

黄竺, 杨经绥, 朱永旺, 等. 内蒙古贺根山蛇绿岩的铬铁矿中发现金刚石等深部地幔矿物[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1493–1514.
Huang Zhu, Yang Jingsui, Zhu Yongwang, et al. The discovery of diamonds and deep mantle minerals in chromitites of Hegenshan ophiolite, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2015, 42(5): 1493–1514(in Chinese with English abstract).

内蒙古贺根山蛇绿岩的铬铁矿中 发现金刚石等深部地幔矿物

黄 竺^{1,2} 杨经绥¹ 朱永旺³ 熊发挥¹ 刘 钊⁴ 张仲明¹

(1. 大陆构造与动力学国家重点实验室地幔研究中心, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 内蒙古自治区第九地质矿产勘查开发院, 内蒙古 锡林浩特 026000; 4. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要:前人报道在西藏中生代和俄罗斯极地乌拉尔早古生代蛇绿岩地幔橄榄岩铬铁矿中发现了金刚石等深部地幔矿物, 认为需重新考虑铬铁矿浅部成因的传统认识。为了查明不同造山带蛇绿岩的铬铁矿中金刚石等深部矿物的分布规律和豆荚状铬铁矿的成因, 笔者开展了内蒙古贺根山晚古生代蛇绿岩中的铬铁矿床的人工重砂矿物学研究, 本研究获得约 2000 kg 的内蒙古贺根山蛇绿岩铬铁矿石样品, 对所采样品开展人工重砂选矿, 表明该铬铁矿矿石样品中至少有金刚石、碳硅石及其他自然元素类、金属互化物类、氧化物类、硫化物类、硅酸盐类等 30 余种矿物。内蒙古一大兴安岭造山带晚古生代的内蒙古贺根山蛇绿岩带铬铁矿石中, 发现金刚石等深部地幔矿物表明, 贺根山铬铁矿可能为深部成因。

关键词: 金刚石; 深部地幔矿物; 铬铁矿; 贺根山; 内蒙古

中图分类号: P578.1¹⁶; P618.31.33 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657 (2015)05-1493-21

The discovery of diamonds and deep mantle minerals in chromitites of Hegenshan ophiolite, Inner Mongolia

HUANG Zhu^{1,2}, YANG Jing-sui¹, ZHU Yong-wang³,
XIONG Fa-hui¹, LIU Zhao⁴, ZHANG Zhong-ming¹

(1. CARMA, State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Inner Mongolia No. 9 Institute of Geology and Mineral Exploration and Development, Xilin Hot 026000, Inner Mongolia, China; 4. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Diamond and other deep mantle minerals, previously found in the Mesozoic Tibet and the early Paleozoic Polar Ural,

收稿日期: 2015-06-15; 改回日期: 2015-06-23

基金项目: 中国地质调查局 (12120114061801, 12120114061501) 和国家自然科学基金 (40930313) 联合资助。

作者简介: 黄竺, 女, 1988 年出生, 硕士, 研究方向为矿物学方向; E-mail: zzhuhuang@163.com。

通讯作者: 杨经绥, 男, 1950 年生, 研究员, 博士, 从事岩石学研究; E-mail: yangjsui@163.com, yangjsui@cags.ac.cn。

Russia, are now found in ophiolite mantle peridotite chromite. Hence the traditional opinion holding shallow origin of ophiolite and chromite should be reconsidered. In order to find out the distribution of diamond and other deep mantle minerals in different orogenic ophiolite chromites and to investigate the formation processes of the Hegenshan podiform chromitites, the authors carried out mineralogical study of chromitites in the Hegenshan ophiolite, Inner Mongolia. Approximately 2000 kg of mainly disseminated chromitite ore were collected from Hegenshan No. 3756 orebody. By mineral separation, preliminary studies identified more than 30 mineral species in addition to diamonds and moissanite. The other minerals include minerals of oxides, sulfides, silicates, and other compounds. This study demonstrates that the formation and tectonic setting of Hegenshan ophiolite and the chromitites deserve reevaluation.

Key words: diamond; deep mantle mineral; chromitite; Hegenshan; Inner Mongolia

About the first author: HUANG Zhu, female, born in 1988, master, mainly engages in the study of genetic mineralogy and prospecting mineralogy; E-mail: zzhuhuang@163.com.

About the corresponding author: YANG Jing-sui, male, born in 1950, professor, majors in the study of petrology; E-mail: yangjsui@163.com, yangjsui@cags.ac.cn.

1 引 言

铬铁矿是我国国民经济建设紧缺矿种,是发展冶金、国防、化工等工业不可缺少的矿产资源,主要用于冶金工业生产不锈钢及各种合金钢、合金,在玻璃、陶瓷、耐火材料等方面也有广泛用途。全国拥有铬铁矿矿区 53 个,其中西藏、新疆、内蒙古三省(区)是中国主要的拥有铬铁矿矿区省份。中国是铬铁矿消费大国,但由于铬铁矿储量少,产量低,使其成为短缺矿种,致使近几年每年消费量的 90% 以上依靠进口^[1]。要解决长期依赖国外进口的铬铁矿问题,改变中国铬铁矿短缺的局面,根本问题就是要探明铬铁矿的成因。

内蒙古自治区贺根山铬铁矿,其储量是超过 170 wt 的大型矿床。自 1954 年以来,针对于内蒙古自治区贺根山铬铁矿的成因问题,相继做了不少研究工作。鲍佩声等^[2]提出贺根山大、小型富铝型具工业价值的豆荚状铬铁矿属地幔熔融残余成因,这与那个时期豆荚状铬铁矿成因主流观点一致。而白文吉等^[3]用斜方辉石、单斜辉石作为地质温压计得出结论:工业铬铁矿的围岩方辉橄榄岩和铬铁矿床本身,形成于两种不同的温-压条件下。紧接着,白文吉等^[4]在内蒙古贺根山豆荚状铬铁矿矿石中发现固体包裹体矿物:橄榄石、斜方辉石、单斜辉石等,并且固体包裹体矿物与容矿岩石内的各种同类矿物化学成分不同,由此得出结论:铬铁矿矿石不是上地幔岩经局部熔融的产物,而铬铁矿浆源来自上地幔较深部位。1999 年,Robinson 等^[5]通过地球

化学测试,提出贺根山蛇绿岩中的地幔方辉辉橄岩是亏损的地幔残余物,而贺根山豆荚状铬铁矿形成于拉斑玄武质熔岩与其地幔橄榄岩围岩的熔体/岩石反应。

然而,呈扁豆状、透镜状、团块状及不规则状等产出的贺根山豆荚状铬铁矿的成因,离不开大的豆荚状铬铁矿成因问题探讨。世界上原生铬铁矿床产出主要包括两种基本类型:(1)产于 MOHO 以上堆晶岩中的层状(或似层状)铬铁矿,类似于 Thayer^[6]划分的层状火成杂岩中的铬铁矿;(2)和产于 MOHO 以下地幔橄榄岩中的豆荚状铬铁矿^[6-7],通常深度在 1 km 以下,贺根山铬铁矿就属于豆荚状铬铁矿。层状铬铁矿床目前普遍认为是典型的岩浆矿床,由侵位于地壳的玄武质岩浆经过火成堆积作用或结晶分异作用形成^[7-8]。但是豆荚状铬铁矿矿床的成因问题国际上却始终未达成一致。

20 世纪初及更早,学者们认为豆荚状铬铁矿是和层状铬铁矿一样的岩浆分异作用形成的,王恒升等^[9]认为,铬铁矿为铬尖晶石液态熔滴聚集成矿浆,矿浆与岩浆熔离并结晶形成;20 世纪 80 年代末期,王希斌^[10-11]提出了中国豆荚状铬铁矿床为高度熔融残余的观点,认为西藏罗布莎铬铁矿床经历了原始地幔岩高度熔融再造作用。关于豆荚状铬铁矿成因,目前流行的一种说法是岩石/熔体反应说:铬铁矿是岩石/熔体在地幔俯冲带之上(SSZ)低于 50 km 地幔深度反应的产物,且高铬型和富铝型铬铁矿分别形成于不同成分的母岩浆的结晶^[12-18]。但是,西藏罗布莎白垩纪蛇绿岩铬铁矿和俄罗斯极地乌拉

尔 Ray—Iz 蛇绿岩铬铁矿中,发现了金刚石及其伴随的一系列超高压、强还原矿物,这些矿物的发现表明,铬铁矿有可能形成于强还原环境的深部地幔^[19-29]。西藏罗布莎铬铁矿中发现呈针柱状交生在一起的柯石英和蓝晶石集合体,产在一个钛铁合金颗粒的边部^[23],表明了至少 2.8~4 GPa 的形成压力。在柯石英中还发现了氮化物 TiN 和 BN 的包裹体,两者的稳定压力区间甚至高达 40 GPa 和 60 GPa^[30-32]。虽然这些包裹体可能有如此高的稳定压力,但是并不能确定铬铁矿形成于同样的深度。Yamamoto 在 2009 年报道他们在罗布莎铬铁矿的一些铬铁矿矿物颗粒中发现了许多针状或柱状透辉石单斜辉石和柯石英出溶^[33],这指示超过 3 GPa 的超高压形成环境(>100 km 深度),并且表明,罗布莎铬铁矿是被地幔对流从深部地幔(至少 100 km 深度,可能深于 380 km)运移至大洋中脊浅部。随后,地幔橄榄岩及其内部铬铁矿经历部分熔融,铬铁矿大量结晶析出。这些出溶是西藏罗布莎蛇绿岩豆荚状铬铁矿来源于深部地幔的原位岩石学证据,并且是某些铬

铁矿形成于深部的有力证据。Yang 在 2014 年提出,含金刚石铬铁矿矿物颗粒可能形成于地幔转换带附近,然后被带到上地幔浅部,并且形成豆荚状铬铁矿^[34]。

为了查明贺根山豆荚状铬铁矿的成因问题,笔者开展了古亚洲褶皱带内蒙古晚古生代贺根山蛇绿岩中铬铁矿的人工重砂矿物学研究,并从中找到了金刚石等一系列深部地幔矿物。这是铬铁矿含深部矿物又一新的例证,论证了豆荚状铬铁矿的深部成因。

2 区域地质背景

内蒙古贺根山蛇绿岩处于天山—兴安褶皱区的内蒙一大兴安岭褶皱带,该带在内蒙古境内包括阿尔泰造山带和满洲里造山带。古亚洲褶皱带的东部,为北侧西伯利亚板块和南侧中朝板块的中间地带,居于乌兰浩特—哲斯大复背斜内的贺根山复背斜近轴部^[2,5,35-36],区域构造图见图 1。贺根山蛇绿岩位于内蒙古自治区锡林郭勒盟北部,锡林浩特市

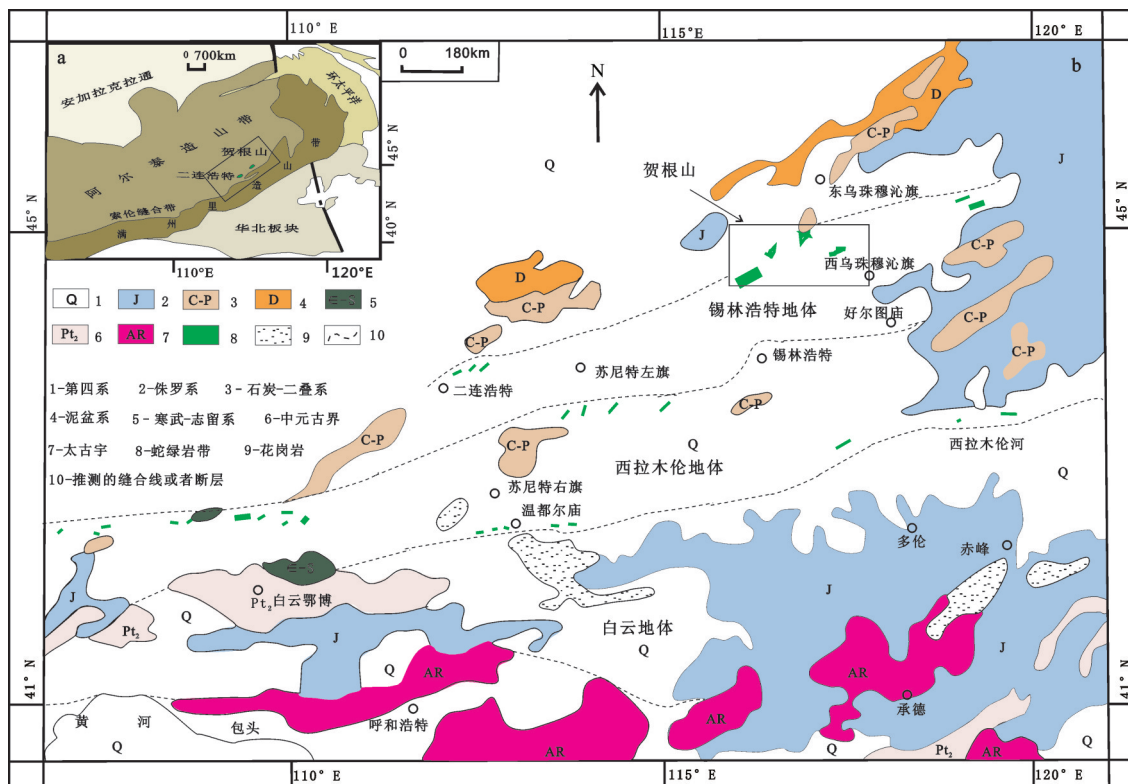


图1 内蒙古中段蛇绿岩分布略图(据[36,38]修改)

Fig.1 Simplified geological map showing the location of ophiolites in the collisional belt of Inner Mongolia (modified after references [36,38])

