

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.05.05

引用格式: 张航飞, 韩晓影, 杨林龙, 等. 四川省沐川地区石英砂岩特征及利用途径探讨[J]. 中国地质调查, 2023, 10(5): 34–42. (Zhang H F, Han X Y, Yang L L, et al. Characteristics and utilization route discussion of quartz sandstone in Muchuan area of Sichuan Province[J]. Geological Survey of China, 2023, 10(5): 34–42.)

四川省沐川地区石英砂岩特征及利用途径探讨

张航飞^{1,2}, 韩晓影³, 杨林龙⁴, 钟强生¹, 陈东方¹

(1. 四川省地质矿产勘查开发局二零七地质队, 四川 乐山 614000; 2. 张金元劳模创新工作室, 四川 乐山 614000; 3. 华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山 063210; 4. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257000)

摘要: 四川省沐川地区石英砂岩储量巨大, 开采技术条件好。通过采集沐川地区矿区坑道的原矿样品和精选厂的工业品, 开展地球化学、薄片鉴定和导流能力实验等测试分析, 研究了沐川地区石英砂岩的特征并探讨其开发利用途径。结果显示: 矿石主要为中粒岩屑石英砂岩, 矿物成分以石英和硅质岩屑等陆源碎屑为主, 含少量黏土杂基和石英胶结物等填隙物; 40/70 目工业级石英砂样品在闭合压力 28 MPa 条件下的破碎率为 9.05%, 在 70 MPa 闭合压力下的导流能力为 $1.12 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$, 满足四川盆地页岩气井主裂缝的导流能力要求。沐川地区石英砂岩的矿石产品有磷化工、玻璃制品、铸造用型砂以及压裂支撑剂 4 种应用途径, 建议加强石英砂岩压裂支撑剂用途的评价, 综合开发利用石英砂岩矿资源, 保障服务于支撑剂产业的砂源本地化。

关键词: 石英砂岩; 压裂支撑剂; 四川省

中图分类号: P584; P588.14

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2023)05–0034–09

0 引言

石英砂岩是生产石英砂的主要原料, 石英砂作为压裂支撑剂被广泛应用于油气开采^[1]。我国石英砂岩分布广泛, 如四川江油、沐川、重庆永川、广东东源、山东兰陵、湖南溆浦、陕西城固、宁夏石嘴山、云南大关—彝良等地石英砂岩资源丰富^[2]。2019 年四川省川南页岩气田年产能突破 100 亿 m^3/a , 沐川地区位于川南地区页岩气勘查开发试验区, 区内有 1 处页岩气探矿权, 5 000 m 以浅的页岩气资源量约 787 亿 m^3 , 具备建成 5 亿 m^3/a 产能的资源潜力。压裂支撑剂是钻完井成本的重要组成部分^[3], 可以预见沐川及周边地区在页岩气开发中对低成本石英砂压裂支撑剂的需求将会增加^[4]。

沐川地区以往的石英砂岩矿评价工作主要针对化肥用、水泥用、陶瓷用、铸造用和玻璃用等用途^[5–7], 尚未开展石英砂压裂支撑剂性能的评价工作。本文通过野外露头调查, 从矿区坑道和精选厂中采集石英砂岩矿石样品, 开展地球化学测试分析、薄片鉴定和导流能力实验, 发现沐川地区上三叠统小塘子组石英砂岩矿砂的压裂支撑剂性能指标和导流能力等禀赋条件满足页岩气中浅层压裂需求。预期本文研究成果可为区内及周边石英砂岩矿提供新的产品用途方向, 还能保障服务于支撑剂产业的砂源本地化^[8], 对川南页岩气田开发降本增效具有促进作用。

1 地质背景

沐川地区在大地构造上属于扬子陆块区中的

收稿日期: 2022–11–19; 修订日期: 2023–06–30。

基金项目: 四川省地质矿产勘查开发局科技创新项目“四川乐山地区三叠系小塘子组石英砂岩应用途径研究(编号: SCDKZCKJXM–2022024)”资助。

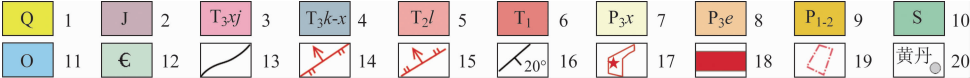
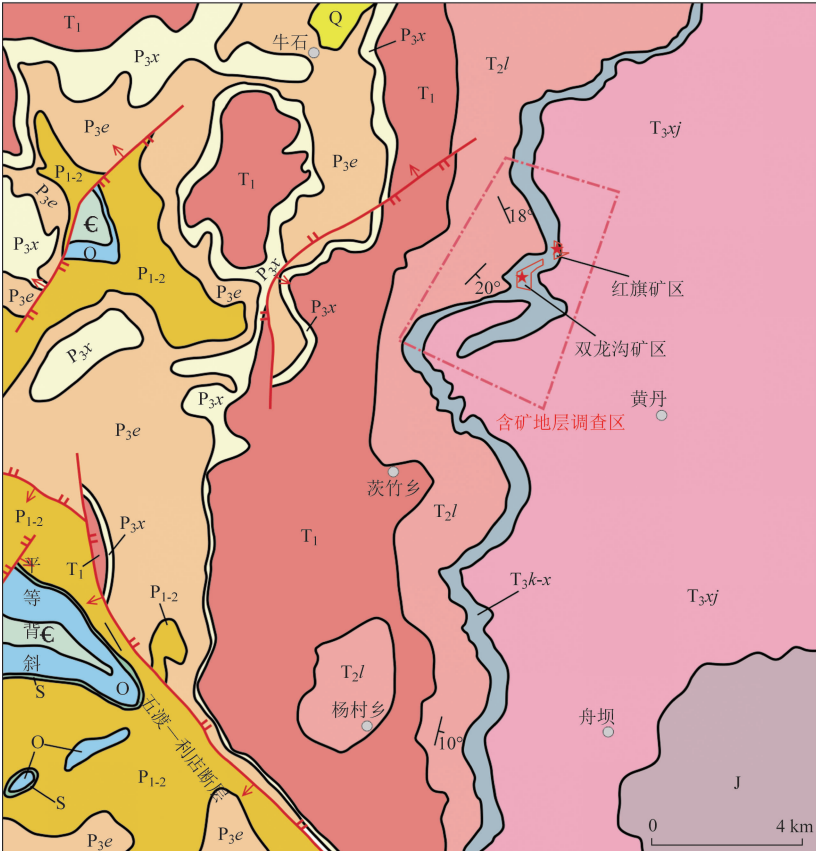
第一作者简介: 张航飞(1990—), 男, 工程师, 主要从事地质调查与矿产勘查工作。Email: 765316210@qq.com。

