

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.295

引用格式: 陈虎,周芳春,柳清琦,等. 湖南仁里矿床高纯石英原料矿资源评价[J]. 中国地质调查,2025,12(1): 40-48.
(Chen H,Zhou F C,Liu Q Q,et al.,Resource evaluation of high-purity quartz raw material minerals in Renli deposit of Hunan Province[J]. Geological Survey of China,2025,12(1): 40-48.)

湖南仁里矿床高纯石英原料矿资源评价

陈虎,周芳春*,柳清琦,汪宣民,曾乐,粟峰

(湖南省地质灾害调查监测所,湖南长沙 410029)

摘要: 湖南仁里矿床是我国建国以来发现的品位最富、规模最大的超大型伟晶岩型钽矿床,拥有丰富的钽、铍等稀有金属矿和高纯石英原料矿。为了解区内伟晶岩型高纯石英原料矿品质,为矿山综合开发利用提供依据,对伟晶岩中的石英矿物特征、包裹体特征和杂质含量开展分析,并与邻区脉石英进行对比。研究表明:区内伟晶岩中石英矿物呈透明-半透明,矿物样品的 SiO_2 平均含量为99.982%,Al、B、Ca等14种杂质元素总量的平均值为 110.06×10^{-6} ,Al平均含量为 43.18×10^{-6} ,Ti平均含量为 4.90×10^{-6} ;镜下观察显示石英颗粒大小不等,有一定的拉伸变形,颗粒表面通透性好,50%的颗粒内未见流体包裹体,包裹体类型为气液两相的 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 型包裹体,包裹体形状多样、颜色明亮,个体形态差异较大,多数包裹体直径小于 $4 \mu\text{m}$,最小个体直径不足 $1 \mu\text{m}$,最大个体直径超过 $32 \mu\text{m}$,视域内包裹体面积比例少于5%。区内高纯石英原料矿具有优良的禀赋条件,是优良的高纯石英硅质原料,预测仁里矿床高纯石英原料矿的潜在资源量超过3 000万t,加强选矿-提纯工艺研究有望获取4N8级及以上高纯石英产品。研究成果对构建平江县域高纯石英产业基地,促进湘东北地区高纯石英产业发展具有一定指导意义。

关键词: 伟晶岩型高纯石英原料矿;资源评价;资源预测;仁里矿床;湖南省

中图分类号: P621+6,P613.23

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2025)01-0040-09

0 引言

高纯石英作为半导体、光纤、光伏、光学、电光源等产业不可或缺且无法替代的重要功能性材料,是重要的战略性资源。我国是全球最大的高纯石英工业原料进口国,4N8及以上($\text{SiO}_2 \geq 99.998\%$)的高端石英制品或高端高纯石英原料依赖进口^[1-3]。高纯石英是指以石英矿物为原料,经提纯后获得的一种产品,能够提纯生产高纯石英的矿床被称之为高纯石英原料矿^[2]。全球高纯石英主要来源于巴西的天然水晶、美国的伟晶岩、加拿大的脉石英^[4-5]等。伟晶岩中的石英具有包裹体少、纯度高等特点^[6],

是优质高纯石英的主要原料来源,例如:龚断全球4N8级及以上高端石英产品的美国尤尼明(现矽比科)公司,其高纯石英原料来源为美国Spruce Pine地区的伟晶岩^[7-8]。

幕阜山地区发育有丰富的伟晶岩,呈密集展布且规模较大^[9-10],例如:仁里矿床5号脉长达4 040 m,最大厚度可达204 m^[11],在我国分布的伟晶岩中,5号脉中发现的钽矿规模最大、 Ta_2O_5 品位最高。经过长期的普查工作^[11],目前仁里矿床已转入商业性勘探开发阶段。近年来,众多学者针对幕阜山地区(尤其是仁里矿区)的稀有金属伟晶岩开展了成矿地质特征、成矿规律^[11,13-15]、岩相学、矿物学、地球化学、成岩成矿时代^[13,16-18]、岩浆热液成矿环境和包裹体、成矿流体及温压条

收稿日期:2024-08-23;修订日期:2025-01-13。

基金项目: 湖南省自然资源厅省级财政出资地质勘查项目“湖南省平江县仁里矿区钽铌多金属矿普查(编号:20120370、20140350、20150351、20170331、20200803)”、湖南省自然资源厅项目“湖南省钽铌锂矿成矿规律及找矿方向研究(编号:2018-02)”及湖南省地质院科研项目“湘东北仁里钽铌矿床深部成矿规律及找矿预测研究(编号:HNGSTP202427)”联合资助。

第一作者简介: 陈虎(1991—),男,高级工程师,主要从事稀有金属矿产勘查工作。Email:604728898@qq.com。

通信作者简介: 周芳春(1967—),男,正高级工程师,主要从事稀贵金属矿产勘查与资源综合利用研究工作。Email:578486016@qq.com。

件^[19-20]、矿体矿石可选性试验及矿产资源综合评价^[21-22]等工作,但对于伟晶岩中石英的研究工作较为滞后。

目前,我国伟晶岩型和脉石英型高纯石英的研究工作已取得了突破性进展:江苏凯达石英公司与武汉理工大学合作,利用脉石英可生产 SiO₂ 含量为 99.998% 的高纯石英产品;连云港太平洋石英公司利用东海脉石英矿,生产出了 4N5($\omega(\text{SiO}_2) \geq 99.995\%$)~4N8 级($\omega(\text{SiO}_2) \geq 99.998\%$)的高纯石英产品^[8]。此外,张海啟等^[2,23]、刘广学等^[24]、赵金洲等^[25]、赵海波等^[26]采用阿尔泰、秦岭等成矿带伟晶岩以及河南卢氏龙泉坪伟晶岩,通过实验室选矿-提纯工艺流程,制备出了 4N5 级以上和 4N8 级以上的高纯石英产品。