北约180 km的朝克乌拉苏木。在内蒙古境内,内蒙古一大兴安岭褶皱带相当宽广,并含多个由不同年龄蛇绿岩组成的地体^[37],这几个地体可划分成三个北东向展布地体,从南向北依次:元古宇白云地体、寒武纪到奥陶纪的西拉木伦地体和志留纪至石炭纪的锡林浩特地体,贺根山蛇绿岩就出露于北部锡林浩特地体。白文吉等^[3]根据贺根山蛇绿岩上部的放射虫硅质岩含 *Eatactinia* sp., *Tetrentactinia* sp. 化石,判断其为晚泥盆世产物。梁日暄^[38]根据放射虫化石 *Eatactinia* sp. 和 *Tetrentactinia* sp., 判断贺根山蛇绿岩为中—晚泥盆世;夹于玄武岩内的灰岩透镜体所含珊瑚化石 *Thamnopora* 和 *Favosites* sp., 判断其时代为中泥盆世;纯橄岩和方辉橄岩全岩 K-Ar 法年龄 346 Ma 和 380 Ma, 综合认为贺根山蛇绿岩形成于中泥盆世—早石炭世。包志伟等^[39]在贺根山超基性岩获得 Sm-Nd 等时线年龄 (403 ± 27) Ma。通过锆石的 SHRIMP 年龄和全岩地球化学, Jian et al. 在 2012 年得出结论:贺根山蛇绿岩的北部地区,由微辉长岩和斜长花岗岩获得锆石,测得年龄为早石炭世(354~333 Ma),这一年龄反映了锆石(和岩浆)结晶的时间;贺根山蛇绿岩的南部地区,由伟晶岩相辉长岩和异剥钙榴岩获得的岩浆锆石,测得年龄为早白垩世(142~125 Ma);而从贺根山蛇绿岩锆石中

发现的捕虏晶年龄为 152~492 Ma^[40]。故目前我们认为贺根山蛇绿岩年龄为晚古生代。

贺根山、朝根山、乌斯尼黑和崇根山四个大的蛇绿岩块,和一些沿锡林浩特地体北界出露的小的超镁铁岩块组成了贺根山蛇绿岩带,已知工业铬铁矿床主要分布在贺根山蛇绿岩块中。据磁异常圈定,贺根山蛇绿岩带呈北东向,长 135 km,一般宽 15~20 km,最宽处达 40 km,总面积约 2158 km²。由于绝大部分被中生代、新生代地层覆盖,出露较差,但现代的大量探坑、探槽,地表出露面积已可达到 315 km²。其中产出具工业价值的铬铁矿矿床的贺根山蛇绿岩块,磁异常面积为 112 km²,工程揭露的岩体面积约为 46 km²,厚大的早白垩世砂砾岩、砂岩和泥岩等覆盖住了岩体的北、西、南面。未被覆盖的东部为晚石炭世阿木山组中酸性火山岩,见图 2^[41]。

贺根山地区出露的蛇绿岩层序比较完整,普遍蛇纹石化,以蛇纹石化方辉橄岩为主,并已查明有不少于 1600 个纯橄岩的扁豆体和透镜体,其中许多含有铬铁矿矿体。贺根山蛇绿岩块可分为三个部分,分别是:岩块中轴部位的方辉橄岩相,发育有大量纯橄岩、橄长岩和辉长岩脉,纯橄岩透镜体规模小,常分段集中,密集成群,成带出现,形成大型铬铁矿床如 3756 号矿床;出露于岩块西南和东北

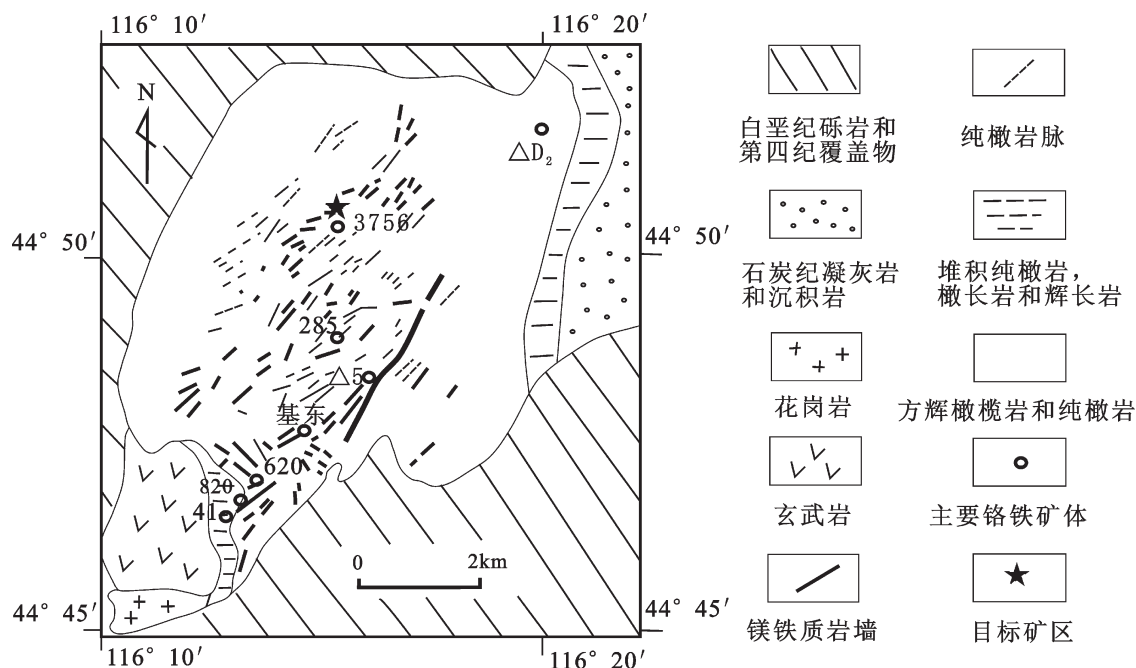


图2 贺根山蛇绿岩块地质略图

Fig.2 Simplified geological map of the Hegenshan block showing distribution of major lithologic units

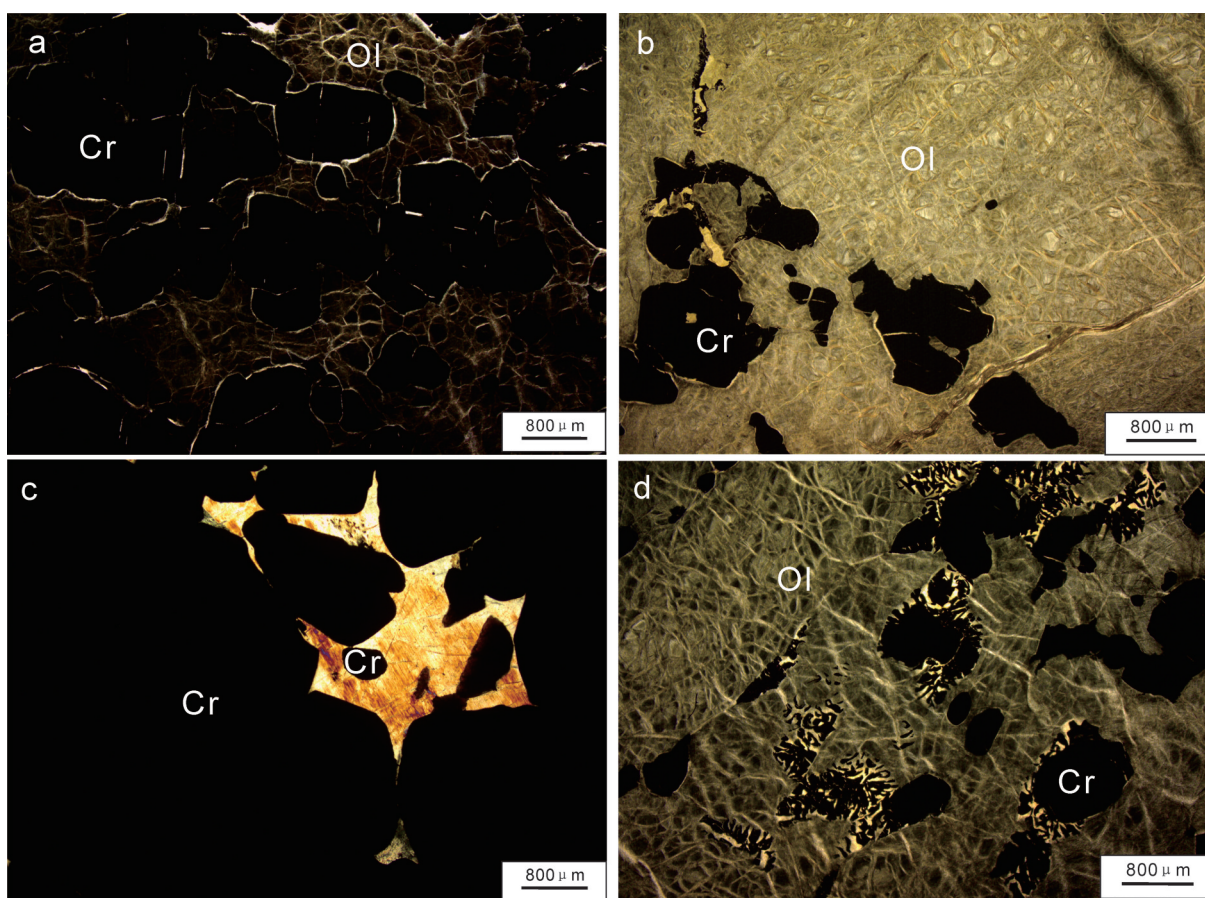


图3 内蒙古贺根山3756号矿床的铬铁矿矿石结构特征

a—b—细—中粒半自形粒状结构,因熔蚀作用使晶面呈浑圆状(单偏光);c—粗粒半自形—他形粒状结构,晶边以弧形为主,甚至出现港湾型凹陷(正交偏光);d—蠕虫结构,铬铁矿石中铬尖晶石常和硅酸盐矿物穿插生长,形成蠕虫状结构(单偏光);Ol—橄榄石;Cr—铬尖晶石

Fig. 3 Texture features of chromite ores from Hegenshan No. 3756 chromite deposit

a—b—Microphotographs showing fine to medium grained subhedral crystal texture and the round shape formed from corrosion (plainlight);

c—Microphotographs showing the arc-shaped crystal rims even with harbor-like concave (crossed nicols); d—Microphotographs showing chromite intergrowth with silicate minerals to form vermicular texture (plainlight); Ol—Olivine; Cr—Spinel

边缘,主要由纯橄岩、含长纯橄岩、橄长岩、辉长岩和少量斜长岩组成的堆晶岩,多呈条带状产出,剖面厚度可达400 m,产出具有工业价值的小型铬铁矿床;堆晶岩上部是薄的层状镁铁质熔岩和放射虫燧石、硬砂岩。

3 贺根山铬铁矿矿床地质特征

贺根山蛇绿岩块体铬铁矿化普遍,但分布不均,铬铁矿体主要赋存于蛇绿岩块中心方辉橄岩岩相内的纯橄岩透镜体中,或被薄层纯橄岩壳包围,以豆荚状产出为主,与围岩突变接触^[3-4]。已查明的矿床有3756号矿床、基东矿床、620号矿床、820号矿床、41

号矿床、B265号矿床、△15号矿床和△D₂号矿床等十余处,其中3756号矿床的规模最大,属大型矿床,其余均为小型矿床。现简要介绍有代表性的820号矿床、41号矿床、3756号矿床地质特征:

820号矿床位于贺根山岩体西南部堆晶岩相纯橄岩内,长约70 m,厚数厘米至2 m多,呈扁豆状、条带状,走向近南北,倾向东,倾角60°。矿石类型以细—中等稠密浸染状为主,矿石Cr₂O₃含量最高为34.55%,最低为16.03%,平均为27.80%。

41号铬铁矿床同样位于贺根山岩体西南部堆晶岩相,靠近820号矿床,由30多个小矿体组成。长22 m,宽大于50 m,单个矿体最厚达2.3 m,呈团

块状、扁豆状产于与820号矿床相邻的纯橄岩中,走向近南北,倾向东,倾角45°。矿石类型以致密块状和稠密浸染状为主,矿石 Cr_2O_3 含量最高为44.78%,最低为27.70%,平均为35.79%。

3756号矿床为贺根山岩体中规模最大矿床,也为本项研究的采样点。3756号矿床矿体产于蛇绿岩块中轴部方辉橄榄岩岩相的纯橄岩体内,矿床由180余个大小不等的矿体群组成,其中地表矿体仅20余个,其余全为盲矿体。矿体形态复杂,以扁豆状、透镜状为主,矿体外缘常有一层2~50 cm厚绿泥石薄壳,使铬铁矿体与外部纯橄岩分隔开。矿体总走向54°,倾向南东,倾角多较陡,为20°~70°,纯橄岩产状与矿体一致。矿床沿轴向断续延长最长830 m,面积约0.13 km²。造矿铬尖晶石为富铝铬尖晶石,即 $\text{Cr}^\#$ 值($\text{Cr}^\# = 100\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$)为20~60。矿石矿物以铬尖晶石为主,尘点状磁铁矿次之,脉石矿物以橄榄石和斜方辉石为主,但均遭受蚀变,绿泥石次之,方解石、橄榄石和高岭石等微量,伴随有少量单斜辉石出现。

贺根山3756号铬铁矿床矿石类型以细一中粒半自形粒状结构,中等浸染状构造为主。根据矿石中矿物的颗粒大小、自形程度及矿物颗粒间的相互关系,将3756号矿床的矿石结构划分为细一中粒半自形粒状结构、粗粒半自形-他形粒状结构、蠕虫结构、网状结构四种类型。构造类型,以中等浸染状为主(铬尖晶石含量30%~60%),稠密浸染状(铬尖晶石含量60%~80%)和致密块状(铬尖晶石含量大于80%)少量,也有斑杂状和豆状等构造。浸染状矿石中以细一中粒半自形粒状结构为主,铬尖晶石粒径为0.5~2.4 mm,部分铬尖晶石的晶面发育较完整,部分晶面发育不完全,或因熔蚀作用使晶面呈浑圆状(图3-a, b)。致密块状矿石中铬尖晶石以粗粒半自形-他形粒状结构为主,铬尖晶石粒径较粗,多大于5 mm,其中也不乏0.4~2 mm细粒铬尖晶石颗粒。部分铬尖晶石晶边平直,有些晶边以弧形为主,甚至出现港湾型凹陷(图3-c)。铬铁矿石中铬尖晶石常和硅酸盐矿物穿插生长,形成蠕虫状结构,这种结构在浸染状铬铁矿中更为常见,且浸染程度越低,蠕虫状生长越为彻底(图3-d)。在铬铁矿石中,蛇纹石沿橄榄石裂纹和边缘进行交代,网状结构极其发育(图3-d)。