通信作者简介: 韩晓影(1989—), 女, 讲师, 主要从事矿业工程与地质调查工作。Email: hanxiaoying_cup@126.com。

上扬子陆块,三级大地构造单元属四川陆内前陆盆地之川中坳陷盆地。出露地层较齐全,寒武系—侏罗系及第四系均发育,主要为碎屑岩和碳酸盐岩建造。沐川地区主要发育SN向构造形迹,向斜平缓、开阔,背斜相对较窄,主要褶皱构造为平等背斜的东段,呈NW—SE向延伸,东西两端均被断层破坏,出露地层不全,长度超过18 km。区内主要断层为五渡—利店断层的南段,总体呈NNW向延伸,全长超过15 km(图1),该断层向南断于中生界中,在利店以南地区逐渐消失。沐川地区出露的岩浆岩主要为晚二叠世峨眉山玄武岩,岩石类型有微晶玄武岩、斑状玄武岩、杏仁状玄武岩和火山角砾岩等,主要为溢流相熔岩。

沐川地区的含矿地层是上三叠统小塘子组

(T_3x),为一套湖泊—沼泽相沉积的砂岩和黏土岩地层。矿层赋存于小塘子组底部(图1),下距上三叠统垮洪洞组(T_3k)顶界约0.3~5 m,岩性为灰白色—浅白色厚层状中粒岩屑石英砂岩,厚度9.75~13.36 m,平均厚11.03 m。矿层含厚3~5 m的浅白色糖粒状中粒岩屑石英砂岩(图1中取样层位),其 $w(SiO_2)>90\%$ 。矿层层位和厚度均较稳定,呈层状产出,与地层产状一致。矿体沿走向延伸超过5 km,沿倾向延伸超过500 m。矿层呈单一结构,局部夹0.3~1.2 m的透镜状灰色、暗灰色细粒长石石英砂岩,直接顶板为黄灰色厚层状细粒长石石英砂岩,直接底板为浅灰色厚层状粗粒岩屑石英砂岩,其直接顶底板石英砂岩粒度较粗,云母、磁铁矿等暗色矿物含量较多, SiO_2 含量约80%。



地层单元		岩性柱	岩性描述
系	组	代号	
三叠系	须家河组	T_3xj	粉砂质黏土岩夹煤线
			泥质粉砂岩
			长石石英砂岩
			石英砾岩
			粉砂质黏土岩
	小塘子组	T_3x	长石石英砂岩
			石英砂岩
			10 m
			0 m
			垮洪洞组
三叠系	雷口坡组	T_2l	白云岩
			灰岩

1. 第四系; 2. 侏罗系; 3. 上三叠统须家河组; 4. 上三叠统垮洪洞组—小塘子组; 5. 中三叠统雷口坡组; 6. 下三叠统; 7. 上二叠统宣威组; 8. 上二叠统峨眉山玄武岩组; 9. 下二叠统一—中二叠统; 10. 志留系; 11. 奥陶系; 12. 寒武系; 13. 地质界线; 14. 逆断层; 15. 正断层; 16. 地层产状; 17. 矿山范围及取样位置; 18. 取样层位; 19. 含矿地层调查区位置; 20. 乡镇位置及名称

图1 沐川地区地质简图(左)和调查区地层柱状图(右)

Fig.1 Geological sketch of Muchuan area(left) and stratigraphic column of the survey area (right)

2 样品采集与实验

2.1 样品采集

本文采集了矿区坑道的石英砂岩原矿和精选厂的工业加工品。原矿样品为块状样,采自双龙沟、红旗等铜采矿区,共 6 件样品。工业品来自乐山中天矿业有限公司中试基地,其为从双龙沟矿区坑道开采的石英砂岩原矿,经过石英砂工业试验生产线加工、烘干和筛分等工艺获得的 40/70 目石英砂工业品,共 1 件样品。

2.2 测试分析

所有测试均由西南石油大学完成。原矿样品的主量元素采用 X 射线荧光光谱仪(X-ray fluorescence, XRF)熔融法测试,仪器型号为 AXIOS-X 射线荧光光谱仪,测量的精密度和准确度控制相对标准偏差均小于 1%。对其中 2 件样品进行 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD),测试仪器型号为 X Pert PRO 型 X 射线衍射仪。原矿样品磨制薄片后在偏光显微镜镜下进行观察及照相,对开展 XRD 测试的 2 件样品用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)进行矿石微区形貌分析,仪器型号为 XL30。