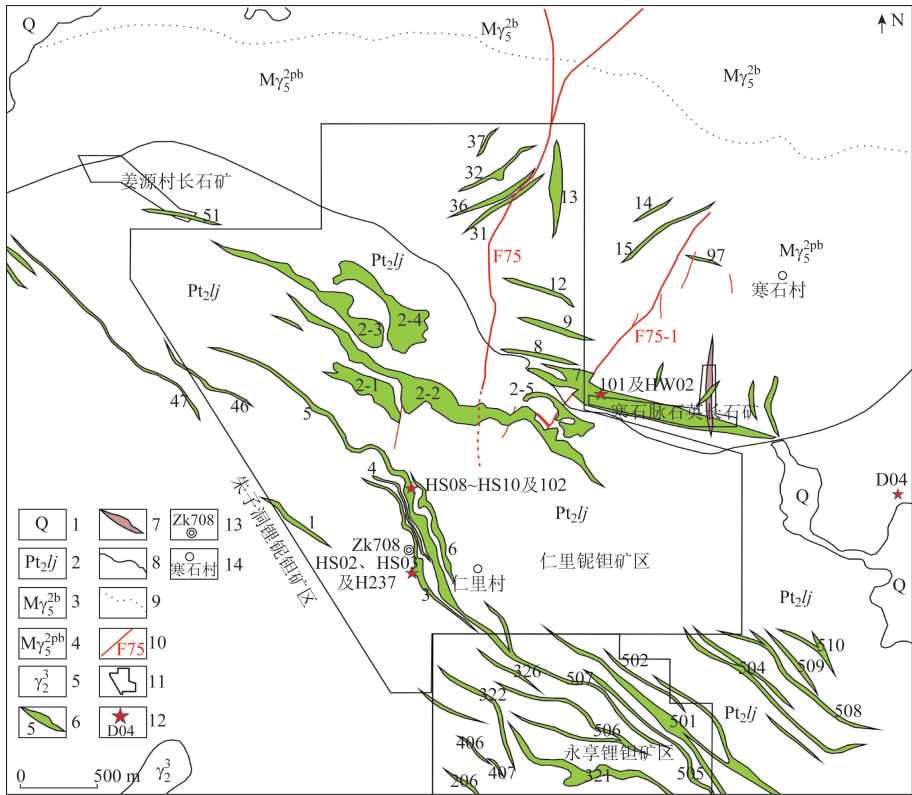
通过分析仁里矿床伟晶岩中石英的矿物特征、包裹体特征和杂质元素,并与邻区脉石英进行对比,对伟晶岩型高纯石英原料矿进行评价,旨在为仁里矿床的综合开发利用提供依据,为湘东北地区伟晶岩型高纯石英原料矿的开发利用提供新思路。

1 研究区地质概况

湖南仁里矿床位于幕阜山岩体西南缘,湖南省平江镇内,其花岗岩来源于地壳重融^[13-14,16-17],并受到一定程度地幔物质的影响^[13-14,17-18]。燕山早期至中期该地区经历了多期岩浆演化,且持续时间较长,伟晶岩的稀有金属矿化发生在白垩纪的岩浆活动末期^[13]。

研究区出露的地层为冷家溪群云母片岩和第四系,伟晶岩产于冷家溪群云母片岩和燕山期花岗岩中,其主要的成矿母岩为深部隐伏的二云母二长花岗岩。仁里矿床热液活动频繁,伟晶岩与热液活动关系密切,多阶段的热液活动导致了区内铌钽等稀有金属元素的超常富集,具有典型的岩浆-热液两阶段成矿现象^[15,18-19]。

研究区面积为 9.25 km²,分布 44 条伟晶岩脉,长度均大于 100 m,宽度均大于 2 m。其中岩体内分布有 21 条伟晶岩脉,岩体外沿构造裂隙充填有 23 条伟晶岩脉(图 1)。



1. 第四系; 2. 冷家溪群云母片岩; 3. 燕山早期中粒似斑状黑云母二长花岗岩; 4. 燕山早期粗中粒片麻状斑状黑云母二长花岗岩; 5. 武陵期中细粒黑云母斜长花岗岩; 6. 伟晶岩脉及编号; 7. 石英脉及编号; 8. 地质界线; 9. 不整合界线; 10. 断裂及编号; 11. 矿权界线; 12. 取样点位置及取样编号; 13. 钻孔位置及编号; 14. 地名

图 1 仁里矿床地质简图
Fig. 1 Geological sketch of Renli deposit

岩体内的伟晶岩脉与花岗岩之间边界清晰,规模相对较小,产状复杂,倾角大于 60° ; 岩体外的伟晶岩脉沿片岩层间破碎带充填,规模较大(如 5 号伟晶岩脉长 4 040 m),呈层状产出(局部地段切层),近平行排列,NW 走向,倾向南西,倾角较缓,一般小于 40° (局部地段大于 50°),不同规模的石英脉穿插于伟晶岩中(宽约 150 cm)。其中,2 号和 5 号伟晶岩脉为区内规模最大的岩脉,不同规模的石英脉穿插其中,块状石英多以透镜体形式赋存于规模较大的伟晶岩中,其短轴长 1.0~3.0 m。研究区石英主要赋存于伟晶岩和石英脉中,透明-半透明,呈颗粒状、结晶-半结晶、块状,一般含有少量的长石和白云母。

2 号伟晶岩脉呈层状产出,沿走向长 2 970 m,厚 3.66~79.54 m,最厚处可达 228 m^[11]。主要由石英、钠长石、微斜长石、斜长石、白云母等组成,黑云母含量较少,未见含锂矿物。

5 号伟晶岩脉为白云母微斜长石/钠长石伟晶岩,呈层状产出,与永享锂钽矿区 507 号脉连接(图 1),脉体沿走向总长度为 4 040 m,宽 3.21~79.54 m,最厚处达 204 m^[11],主要由石英、钠长石、微斜长石、斜长石和白云母组成,局部含少量黑云母。锂云母、锂电气石等含锂矿物仅赋存于锂云母石英核中,伟晶岩中 Li 含量一般为 $(13.0 \sim 110.0) \times 10^{-6}$,平均含量为 46.14×10^{-6} ,锂云母石英核中的 Li 含量可达工业品位($\omega(\text{Li}_2\text{O}) \geq 0.8\%$)^[11, 14]。