4 贺根山铬铁矿矿床的围岩特征

贺根山蛇绿岩块中3756号矿床,地幔橄榄岩围岩90%以上由方辉橄榄岩组成,其余为少量纯橄岩和其他脉岩。地幔橄榄岩围岩都遭受了强烈的蛇纹石化,具有变质的构造组构。岩石矿物组成主要为橄榄石、斜方辉石、单斜辉石及少量铬尖晶石。

4.1 方辉橄榄岩

方辉橄榄岩是贺根山铬铁矿围岩的主体,并且多遭受蛇纹石化,具变质构造组构。造岩矿物由70%~80%的橄榄石、10%~30%的斜方辉石,以及不多于5%的单斜辉石和不多于1%的铬尖晶石。其中橄榄石大部分蚀变,但仍可辨别蚀变前的自形-半自形粒状结构。显微镜下可见橄榄石被蛇纹石蚀变后的网状结构(图4-a),为一颗大的粒度达4~8 mm橄榄石蚀变成许多小的橄榄石颗粒,粒度仅有100 μm,甚至更小,有的橄榄石完全蚀变。残余橄榄石表明干净,测得 F_o 为90.12~90.96,属镁橄榄石。斜方辉石也蚀变强烈,以蛇纹石化为主,蚀变后变成绢石(图4-b),蚀变前斜方辉石多呈半自形-他形粒状,蚀变后残余的斜方辉石粒度0.3~8 mm不等,裂纹发育、解理明显,可见波状消光(图4-c)和单斜辉石出溶(图4-d)。斜方辉石颗粒化学成分一致,属顽火辉石。单斜辉石在方辉橄榄岩中较少见,常以斜方辉石周围或者内部的出溶条带(图4-d, e)出现,化学成分恒定在一定区间内,En平均值为50,属透辉石。方辉橄榄岩中的副矿物主要为铬尖晶石,含量少于1%,且铬尖晶石蚀变后常析出尘点状磁铁矿,呈小的(0.05~1 mm)他形晶颗粒出现在方辉橄榄岩的硅酸盐矿物中,形成蠕虫状(图4-f)。铬尖晶石中铬值($100\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$)变化较大,为56.10~71.89,兼有富铝型和富铬型两种铬尖晶石。

4.2 纯橄岩

铬铁矿赋存于方辉橄榄岩中的纯橄岩内,纯橄岩是铬铁矿的近矿围岩,常呈扁豆装、透镜状分段、成群地产出在铬铁矿体周围。贺根山岩体内纯橄岩大小、规模不等,最长有长达400余米的大脉体,厚度变化范围从几米到十余米均有,总共有1600多个这样的扁豆体和透镜体与包裹的方辉橄榄岩渐变过渡,有时突变过渡,且接触界线明显。

扁豆状、透镜状纯橄岩蚀变强烈,几乎全部

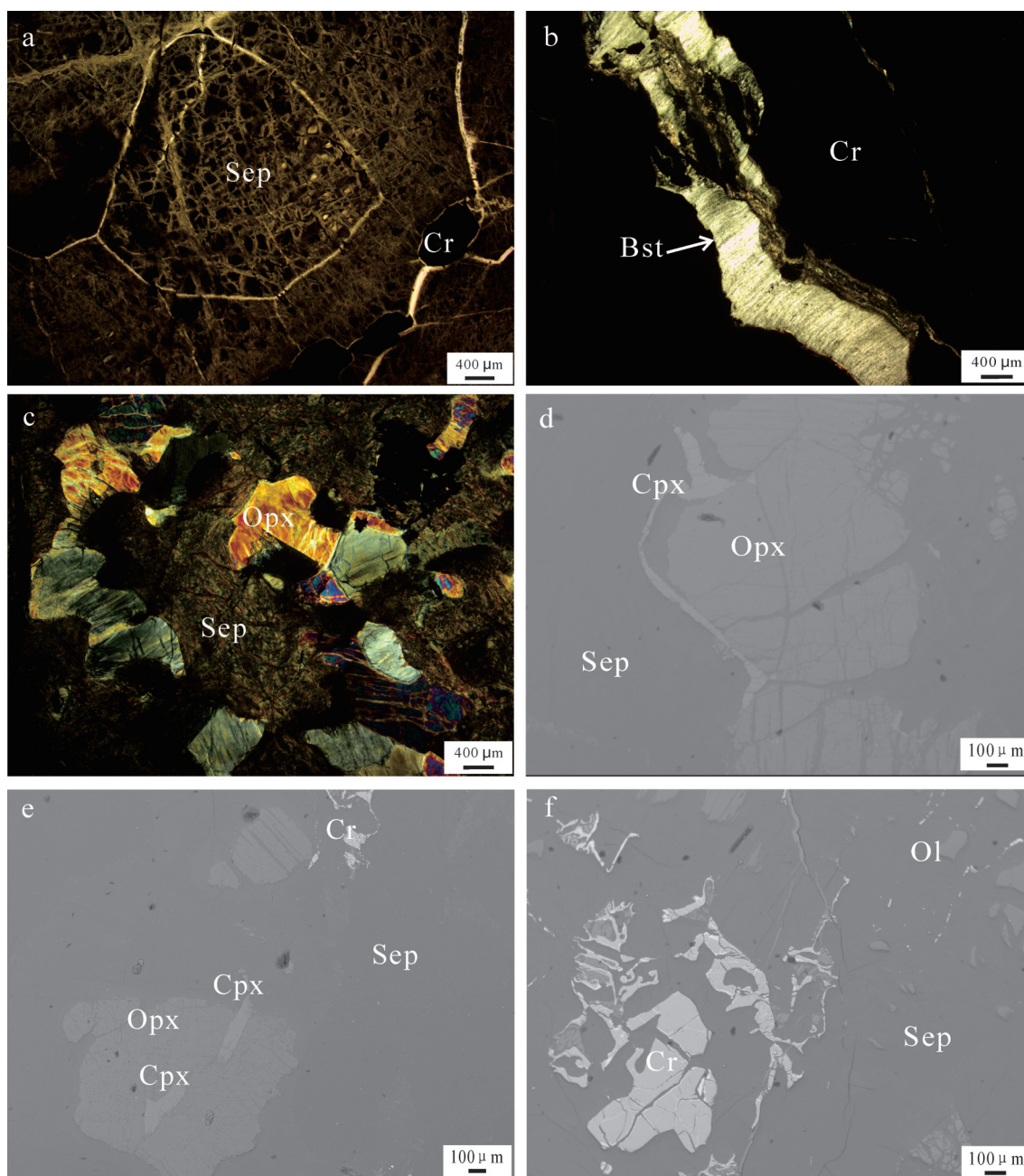


图4 贺根山蛇绿岩块的贺根山铬铁矿矿区方辉橄榄岩的显微照片

a—方辉橄榄岩的网状结构(正交偏光);b—方辉橄榄岩的斜方辉石蚀变成绢石(正交偏光);c—方辉橄榄岩残余的斜方辉石的裂纹及波状消光(正交偏光);d—方辉橄榄岩的斜方辉石边部单斜辉石出溶(背散射图);e—方辉橄榄岩的斜方辉石边部和内部单斜辉石出溶(背散射图);f—方辉橄榄岩的蠕虫状铬尖晶石(背散射图);Ol—橄榄石;Cpx—单斜辉石;Opx—斜方辉石;Sep—蛇纹石;Cr—铬尖晶石;Bst—绢石

Fig. 4 Microphotographs showing harzburgite in the Hegenshan ore district, Hegenshan ophiolite block

a—Microphotographs showing mesh texture (plainlight); b—Microphotographs showing bastite pseudomorphs of orthopyroxene (plainlight); c—Microphotographs showing cracks, cleavages and wavy extinction in orthopyroxene (cross nicols); d—BSE image showing exsolution lamellae of clinopyroxene in orthopyroxene (BSE image); e—BSE image showing clinopyroxenes occurring as exsolution in orthopyroxenes (BSE image); f—BSE image showing chromite forming vermicular texture (BSE image). Ol—Olivine; Cpx—Clinopyroxene; Opx—Orthopyroxene; Sep—Serpentine; Cr—Spinel; Bst—Bastite

蛇纹石化,偶见极少量橄榄石残晶。

5 样品采集和研究方法

本研究获得约2000 kg的铬铁矿石样品,样品采自内蒙古贺根山蛇绿岩岩块3756号铬铁矿床。主要为浸染状铬铁矿石,含少量致密块状铬铁矿石,新鲜程度中等,有较强蛇纹石化,对所采样品开展人工重砂选矿工作。人工重砂选矿工作在郑州矿产综合利用研究所完成,由于选矿过程必然会破坏矿物原本形态,故依据不同矿石粒度大小、磁性、比重、导电性等属性,用不同大小颚式破碎机进行分级破碎、用大小摇床进行分级重选,以及磁选、电选等方法分级选别,使目的矿物有效充分并尽可能保护矿物完整性地分离富集,故内蒙矿样重砂选矿试验流程为:棒磨机磨矿—弱磁选—强磁选—重选—磁选—电选—最终样品。具体选矿流程见图5。最终在双目镜下从选出精矿中仔细挑选出特殊矿物。为开展金刚石研究,将金刚石置于环氧树脂中,然后用磨砂纸进行粗磨、细磨,将矿物磨去一半,再用人造金刚石研磨膏抛光表面,之后用超声波清洗器清洗。此外,鉴定矿物过程中还运用激光拉曼测试、能谱成分分析测试。选矿过程中使用的仪器为:国土资源部大陆动力学重点实验室的上海光学仪器六厂出产的XTZ-CT型体视显微镜进行双目镜下挑选;英国RENISHAW公司的RM1000型激光拉曼光谱仪;运用英国牛津公司(OXFORD)INCA能谱仪进行矿物化学成分的普查和测定,电子束电压20 kV,焦距20 mm,软件包版本4.4,并配有日本电子公司(JEOL)JSM-5610LV型扫描电镜。

6 贺根山铬铁矿发现的深部地幔矿物

初步研究表明,贺根山铬铁矿石样品中至少含有30余种矿物,包括金刚石、自然铬、自然锰、自然铝、自然钙、自然铁自然元素类;碳硅石、Ni-Mn-Fe、Fe-Ni-Al、Ni-Mn-Co等金属互化物类;方铁矿、金红石、赤铁矿、锐钛矿、钛铁矿、磁铁矿、铬尖晶石、石英、锡石等氧化物类;黄铁矿、白铁矿、辉钼矿、方铅矿等硫化物类;镁橄榄石、顽火辉石、透辉石、普通辉石、锆石、蛇纹石、符山石、楣石、正长石、绿泥石、钙铬榴石和镁铝榴石等硅酸盐类;以及独

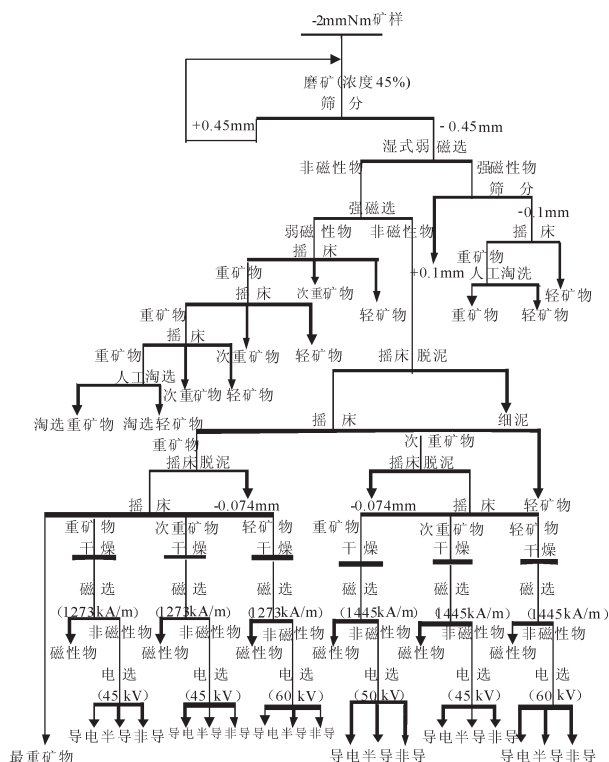


图5 内蒙古贺根山铬铁矿矿样重砂选矿试验全流程
Fig.5 Mineral separation processing of Hegenshan chromitites

居石、菱水碳铝镁石、钾盐、钙芒硝和水氯铁镁石等矿物。

6.1 自然元素矿物大类

内蒙古贺根山蛇绿岩铬铁矿石样品中目前已发现五种自然元素矿物,分别是金刚石、自然锰、自然钙、自然铝和自然铬,其中自然锰、自然钙呈包裹体产于金刚石中。

金刚石:从贺根山蛇绿岩铬铁矿中挑选出的金刚石,目前已有130余粒,晶形完好,多为自形八面体和立方八面体(图6-a, b, c),并有许多金刚石连晶(图6-c)。金刚石粒度在200~300 μm ,双目镜下为淡黄色,金刚光泽,断口油脂光泽,透明,扫描电镜发现金刚石有明显生长纹(图6-d)。经过拉曼光谱测试,贺根山铬铁矿的所有金刚石拉曼峰值都叠于1331~1333 cm^{-1} 位置(图6-e, f)。

