮能力。

此外,支撑剂的制粉、造粒成型等工艺也是油基钻屑制备支撑剂必须严格控制的系统性技术,其很大程度上影响了支撑剂的圆球度、破碎率等性能参数。

2 油基钻屑烧结制备支撑剂

烧结制备技术是当前高强度陶粒支撑剂使用最为广泛的工艺技术,其主要以铝矾土等固相材料和其他增强型添加剂为原料,采用高温煅烧后制得支撑剂,是当前油基钻屑制备支撑剂研究相对较多的技术手段。通过调控烧结温度、时间、气氛及增强材料掺量,可使支撑剂的关键性能满足行业标准要求^[6]。同时,脱油处理后油基钻屑中仍含有少量(通常<1%)的油相,采用高温烧结可实现油类分解

与固化,将油相中的重质组分转化成碳材料,并参与高温烧结反应进一步提升支撑剂性能^[7]。

陈浩^[8]、Li等^[9]以川南页岩气油基钻屑(含水率 3.96%,体密度 1.41 g/cm³,视密度 2.21 g/cm³)为原料,考察了掺入铝矾土、磷酸二氢铝等固相颗粒对制得支撑剂性能的影响,结果表明,掺入质量分数为 30%的低品位铝矾土,在 925℃真空中烧结 110 min 和 1 075℃空气中烧结 115 min,均可制得表观密度不超过 2.52 g/cm³、35 MPa 下破碎率不超过 8.67%的支撑剂;掺入质量分数为 10%的磷酸二氢铝可形成 Ca₉Al(PO₄)₇、AlPO₄ 等高强度磷酸盐相,提升基体结合强度,在 910℃真空和 1 100℃空气中各烧结 90 min,可制得表观密度不超过 2.37 g/cm³、35 MPa 下破碎率不超过 7.65%的支撑剂。

Xie等^[10]以六价铬污染的二次热解油基钻屑灰(OBDCA-sp)和铝矾土为原料制得支撑剂,并系统测试其性能。结果表明,OBDCA-sp/铝矾土制备支撑剂密度低于纯铝矾土支撑剂,当 OBDCA-sp 与铝矾土混合比例为 20%时所制备支撑剂的性能最佳,积密度为 1.756 g/cm³、视密度为 2.291 g/cm³、圆球度大于 0.8,52 MPa 破碎率为 8.5%、浊度为 12 NTU、酸溶解度为 6.8%。

廖梓佳^[7]以深层页岩气油基钻屑为原料,选用 10%的松香水为球磨介质,采用“引子成球法”造粒,先在 700℃下保温 60 min,后在 1 150℃下终烧 90 min,制备出陶粒支撑剂,其体积密度为 1.65 g/cm³、视密度为 2.80 g/cm³、35 MPa 下破碎率为 8.8%,抗压强度可提升至 35 MPa 以上,此时支撑剂的气孔率约 7%,物相以方石英相、玻璃相为主。而以低品位铝矾土为添加剂时,10%油基钻屑掺入 2% MnO₂ 和 88%的铝矾土在 1350℃下制备的支撑剂,其体积密度为 1.64 g/cm³、视密度为 2.82 g/cm³、52 MPa 下破碎率为 3.5%,此时支撑剂的气孔率约 12%,物相以莫来石相(3Al₂O₃·2SiO₂)、玻璃相(SiO₂)为主,棒状莫来石之间相互穿插、交错,形成网状骨架结构,玻璃液相充填莫来石之间的间隙,使得结构致密。此外,还表明当支撑剂的气孔率增加时,支撑剂的破碎形态变得复杂,强度近似呈指数下降;莫来石相含量增加,可减慢裂纹产生和裂纹扩展速率,支撑剂强度近似呈线性增加;在同一抗压强度级别下,气孔率含量越高,其莫来石相含量越多。