2 矿石特征

2.1 矿物特征

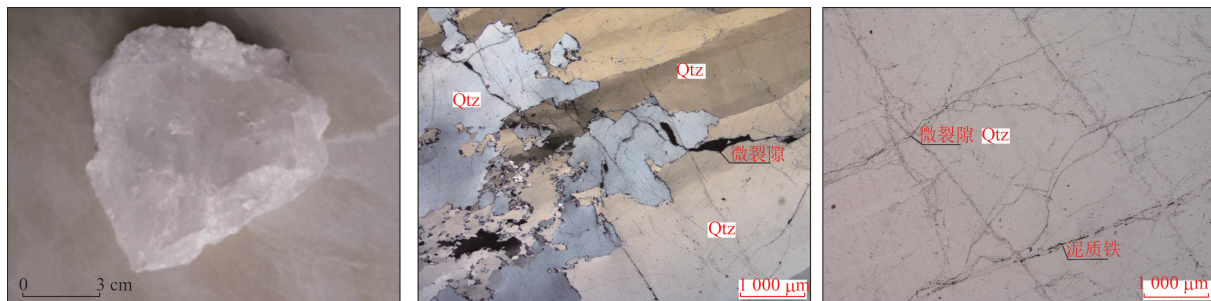
研究区内的伟晶岩主要为白云母微斜长石/钠长石伟晶岩及少量碱性长石伟晶岩。钻孔 Zk708

揭露了 5 号和 6 号伟晶岩脉的深部矿体,对钻孔全孔取样(64 个样品,位置见图 1),镜下观察确定其类型为含石榴石白云母钠长石伟晶岩,主要矿物为石英(约 28.78%)、钠长石(约 25.28%)、白云母(约 15.50%)、条纹长石(约 12.16%)、斜长石(约 5.38%)、微斜长石(约 3.08%)、石榴石(约 4.25%)、碱性长石(约 2.14%)、黑云母(约 1.94%)、绢云母(约 1.09%)和少量的钾长石(约 0.94%)。伟晶岩中石英矿物呈透明-半透明,表面光滑,呈粒状、块状、结晶-半结晶状赋存于伟晶岩中。

石英手标本呈透明-半透明,含少量的长石和白云母(图 2(a)),镜下为无色-纯白色,较透明,可见贝壳状断口,微裂隙略发育,可含少量泥质矿物等,为重结晶结构、块状构造。石英含量为 94%~98%,粒径为 0.06~20.00 mm(图 2(b)),半自形或不规则粗粒状,无色透明,一级灰白干涉色,晶体中菱形交叉裂纹较发育,沿裂隙可见白云母和斜长石,晶粒中可见微量绢云母定向分布。沿微裂纹多见气液两相包裹体或铁泥质,铁泥质含量为 1%~2%,呈不规则微细片粒状,浅褐色,由片粒状黏土矿物和粉尘状铁质混合分布在石英微裂纹中(图 2(c))。斜长石含量约 1%,半自形板状,一级灰干涉色,聚片双晶发育,弱绢云母化,零星分布在菱形交叉裂纹中,斜长石粒径为 1.80~4.00 mm。

钠长石呈无色,半自形-它形,片状,低突起,可见钠长石双晶或钠长石-卡斯巴复合双晶及细密钠长石双晶,局部可见斜长石聚片双晶。单偏光下呈无色透明,较脏,表面大多发生黏土化。

白云母呈无色,半自形-它形,片状,具一组极完全节理,无多色性和吸收性,部分受应力作用发生扭曲,近平行消光,部分呈细小鳞片状分布。白云母含量为 0%~3%,无色粗晶片状,鲜艳干涉色,



(a) 伟晶岩中块状石英

(b) 正交偏光

(c) 单偏光

Qtz. 石英

图 2 仁里矿床伟晶岩型石英镜下照片

Fig. 2 Photos of pegmatitic quartz in Renli deposit

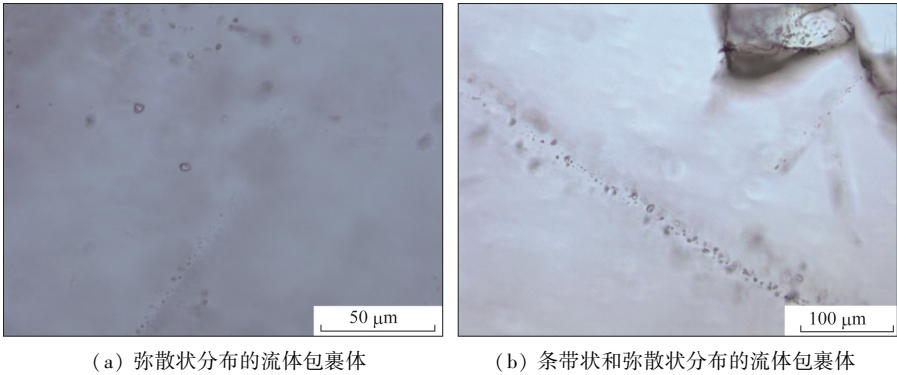
沿交叉裂纹零星分布,且多与中细粒动态重结晶石英集合体共同分布,白云母片径为 3.00 ~ 6.00 mm。

2.2 流体包裹体特征

仁里矿床 5 号伟晶岩脉中流体包裹体较发育,绝大部分包裹体孤立存在于石英中或呈线性分布,但不切穿矿物边界,表现出较明显的原生特征,这一特征在含石榴石钠长石伟晶岩与锂云母石英的核部中比较显著。部分包裹体呈线性或成群分布,大小不一,气液比例明显,形状各异,切穿矿物边界,表现出十分明显的次生特征。气体体积分数变化范围较集中,多为 1% ~ 20%,个别达 30%。根据镜下观察与冷冻回温的相态变化,确定石英中的

包裹体类型为气液两相的 $H_2O - NaCl$ 型包裹体,未发现 CO_2 包裹体和含石盐子晶三相包裹体^[19-20]。

石英颗粒大小不等,有一定的拉伸变形,颗粒表面通透性好,50% 的颗粒内未见流体包裹体,其他颗粒内可见流体包裹体。包裹体颜色明亮,个体形态差异较大,多数包裹体直径小于 4 μm ,最小个体直径不足 1 μm ,最大个体直径超过 32 μm 。包裹体形状各异,有柱状、多边形,六边形,六方柱状等,呈串珠状、条带状(图 3(a))和弥散状(图 3(b))分布。条带状包裹体主要沿裂隙分布,形态窄而平直,其中可见矿物杂质;弥散状包裹体多呈微尘状,多数直径小于 4 μm ,呈圆形或椭圆形。视域内包裹体面积比例少于 5%。