通过将金刚石磨制成靶,进行包裹体研究,发现了7种包裹体,主要是金属互化物:Ni-Mn-Fe、Fe-Ni-Al、Ni-Mn-Co;自然元素矿物:Mn、Ca;氯化物KCl;氧化物FeO。金刚石中的包裹体在背散射图中金属互化物均为亮白色,粒度大小不一。在多粒

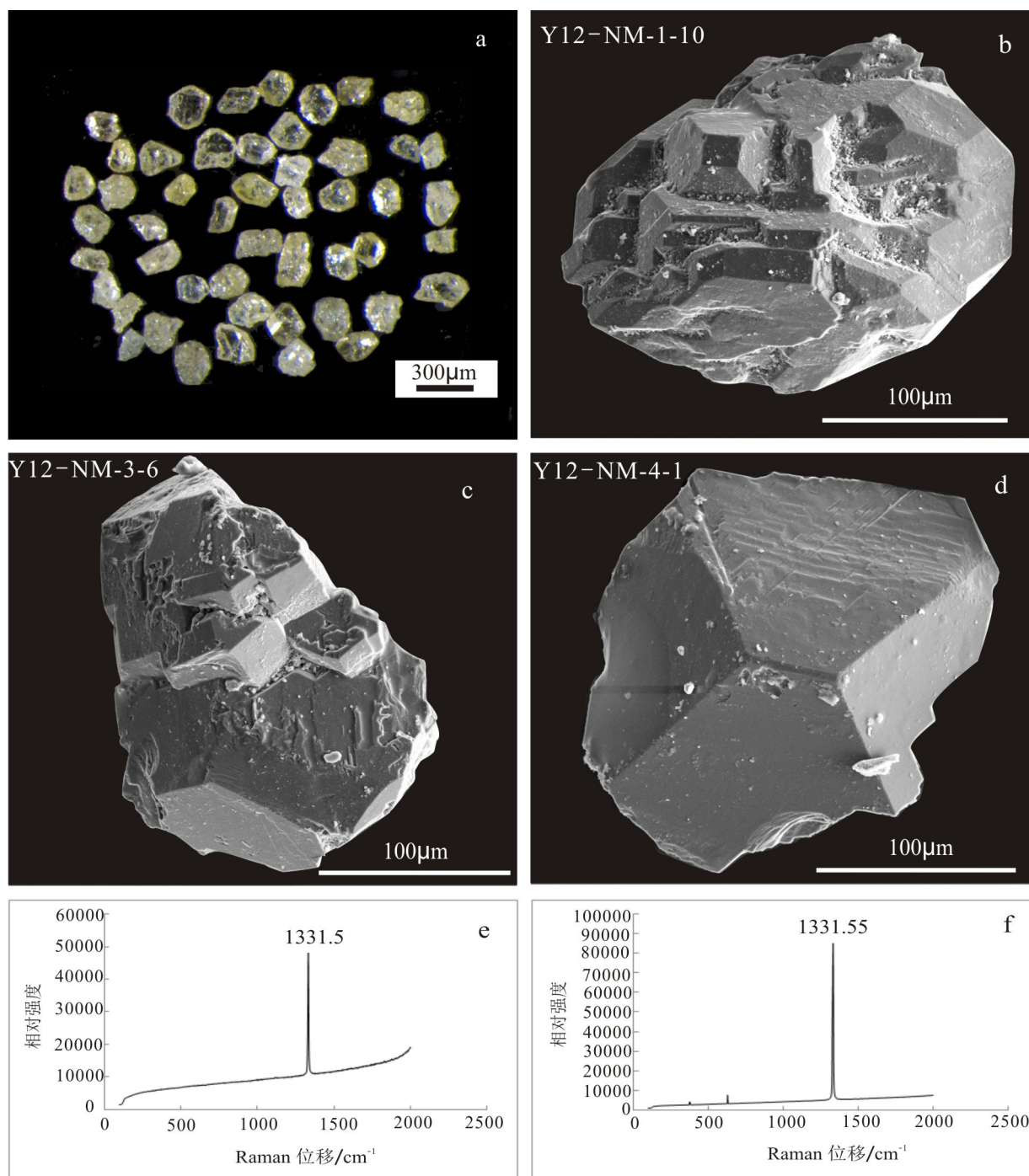


图6 贺根山铬铁矿中发现的金刚石照片及拉曼谱图

a—淡黄色、无色金刚石实体照片;b—立方八面体金刚石的二次电子图;c—八面体连晶金刚石的二次电子图;d—八面体金刚石的生长纹;e—f—金刚石的拉曼谱图

Fig. 6 Photomicrographs and Raman spectrograms of diamonds from the Hegenshan chromitites

a—Microphotograph showing abundant light yellow and colorless diamonds; b—Secondary electron image showing cubic octahedral diamond; c—Secondary electron image showing octahedral diamond; d—Secondary electron image showing striations on the surface of diamond; e—f—Raman spectrograms of diamonds

金刚石中发现自然 Mn, 长 3 μm , 宽 1 μm , 亮白(图 7-a, c), 自然 Ca 见图(图 7-b, d)。Ni-Mn-Fe 合金(图 8-a, c)、FeO 在同一粒金刚石中发现, 呈直径约为 2 μm 圆形, 亮白(图 8-b, d)。Fe-Ni-Al、石墨也在同一粒金刚石中发现, 其中石墨长 25 μm , 宽 8 μm , 背散射图中颜色比金刚石白, 呈片状突出于金刚石表面, 且含少量自然 Ta(图 8-e, g)。Fe-Ni-Al 长 3 μm , 宽 1 μm , 不规则形状, 亮白(图 8-f, h)。

自然铝: 本样品中挑选出的自然铝为粒状, 约 100 μm , 银白, 金属光泽。背散射图片见图 9-a, 能谱图见图 9-b。

自然铬: 本样品中挑选出的自然铬为粒状, 约 100 μm , 银白, 金属光泽。背散射图片见图 10-a, 能谱图见图 10-b。

自然铁: 在贺根山的双目镜下挑选过程中, 发现了许多球状, 铁灰色物质, 为了进行深入研究, 将这些球状物体挑选 122 粒制靶, 通过能谱成分测试,

发现其中 18 粒中间部分为自然铁(图 11-a, b, c)(部分含 Si 杂质), 边缘为不同比例的铁的氧化物, 有方铁矿 FeO(图 11-e)、FeO₂(图 11-f)、FeO₃(图 11-d)(部分含 Ti、Mn、Ca、Al、K 等杂质), 呈臂状或环状包围中间的自然铁。自然铁直径 100~1000 μm 不等, 形状多为球形, 少数为不规则球形。双目镜下为铁灰色, 金属光泽, 不透明, 背散射图下为亮白。在同一粒自然铁矿物中发现了不同比例的铁的氧化物, 其背散射、能谱图见图 11。

6.2 金属互化物

目前在贺根山铬铁矿样品中发现的金属互化物有碳硅石、Ni-Mn-Fe、Fe-Ni-Al、Ni-Mn-Co 等, 发现更多此类矿物还要进行下一步更多的实验。除碳硅石以单颗粒矿物出现外, 其他发现的合金主要存在于金刚石中, 现简要介绍碳硅石。

碳硅石: 已发现的碳硅石的颗粒有 60 余粒, 多为不规则碎屑状, 也发现有不规则长条状。粒度多

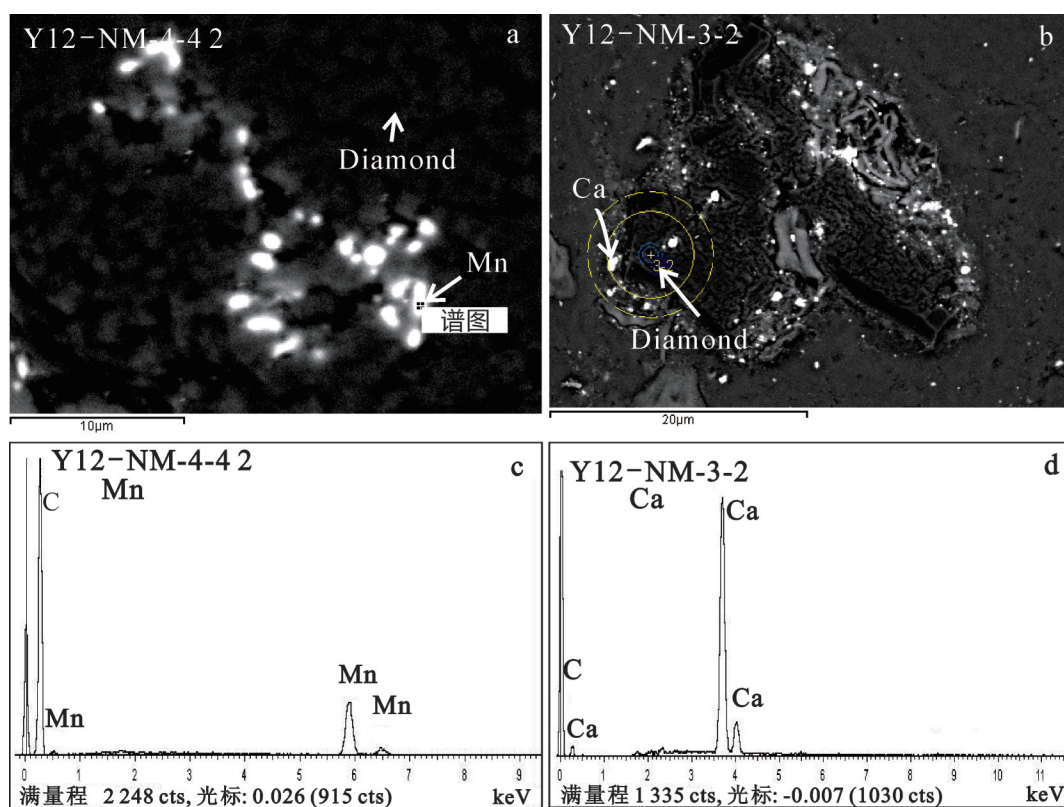


图7 贺根山铬铁矿中发现的金刚石及其包裹体

a—金刚石和自然 Mn 包裹体的背散射图; b—金刚石和自然 Ca 包裹体的背散射图; c—自然 Mn 能谱图; d—自然 Ca 能谱图

Fig.7 Diamonds and their inclusions recovered from the Hegenshan chromitites

a—BSE image showing native Mn; b—BSE image showing native Ca; c—Energy spectrum of native Mn inclusion in diamond in a; d—Energy spectrum of native Ca inclusion in diamond in b

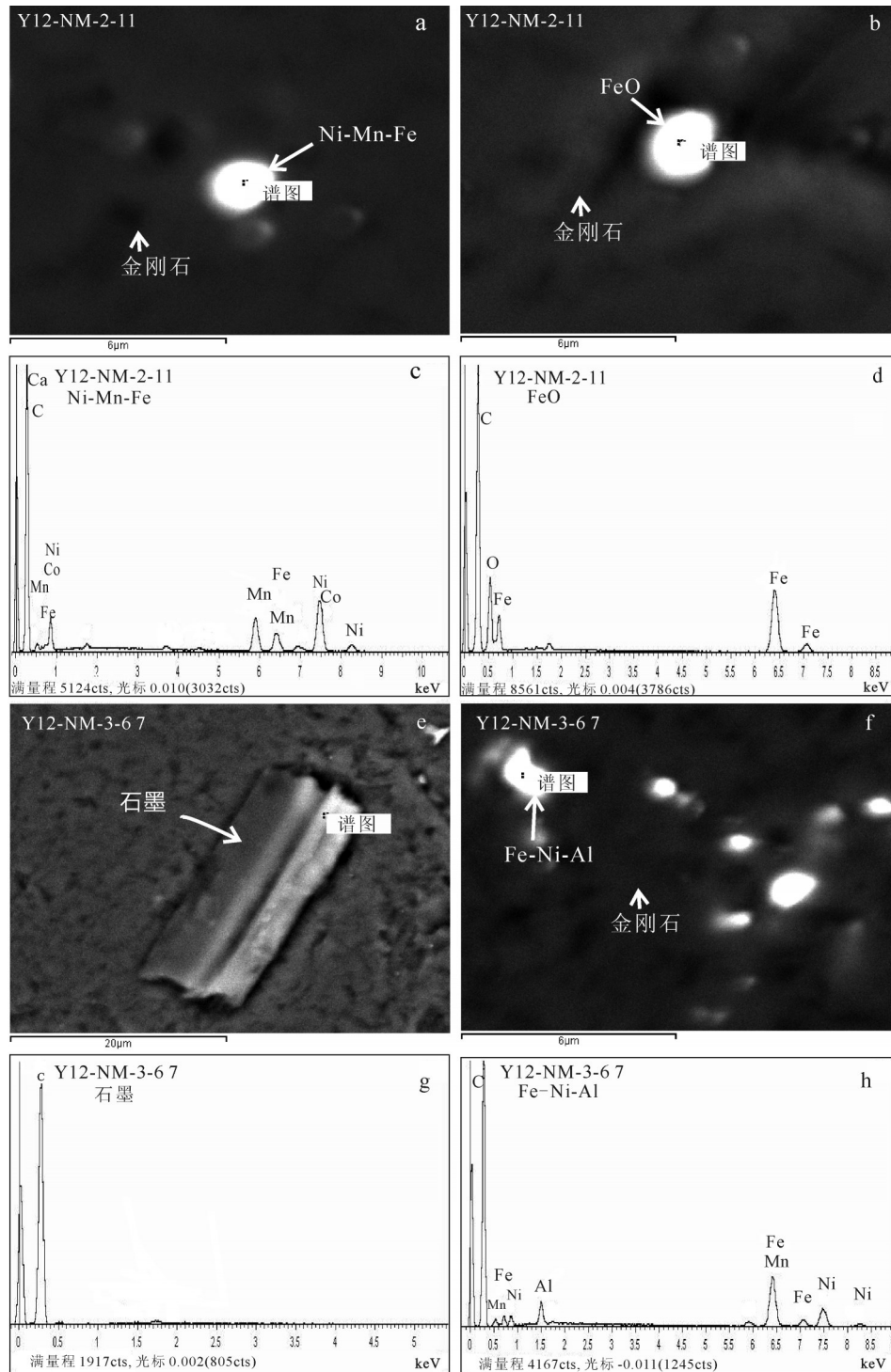


图8 贺根山铬铁矿中发现的金刚石及其包裹体

a—金刚石和Ni-Mn-Fe合金包裹体的背散射图;b—金刚石和FeO包裹体的背散射图;c—Ni-Mn-Fe合金能谱图;d—FeO能谱图;
e—金刚石和石墨单质包裹体的背散射图;f—金刚石和Fe-Ni-Al合金包裹体的背散射图;g—石墨单质能谱图;h—Fe-Ni-Al合金能谱图