样品的压裂支撑剂性能参照《SY/T 5108—2014 水力压裂和砾石充填作业用支撑剂性能测试方法》^[9]进行测试,测试项目包括圆度和球度、视密度和体积密度、酸溶解度、浊度、粒径以及破碎率。短期导流能力测试方法参照《SY/T 6302—2009 压裂支撑剂充填层短期导流能力评价推荐方法》^[10],石英砂铺置浓度均为 10.0 kg/m^2 。四川盆地油气田以天然气田为主,开发生产时储层一般不含水,考虑到未来矿石主要用于四川盆地页岩气开发,采用氮气为驱替流体介质更具有实际意义,分别测试在 6.9 MPa、13.8 MPa、27.6 MPa、41.4 MPa、55.2 MPa、69 MPa 闭合压力下的导流能力。每个闭合压力进行 3 次测试,测试结果取其平均值。长期导流能力实验参照《NB/T 14023—2017 页岩支撑剂充填层长期导流能力测定推荐方法》^[11],岩板采用页岩岩心,介质为氮气,石英砂铺置浓度为 10.0 kg/m^2 。分别在 6.9 MPa、13.8 MPa、27.6 MPa、41.4 MPa、55.2 MPa 闭合压力

下,经过稳压 50 h 后,进行长期导流能力检测。

压裂支撑剂性能和导流能力的测试样品均为制备的 40/70 目石英砂。除工业品由精选厂加工制备外,其余样品均为实验室制备。行业标准值参照《SY/T 5108—2014 水力压裂和碱石充填作业用支撑剂性能测试方法》^[9]。

3 测试结果

3.1 矿石组构

矿石薄片中的微观特征显示,矿石主要为中粒岩屑石英砂岩、致密块状构造、颗粒支撑结构、分选性中等、孔隙胶结。石英颗粒的粒径为 $0.20 \sim 0.50 \text{ mm}$,中砂屑含量一般为 75% ~ 90%,细砂屑、粗砂屑及巨砂屑含量不等,砂屑分布不均,局部细砂屑相对集中,呈条带或纹层。矿石矿物成分较为简单,以石英和硅质岩屑等陆源碎屑为主(含量约 82% ~ 85%),含少量黏土杂基和石英胶结物等填隙物(含量约 10% ~ 15%)。石英以次生加大为主(图 2(a)),加大边宽 $20 \sim 60 \mu\text{m}$,局部宽约 $80 \mu\text{m}$,少部分石英呈微晶状充填孔隙,含量约占 48% ~ 64%。石英以外的陆源碎屑含量约 17% ~ 30%,主要为硅质岩屑(含量 13% ~ 26%)、少量云母和斜长石(图 2(b))。

样品的 XRD 测试分析结果表明,石英砂岩矿石的矿物组成以石英(含量 89.7% ~ 93%)为主,次为黏土矿物(含量 5.9% ~ 7%)和斜长石(含量 0% ~ 4.4%)。石英在 XRD 图谱中均表现为强衍射峰,锋形尖锐对称,指示石英的结晶度高^[12]。少量的黏土、斜长石等矿物在图谱中表现为非常微弱的衍射峰。矿石块状样的 SEM 照片显示,石英可见典型的贝壳状断口(图 2(c)),石英颗粒表面存在直径 $1 \sim 150 \mu\text{m}$ 的溶蚀坑,尤其是基质内裂缝较为发育(图 2(d)),局部可见颗粒细小的片状黏土矿物充填溶蚀坑,使石英表面出现较明显的白色斑点(图 2(e))。矿石中的黏土矿物主要呈不规则卷曲片状分布于石英颗粒之间(图 2(f))。化学成分分析结果(表 1)显示矿石的 K_2O 含量为 1.06% ~ 2.35%,平均 1.46%。结合矿石微区形貌特征和前人研究成果,推测矿石中黏土矿物以伊利石为主^[13]。