熊兴洋^[11]在对页岩气油基岩屑脱油残渣基本性能进行分析的基础上,开展其制备陶粒支撑剂的工艺研究,证实脱油残渣主要矿物相为石英(SiO₂)、

重晶石 (BaSO_4)、方解石 (CaCO_3) 和刚玉 (Al_2O_3)，颗粒呈无规则状，粒径分布集中于 $1 \sim 75 \mu\text{m}$ ，具备作为陶粒支撑剂的基本条件。当脱油残渣、铝矾土和二氧化锰质量比为 20:76:4 时，外掺 8% 赤泥，于 1342°C 下烧结 1 h 后所制备陶粒支撑剂，其体积密度为 1.45 g/cm^3 ，视密度为 2.96 g/cm^3 ，圆球度为 0.8，52 MPa 下破碎率为 8.6%，浊度为 43.5 NTU，酸溶解度为 6.85%，满足标准要求^[12]。

金容旭^[13]以海上油田的油基岩屑脱油残渣(含水率 2.92% 左右,主要矿物相为石英、重晶石、方解石,同时含少量的高岭土,较多的 CaO)为原料,在 10:90:4 的配比下,添加一级铝矾土和二氧化锰于 1350°C 下烧结 120 min 制得性能满足行业标准的支撑剂,并系统考察了钻井岩屑掺量对支撑剂性能的影响。随钻井岩屑掺量逐渐增加至 10%,支撑剂的破碎率显著降低,掺量超过 10% 时支撑剂酸溶解度大于 7%,掺量增加至 20% 时破碎率增加、体积密度和视密度下降,无法满足标准要求,而浊度变化较小且无明显线性关系。当烧结温度低于最佳温度时,内部钙长石形成液相受阻,使支撑剂内部疏松多孔,无法形成致密结构,破碎率上升;当温度升高,支撑剂内部晶相形成液相,钻井岩屑填充孔隙,使支撑剂抗压强度增加,破碎率下降。而油基钻屑掺量增加,支撑剂酸溶解度逐渐升高主要归结于油基钻屑中有机质和碱性氧化物的助熔效应,促进了支撑剂中玻璃相等晶相的生成,且石英熔融到液相中生成

富含硅的玻璃相,从而致使支撑剂耐酸性降低。

Yang 等^[14]以油基钻井岩屑热解残渣(OBCPRs)、高品位铝矾土、二氧化锰和其他烧结添加剂为原料,系统性研究了 ODCPRs 比例、烧结温度、保温时间和添加剂含量对支撑剂烧结行为和性能的影响。结果表明,在 3:7:0.1 的最佳质量配比和 1280°C 保温 60 min 的烧结条件下,支撑剂内部形成了发育良好的粒状刚玉和针状莫来石,并相互交织形成致密结构,进而表现出低密度和高强度特征,其体积密度为 1.48 g/cm^3 ,视密度为 2.94 g/cm^3 ,52 MPa 下破碎率为 5.25%,酸溶率为 4.80%。进一步地,Chen 等^[15]还对比研究了通过电阻烧结法和微波烧结法所制备支撑剂的性能(图 1),并阐述了 OBCPRs 基支撑剂的环境风险和污染消除机理。结果表明,以 30% OBCPRs (SiO_2 含量为 27.85%、 Al_2O_3 含量为 7.89%)、70% 铝矾土 (SiO_2 含量为 6.15%、 Al_2O_3 含量为 85.72%) 和 1% 二氧化锰的混合物为原料,0.4% 的羧甲基纤维素(CMC-400)为粘合剂,配合相同质量的水制成生坯后,通过微波烧结法获得的支撑剂在 52 MPa 下的破碎率为 2.75%,酸溶率仅为 2.24%,体积密度为 1.78 g/cm^3 ,且重金属离子浸出特性显著降低。微波烧结技术显著提高了焙烧效率,降低了烧结温度,改善了支撑剂的强度,提高了其抗酸腐蚀能力,并增强了重金属离子的稳定化能力,为油气田危险废物制造高性能支撑剂提供了重要的参考途径。