Fig. 8 Diamonds and their inclusions recovered from the Hegenshan chromitites

a—BSE image showing Ni-Mn-Fe alloy; b—BSE image showing FeO oxide in the same diamond grain of a; c—Energy spectrum of Ni-Mn-Fe alloy inclusion in diamond in a; d—Energy spectrum of FeO oxide inclusion in diamond in b; e—BSE image showing graphite; f—BSE image showing Fe-Ni-Al alloy in diamond grain; g—Energy spectrum of graphite; h—Energy spectrum of Fe-Ni-Al alloy

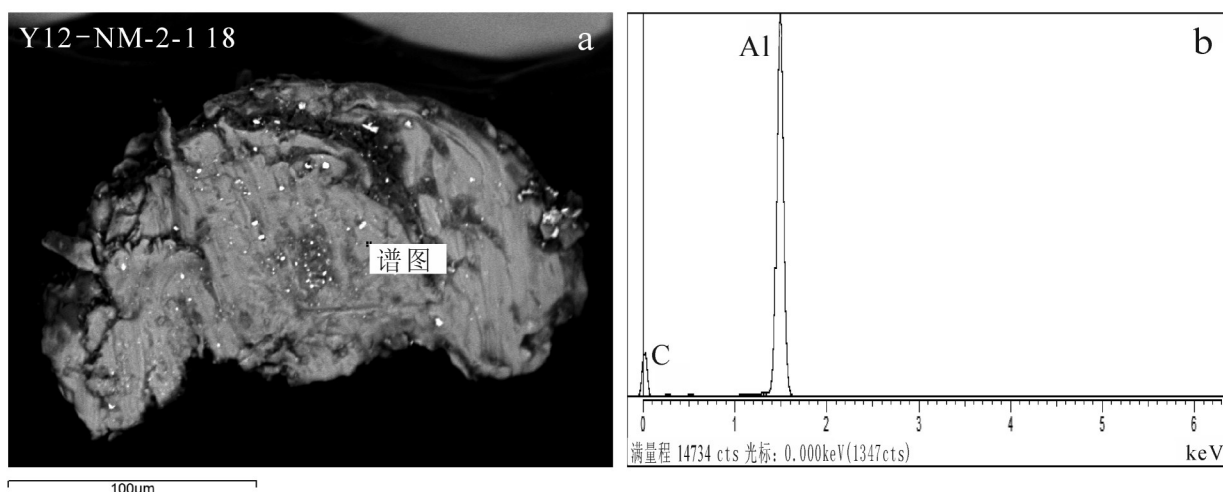


图9 贺根山铬铁矿中发现的自然铝

a—自然铝背散射图;b—自然铝能谱图

Fig. 9 Native Al recovered from the Hegenshan chromitites

a—BSE image showing native Al; b—Energy spectrum of native Al

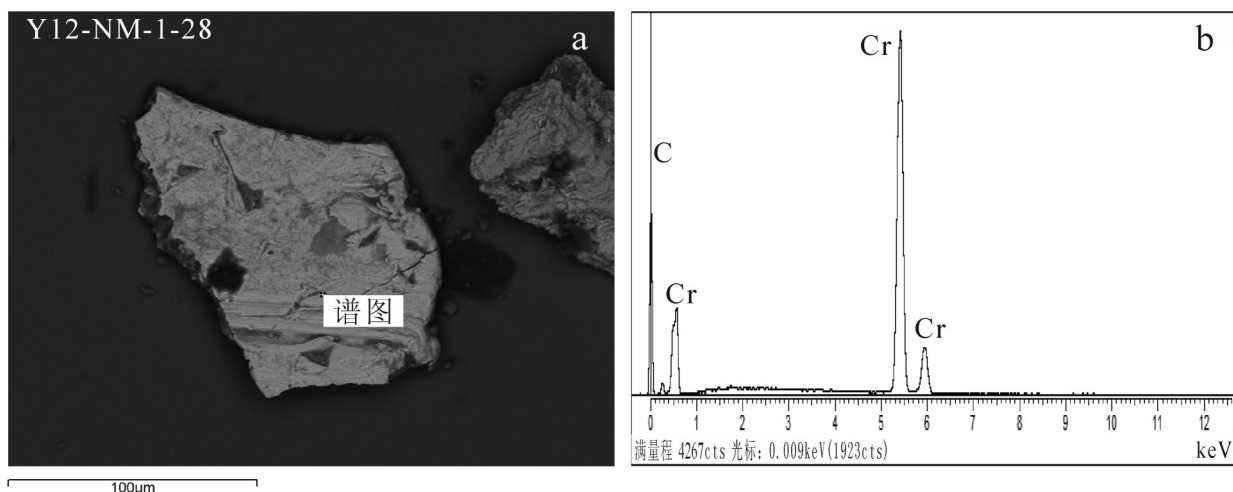


图10 贺根山铬铁矿中发现的自然铬

a—自然铬背散射图;b—自然铬能谱图

Fig. 10 Native Cr recovered from the Hegenshan chromitites

a—BSE image showing native Cr; b—Energy spectrum of native Cr

为 100 ~200 μm ,与金刚石粒度相近。双目镜下为无色至蓝绿色和深蓝色浅蓝色,金刚光泽,透明(图 12-a)。激光拉曼谱显示碳硅石典型的 789 cm^{-1} 、 764 cm^{-1} 、 968 cm^{-1} 主峰(图 12-c),背散射、能谱图见图 12-b, d。

6.3 氧化物

从样品中挑选出的氧化物种类较多,有方铁

矿、赤铁矿、 FeO_2 、 FeO_3 、磁铁矿、金红石、锐钛矿、钛铁矿、铬尖晶石、锡石、石英等氧化物类,其中方铁矿、 FeO_2 、 FeO_3 在自然铁矿物颗粒中均有发现(图 11)。

方铁矿:贺根山铬铁矿中常见到方铁矿,一般为球形,但是值得注意的是,在金刚石中发现了方铁矿包裹体。方铁矿常呈球形,或椭圆形生长,粒度大小不等,直径 50~200 μm ,甚至更大均有。钢灰

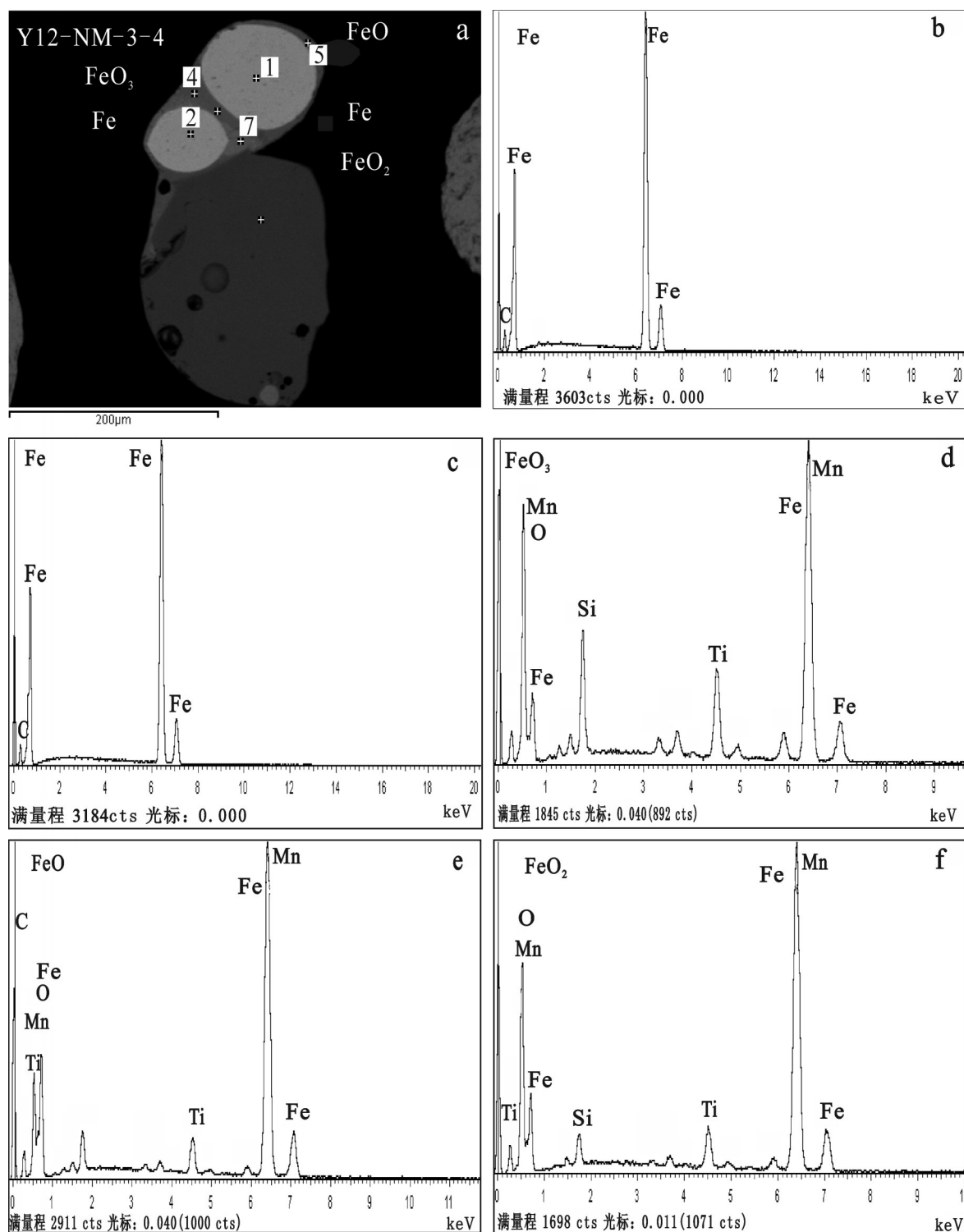


图 11 贺根山铬铁矿中发现的自然铁和铁的氧化物

a—自然铁和其他铁的氧化物背散射图;b—c—Fe的能谱图;d—FeO₃能谱图;e—方铁矿(FeO)能谱图;f—FeO₂能谱图

Fig. 11 Native Fe and iron oxides recovered from the Hegenshan chromitites

a—BSE image showing native Fe and iron oxides; b—c—Energy spectrum of native Fe; d—Energy spectrum of FeO₃; e—Energy spectrum of FeO; f—Energy spectrum of FeO₂

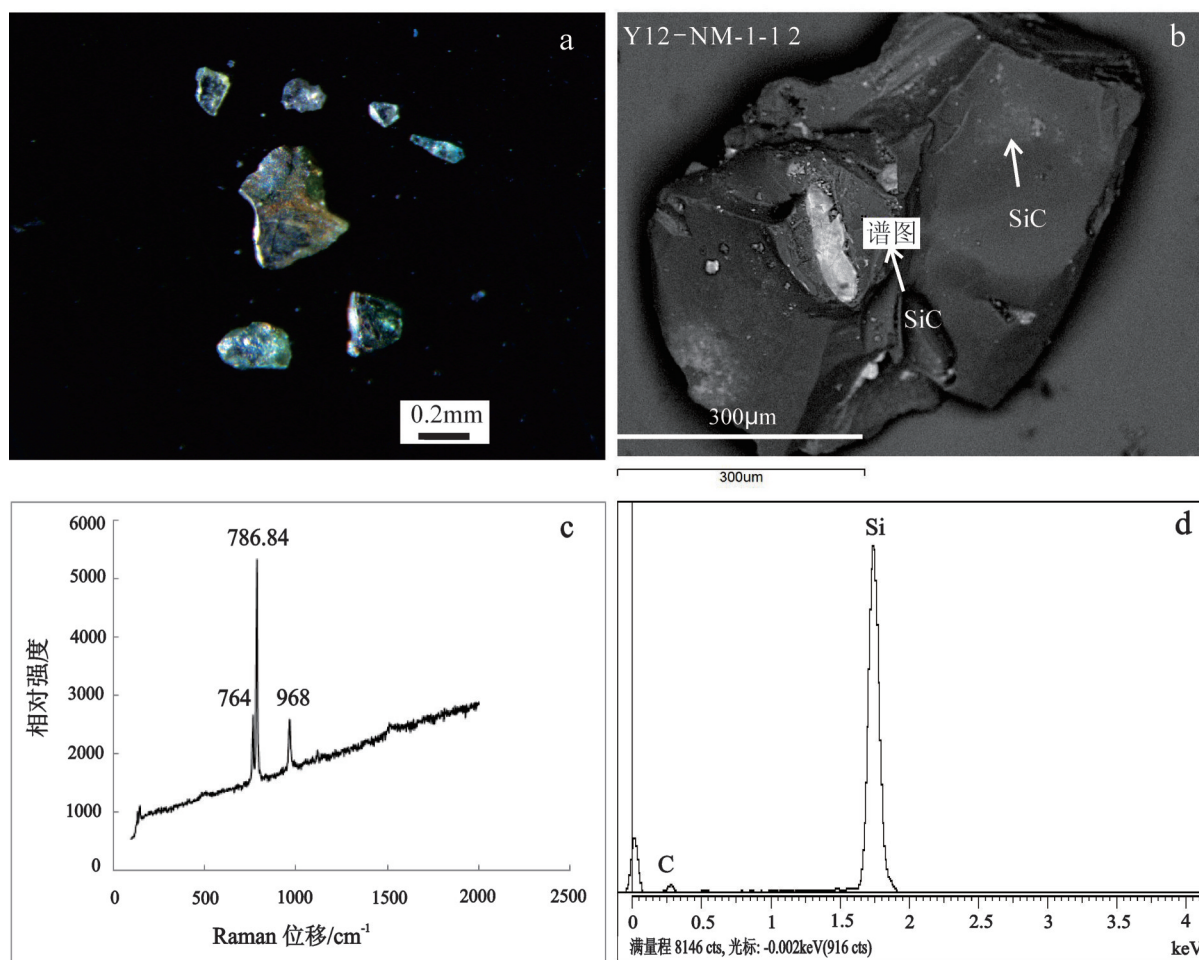


图12 贺根山铬铁矿中发现的碳硅石

a—蓝绿色碳硅石实体照片;b—碳硅石背散射照片,其中矿物颗粒浅灰色部分为碳硅石,中间无色透明部分为未知矿物填充;
c—碳硅石呈现的特征拉曼谱峰;d—碳硅石能谱图

Fig.12 Moissanites recovered from the Hegenshan chromitites

a—Microphotograph showing bluish green moissanites; b—BSE image showing moissanite grain, with the light gray part being moissanite; the colorless and transparent one in the middle part of the moissanite is unknown mineral filling the hole; c—Raman spectrograms showing moissanite characteristic shifts; d—Energy spectrogram showing moissanite grain