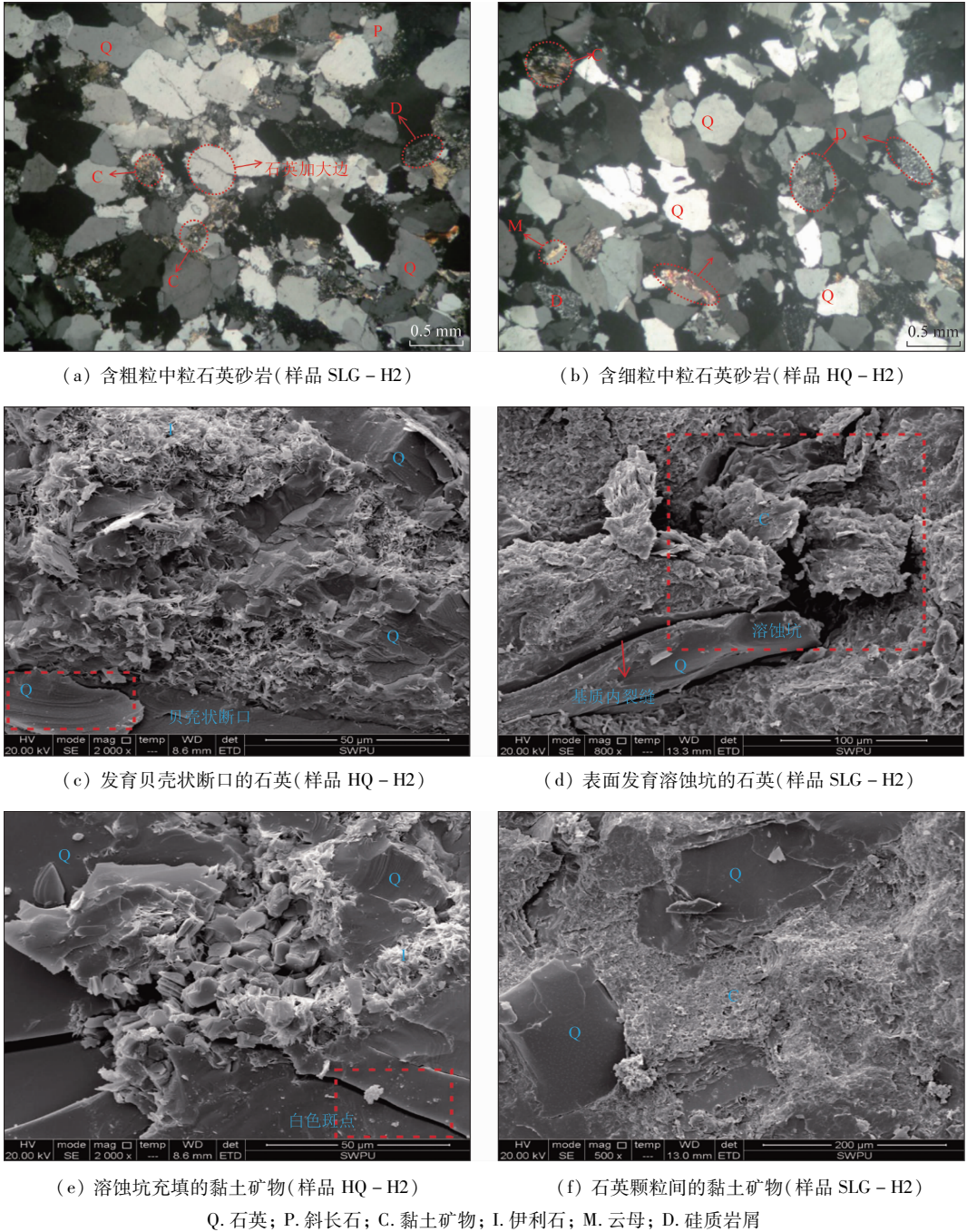


图 2 矿石样品显微镜及扫描电镜照片

Fig.2 Microscopic and SEM photographs of ore samples

表 1 矿石样品元素 XRF 测试结果

Tab.1 XRF test results of ore sample elements

样品编号	矿 区	样品性质	含量/%								
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	烧失量
SLG - H1	双龙沟	原矿块状样	91.450	5.531	0.641	0.185	0.179	1.222	0.035	0.068	0.180
SLG - H2	双龙沟	原矿块状样	87.185	9.003	0.414	0.175	0.229	2.350	0.065	0.194	0.240
SLG - H3	双龙沟	原矿块状样	88.649	5.495	0.148	0.180	0.169	1.840	0.048	0.090	0.280
HQ - H1	红旗	原矿块状样	91.375	6.283	0.491	0.080	0.135	1.059	0.032	0.091	0.190

续表

样品编号	矿 区	样品性质	含量/%								
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	烧失量
HQ-H2	红旗	原矿块状样	90.373	7.377	0.390	0.041	0.135	1.132	0.033	0.250	0.350
HQ-H3	红旗	原矿块状样	92.098	5.594	0.354	0.118	0.155	1.137	0.033	0.064	0.370
平均值		原矿块状样	90.188	6.547	0.406	0.130	0.167	1.457	0.041	0.126	0.268
工业品 G1	双龙沟	40/70 目工业级石英砂	98.121	0.921	0.073	0.005	0.301	0.404	0.039	0.065	0.245

注：平均值只统计原矿块状样数据。

3.2 石英砂支撑剂性能指标

样品的压裂支撑剂性能指标测试结果如表 2 所示。40/70 目石英砂样品的圆度和球度较好,均大于 0.7,满足行业标准对球度 ≥ 0.6 和圆度 ≥ 0.6 的要求^[9];体积密度介于1.25~1.40 g/cm³之间,小于40/70 目石英砂体积密度的一般值(1.5~1.7 g/cm³)^[14];视密度介于2.58~2.63 g/cm³之间,虽然行业标准未给出压裂支撑剂的体积密度和视密度的具体要求,但由于低密度支撑剂在压裂液中呈悬浮状态,降低其沉降速度能够减缓油气井的产能递减率,因此发展低密度支撑剂是行业的当前趋势^[3,14]。在酸性岩层中,耐酸性好的支撑剂能在更长时间保持良好的导流能力^[15],40/70 目石英砂样品的酸溶解度介于1.70%~6.14%之间,均满足行业标准对酸溶解度 $\leq 7\%$ 的要求^[9]。浊度主要表征了支撑剂的表面光洁度,体现其表面所沾微粒的数量与大小^[16],实验室加工的40/70 目石英砂