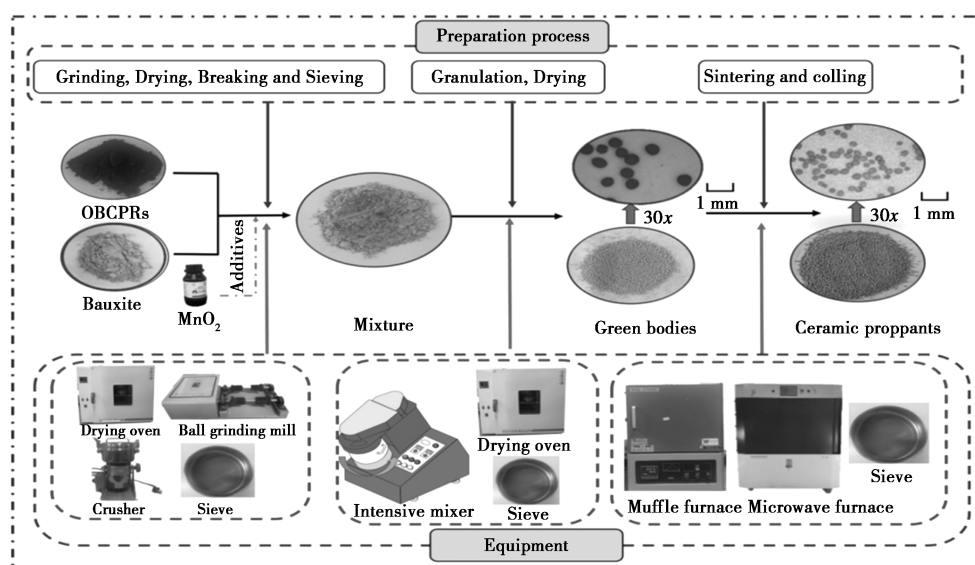


图 1 油基钻屑热解残渣(OBCPRs)制备支撑剂流程图

Meng 等^[16]以油基钻屑热解残渣(ODPR)为主要原料,辅以添加质量比为 97:3 的膨润土,研究了

制备陶粒支撑剂的可行性,并采用响应面实验设计方法优化了烧结工艺参数(图 2)。 1063°C 下保

温 82 min 制备的陶粒支撑剂在 52 MPa 下的破碎率为 5.5%, 体积密度为 1.71 g/cm^3 , 视密度为 2.98 g/cm^3 。同时, X 射线衍射等多重微观结构表征证实支撑剂的机械强度主要源于硅灰石、石英和钡长石; 在烧结过程中, 由方解石分解产生的氧化钙与石英反应生成硅灰石; 重晶石与氧化铝和石英反

应生成钡长石, 陶粒支撑剂的形成特征在于这些新形成的结晶相与熔融非晶相之间的复杂相互作用。此外, 适量的膨润土有助于在成球过程中促进生球的球形形态发展, 提高其圆球度, 且作为一种黏土矿物, 膨润土也增加了支撑剂原料中总的 SiO_2 和 Al_2O_3 的含量。