(a) 弥散状分布的流体包裹体 (b) 条带状和弥散状分布的流体包裹体

图 3 仁里矿床伟晶岩中石英及包裹体特征

Fig. 3 Characteristics of pegmatite quartz and inclusions in Renli deposit

3 样品采集及测试

以 3 号和 5 号伟晶岩脉为研究对象(图 1),采取刻槽取样,采样规格为 10 cm $\times$ 5 cm,样品重量为 6.0 ~ 7.0 kg,在仁里铌钽矿区脉石英透镜体部位分别采集全岩样品 5 件(样品 HS02、HS03、HS08、HS09、HS10)。样品测试由中国冶金地质总局中南局中心实验室完成,采用粗碎—水洗—研磨—数显高效电热板—测试的流程,矿石加工经过无污染前处理:使用非金属制品进行粗碎后,用去离子水对粗碎后的样品进行水洗,之后再进行烘干,最后采用玛瑙研钵进行人工研磨。检测采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)^[27],分析结果见表 1。

样品 HS02、HS03、HS08 及 HS09 未进行 Ti 含量分析。区内伟晶岩中石英的杂质含量较少,全岩样品中 SiO_2 含量为 99.90% ~ 99.95%,平均含量为 99.92%,13 种杂质元素总量的平均值为 335.19 $\times$

10^{-6} ,Al 含量为 $(60.00 \sim 280.00) \times 10^{-6}$,平均含量为 203.33×10^{-6} ,高于阿尔泰地区伟晶岩中石英的 Al 含量,低于仁里周边地区样品(D04)脉石英及美国 Spruce Pine 地区伟晶岩中石英的 Al 含量,几个地区样品中的 Ti 含量均较少(表 1)。

为了解区内伟晶岩中石英矿物杂质元素含量,分别在 7 号、5 号和 3 号伟晶岩脉的石英透镜体中挑出 3 件表面无杂质的石英矿物样品,分别送安徽点金石能源科技有限公司(样品 101、102)和佛山优博陶瓷分析测试有限公司(样品 H237)进行测试。样品采用玛瑙研钵进行人工研磨,在实验室温度 25°,相对湿度 68% 的条件下,依据《GB/T 32649—2016 光伏用高纯石英砂》^[28]及《GB/T 3284—2015 石英玻璃化学成分分析方法》^[29]进行有害元素分析,测试结果见表 2。

区内伟晶岩矿物样品中 Al、B、Ca、Co、Cr、Cu、Fe、K、Li、Mg、Mn、Na、Ni、Ti 共 14 种杂质元素总量为 $(52.60 \sim 214.40) \times 10^{-6}$,平均含量为 $110.06 \times$

表 1 仁里矿床、Spruce Pine 地区、阿尔泰地区全岩样品杂质含量对比

Tab.1 Comparison of impurities in whole rock samples in Renli deposit, Spruce Pine area and Altai area

取样位置	样号	$\omega_{\text{B}}/10^{-6}$														$\omega(\text{SiO}_2)$	
		Ni	Fe	Cr	Mg	Ca	Cu	Ti	Al	Ba	Na	Li	K	Mn	杂质含量	/%	
仁里 钨钼 矿区	HS02	0.00	7.00	0.04	3.00	26.00	0.06	—	210.00	0.11	48.00	28.76	29.00	0.19	352.16	99.92	
	HS03	0.10	7.00	0.00	3.00	9.00	0.07	—	190.00	0.04	44.00	24.30	29.00	0.24	306.75	99.93	
	HS08	0.00	4.00	0.19	2.00	5.00	0.00	—	60.00	0.03	70.00	8.18	43.00	0.04	192.44	99.95	
	SH09	0.00	9.00	0.50	2.00	9.00	0.02	—	280.00	0.10	67.00	29.98	75.00	0.98	473.58	99.90	
	HS10	0.01	14.00	0.08	3.00	11.00	0.15	8.41	260.00	0.20	22.00	24.11	44.00	1.39	388.35	99.91	
	HW2 (寒石)	0.01	4.90	0.07	3.50	7.80	0.03	7.51	220.00	—	2.00	35.50	16.00	0.50	297.83	99.93	
	平均	0.02	7.65	0.15	2.75	11.30	0.06	7.96	203.33	0.10	42.17	25.14	39.33	0.06	335.19	99.92	
仁里 周边	D04	0.06	235.00	0.09	34.00	10.80	0.06	6.81	910.00	—	32.00	23.50	790.00	3.70	2046.02	99.67	
Spruce	SP-01	<0.05	51.00	0.10	19.50	1 898.00	<0.05	1.60 11	622.00	5.02	6 669.00	2.51	347.00	—	20 615.83	—	
Pine ^[7]	SP-02	<0.05	23.40	0.08	28.00	1 635.00	<0.05	1.29	7 573.00	19.00	4 839.00	1.03	182.00	—	14 301.90	—	
阿尔 泰 ^[2]	—	0.00	22.08	2.86	3.87	26.60	0.04	3.29	101.44	49.77	—	0.10	12.43	0.48	222.96	—	

注：“—”表示未检测。

表 2 仁里矿床矿物样品杂质含量

Tab.2 Impuritie content in mineral samples in Renli deposit

样号	$\omega_{\text{B}}/10^{-6}$														$\omega(\text{SiO}_2)/\%$	
	Al	B	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Na	Ni	Ti		
101	30.16	0.43	3.04	—	0.05	—	4.71	/	1.02	1.97	0.09	6.18	0.04	4.91	99.992	
102	57.38	0.23	5.57	—	39.50	—	4.48	/	7.37	1.80	0.08	16.99	—	8.78	99.987	
H237	42.00	/	10.00	<1	<1	<1	126.00	17.00	<2	3.90	4.50	21.00	<1	<1	99.966	
平均值	43.18	0.33	6.20	0.33	13.52	0.33	45.06	/	3.46	2.56	1.56	14.72	0.35	4.90	99.982	

注：“—”表示未检出；“/”表示未检测。

10^{-6} ；Al 含量为 $(30.16 \sim 57.38) \times 10^{-6}$ ，平均含量为 43.18×10^{-6} ；Ti 含量为 $(1.00 \sim 8.78) \times 10^{-6}$ ，平均含量为 4.90×10^{-6} ； SiO_2 含量为 99.966% ~ 99.992%，平均含量为 99.982%。