样品浊度均大于200 FTU,工业品 G1 的浊度为81.27 FTU,只有工业品 G1 满足行业标准对浊度 ≤ 150 FTU 的要求^[9]。40/70 目石英砂样品中,石英粒径为212~425 μm 的占比80.07%~98.48%,石英粒径 >600 μm 的占比0%~0.12%,石英粒径为150 μm 的占比0%~8.17%。实验室加工的40/70 目石英砂样品中,石英粒径为150 μm 的占比均大于1%,不满足行业标准对石英粒径为150 μm 的占比 $\leq 1\%$ 的要求,工业品 G1 满足行业标准对石英粒径的要求^[9]。支撑剂的破碎率影响着裂缝导流能力,是石英砂支撑剂重要的评价指标^[8],40/70 目石英砂样品在闭合压力28 MPa 下的破碎率为9.05%~23.41%。其中工业品 G1 的破碎率基本满足 $\leq 9\%$ 的4K 破碎等级,实验室加工样品的破碎率均大于9%,不满足行业标准的的要求^[9]。在闭合压力35 MPa 的条件下,工业品 G1 的破碎率不满足行业标准的的要求^[9]。

表 2 40/70 目石英砂样品的压裂支撑剂性能指标测试结果

Tab.2 Fracture proppant performance test results of 40/70 mesh quartz sand samples

样品编号	圆度	球度	视密度/ (g·cm ⁻³)	体积密度/ (g·cm ⁻³)	酸溶 解度 /%	浊度/ FTU	不同石英粒径占比/%			不同闭合压力下的 破碎率/%	
							>600 μm	425~212 μm	150 μm	28 MPa	35 MPa
SLG-H1	0.75	0.76	2.63	1.31	3.21	>200	0.09	96.36	1.73	17.68	未测
SLG-H2	0.75	0.74	2.62	1.26	3.78	>200	0.05	89.23	4.31	20.21	未测
SLG-H3	0.72	0.75	2.58	1.25	6.14	>200	0.01	86.98	6.70	23.41	未测
HQ-H1	0.73	0.75	2.63	1.28	4.95	>200	0.06	80.07	8.17	22.68	未测
HQ-H2	0.74	0.76	2.59	1.26	3.94	>200	0.01	87.36	4.92	20.82	未测
HQ-H3	0.73	0.74	2.58	1.29	2.87	>200	0.12	94.60	2.47	21.47	未测
平均值	0.74	0.75	2.61	1.28	4.15	>200	0.06	89.10	4.72	21.05	未测
工业品 G1	0.73	0.76	2.62	1.4	1.70	81.27	0.00	98.48	0.00	9.05	14.95
行业标准值	≥ 0.6	≥ 0.6	—	—	≤ 7	≤ 150	≤ 0.1	≥ 90	≤ 1.0	≤ 9.0	≤ 9.0

注：测试结果的平均值只统计实验室制备样品,“—”表示行业规范中无对应的标准值。

3.3 石英砂支撑剂导流能力

40/70 目石英砂样品的短期导流能力可以看出(图3(a),(b)):当闭合压力 <40 MPa,样品的导流能力在1.71~52.26 $\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 之间;当闭合压力为40~70 MPa,样品的导流能力介于0.23~7.83 $\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 之间,其中工业品在70 MPa 闭合压力下的导流能力为1.12 $\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 。从样品的长期

导流能力可以看出(图3(c)),40/70 目石英砂样品在闭合压力55.2 MPa 下,经过稳压50 h 后,样品SLG-H2 的导流能力为0.22 $\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 。图3(a)和图3(c)显示,在闭合压力 >27.6 MPa 时,同一样品的长期导流能力相比其短期导流能力下降的幅度更小,在闭合压力提高到55 MPa 后长期导流能力基本无变化。