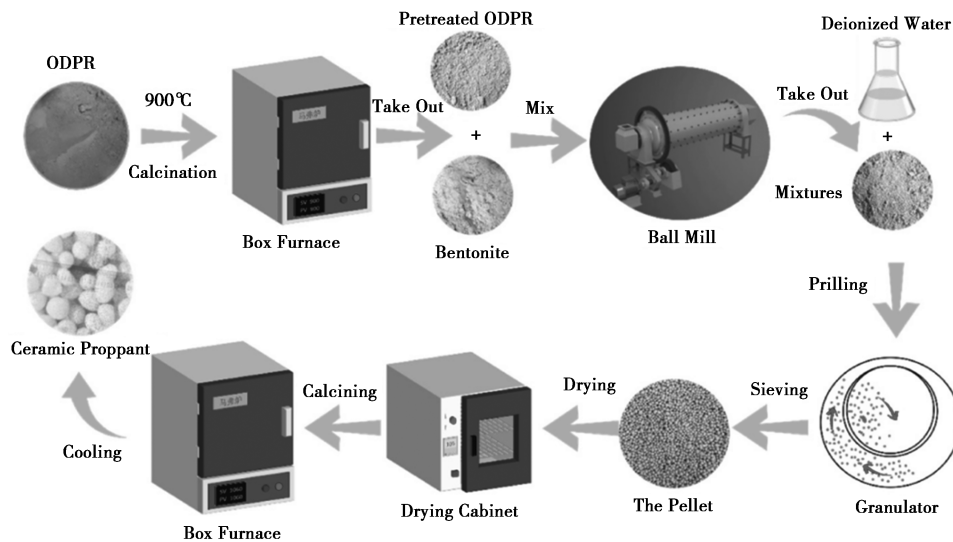


图2 油基钻屑热解残渣制备陶粒支撑剂流程

陈红硕等^[1]将某页岩气去油后油基钻屑与三级铝矾土和一级钾长石混合制备陶粒支撑剂, 在 5%~15% 的钻屑含量、0%~10% 的长石含量和 1 200~1 260℃ 的烧结温度下, 系统考察了钻屑和长石含量及烧结温度对支撑剂性能的影响, 表明钻屑含量为 5%、长石含量为 10%、烧结温度为 1 260℃ 时可制备出破碎率低至 5.7% 的支撑剂, 其体积密度为 1.42 g/cm^3 、视密度为 2.68 g/cm^3 、酸溶解度为 5.9%。同时, 研究表明岩屑含量、烧结温度和长石含量对支撑剂抗破碎能力的影响程度依次降低, 而更多莫来石相的形成是其抗破碎能力更强的主要原因。

3 油基钻屑免烧制备支撑剂

免烧制备支撑剂技术不涉及高温烧结, 具有无需大型高温烧结设备, 工艺简单、能耗低(可较高温烧结降低 60% 以上)、生产效率高(冷压成型)、无高温烟气排放、环境污染小等优点^[17], 主要适用于制备较低强度低密度支撑剂。

孙建辉^[18]以质量比为 40%~60% 的某页岩气油基钻屑热解残渣、质量比为 40%~60% 的自制固化剂(药剂 5%、水泥 90%、增强剂 5%)为原料, 采用球磨机、不锈钢变速成球机、恒温恒湿养护箱等实验

设备, 在恒温恒湿养护箱(温度 20℃, 湿度 95%)养护 28 d 后制备了免烧压裂支撑剂。当油基钻屑残渣与固化剂的比例为 6:4 时, 添加的油基钻屑残渣最多, 且制备产品的成球率最高, 破碎率低, 其圆度 0.9、球度 0.8、体积密度为 0.963 g/cm^3 、视密度为 3.937 g/cm^3 、破碎率为 1.52%、酸溶解度为 6.8%。

常爽^[17]以油基钻屑脱油残渣(含油率 0.8%, SiO_2 含量为 30.673%、 Al_2O_3 含量为 6.582%, 氧化钙含量为 29.640%)和 52.5R 波特兰水泥为主要原料, 添加羧甲基纤维素(CMC)为粘结剂、石膏为碱性激发剂, 通过圆盘造粒机成球, 经恒温恒湿养护箱中水化养护 28 天制备出了免烧压裂支撑剂。测试结果表明, 在最佳配方(钻屑/水泥质量比为 0.67, CMC 质量分数为 4%, 石膏质量分数为 6% 时造粒, 再通过水化养护 28 天)下, 所制备支撑剂的体积密度为 1.47 g/cm^3 、视密度为 2.52 g/cm^3 、35 MPa 破碎率为 1.57%, 残渣利用率达 32%, 圆度为 0.7, 球度为 0.8, 酸溶解度为 12.7%, 浊度为 82 NTU。此外, 他们还发现在水化养护过程中, 支撑剂内部有气体产生而形成的大量孔洞结构, 降低了支撑剂的密度, 水化产物水化硅酸钙、Aft 晶体等物质为免烧支撑剂提供了强度支撑。

4 油基钻屑树脂覆膜制备支撑剂

树脂覆膜制备支撑剂技术可通过树脂覆膜层提升支撑剂的抗压强度,制备的支撑剂耐腐蚀性好、防砂能力较强、密度可调范围广^[19],尤其适用于高压地层(闭合应力>80 MPa)下的支撑剂制备。