4 高纯石英原料矿资源评价

4.1 仁里矿床高纯石英原料矿质量评价

张晔等^[7]在美国 Spruce Pine 地区、新疆库卫和青河地区采集了 7 件伟晶岩样和 9 件石英矿物样,从成矿地质条件、成岩成矿年代、伟晶岩形成温度、矿物学及包裹体特征、矿物中的杂质元素等方面,将新疆的样品与 Spruce Pine 地区伟晶岩进行对比研究。后续众多学者^[2, 23, 25-26, 30-31]以此为依据开展了对比研究,取得了较好效果。然而,Spruce Pine 地区伟晶岩中的样品数据相对较少,此方法是否适用于其他地区还有待验证。

根据《DZ/T 0467—2024 高纯石英用硅质原料评价工作指南》^[32],综合样品的手标本特征、

石英矿物特征、石英中包裹体特征和类型、石英中杂质赋存状态及含量,可以判断样品所代表的矿石能否成为潜力原料。一般标准为：①伟晶岩中的石英矿物呈无色,透明 - 半透明,表面干净,晶粒完整,黑云母和白云母等暗色矿物含量较低；②显微镜下石英矿物颗粒表面光滑,透明度高,矿物构造裂隙少,微细粒矿物包裹体极少,石英解离度较好；③当石英包裹体以矿物包裹体、气液两相包裹体为主(超过总数的 50%),且视域内所有包裹体面积比例大于 10% 时,通常很难被加工成高纯石英；④当石英中的包裹体以微细粒包裹体为主(直径小于 10 μm 的个体超过总数的 50%),且视域内所有包裹体面积比例大于 5% 时,通常很难被加工成高纯石英；⑤石英矿物中杂质元素 $\omega(\text{Al}) \leq 50 \times 10^{-6}$, $\omega(\text{Ti}) \leq 15 \times 10^{-6}$ 。

区内伟晶岩矿物样品中石英矿物具有较好的透明度和较高的纯度(SiO_2 平均含量为 99.982%),杂质元素含量较少。包裹体类型为气液两相包裹体,气体体积分数变化范围较集中,一般不大于 20%。

50%的石英颗粒内无流体包裹体,包裹体颜色明亮,个体形态差异较大,多数包裹体个体直径小于4 μm,视域内包裹体面积比例少于5%。符合《DZ/T 0467—2024 高纯石英硅质原料评价工作指南》^[32]要求,具备制备高纯石英硅质原料的潜力。

国际公认的高纯石英砂标准为 Al、K、Na、Li、Ca、Fe、Mg、Mn、Ti、Zr、Cu、Cr、Ni、P 及 B 共 15 种元素杂质总量小于 22.26×10^{-6} ^[7],美国尤尼明(现砂比科)公司的 IOTA – CG 标准以 Al、K、Na、Li、Ca、

Mg、Fe、Mn、Cu、Cr、Ni、B 共 12 种杂质元素总量小于 20×10^{-6} 为标准,其中碱金属(K、Na、Li)均小于 1×10^{-6} ^[33]。

2024 年,在仁里周边地区(距原仁里铌钽矿区以东 470 m,D04 号采样点,位置见图 1)采集 2.0 t 脉石英品,送国家石材质量监督检测中心进行选矿 – 提纯试验,得到的高纯石英产品中 SiO₂ 含量为 99.998 0%,14 种杂质元素总量为 19.78×10^{-6} (表 3),达到了国际标准。

表 3 D05 点位高纯石英砂主要杂质元素含量
Tab.3 Content of main impurity elements in high – purity quartz sand in D05 sampling location

$\omega_B/10^{-6}$														$\omega(\text{SiO}_2)$	
Al	B	Ca	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Na	Ni	P	Ti	总量	/%
15.39	0.01	0.34	0.02	0.03	0.83	0.22	0.35	0.18	0.1	0.68	0.02	0.36	1.25	19.78	99.998

仁里周边地区的脉石英与伟晶岩均产于幕阜山岩体内、外接触带,具有相同的成矿地质条件和相似的岩相学、矿物学特征。仁里钽铌矿区伟晶岩中石英的 SiO₂ 含量高于周边地区的脉石英,而 Al、Fe 和 Mg 等杂质含量显著低于周边地区(表 1)。因此,仁里钽铌矿区内伟晶岩中的石英更具有生产 4N8 级及以上高纯石英产品的潜力。

张海啟等^[2]采用阿尔泰地区的伟晶岩,经“磨矿制砂—重选—磁选—浮选—物理深度除杂”工艺,其石英初级产品 SiO₂ 含量为 99.97%,Al、Ca、Fe 等 15 种杂质元素总量为 233.83×10^{-6} ,其中 Al 含量为 101.44×10^{-6} 。经过“一段混合酸浸—煅烧水淬—二段混合酸浸”的化学深度除杂工艺,15 种杂质元素总量为 23.35×10^{-6} ,其中 Al 含量为 13.23×10^{-6} ,Ti 含量为 3.07×10^{-6} 。经工艺优化,制备出 SiO₂ 含量为 99.998 3%的高纯石英砂,15 种杂质元素总量为 16.31×10^{-6} ,其中 Al 含量为 11.41×10^{-6} ,Ti 含量为 3.07×10^{-6} 。

黄建中等^[34]对仁里矿床钽铌矿石进行了选矿工艺流程研究,通过回收尾矿得到石英粉中的 SiO₂ 含量为 98.51%,Al、K、Na 等 7 种有害元素总量为 $5\,690.30 \times 10^{-6}$ 。石英粉经过“物理深度除杂—化学深度除杂”工艺,有望获得 4N8 级及以上($\omega(\text{SiO}_2) \geq 99.998\%$)优质石英砂。

仁里矿床伟晶岩中规模较大的脉体(如 5 号伟晶岩脉)主要分布于岩体外接触带的片岩地层中,呈似层状产出,密集分布^[11],开采方式以坑采为主,矿山开采技术条件属中等 – 简单类型^[11]。