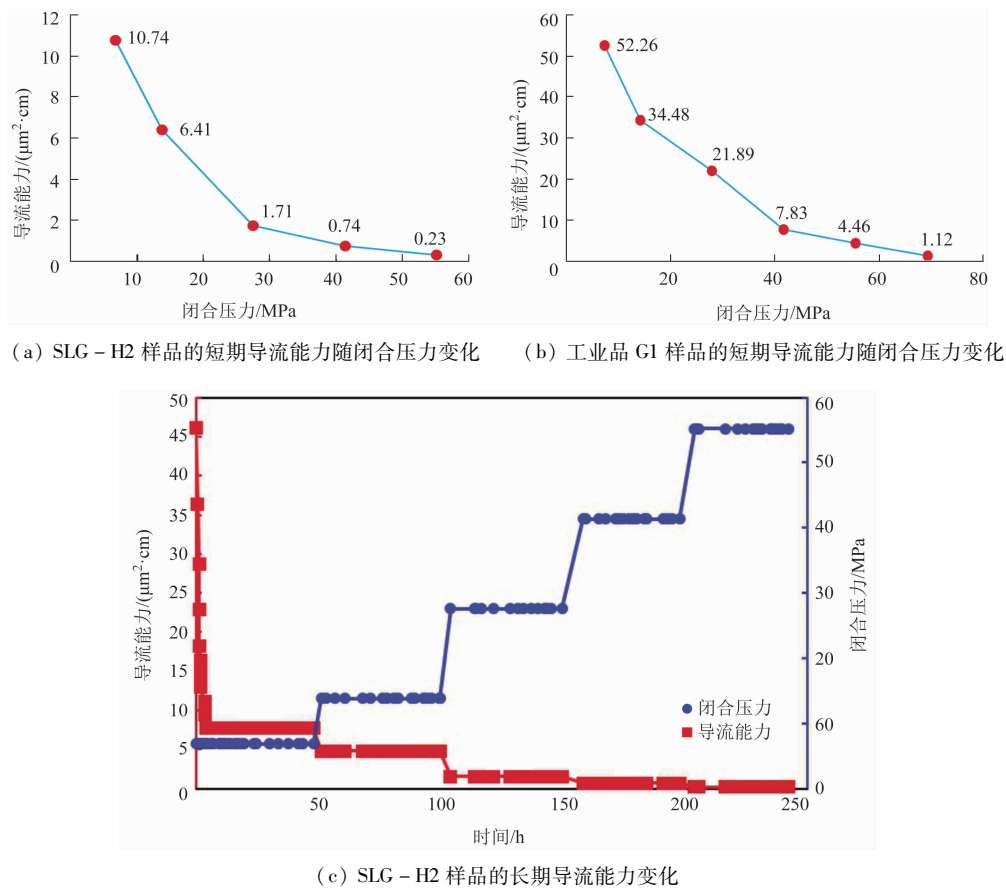


图 3 40/70 目石英砂样品在不同闭合压力下导流能力的变化

Fig.3 Variation of conductivity of 40/70 mesh quartz sand samples under different closing pressures

4 利用途径

4.1 磷化工

沐川县冷家沟化肥用砂岩矿、红旗里坪石英矿采选厂和双龙沟硅矿等矿山均主要生产销售石英砂岩原矿及水洗矿,主要为黄磷生产材料。黄磷厂化肥用砂岩的工业指标只要求 $w(\text{SiO}_2) \geq 84\%$,本文调查区采集的石英砂矿石 SiO_2 含量为 $87.2\% \sim 92.1\%$,平均 90.19% (表 1)。参照《DZ/T 0207—2020 矿产地质勘查规范 硅质原料类》^[17]和黄磷厂生产企业的要求,建议将区内化肥用砂岩工业指标定为 $w(\text{SiO}_2) > 84\%$,最低可采厚度 $\geq 2\text{ m}$,夹石剔除厚度 $>0.5\text{ m}$ 。

4.2 玻璃制品

石英砂岩样品测试分析结果显示,矿石的 $w(\text{SiO}_2) > 85\%$,有害杂质主要以黏土矿物的形式赋存于石英颗粒间(图 2(e),(f))。表 1 显示,经过石英砂工业试验生产线加工后的样品相较于于

原矿块状样,其 SiO_2 含量较高, Al_2O_3 和 Fe_2O_3 等的含量较低。黄丹里坪矿区相同层位的石英砂岩矿石加工提纯的研究成果显示^[5,7,18],可通过原矿—破碎—磨矿—优化擦洗—优化湿式磁选—筛分分级的选矿加工提纯流程,获得 $w(\text{SiO}_2) = 98.80\%$ 、 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 0.051\%$ 的优质石英砂。结合《DZ/T 0207—2020 矿产地质勘查规范 硅质原料类》^[17],建议将沐川地区玻璃用砂岩工业指标定为 $w(\text{SiO}_2) \geq 98.10\%$ 、 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3) \leq 0.060\%$ 。要求石英砂颗粒度全部通过 20 目,40 目~80 目占比 $>85\%$ 。

4.3 铸造用型砂

矿石薄片鉴定结果显示(图 2),矿石中石英碎屑的粒径范围主要分布在 $0.2 \sim 0.5\text{ mm}$ (32~80 目),占比约 90%,可见石英的天然颗粒大小适合生产加工粒度为 40~70 目的铸造型砂产品^[7]。已有研究表明, SiO_2 含量决定了原砂烧结点的高低, $w(\text{SiO}_2) \geq 98\%$ 是 40/70 目产品质量标准最重要的指标之一^[7]。根据黄丹石英砂岩矿及其加工

产物,以及铸造型砂应用的研究成果^[6-7],通过高效擦洗能够除去石英颗粒间的黏土等杂质,有效提高 SiO_2 含量,降低 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 等杂质的含量,再通过筛分加工可进一步提高 SiO_2 含量,降低 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 等杂质的含量。本文 40/70 目石英砂样品的圆度和球度均大于 0.7,说明矿石中石英颗粒的天然形状主要呈圆形一次棱角状,可知矿石及其加工产物的石英颗粒角形因数 ≤ 1.3 ^[7]。参照《DZ/T 0207—2020 矿产地质勘查规范 硅质原料类》^[17],以及铸造用石英砂生产企业的要求,建议将区内铸造用石英砂工业指标定为 $w(\text{SiO}_2) \geq 96\%$ 、含泥量(质量分数) $\leq 0.3\%$ 、粒度集中度 $\geq 90\%$ 、角形因数 ≤ 1.3 。

4.4 压裂支撑剂

以四川盆地页岩储层为例,页岩气井主裂缝的导流能力大于 $0.5 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$,分支裂缝的导流能力大于 $0.2 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 即能满足页岩气井生产需求^[19]。目前,四川盆地长宁—威远地区页岩气井产气阶段的闭合压力为 40 ~ 70 MPa^[20]。在 70 MPa 闭合压力下,工业品 G1 的导流能力大于 $1.0 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$,能满足四川盆地页岩气井对主裂缝的导流能力要求。样品 SLG-H2 在 55.2 MPa 闭合压力下的短期导流能力为 $0.23 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$,长期导流能力为 $0.22 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$;在 41.4 MPa 闭合压力下的短期导流能力为 $0.74 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$,长期导流能力为 $0.69 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$,能满足四川盆地页岩气井对分支裂缝以及浅层页岩气井对主裂缝的导流能力要求。此外,实验室与矿山的 40/70 目石英砂样品导流能力存在明显差异,推测是实验室与矿山的 40/70 目样品加工工艺质量存在差别,工业品的测试结果更具现实意义,且满足目前页岩气井主裂缝对导流能力的要求。