常爽^[17]在其通过油基钻屑脱油残渣和水泥制备的免烧支撑剂的基础上,采用环氧/酚醛混合树脂进行包覆,通过优化树脂配比、固化剂(乌洛托品)用量、硅烷偶联剂(KH-560)用量、覆膜温度与时间等参数,制备出具有更高强度与更低密度的复合支撑剂,可满足深层高压压裂需求。在最佳配方(树脂含量为 3%,环氧/酚醛树脂配比为 2:1,乌洛托品加量为 5%,KH-560 加量为 1%,覆膜温度为 100℃,覆膜时间为 90 min)下,所制备支撑剂的体积密度为 1.30 g/cm³,52 MPa 破碎率为 8.15%,酸溶解度为 4.1%,浊度为 0.04 NTU,圆球度为 0.8,满足行业标准要求。此外,如图 3 所示,研究发现树脂密度远小于免烧支撑剂密度,覆膜后支撑剂的体积密度进一步降低,降幅达 11.52%^[20]。又由于树脂包覆能填充免烧支撑剂表面孔洞,降低其脆性,改变接触方式,故能提升支撑剂强度,使支撑剂在 52 MPa 下的破碎率降幅达到 90.61%。

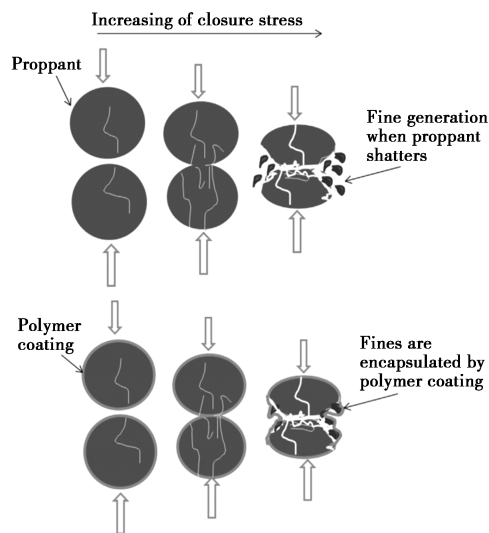


图 3 树脂涂层的包覆作用机理

杨婷婷等^[21]以热解油基岩屑残渣制备的 20~40 目陶粒支撑剂(体积密度为 1.63 g/cm³、视密度为 2.98 g/cm³)为基体,通过丙烯酰胺、N,N'-亚甲基双丙烯酰胺、过硫酸铵、N,N,N',N'-四甲基乙二胺共聚制备树脂后对陶粒支撑剂进行表面包覆,制得膨胀型自悬浮支撑剂,在最佳配比下,自悬浮支撑

剂膨胀倍数可达 4.3 倍,沉降速度为 45 mm/s。覆膜支撑剂的自悬浮机理如图 4 所示。

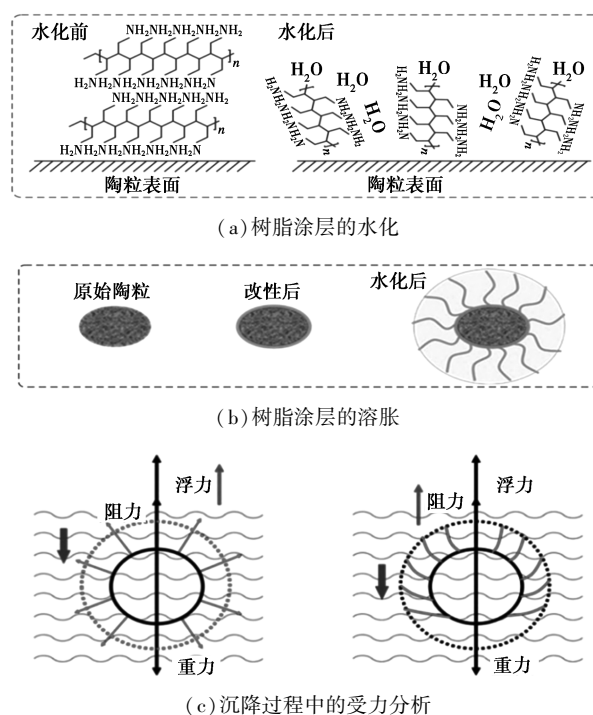


图 4 覆膜支撑剂的自悬浮机理

5 油基钻屑制备压裂支撑剂面临难点与问题

将上述油基钻屑制备压裂支撑剂的不同基本配方组成与支撑剂性能参数列于表 1。可看出,当前研究已初步解决无害化处理和实现低密度高强度支撑剂的实验室制备,支撑剂在密度、强度、圆球度等整体性能方面表现良好,但仍存在许多问题需进一步攻关与解决。