仁里矿床除钽铌矿资源丰富外,还发育丰富的白云母、长石、石英等非金属矿产资源^[11, 22]。伟晶岩可分为含矿(钽铌钽矿)伟晶岩和不含矿伟晶岩,这些伟晶岩中黑云母等暗色矿物较少,石英呈透明 – 半透明,以粒状、结晶 – 半结晶、块状分布于伟晶岩中。块状石英一般以透镜体形态存在,这些石英透镜体是优良的高纯石英原料,可直接作为高纯石英原料矿,含矿伟晶岩和不含矿伟晶岩则可以通过“长石石英尾矿分离工艺—物理深度除杂工艺”获得高纯石英原料矿。

综上,区内伟晶岩中的石英具有获取 4N8 级及以上高纯石英原料矿的资源潜力。

4.2 高纯石英原料矿资源量预测

计算精矿产率的公式为

$$\gamma = Q_{\text{精矿}} \div Q_{\text{原矿}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:γ 为精矿产率,%; $Q_{\text{精矿}}$ 为精矿资源量,t; $Q_{\text{原矿}}$ 为原矿资源量,t。根据黄健中等^[34]在选矿实验中得到的石英初级产品的精矿产率为 16.12%,结合 2 号、3 号、5 号和 6 号伟晶岩脉中的伟晶岩矿石量为 24 700 万 t,计算 2 号、3 号、5 号和 6 号伟晶岩脉的精矿资源量 $Q_{\text{精矿}} = 24\,700 \text{ 万 t} \times 16.12\% = 3\,982 \text{ 万 t}$,按照 0.6 的可靠系数预测,这 4 条伟晶岩脉的高纯石英原料矿资源量可达 2 389 万 t。区内伟晶岩脉众多(44 条)^[11],其余 40 条规模较小脉体的资源量按 1/3 推测,高纯石英原料矿可达 796 万 t。

综合主要伟晶岩脉和较小脉体的资源量,整个仁里矿床高纯石英原料矿的潜在资源量超过 3 000 万 t。

5 结论

(1)仁里矿区伟晶岩中石英矿物呈透明—半透明,全岩样品的 SiO_2 平均含量为 99.92%,Ni、Fe、Cr 等 13 种杂质元素总量的平均值为 335.19×10^{-6} ,其中 Al 的平均含量为 203.33×10^{-6} 。矿物样品的 SiO_2 平均含量为 99.982%,Al、B、Ca 等 14 种杂质元素总量的平均值为 110.06×10^{-6} ,Al 平均含量为 43.18×10^{-6} ,Ti 平均含量为 4.90×10^{-6} 。

(2)石英颗粒大小不等,有一定的拉伸变形,颗粒表面通透性好,50% 的颗粒内未见流体包裹体,包裹体类型为气液两相的 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 型包裹体。包裹体形状各异,颜色明亮,个体形态差异较大,多数包裹体直径小于 $4 \mu\text{m}$,最小个体直径不足 $1 \mu\text{m}$,最大个体直径超过 $32 \mu\text{m}$ 。气体体积分数变化范围较集中,多为 1%~20%,个别达 30%,视域内包裹体面积比例少于 5%。

(3)区内高纯石英原料矿具有优良的禀赋条件,是优良的高纯石英硅质原料,加强选矿—提纯工艺研究有望获取 4N8 级及以上高纯石英产品,仁里矿床高纯石英原料矿的潜在资源量超过 3 000 万 t。

致谢: 本文得到了中国冶金地质总局中南局中心实验室的大力支持,审稿专家对本文修改提出了建设性意见,在此一并表示感谢!

参考文献 (References):

- [1] 王九一. 全球高纯石英原料矿的资源分布与开发现状[J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40(1): 131–141.
Wang J Y. Global high purity quartz deposits; Resources distribution and exploitation status[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2021, 40(1): 131–141.
- [2] 张海敏, 谭秀民, 马亚梦, 等. 新疆阿尔泰伟晶岩型高纯石英矿床地质特征及 4N8 级产品制备技术[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(5): 1–7.
Zhang H Q, Tan X M, Ma Y M, et al. Geological characteristics of pegmatite-type high purity quartz in Altay, Xinjiang and preparation technology of 4N8 grade products[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(5): 1–7.
- [3] 张海敏, 张亮, 刘磊, 等. 全球高纯石英资源开发利用现状及供需分析[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(5): 49–54.
Zhang H Q, Zhang L, Liu L, et al. Development, utilization, supply and demand of global high purity quartz resources: a systematic review and meta-analysis[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(5): 49–54.
- [4] Müller A, Ihlen P M, Wanvik J E, et al. High-purity quartz mineralisation in Kyanite Quartzites, Norway[J]. Mineralium Deposita, 2007, 42(5): 523–535.
- [5] 焦丽香. 我国脉石英资源开发利用现状及供需分析[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2019(2): 11–14.
Jiao L X. Current situation and supply demand analysis of the development and utilization of vein quartz resources in China[J]. China Non-Metallic Minerals Industry, 2019(2): 11–14.
- [6] Swanson S E, Veal W B. Mineralogy and petrogenesis of pegmatites in the Spruce Pine District, North Carolina, USA[J]. Journal of Geosciences, 2010, 55(1): 27–42.
- [7] 张晔, 陈培荣. 美国 Spruce Pine 与新疆阿尔泰地区高纯石英伟晶岩的对比研究[J]. 高校地质学报, 2010, 16(4): 426–435.
Zhang Y, Chen P R. Characteristics of granitic pegmatite with high-purity quartz in Spruce Pine Region, USA and Altay region of Xinjiang, China[J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(4): 426–435.
- [8] 赵维佳. 我国高纯石英产业现状及资源保障分析[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2023(1): 11–13, 27.
Zhao W J. Analysis on the current situation of high-purity quartz industry and its resource guarantee in China[J]. China Non-Metallic Minerals Industry, 2023(1): 11–13, 27.
- [9] 周芳春, 陈虎, 李鹏, 等. 幕阜山地区稀有金属矿勘查工作进展及成矿预测[J]. 中国地质调查, 2022, 9(3): 32–39.
Zhou F C, Chen H, Li P, et al. Exploration progress and metallogenetic prediction of rare metal deposits in Mufushan area[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(3): 32–39.
- [10] 杨世珍, 周芳春, 李建斌, 等. 湖南仁里超大型钽铌矿床工作进展及找矿思路[J]. 中国地质调查, 2020, 7(4): 28–36.
Yang S Z, Zhou F C, Li J B, et al. Prospecting ideas and research progress of extra-large Ta-Nb deposit in Renli of Hunan Province[J]. Geological Survey of China, 2020, 7(4): 28–36.
- [11] 周芳春, 黄志彪, 陈虎, 等. 湖南省平江县仁里矿区钽铌多金属矿普查报告[R]. 长沙: 湖南省核工业地质局三一一大队, 2021: 1–169.
Zhou F C, Huang Z B, Chen H, et al. Survey Report of Nb-Ta Poymetallic Deposit in Renli Mining Area, Pingjiang County, Hunan Province[R]. Changsha: 311 Brigade of Hunan Nuclear Geological Bureau, 2021: 1–169.
- [12] 杨岳清, 王登红, 孙艳, 等. 矿产资源研究所“三稀”矿产研究与找矿实践 70 年历程——回顾与启示[J]. 矿床地质, 2021, 40(4): 655–692.
Yang Y Q, Wang D H, Sun Y, et al. Review on research and exploration of the 3R mineral resources during the past 70 years by Institute of Mineral Resources [J]. Mineral Deposits, 2021, 40(4): 655–692.
- [13] 刘翔, 周芳春, 李鹏, 等. 湖南仁里稀有金属矿田地地质特征、成矿时代及其找矿意义[J]. 矿床地质, 2019, 38(4): 771–791.
Liu X, Zhou F C, Li P, et al. Geological characteristics and metallogenic age of Renli rare metal orefield in Hunan and its prospec-