色,金属光泽,不透明。背散射图片见图13-a,能谱图见图13-b。

赤铁矿:贺根山铬铁矿中也有为数众多的赤铁矿,多为圆球状。实体镜下观察粒度、颜色、光泽等与方铁矿相近,目前主要靠能谱测试区分这两种矿物,方铁矿化学式为 FeO ,赤铁矿为 Fe_2O_3 。背散射图片见图14-a,能谱图见图14-b。

铬尖晶石:由于是从铬铁矿中进行人工重砂选矿,铬尖晶石无论从数量还是粒度上都是很大的,多呈粒状,粒度可达1~2 mm,也有破碎到很细小的。铁黑色,半金属光泽,不透明。背散射图片见

图15-a,能谱图见图15-b。

金红石:贺根山铬铁矿中也发现了较多金红石,约100余粒,200~500 μm ,粒度较大(图16-a)。多为致密块状,常见褐红、暗红色,个别金红石颜色发黑,金刚光泽强烈,较透明。激光拉曼谱显示金红石具典型的237 cm^{-1} 、443 cm^{-1} 、607 cm^{-1} 主峰(图16-e)。在金红石能谱测试中发现了富含铁的金红石(图16-b),铁与钛原子百分比比值为1:1,矿物晶体化学式书写标准,即铁金红石 FeTiO_2 ,金红石和铁金红石能谱图见图16-c, d。

钛铁矿:此次挑选出的钛铁矿自形很好,多为

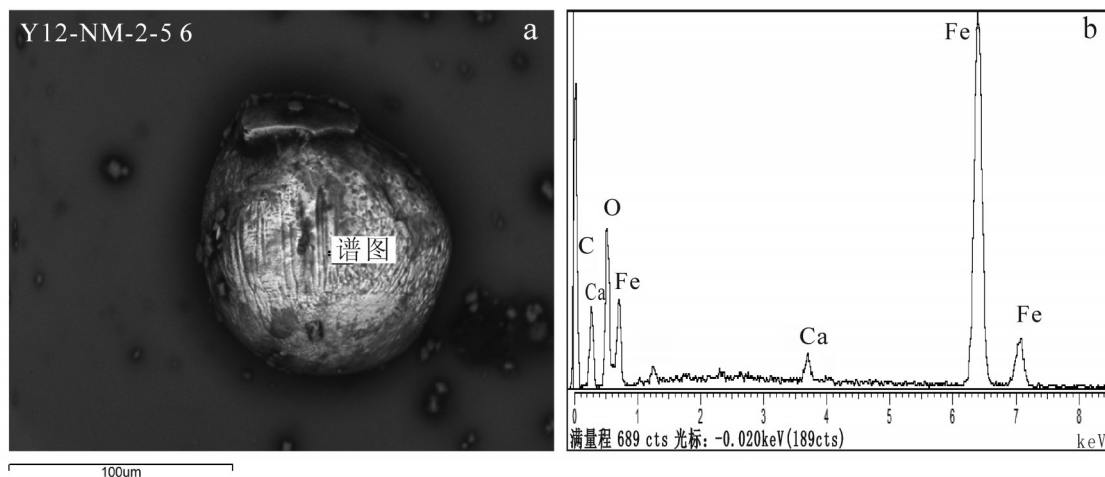


图13 贺根山铬铁矿中发现的方铁矿

a—方铁矿背散射图;b—方铁矿能谱图

Fig.13 Wüstite recovered from the Hegenshan chromitites

a—BSE image showing wüstite; b—Energy spectrum of wüstite

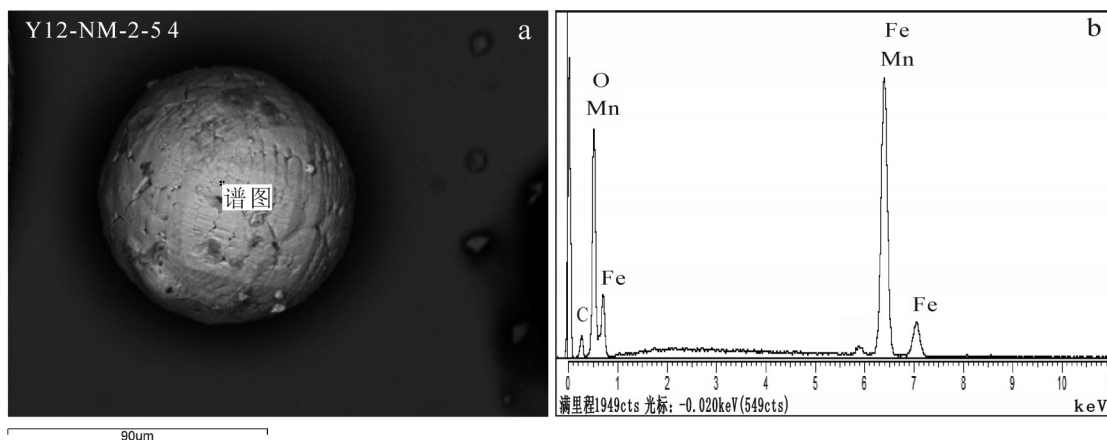


图14 贺根山铬铁矿中发现的赤铁矿

a—赤铁矿背散射图;b—赤铁矿能谱图

Fig.14 Hematite recovered from the Hegenshan chromitites

a—BSE image showing hematite; b—Energy spectrum of hematite

粒状,长度200~400 μm ,钢灰色、铁黑色,金属光泽,不透明。背散射图片见图17-a,能谱图见图17-b。

锡石:锡石量少,粒度大小不一,最大达400 μm ,褐色,金刚光泽,断口油脂光泽,微透明。背散射图片见图18-a,能谱图见图18-b。

6.4 硫化物

贺根山铬铁矿中挑选出的硫化物矿物种类比较丰富,有黄铁矿、白铁矿、方铅矿、辉钼矿等。其中以黄铁矿数量居多。

黄铁矿:样品中发现了大量黄铁矿,可见立方

体自形晶,且聚形纹常见,大多为粒状,200~500 μm 均有。浅铜黄色,强金属光泽。背散射图片见图19-a,能谱图见图19-b。

方铅矿:方铅矿从几十 μm 到100 μm 均有,自形粒状,铅灰色,金属光泽,可见明显立方体完全解理。背散射图片见图20-a,能谱图见图20-b。

6.5 其他矿物

贺根山铬铁矿人工重砂矿物学研究除了上述矿物,还发现了诸如镁橄榄石、顽火辉石、透辉石、普通辉石、锆石、蛇纹石、绿泥石、榍石、符山石、正长石、钙

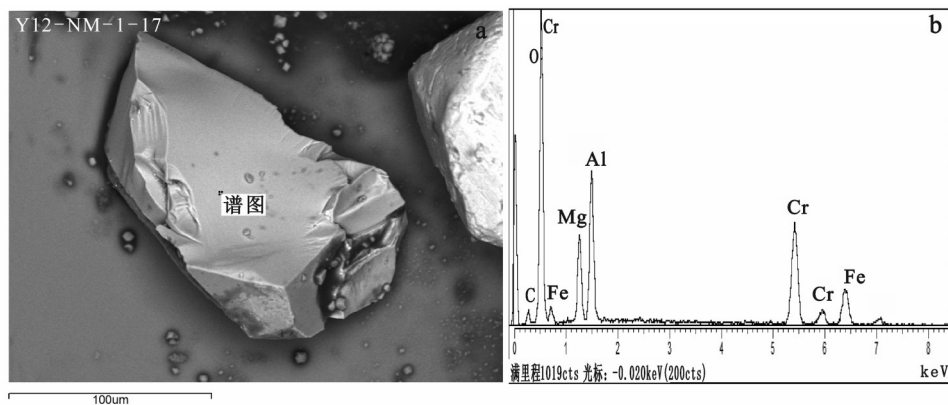


图15 贺根山铬铁矿中发现的铬尖晶石

a—铬尖晶石背散射图;b—铬尖晶石能谱图

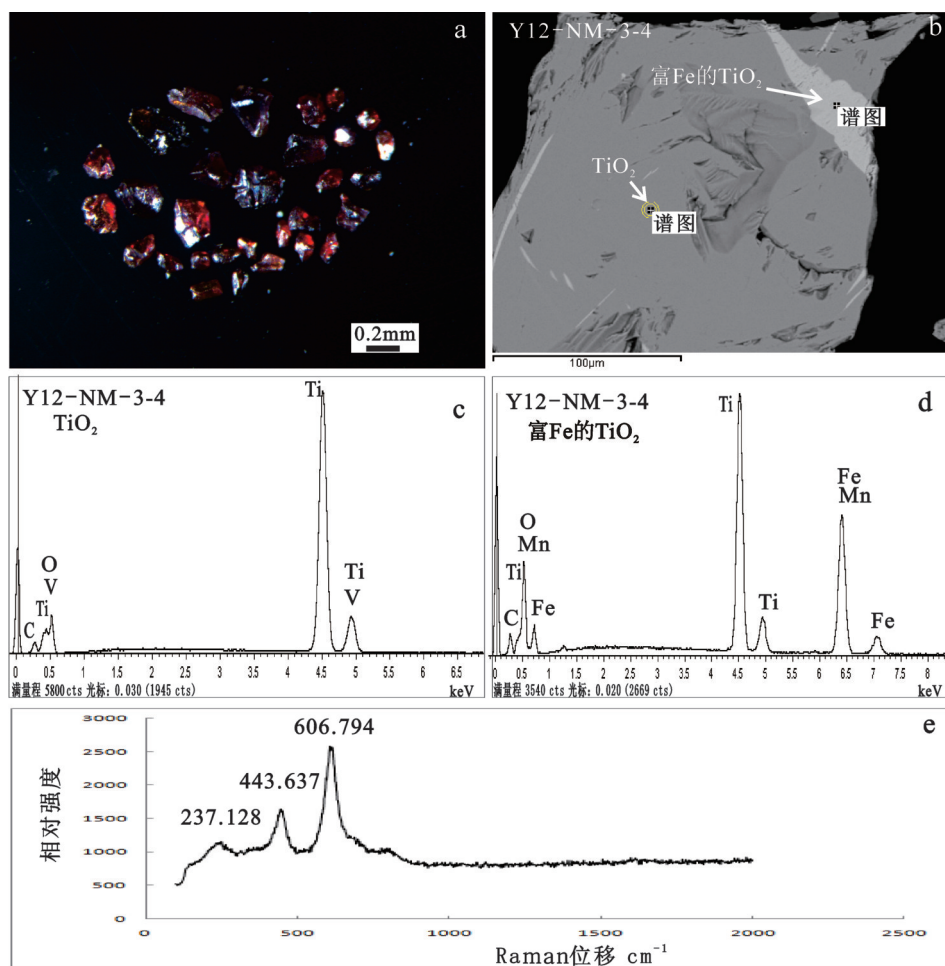
Fig.15 Chrome spinel recovered from the Hegenshan chromitites
a—BSE image showing chrome spinel; b—Energy spectrum of chrome spinel

图16 贺根山铬铁矿中发现的金红石

a—褐红色金红石实体镜照片;b—金红石背散射照片;c—金红石能谱图;d—金红石中富铁的铁金红石;e—金红石的特征拉曼谱峰

Fig.16 Rutiles recovered from Hegenshan chromitites

a—Microphotograph showing maroon rutiles; b—BSE image showing rutile grain; c—Energy spectrogram showing rutile grain;
d—Energy spectrogram showing Fe-rich rutile grain; e—Raman spectrograms showing rutile characteristic shifts