(1) 质量控制难度大:油基岩屑成分受钻井区域、层位、钻井液体系等影响大,原料来源复杂,均一性差,难以稳定控制产品质量。

(2) 烧结工艺控制难度高:烧结过程中易出现“欠烧”(强度不足)或“过烧”(颗粒粘连、脆性增加)现象,温度与时间窗口较窄,碳酸盐岩还会分解产生气体,易形成气孔,影响致密性与强度。

(3) 免烧支撑剂强度有限:尽管在 35 MPa 下破碎率较低,但在 52 MPa 及以上高压下破碎率显著升高,难以直接用于深层/超深层压裂。

(4) 树脂覆膜工艺控制复杂:树脂种类、配比、固化剂与偶联剂用量、温度与时间均需精确控制,否则易出现颗粒粘结、覆膜不均、强度提升不足等问题。

(5) 固废利用率仍偏低:目前油基钻屑利用率

平均仅为30%左右,提升空间较大。

(6)环保与成本平衡问题:需确保产品浸出液达标(如COD、重金属等),同时控制树脂等添加剂成本,以提升经济性。

(7)规模化生产挑战大:实验室制备工艺(如分筛造粒)效率低,难以直接放大至工业化生产,烧结设备(如真空炉)投资大,运行成本高,废气处理系统尚不完善。

表1 油基钻屑制备支撑剂基本配方组成与支撑剂性能参数统计表

制备技术	油基钻屑掺入量/%	配方其他添加剂	烧结(养护)温度/℃	养护时间/d	制备支撑剂性能参数					参考文献	
					体积密度/(g·cm ⁻³)	视密度/(g·cm ⁻³)	圆球度	破碎率/%	酸溶解度/%		浊度/NTU
烧结	—	30%低品位铝矾土或10%磷酸二氢铝	925~1100	—	—	2.52/2.37	—	7.62/6.89(35 MPa)	—	—	[8-9]
	—	受六价铬污染的二次热解油基钻屑灰+20%铝矾土	—	—	1.756	2.291	>0.8	8.5(52 MPa)	6.80	12	[10]
	10	2% MnO ₂ +88%铝矾土	1350	—	1.64	2.82	—	3.5(52 MPa)	—	—	[7]
	20	76%铝矾土+4% MnO ₂	1342	—	1.45	2.96	0.8/0.8	8.6(52 MPa)	6.85	43.5	[11-12]
	10	90%铝矾土+4% MnO ₂	1350	—	满足SY/T 5108—2014标准要求					[13]	
	30	69%铝矾土+1% MnO ₂	—	—	1.48	2.94	—	5.25(52 MPa)	4.80	—	[14]
	—	3%膨润土	1063	—	1.71	2.98	—	5.50(52 MPa)	—	—	[16]
	5	三级铝矾土+10%的一级钾长石	1260	—	1.42	2.68	—	5.70(52 MPa)	5.90	—	[1]
免烧	40~60	40%~60%自制固化剂(药剂5%、水泥90%、增强剂5%)	20	28	0.963	3.93	0.9/0.8	1.52(52 MPa)	6.80	—	[18]
	32	47.76%水泥+4% CMC+6%石膏+10%水	—	28	1.47	2.52	0.7/0.8	1.57(35 MPa)	12.70	82	[17]
树脂覆膜	—	免烧支撑剂+3%树脂+5%乌洛托品+1% KH-560	100	—	1.30	—	0.8/0.8	8.15(52 MPa)	4.10	0.04	[17]
	—	丙烯酰胺+N,N'-亚甲基双丙烯酰胺+过硫酸铵+N,N,N',N'-四甲基乙二胺	—	—	1.63	2.98	—	—	—	—	[21]

6 油基钻屑制备压裂支撑剂发展方向

油基钻屑脱油残渣制备陶粒支撑剂是一项具有显著环保价值与资源化潜力的技术,未来仍需在工艺稳定性、成本控制、性能优化及标准化建设等方面进一步突破,通过多学科交叉与技术集成,推动该技术走向工业化、规模化、高性能化、智能化方向发展应用,为油气田固废治理与绿色开采提供重要支撑。