根据上述研究成果,建议将沐川地区石英砂压裂支撑剂的工业参考指标定为 $w(\text{SiO}_2) \geq 90.0\%$ 、球度 ≥ 0.6 、圆度 ≥ 0.6 、酸溶解度 $\leq 7\%$ 、浊度 $\leq 150 \text{ FTU}$ 、颗粒大小 30 目以下的不多于 0.1%、颗粒大小 40 ~ 70 目的占 90% 以上、颗粒大小 100 目以上的不多于 1%、破碎率满足 9% 破碎的 4K 及以上等级。在 70 MPa 闭合压力下,短期导流能力大于 $1.0 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$,在 55 MPa 闭合压力下,长期导流能力大于 $0.2 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 。

4.5 开发利用潜力

沐川地区上三叠统小塘子组底部石英砂岩矿

床的规模大,矿石保有资源储量超 4 000 万 t,区内石英砂岩矿开采技术条件较好,矿层埋深一般为 40 ~ 200 m,矿山地下开采对永久基本农田无影响。石英砂岩矿层顶板抗压强度为 20 ~ 25 MPa,矿层抗压强度为 25 ~ 30 MPa,底板抗压强度为 1 ~ 5 MPa,矿山矿坑稳定性较好,采矿活动应注意矿坑的支护等安全措施。区内可采矿层均位于当地最低侵蚀基准面标高之上,地形有利于地表水和地下水排泄,含水层富水性一般,矿床充水主要因素为大气降水,可加强监测矿层之上含水层的变化和采场巷道底部汇水的疏导工作。2020 年以来,乐山中天矿业有限公司中试基地(双龙沟矿区)的少量石英砂岩矿原矿石通过加工后获得 40/70 目型号的石英砂工业品,并将其作为压裂支撑剂销售。石英砂压裂支撑剂在生产需求、施工、经济和环境方面均具有推广可行性^[20]。区内在建矿山有沐川县冷家沟化肥用砂岩矿、红旗里坪石英矿采选厂等,展现了较大的开发利用潜力。

5 结论

(1) 沐川地区赋存于上三叠统小塘子组底部的石英砂岩矿主要为中粒岩屑石英砂岩,粒度主要分布在 0.20 ~ 0.50 mm 之间。矿石矿物的成分较为简单,以石英(含量约 48% ~ 64%)和硅质岩屑(含量 13% ~ 26%)等陆源碎屑为主,含少量黏土杂基和石英胶结物等填隙物(含量约 10% ~ 15%)。

(2) 沐川地区 40/70 目石英砂工业品的各项指标均满足支撑剂性能的相应要求,其破碎率基本满足 9% 破碎的 4K 等级,能满足四川盆地页岩气井主裂缝的导流能力要求,下一步可开展现场试验评价和压裂工艺可行性论证。

(3) 沐川地区石英砂岩原矿石可销售作磷化工用品,原矿石通过擦洗、磁选、筛分等加工提纯工艺后,可销售 40/70 目石英砂工业品作玻璃制品、铸造用型砂和压裂支撑剂用。

参考文献(References):

- [1] 褚强,张明. 石英产品的市场开发与应用[J]. 中国非金属矿工业导刊,2010(1):17-21.
Chu Q, Zhang M. The market development and application of quartz products[J]. China Nonmetallic Mineral Industry Guide, 2010(1):17-21.