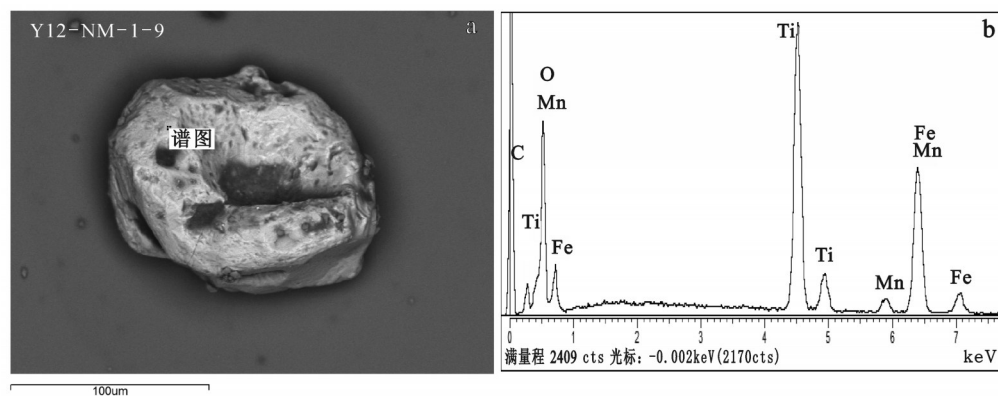


图17 贺根山铬铁矿中发现的钛铁矿

a—钛铁矿背散射图;b—钛铁矿能谱图

Fig. 17 Ilmenite recovered from the Hegenshan chromitites

a—BSE image showing ilmenite; b—Energy spectrum of ilmenite

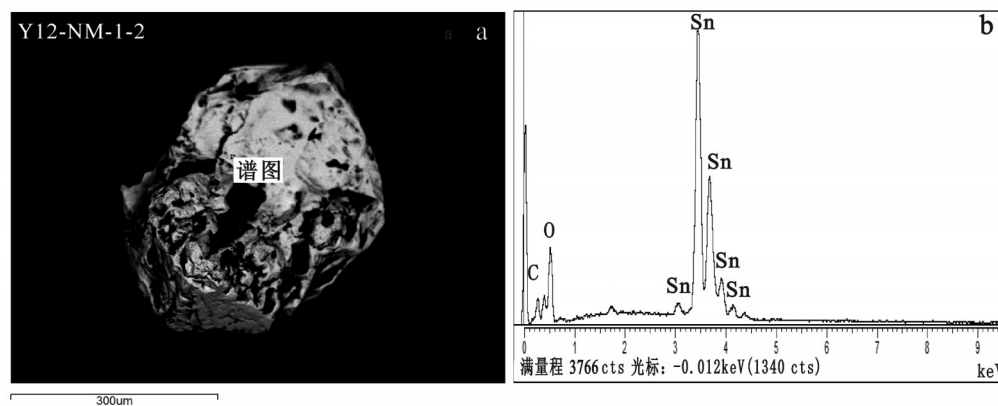


图18 贺根山铬铁矿中发现的锡石

a—锡石背散射图;b—锡石能谱图

Fig. 18 Cassiterite recovered from the Hegenshan chromitites

a—BSE image showing cassiterite; b—Energy spectrum of cassiterite

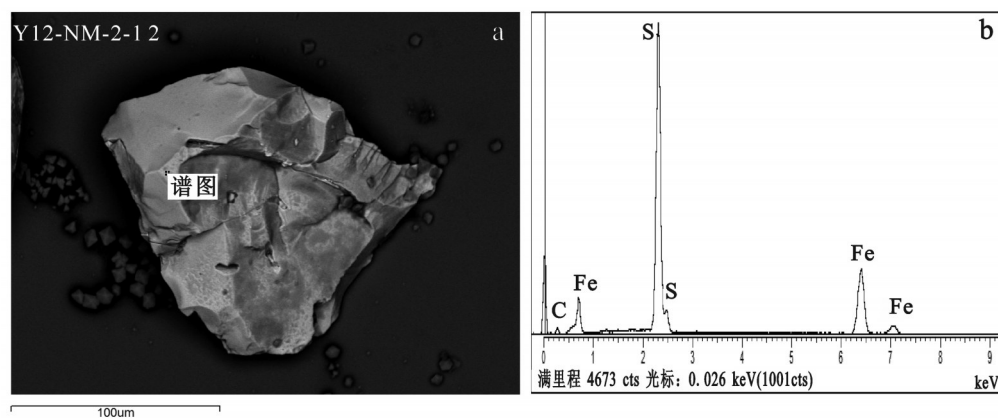


图19 贺根山铬铁矿中发现的黄铁矿

a—黄铁矿背散射图;b—黄铁矿能谱图

Fig.19 Pyrite recovered from the Hegenshan chromitites

a—BSE image showing pyrite; b—Energy spectrum of pyrite

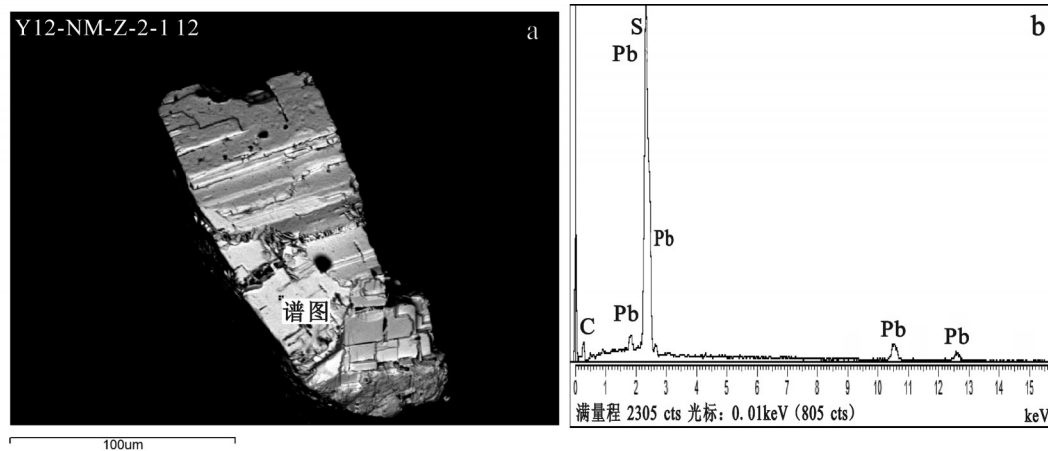


图20 贺根山铬铁矿中发现的方铅矿

a—方铅矿背散射图;b—方铅矿能谱图

Fig.19 Galena recovered from the Hegenshan chromitites

a—BSE image showing galena; b—Energy spectrum of galena

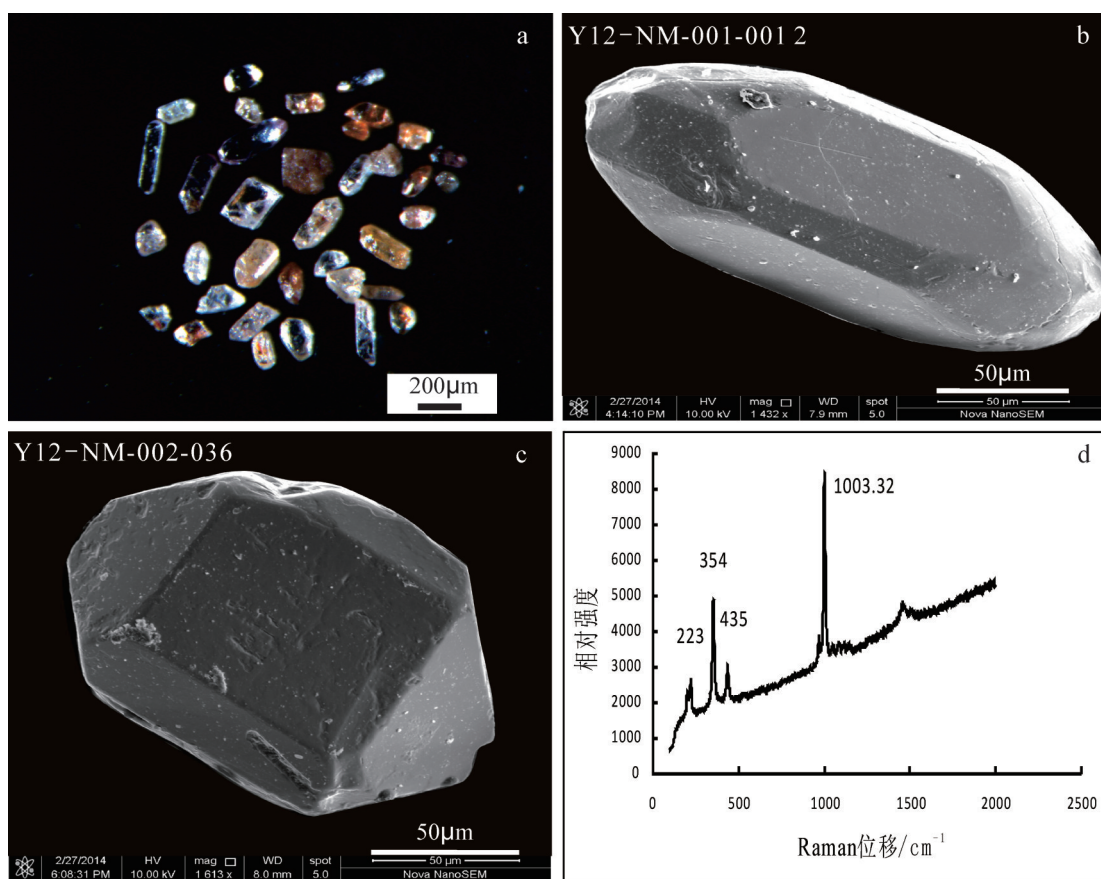


图21 贺根山铬铁矿中发现的锆石

a—各种形态锆石的实体照片;b—长柱状锆石的二次电子图;c—短柱状锆石的二次电子图;d—锆石的拉曼谱峰图

Fig.6 Zircons recovered from the Hegenshan chromitites

a—Microphotograph showing multicolor zircons; b—Secondary electron image showing long columnar zircon; c—Secondary electron image showing short columnar zircon; d—Raman spectrograms showing zircon characteristic shift

石榴石和镁铝榴石等硅酸盐类矿物;以及独居石、菱水碳铝镁石、钙芒硝和水氯铁镁石等矿物。

锆石:贺根山铬铁矿中发现了大量的锆石(图21-a),约300余粒,50~2000 μm ,粒度大小不一。锆石颗粒多为自形短柱、长柱状,柱面、双锥均明显(图21-b, c);亦可见呈浑圆状,可能形成于熔蚀或磨蚀作用。红褐、黄、无色,透明或不透明,玻璃-金刚光泽,双目镜下可见多含包裹体。激光拉曼谱显示锆石具典型的1003 cm^{-1} 、435 cm^{-1} 、354 cm^{-1} 、223 cm^{-1} 主峰(图21-d)。

7 讨 论

本论文通过人工重砂选矿工作,首次在内蒙古贺根山蛇绿岩的铬铁矿中发现金刚石、碳硅石等特殊地幔矿物。较之于罗布莎矿区的31号矿体中挑选出的矿物,贺根山铬铁矿挑选出的矿物种类类似,并且金刚石形态特征也极其相似。因此,本项工作不仅表明金刚石等特殊地幔矿物不仅存在于高铬型铬铁矿中,同样存在于高铝型铬铁矿中,并且拓宽了蛇绿岩中铬铁矿赋存特殊地幔矿物的地域和时代范围。

位于特提斯—喜马拉雅构造带东端,即西藏雅鲁藏布江蛇绿岩带东段的西藏罗布莎铬铁矿床,构造上位于冈底斯火山—岩浆弧南边,侵入于上三叠统与上白垩统或古近—新近系砂砾岩层之间,蛇绿岩年代为白垩纪,侵入年代大约为 $(177\pm33)\text{Ma}^{[42-43]}$ 。罗布莎31号矿体,即发现金刚石的矿体产于向斜轴部,走向 $75^{\circ}\sim 80^{\circ}$,倾向南,倾角 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。长度超过300 m,宽0.3~3 m,厚1.95~14.88 m,矿体被5 m厚纯橄岩外壳包裹,矿石属高铬型豆荚状铬铁矿,矿石构造以块状和豆状为主。

内蒙古贺根山蛇绿岩区域大地构造上位于古亚洲褶皱带东部,西伯利亚板块和中朝板块之间,居于乌兰浩特—哲斯大复背斜内的贺根山复背斜近轴部,蛇绿岩年龄为晚古生代。本文研究的3756号铬铁矿矿床由180余个大小不等的矿体群组成,矿床分布长830 m,宽110~230 m,面积约0.13 km^2 。矿体走向 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$,倾向南西,倾角 $30^{\circ}\sim 70^{\circ}$,变化较大。方辉橄榄岩相的纯橄岩异离体内断续分布呈透镜状、豆荚状、扁豆状、似脉状的矿体。矿体围岩主要是方辉橄榄岩,纯橄岩是其近矿围岩。

矿石呈半自形—他形粒状结构,细—中粒中等浸染状,也有斑杂状和豆状等构造。电子探针测得造矿铬尖晶石 $\text{Cr}^{\#}$ 为45~53,属高铝型豆荚状铬铁矿。

罗布莎31号矿体发现的特殊地幔矿物有100余种(亚种),涵盖了自然元素矿物、金属互化物矿物、氧化物矿物、硫(砷)化物和硅酸盐矿物。贺根山3756号矿床铬铁矿初步挑选出的特殊地幔矿物有30余种,也包括自然元素类矿物、金属互化物类矿物、氧化物类矿物、硫化物类矿物、硅酸盐类矿物及其他矿物。两地铬铁矿中发现的矿物种类非常相似,不仅如此,它们所发现的金刚石特征也高度一致。

罗布莎31号矿体选出的金刚石,大小多数为100~200 μm ,少量达到500 μm ,无色透明,少量晶形破碎,完整晶形金刚石以自形晶八面体、十二面体和立方八面体为主,个别也具有双晶,经过拉曼光谱测试,峰值在1329.9~1331.9 cm^{-1} 。贺根山3756矿床选出的金刚石粒度在200~300 μm ,大多无色透明,或者浅黄色,完整晶形多为自形八面体和立方八面体,并有许多金刚石连晶,所有金刚石拉曼峰值都叠于1331~1333 cm^{-1} 位置。由此可见,罗布莎金刚石和贺根山挑选出的金刚石的物理形态、内部结构都非常相似。

贺根山蛇绿岩高铝型豆荚状铬铁矿中发现的金刚石等特殊地幔矿物,与罗布莎蛇绿岩高铬型豆荚状铬铁矿中发现的特殊矿物非常类似,我们指出,这两个矿体可能形成于相似环境相似构造环境。所发现的金刚石、碳硅石等超高压矿物、强还原矿物可能形成于上地幔深部,但是,这些矿物的出现并不代表豆荚状铬铁矿、铬铁矿矿物颗粒形成于与这些矿物相同的环境。贺根山蛇绿岩铬铁矿可能和罗布莎蛇绿岩铬铁矿一样,形成于上地幔深部地区。

8 结 论

(1)西藏罗布莎蛇绿岩和内蒙古贺根山蛇绿岩位于不同年龄,不同构造背景的两个造山带,然而,两地豆荚状铬铁矿中均发现金刚石、碳硅石等深部地幔矿物,表明两地豆荚状铬铁矿经历了相似的形成过程。并且,内蒙古贺根山铬铁矿深部矿物的发现,延伸了蛇绿岩铬铁矿中金刚石赋存的地域和时

代范围。

(2)研究证实了超高压、强还原矿物及其他矿物不仅出现于高铬铬铁矿(罗布莎)中,还出现于高铝铬铁矿(贺根山),表明金刚石等深部矿物的产出,并没有受控于铬铁矿的化学成分差异。

(3)笔者推测,贺根山豆荚状铬铁矿中的超高压、强还原矿物形成于上地幔深部,可能达到地幔转换带,但是,这些特殊地幔矿物进入铬铁矿的机制尚未清楚。

内蒙古贺根山古生代蛇绿岩高铝型铬铁矿中新发现金刚石等深部矿物,与西藏和乌拉尔不同时代和造山带蛇绿岩高铬型铬铁矿中的深部矿物十分类似,由此表明,这些蛇绿岩铬铁矿中的金刚石等深部矿物可能不受蛇绿岩构造背景和铬铁矿类型的制约。但找到该问题的答案,解决贺根山豆荚状铬铁矿的成因问题,本论文目前开展的内蒙古贺根山铬铁矿的研究远远不够,尚需要更多的研究。

致谢:大陆构造与动力学国家重点实验室闫玲对样品制备、激光拉曼实验提供的帮助,陈方远在能谱分析给予的支持,戎合研究员对电子探针测试的辅导帮助,徐向珍在二次电子照相和论文编写方面给予的帮助。论文编写过程中和田亚洲博士、周文达、王云鹏、陈艳虹、来盛民、张岚、赵慧硕士进行了有益的探讨,在此,一并致以诚挚的感谢!