(1)材料体系创新与性能增强:①探索更高性能的增强相(如碳化硅、氮化硅等),制备SiC增强型复相陶粒,提升强度与耐酸性;②研发纳米改性树脂或复合涂层,提升支撑剂的耐温、耐压与耐腐蚀性;③通过孔隙调控进一步提升密度与强度的平衡;④开发具有自修复、响应性等智能特性的支撑剂。

(2)工艺优化与设备升级:①开发高效喷雾造

粒、流化床烧结等连续化生产技术,提升产能与产品一致性;②优化烧结气氛控制系统,实现废气回收与资源化利用;③开发新型粘结剂与激发剂,提高免烧水化效率,缩短养护时间;④探索低温或常温固化树脂体系,降低能耗与碳排放;⑤提升造粒与覆膜设备精度,实现规模化、均匀化生产。

(3)资源化率提升与循环利用:①研究更高掺量(>40%)的残渣利用配方,推动“以废治废”与全量资源化;②探索与其他固废多元协同利用的可能性,如掺入粉煤灰、钢渣等,进一步降低原料成本和提升资源化率。

(4)标准化与产业化应用:①建立基于油基钻屑支撑剂的产品标准与评价体系,推动行业规范发展;②加强与油气企业的合作,开展中试与现场试验,验证其在真实压裂环境中的性能与稳定性,加速