- [2] 汪灵. 石英的矿床工业类型与应用特点[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(6): 39–47.
Wang L. Industrial types and application characteristics of quartz ore deposits [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(6): 39–47.
- [3] 光新军, 王敏生, 韩福伟, 等. 压裂支撑剂新进展与发展方向[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(5): 529–533, 541.
Guang X J, Wang M S, Han F W, et al. Proppants for fracturing fluids: New progress made and direction of future development [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(5): 529–533, 541.
- [4] 张道伟. 四川盆地未来十年天然气工业发展展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 34–45.
Zhang D W. Development prospect of natural gas industry in the Sichuan Basin in the next decade [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 34–45.
- [5] 汪灵, 李萍, 殷德强, 等. 沐川黄丹石英砂岩加工玻璃工业用石英砂试验研究[J]. 矿物岩石, 2010, 30(4): 1–6.
Wang L, Li P, Yin D Q, et al. Experimental study of processing quartz sand used for glass industry by Quartzose sandstone of Huangdan, Muchuan County, Sichuan [J]. Mineralogy and Petrology, 2010, 30(4): 1–6.
- [6] 唐小刚. 沐川黄丹石英砂岩加工玻璃工业用普高料石英砂试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
Tang X G. Experimental Study of Processing Quartz Sand for Normal-expensive White Quartz By the Quartzose Sandstone from Muchuan Huangdan, China [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [7] 汪灵, 汤建, 张科, 等. 沐川黄丹石英砂岩特点及其铸造型砂应用[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2014, 41(3): 393–400.
Wang L, Tang J, Zhang K, et al. Characteristics of quartzose sandstone from Huangdan in Muchuan of Sichuan and its application of foundry molding sand [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2014, 41(3): 393–400.
- [8] 郑新权, 王欣, 张福祥, 等. 国内石英砂支撑剂评价及砂源本地化研究进展与前景展望[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1): 131–137.
Zheng X Q, Wang X, Zhang F X, et al. Domestic sand proppant evaluation and research progress of sand source localization and its prospects [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(1): 131–137.
- [9] 国家能源局. SY/T 5108—2014 水力压裂和砾石充填作业用支撑剂性能测试方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
National Energy Administration. SY/T 5108—2014 Measurement of Properties of Proppants Used in Hydraulic Fracturing and Gravel-packing Operations [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [10] 国家能源局. SY/T 6302—2009 压裂支撑剂充填层短期导流能力评价推荐方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
National Energy Administration. SY/T 6302—2009 Recommended Practices for Evaluating Short Term Proppant Pack Conductivity [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [11] 国家能源局. NB/T 14023—2017 页岩支撑剂充填层长期导流能力测定推荐方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2017.
National Energy Administration. NB/T 14023—2017 Recommended Method for Measuring the Long-term Conductivity of Proppant Packs in Shale [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017.
- [12] 殷德强, 汪灵, 孔芹, 等. 四川沐川黄丹石英砂岩工艺矿物学研究[J]. 矿物岩石, 2010, 30(1): 1–5.
Yin D Q, Wang L, Kong Q, et al. Study of process mineralogy on quartzose sandstone of Huangdan, Muchuan County, Sichuan [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2010, 30(1): 1–5.
- [13] 汪灵, 张科, 李萍, 等. 四川沐川黄丹石英砂岩铁质赋存状态研究[J]. 矿物学报, 2012, 32(2): 183–192.
Wang L, Zhang K, Li P, et al. A study on the iron occurrence in the Quartzose sandstone from Huangdan, Muchuan County, Sichuan Province, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2012, 32(2): 183–192.
- [14] 徐永驰. 低密度支撑剂的研制及性能评价[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
Xu Y C. Development and Performance Evaluation of Low Density Proppant [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [15] 温庆志, 王强. 影响支撑剂长期导流能力的因素分析与探讨[J]. 内蒙古石油化工, 2003, 29(3): 101–104.
Wen Q Z, Wang Q. Analysis and discussion of effective factors on sustaining longtime diversion ability [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2003, 29(3): 101–104.
- [16] 杨能宇, 梁天成, 邱金平, 等. 压裂支撑剂性能测试方法不确定度评定[J]. 新疆石油天然气, 2022, 18(3): 38–43.
Yang N Y, Liang T C, Qiu J P, et al. Uncertainty analysis for the testing methods of fracturing proppant performance [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2022, 18(3): 38–43.
- [17] 中华人民共和国自然资源部. DZ/T 0207—2020 矿产地质勘查规范 硅质原料类[S]. 2020.
Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. DZ/T 0207—2020 Specifications for Silicon Material Exploration [S]. 2020.
- [18] 李萍, 汪灵, 殷德强, 等. 四川沐川黄丹石英砂岩浮选提纯试验初步研究[J]. 矿物学报, 2010, 30(S1): 120–121.
Li P, Wang L, Yin D Q, et al. Preliminary study on flotation purification of quartz sandstone in Huangdan, Muchuan County, Sichuan [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010, 30(S1): 120–121.
- [19] 高新平, 彭钧亮, 彭欢, 等. 页岩气压裂用石英砂替代陶粒导流实验研究[J]. 钻采工艺, 2018, 41(5): 35–37, 41.
Gao X P, Peng J L, Peng H, et al. Experimental study on feasibility of replace ceramic with sand in shale fracturing [J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(5): 35–37, 41.
- [20] 高新平, 李杰, 彭钧亮, 等. 页岩气体积压裂用石英砂支撑剂

优选实验研究[J]. 钻采工艺,2020,43(S1):48-52.
Gao X P,Li J,Peng J L,et al. Feasibility study on quartz sand for

shale gas fracturing[J]. Drilling & Production Technology,2020, 43(S1):48-52.

Characteristics and utilization route discussion of quartz sandstone in Muchuan area of Sichuan Province

ZHANG Hangfei^{1,2}, HAN Xiaoying³, YANG Linlong⁴, ZHONG Qiangsheng¹, CHEN Dongfang¹

(1. No. 207 Geological Team, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Sichuan Leshan 614000, China; 2. Zhangjinyuan Model Innovation Studio, Sichuan Leshan 614000, China; 3. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Hebei Tangshan 063210, China;4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Shengli Oilfield Ranch Co., SINOPEC, Shandong Dongying 257000, China)

Abstract: The quartz sandstone reserves in Muchuan area of Sichuan Province are huge and the mining technology is good. The raw ore samples from the mine tunnel and the industrial products from the mine pilot test base were collected for geochemical, schist ore identification and flow conductivity testing. The characteristics of quartz sandstone in Muchuan area were studied and the exploitation and utilization ways were discussed. The ore is mainly medium – grained lithic quartz sandstone with dense massive structure, and the mineral composition of the ore is dominated by terrigenous debris such as quartz and siliceous rock debris, with a small amount of interstitial materials such as clay and quartz cement. The breakage rate of 40/70 mesh industrial grade quartz sand samples is 9.05% under the condition of 28 Mpa closing pressure, and the conductivity capacity is 1.12 μm² · cm under the closure pressure of 70 Mpa, which meets the requirements of the conductivity of the main fracture of shale gas wells in Sichuan Basin. There are four applications of quartz sandstone ore products in Muchuan area, including phosphorus chemical industry, glass industry, molding sand for casting, and fracturing proppant. It is necessary to strengthen the evaluation of quartz sandstone fracturing proppant, and comprehensively develop and utilize quartz sandstone mineral resources in Muchuan area to ensure the sand source localization of the proppant industry.

Keywords: quartz sandstone; fracture proppant; Sichuan Province

(责任编辑: 魏昊明)