参考文献(References):

- [1] 余良晖,王海军,于银杰.我国铬铁矿战略储备构思[J].国土资源,2006,(8):24-25.
Yu Lianghui, Wang Haijun, Yu Yinjie. Strategic reserves design of the chromite in China[J]. Land & Resources, 2006, (8): 24-25(in Chinese with English abstract).
- [2] 鲍佩声,王希斌,彭根永,等.中国铬铁矿床[M].北京:科学出版社,1999:1-350.
Bao Peisheng, Wang Xibin, Peng Genyong, et al. Chromite Deposit in China[M]. Beijing: Science Press, 1999: 1-350 (in Chinese with English abstract).
- [3] 白文吉,李行, Bel L L. 内蒙古贺根山蛇绿岩的铬铁矿床生成条件的讨论[J]. 中国地质科学院地质研究所文集, 1985, 12: 1-19.
Bai Wenji, Li Hang, Le B L. A discussion on genetic conditions of the chromite deposits in the Hegenshan ophiolite of Nei Monggol (Inner Mongolia), China[J]. Corpus of Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 1985, 12: 1-19 (in

Chinese with English abstract).

- [4] 白文吉,李行. 内蒙古贺根山蛇绿岩型铬铁矿中固体包裹体矿物化学成分研究[J]. 矿物学报, 1993, 13(3): 204-213.
Bai Wenji, Li Xing. A study on the chemical composition of mineral inclusions in chromite from the Hegenshan ophiolite massif, Inner Mongolia, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1993, 13(3): 204-213 (in Chinese with English abstract).
- [5] Robinson P T, Zhou M F, Hu Xufeng, et al. Geochemical constraints on the origin of the Hegenshan Ophiolite, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 1999, 17(4): 423-442.
- [6] Thayer T P. Principal features and origin of podiform chromite deposits, and some observations on the Gulemen - Soridag district, Turkey[J]. Economic Geology, 1964, 59(8): 1497-1524.
- [7] Hess H H. Complementary evidence from the Bushveld Complex, Great Dyke, and Skaergaard intrusion [C]// Hess H H (ed.). Stillwater Igneous Complex, Montana—A Quantitative Mineralogical Study. America: Geological Society of America Memoirs, 80, 1960, 9: 151-167.
- [8] Gijbels R H, Millard H T, Desborough G A, et al. Osmium, ruthenium, iridium and uranium in silicates and chromite from the eastern Bushveld Complex, South Africa [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta: Journal of the Geochemical Society and the Meteoritical Society, 1974, 38(2): 319-337.
- [9] 王恒升,白文吉,王炳熙,等. 中国铬铁矿及成因[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 1-227.
Wang Hengsheng, Bai Wenji, Wang Bingxi, et al. Chromite Deposit and Its Origin in China[M]. Beijing: Science Press, 1983: 1-227 (in Chinese with English abstract).
- [10] 王希斌,鲍佩声. 豆荚状铬铁矿床的成因—以西藏自治区罗布莎铬铁矿床为例[J]. 地质学报, 1987, (3): 166-181.
Wang Xibin, Bao Peisheng. The genesis of posiform chromite deposits—a case study of the Luobusa chromite deposit, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 1987, (3): 166-181 (in Chinese with English abstract).
- [11] 王希斌,郝梓国,鲍佩声,等. 中国造山带蛇绿岩中铬铁矿床的成因类型及其成矿的若干特征[J]. 矿床地质, 1992, 11(1): 21-34.
Wang Xibin, Hao Ziguo, Bao Peisheng, et al. Genetic types and some metallogenic characteristics of chromite deposits in ophiolites within Phanerozoic orogenic belts of China[J]. Mineral Deposits, 1992, 11(1): 21-34 (in Chinese with English abstract).

- [12] Zhou M F, Robinson P T, Bai W J. Formation of podiform chromitites by melt/rock interaction in the upper mantle[J]. *Mineralium Deposita*, 1994, 29(1): 98–101.
- [13] Zhou M F, Robinson P T, Malpas J, et al. Podiform chromitites in the Luobusa ophiolite (Southern Tibet): implications for melt–rock interaction and chromite segregation in the upper mantle[J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37(1): 3–21.
- [14] Zhou M F, Robinson P T. Origin and tectonic environment of podiform chromite deposits[J]. *Economic Geology*, 1997, 92(2): 259–262.
- [15] Zhou M F, Robinson P T, Malpas J, et al. REE and PGE geochemical constraints on the formation of dunites in the Luobusa ophiolite, Southern Tibet[J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46(3): 615–639.
- [16] Rollinson H. Chromite in the mantle section of the Oman ophiolite: A new genetic model[J]. *The Island Arc*, 2005, 14: 542–550.
- [17] Tamura A, Arai S. Unmixed spinel in chromite from the Iwanadake peridotite complex, Hokkaido, Japan—A reaction between peridotite and highly oxidized magma in the mantle wedge [J]. *Amer. Mineral.*, 2005, 90: 473–480.
- [18] Arai S. Chemistry of chromian spinel in volcanic rocks as a potential guide to magma chemistry[J]. *Mineralogical Magazine*, 1992, 56(383): 173–184.
- [19] 杨经绥, 白文吉, 方青松, 等. 极地乌拉尔豆荚状铬铁矿中发现金刚石和一个异常矿物群[J]. *中国地质*, 2007, 34(5): 950–952.
Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, et al. Discovery of diamond and an unusual mineral group from the podiform chromite, Polar Ural[J]. *Geology in China*, 2007, 34(5): 950–952 (in Chinese with English abstract).
- [20] 杨经绥, 巴登珠, 徐向珍, 等. 中国铬铁矿床的再研究及找矿前景[J]. *中国地质*, 2010, 37(4): 1141–1150.
Yang Jingsui, Ba Dengzhu, Xu Xiangzhen, et al. A restudy of podiform chromite deposits and their ore–prospecting vista in China [J]. *Geology in China*, 2010, 37(4): 1141–1150 (in Chinese with English abstract).
- [21] 杨经绥, 徐向珍, 李源, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带的普兰地幔橄辉岩中发现金刚石: 蛇绿岩型金刚石分类的提[J]. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3171–3178.
Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Li Yuan, et al. Diamonds recovered from peridotite of the Purang ophiolite in the Yarlung – Zangbo suture of Tibet: A proposal for a new type of diamond occurrence[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(11): 3171–3178 (in Chinese with English abstract).
- [22] 杨经绥, 徐向珍, 张仲明, 等. 蛇绿岩型金刚石和铬铁矿深部成因[J]. *地球学报*, 2013, 34(6): 643–653.
Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Zhang Zhongming, et al. Ophiolite – type Diamond and Deep Genesis of Chromitite[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2013, 34(6): 643–653 (in Chinese with English abstract).
- [23] Yang Jingsui, Dobrzhinetskaya L, Bai Wenji, et al. Diamond and coesite–bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Geology*, 2007, 35(10): 875–878.
- [24] Yang Jingsui, Bai Wenji, Dobrzhinetskaya L, et al. In situ diamonds in polished chromitite fragments from the chromite deposits in Polar Ural and Tibet[C]//AGU Fall Meeting Abstracts. 2009, 1: 08.
- [25] Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Wiedenbeck M, et al. Diamond and moissanite in ophiolitic mantle rocks and podiform chromitites: A deep carbon source?[C]//AGU Fall Meeting Abstracts. 2010, 1: 05.
- [26] Yang Jingsui, Meng Fancong, Xu Xiangzhen, et al. Diamonds, native elements and metal alloys from chromitites of the Ray–Iz ophiolite of the Polar Urals[J]. *Gondwana Research*, 2015, 27(2): 459–485.
- [27] Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Chen Songyong, et al. Unusual mantle mineral group from chromitite orebody Cr–11 in Luobusa ophiolite of Yarlung–Zangbo suture zone, Tibet[J]. *Journal of Earth Science*, 2009, 20: 284–302.
- [28] Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Robinson P T, et al. Origin of ultrahigh pressure and highly reduced minerals in podiform chromitites and associated mantle peridotites of the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Gondwana Research*, 2015, 27(2): 686–700.
- [29] Robinson P T, Trumbull R B, Schmitt A, et al. The origin and significance of crustal minerals in ophiolitic chromitites and peridotites[J]. *Gondwana Research*, 2015, 27: 486–506.
- [30] Dobrzhinetskaya L F, Wirth R, Yang Jingsui, et al. High–pressure highly reduced nitrides and oxides from chromitite of a Tibetan ophiolite[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(46): 19233–19238.
- [31] Sekine T, He H, Kobayashi T, et al. Sinoite (Si₂N₂O) shocked at pressures of 28 to 64 GPa[J]. *American Mineralogist*, 2006, 91(2/3): 463–466.
- [32] Dubrovinskaya N, Solozhenko V L, Miyajima N, et al. Superhard nanocomposite of dense polymorphs of boron nitride: Noncarbon

- material has reached diamond hardness[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(10): 101912.
- [33] Yamamoto S, Komiya T, Hirose K, et al. Coesite and clinopyroxene exsolution lamellae in chromites: In-situ ultrahigh-pressure evidence from podiform chromitites in the Luobusa ophiolite, southern Tibet[J]. *Lithos*, 2009, 109(3): 314–322.
- [34] Yang Jingsui, Robinson P T, Dilek Y. Diamonds in ophiolites[J]. *Elements*, 2014, 10(2): 127–130.
- [35] 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等. 中国大地构造及其演化[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 1–140.
- Huang Jiqing, Ren Jishun, Jiang Chunfa, et al. The Geotectonic Evolution of China[M]. Beijing: Science Press, 1980: 1–140 (in Chinese with English abstract).
- [36] Sengör A M C, Natal' in B A. Paleotectonics of Asia: fragments of a synthesis[C]// Yin A, Harrison M (eds.). *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 486–641.
- [37] Allen M B, Saunders A D, Zhai Mingguo, et al. Crustal accretion and mineralization in western Junggar, Xinjiang Province, northwest China[J]. *Institution of Mining and Metallurgy, Section B. Applied Earth Science*, 1989, B147–B149.
- [38] 梁日暄. 内蒙古中段蛇绿岩特征及地质意义[J]. *中国区域地质*, 1994, (1): 37–45.
- Liang Rixuan. The features of ophiolites in the gentral sector of Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Regional Geology of China*, 1994, (1): 37–45(in Chinese with English Abstract).
- [39] 包志伟, 陈森煌, 张桢堂. 内蒙古贺根山地区蛇绿岩稀土元素和 Sm–Nd 同位素研究[J]. *地球化学*, 1994, 23(4): 339–348.
- Bao Zhiwei, Chen Huangsen, Zhang Zhentang. Study on REE and Sm–Nd isotopes of Hegenshan ophiolite, Inner Mongolia[J]. *Geochimica*, 1994, 23(4): 339–348(in Chinese with English Abstract).
- [40] Jian Ping, Kröner A, Windley B F, et al. Carboniferous and Cretaceous mafic–ultramafic massifs in Inner Mongolia (China): A SHRIMP zircon and geochemical study of the previously presumed integral “Hegenshan ophiolite” [J]. *Lithos*, 2012, 142–143: 48–66.
- [41] 内蒙地质局—O九地质队. 内蒙贺根山超基性岩体群铬铁矿分布特征[J]. *西北地质*, 1978, (1): 59–68.
- 109 Team, Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia. The distribution on characteristics of chromitite in ultrabasic rock group of the Hegenshan, Inner Mongolia[J]. *Northwestern Geology*, 1978, (1): 59–68(in Chinese).
- [42] 白文吉, 杨经绥, Robinson P T, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中金刚石的研究[J]. *地质学报*, 2001, 75(3): 404–409.
- Bai Wenji, Yang Jingsui, Robinson P T, et al. Study of diamonds from chromitites in the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(3): 404–409(in Chinese with English abstract).
- [43] Robinson P T, Bai Wenji, Malpas J, et al. Ultra–high pressure minerals in the Luobusa Ophiolite, Tibet, and their tectonic implications[J]. *Special Publication– Geological Society of London*, 2004, 226: 247–272.