技术落地;③推动政策支持与产业链整合,促进该类环保型支撑剂的市场化应用。

参考文献

- [1] 陈红硕, 范禹, 李靖, 等. 油基钻屑尾渣制备陶粒支撑剂研究[J]. 石油化工应用, 2025, 44(10): 25-30.
- [2] Yu J, Liu Z, Yang J, *et al.* Disposal and resource utilization of oil-based drill cuttings in China: A review[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2025, 75(5): 353-367.
- [3] 赵安洋, 王茂仁, 张海兵, 等. 油基岩屑残渣资源化利用技术研究进展[J]. 现代化工, 2024, 44(12): 67-71.
- [4] 丰铭, 吉国荣, 高云峰, 等. 低密度高强度陶粒支撑剂的制备及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(12): 4571-4577, 4587.
- [5] 白杨, 常爽, 刘宇程, 等. 基于油基钻屑制备压裂支撑剂的室内研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2024, 46(1): 76-88.
- [6] 于劲磊, 文明, 蒋国斌, 等. 烧结温度对掺加二次铝灰及钻井岩屑制备陶粒支撑剂性能的影响[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(5): 86-90.
- [7] 廖梓佳. 油基钻屑陶粒支撑剂的制备及强度优化研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2023.
- [8] 陈浩. 利用废弃油基岩屑制备复相陶粒支撑剂工艺研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2022.
- [9] Li X, Xiong J, Yang Z, *et al.* Valorization of oil-based drilling cuttings as a substitute for bauxite in fracturing proppants application[J]. Energy Science & Engineering, 2024(12): 3937-3949.
- [10] Xie P, Wu H, Yang H, *et al.* Utilization of Cr-contaminated oil-based drilling-cuttings ash in preparation of bauxite-based proppants[J]. Environmental Engineering Science, 2022, 39(1): 73-80.
- [11] 熊兴洋. 油基岩屑脱油残渣用于制备陶粒支撑剂和铺垫井场道路研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2023.
- [12] Liu W, Xiong X, Zhao Y, *et al.* Preparing high-strength and low-density proppants with oil-based drilling cuttings pyrolysis residues and red mud: Process optimization and sintering mechanism[J]. Fuel, 2023, 331: 125777.
- [13] 金容旭. 海上钻井废弃物制备压裂支撑剂工艺研究[J]. 资源节约与环保, 2024(1): 48-54.
- [14] Yang Y, Li H, Lei Z, *et al.* Preparation and characterization of high-performance ceramic proppant from recycling utilization of oil-based drilling cuttings pyrolysis residues[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 2345.
- [15] Chen H, Lei Z, Yang Y, *et al.* Fabrication of oil-based drilling cutting pyrolysis residues-based ceramic proppants with high strength, low acid solubility and green characteristics through high efficiency microwave sintering method[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 200: 107398.
- [16] Meng Q, Li K, Zhang S, *et al.* Preparation and sintering mechanism of ceramic proppants with oil-based drill cuttings pyrolysis residues[J]. Ceramics International, 2025, 51(5): 6183-6194.
- [17] 常爽. 油基钻屑脱油残渣制备低密度高强度压裂支撑剂研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2023.
- [18] 孙建辉. 油基钻屑残渣制备免烧压裂支撑剂的研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- [19] 周健. 自悬浮支撑剂研制与评价[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2024.
- [20] Zoveidavianpoor M, Gharibi A. Application of polymers for coating of proppant in hydraulic fracturing of subterranean formations: A comprehensive review[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 24: 197-209.
- [21] 杨婷婷, 李辉, 雷证寰, 等. 油基岩屑残渣自悬浮支撑剂的制备及性能评价[J]. 石油与天然气化工, 2024, 53(1): 129-136. ■
- [14] Yoon J W, Changa J S, Lee H D, *et al.* Trimerization of isobutene over cation exchange resins; Effect of physical properties of the resins and reaction conditions[J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2006, (260): 181-186.
- [15] 周晓龙, 谢宇, 陈微微, 等. 异丁烯二聚制备高品质航空汽油调和组分[J]. 天然气化工: C1 化学与化工, 2016, 41(3): 43-47.
- [16] 杜铭, 陈微微, 宋月芹, 等. 钠交换 Amberlyst 15 催化异丁烯叠合制二异丁烯[J]. 石油学报: 石油化工, 2017, 33(3): 419-425.
- [17] 葛跃娜, 刘静, 丁宁, 等. DH-2 催化 C₄ 烯烃选择性叠合的研究[J]. 现代化工, 2019, 39(7): 117-121.
- [18] 陈治平, 王苗苗, 韦晓艺, 等. 复合分子筛在烃类异构化反应中的应用研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(5): 2404-2415.
- [19] 董平平, 王晓军, 侯凯湖. 制备条件对 MCM-22 分子筛催化异丁烯齐聚性能的影响[J]. 化学反应工程与工艺, 2009, 25(2): 170-174.
- [20] Torresa M, Gutierrez M, Mugica V, *et al.* Oligomerization of isobutene with a beta-zeolite membrane; Effect of the acid properties of the catalytic membrane[J]. Catalysis Today, 2011, (166): 205-208.
- [21] 崔婷婷, 杜玉朋, 房德仁, 等. 不同类型催化剂对异丁烯齐聚反应过程的影响[J]. 化工进展, 2020, 39(3): 1029-1034.
- [22] 霍文涛, 刘稳, 于强, 等. MWW 分子筛上异丁烯齐聚反应探索[J]. 化工进展, 2023, 42(10): 5205-5212.
- [23] Chen X P, Yu P H, Tian H, *et al.* Selective oligomerization of isobutylene in mixed C₄ with Co/BETA-loaded molecular sieve catalysts[J]. Catalysts, 2024, 14(8): 533-549.
- [24] 杨淑清, 郑贤敏, 王路辉, 等. 三氯化铁离子液体催化异丁烯的齐聚反应[J]. 化工学报, 2016, 67(S1): 276-282.
- [25] Csaba F, Szabina T, Jenő H, *et al.* Oligomerization of light olefins in the presence of a supported Brønsted acidic ionic liquid catalyst[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2018, (239): 52-60.
- [26] Liu S M, Shang J P, Zhang S G, *et al.* Highly efficient trimerization of isobutene over silica supported chloroaluminate ionic liquid using C₄ feed[J]. Catalysis Today, 2013, (200): 41-48.
- [27] 余晓佳, 刘莹, 王慧, 等. 复合型质子酸性离子液体协同催化异丁烯齐聚反应[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(5): 599-605.
- [28] Chen J, Wang H Y, Deng L L, *et al.* Synthesis, characterization, and application of metal-free acidic ionic liquids as catalysts for oligomerization of isobutene[J]. Fuel, 2021, (299): 120876-120888.
- [29] 毛远洪, 曹芮, 钱俊峰, 等. Ru-Mn/γ-Al₂O₃ 催化剂制备及合成环己烷二甲酸二异壬酯工艺研究[J]. 现代化工, 2017, 37(12): 130-134.
- [30] 李恺祺. 三异丁烯与苯酚反应生成支链十二烷基苯酚的实验研究[J]. 天津化工, 2025, 39(1): 23-26. ■

(上接第 69 页)