- ting significance[J]. *Mineral Deposits*, 2019, 38(4): 771–791.
- [14] 周芳春, 李建康, 刘翔, 等. 湖南仁里钽铌矿床矿体地球化学特征及其成因意义[J]. *地质学报*, 2019, 93(6): 1392–1404.
Zhou F C, Li J K, Liu X, et al. Geochemical characteristics and genetic significance of ore bodies in Renli Nb–Ta deposit, Hunan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6): 1392–1404.
- [15] 李建康, 李鹏, 黄志彪, 等. 湘北仁里伟晶岩型稀有金属矿田的地质特征及成矿机制概述[J]. *地学前缘*, 2023, 30(5): 1–25.
Li J K, Li P, Huang Z B, et al. Geological features and formation mechanism of pegmatite–type rare–metal deposits in the Renli orefield, northern Hunan, China – an overview[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(5): 1–25.
- [16] 李鹏, 刘翔, 李建康, 等. 湘东北仁里—传梓源矿床5号伟晶岩岩相学、地球化学特征及成矿时代[J]. *地质学报*, 2019, 93(6): 1374–1391.
Li P, Liu X, Li J K, et al. Petrographic and geochemical characteristics of Renli–Chuanziyuan No. 5 pegmatite, NE Hunan, and its metallogenic age [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6): 1374–1391.
- [17] 周芳春, 黄志彪, 刘翔, 等. 湖南仁里钽铌矿床辉钼矿 Re–Os 同位素年龄及其地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2020, 44(3): 476–485.
Zhou F C, Huang Z B, Liu X, et al. Re–Os dating of Molybdenite from the Renli Nb–Ta deposit, Hunan Province, and its geological significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2020, 44(3): 476–485.
- [18] 周芳春, 李鹏, 刘翔, 等. 湖南仁里稀有金属矿床岩相学和矿物学特征及其地质意义: 以5号脉 ZK708 号钻孔为例[J]. *矿床地质*, 2021, 40(4): 753–775.
Zhou F C, Li P, Liu X, et al. Petrographic and mineralogical characteristics of Renli rare metal deposit in Hunan Province and their geological implications: A case study of drill hole ZK708 of the No. 5 vein[J]. *Mineral Deposits*, 2021, 40(4): 753–775.
- [19] Li J K, Liu C Y, Liu X, et al. Tantalum and niobium mineralization from F– and Cl–rich fluid in the lepidolite–rich pegmatite from the Renli deposit in Northern Hunan, China: Constraints of fluid inclusions and lepidolite crystallization experiments[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 115: 103187.
- [20] 刘聪宇. 幕阜山地区仁里矿床成矿流体特征及成矿温压条件研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019: 1–53.
Liu C Y. Study on Fluid Characteristics and Metallogenic Temperature and Pressure Conditions of Renli Deposit in Mufushan Area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019: 1–53.
- [21] 周芳春, 苏俊男, 李建康, 等. 湖南仁里钽铌铍稀有金属矿床综合利用评价[J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(2): 112–118.
Zhou F C, Su J N, Li J K, et al. Comprehensive utilization evaluation of Tantalum–niobium–beryllium rare metal deposits in Renli Deposit, Hunan Province[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020, 40(2): 112–118.
- [22] 周芳春, 苏俊男, 陈虎, 等. 湖南省平江县仁里钽铌矿区钽铌绿柱石长石云母等矿产综合利用评价报告[R]. 湖南省核工业地质局三一大队, 2019: 1–66.
Zhou F C, Su J N, Chen H, et al. Comprehensive Utilization Evaluation Report of Niobium Tantalum Beryl, Feldspar, Mica and Other Minerals in Renli Niobium Tantalum Mining Area, Pingjiang County, Hunan Province[R]. No. 311 Geological Party of Hunan Nuclear Geological Bureau, 2019: 1–66.
- [23] 张海敏, 朱黎宽, 赵海波, 等. 河南卢氏龙泉坪伟晶岩型高纯石英矿床的首次发现及找矿意义[J]. *矿产保护与利用*, 2022, 42(4): 153–158.
Zhang H Q, Zhu L K, Zhao H B, et al. First discovery of the Longquanping pegmatitic high–purity quartz deposit in the area of Lushi, Henan: Implications for exploration [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(4): 153–158.
- [24] 刘广学, 马亚梦, 刘磊, 等. 新疆阿尔泰地区某花岗伟晶岩型石英深度除杂技术研究[J]. *矿产保护与利用*, 2022, 42(5): 8–14.
Liu G X, Ma Y M, Liu L, et al. Study on deep impurity removal technology of a granite pegmatite–type high–purity quartz in Altay region of Xinjiang[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(5): 8–14.
- [25] 赵金洲, 张驰, 张森森, 等. 东秦岭花岗伟晶岩中高纯石英矿物的可利用性研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2022, 41(6): 1305–1308.
Zhao J Z, Zhang C, Zhang S S, et al. Study on the availability of high purity quartz mineral in Granite Pegmatite of East Qinling[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2022, 41(6): 1305–1308.
- [26] 赵海波, 王红杰, 张勇, 等. 东秦岭伟晶岩型高纯石英矿地球化学、锆石 U–Pb 及 Hf 同位素研究: 对高纯石英找矿方向的探讨[J]. *中国地质*, 2024, 51(1): 42–56.
Zhao H B, Wang H J, Zhang Y, et al. Geochemistry, zircon U–Pb and Hf Isotopes of the high–purity pegmatite–quartz deposits in the Eastern Qinling and discussion on its prospecting direction[J]. *Geology in China*, 2024, 51(1): 42–56.
- [27] 全国工业陶瓷标准化技术委员会功能陶瓷技术委员会. JC/T 2027—2010 高纯石英中杂质含量的测定方法电感耦合等离子体原子发射光谱法[S]. 2010.
Functional Ceramics Subcommittee of the National Technical Committee on Industrial Ceramics of Standardization Administration of China. JC/T 2027—2010 Determination of Impurities in High Purity Quartz – Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry[S]. 2010.
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 32649—2016 光伏用高纯石英砂[S]. 中国标准出版社, 2016, 1–4.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China and Standardization Administration of China. GB/T 32649—2016 High Purity Amorphous Quartz Used in Photo–Voltaic Application[S]. Standards Press of China, 2016, 1–4.
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 3284—2015 石英玻璃化学成分分析方法[S]. 中国标准出版社, 2016, 1–18.

- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China and Standardization Administration of China. GB/T 3284—2015 Analytical Method of the Chemical Composition in the Quartz Glass [S]. Standards Press of China, 2016, 1–18.
- [30] 唐春花, 张生辉, 袁晶, 等. 江西宁都白云母伟晶花岗岩型高纯石英用硅质原料矿床特征与资源潜力 [J]. 地质通报, 2024, 43 (5): 667–679.
- Tang C H, Zhang S H, Yuan J, et al. Deposit characteristics and potential resources of silicon material for high – purity quartz of muscovite – pegmatite – granite type in Ningdu, Jiangxi Province [J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43 (5): 667–679.
- [31] 袁晶, 唐春花, 周渝, 等. 江西崇阴花岗伟晶岩型高纯石英原料杂质元素含量特征研究及评价方法探讨 [J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2024, 47 (1): 34–44.
- Yuan J, Tang C H, Zhou Y, et al. Content characteristics of impurity elements analysis and evaluation method discussion of high – purity quartz raw material of the granite pegmatite type in Tangyin, Jiangxi Province [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2024, 47 (1): 34–44.
- [32] 中华人民共和国自然资源部. DZ/T 0467—2024 高纯石英硅质原料评价工作指南 [S]. 地质出版社, 2024, 1–8.
- Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. DZ/T 0467—2024 Guideline for the Evaluation of Siliceous Material for High – purity Quartz [S]. Geological Publishing House, 2024, 1–8.
- [33] 张海啟, 张亮, 刘磊, 等. 全球高纯石英资源开发利用现状及供需分析 [J]. 矿产保护与利用, 2022, 42 (5): 49–54.
- Zhang H Q, Zhang L, Liu L, et al. Development, utilization, supply and demand of global high purity quartz resources: A systematic review and meta – analysis [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42 (5): 49–54.
- [34] 黄建中, 文春华, 成永生, 等. 湖南省锂铌钽等稀有金属资源高效勘查与开发科技报告 [R]. 湖南省地质调查所, 2022: 1–452.
- Huang J Z, Wen C H, Cheng Y S, et al. Efficient Exploration and Development Technology Report on Rare Metal Resources such as Lithium, Niobium, and Tantalum in Hunan Province [R]. Hunan Institute of Geological Survey, 2022: 1–452.

Resource evaluation of high – purity quartz raw material minerals in Renli deposit of Hunan Province

CHEN Hu, ZHOU Fangchun, LIU Qingqi, WANG Xuanmin, ZENG Le, SU Feng
(Hunan Institute of Geological Disaster Investigation and Monitoring, Changsha Hunan 410029, China)

Abstract: Renli deposit in Hunan Province is the richest and largest super – large pegmatitic tantalum deposit since the foundation of China. And it is rich in rare metal minerals such as tantalum niobium, beryllium and high – purity quartz raw material mineral resources. To understand the quality of pegmatite type high – purity quartz raw materials in this area and provide references for the comprehensive development and utilization of the mine, the authors in this paper carried out a study on the characteristics of quartz raw minerals, inclusions and impurity content in pegmatite, as well as a comparative study with vein quartz in adjacent areas. The results show that the quartz minerals in pegmatite in this area are transparent to semi – transparent, with an average SiO_2 content of 99.982%, and the total content of 14 impurity elements such as Al, B, Ca is 110.06×10^{-6} on average in mineral samples. The average content of Al is 43.18×10^{-6} , and the average content of Ti is 4.90×10^{-6} . Under the microscope, the size of quartz grains are different with certain tensile deformation, and the surface permeability is good. Fifty percent of the grains have no fluid inclusions, and the inclusion type is $\text{H}_2\text{O} - \text{NaCl}$ type with gas and liquid phases. The inclusions have various shapes, bright colors, and large individual morphological differences. The diameter of most of the inclusions is less than $4 \mu\text{m}$, with the smallest individual being less than $1 \mu\text{m}$ and largest individual of being more than $32 \mu\text{m}$. The area ratio of inclusions in the field of view is less than 5%. The high – purity quartz raw materials in this area have excellent endowment conditions and are excellent high – purity quartz raw materials. It is predicted that the potential resources of high – purity quartz raw materials in Renli deposit exceed 3 000 wt. with reinforcement of research on beneficiation and purification processes, it is expected to obtain high – purity quartz products of 4N8 and above. This research could provide references for the construction of high – purity quartz industry base in Pingjiang County and the development of high – purity quartz industry in the northeastern Hunan Province.

Keywords: pegmatite type high – purity quartz raw material ore; resource evaluation; resource prediction; Renli deposit; Hunan Province

(责任编辑: 魏昊明)