

# 我国铬铁矿床地质特征和找矿方向

周勇<sup>1,2</sup>, 李俊建<sup>2</sup>, 段明<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院研究生院, 北京 100037; 2. 天津地质矿产研究所, 天津 300170)

**摘要:** 我国已知的铬铁矿床均属于中小型豆荚状铬铁矿床, 分布区域不均衡, 开发利用条件差。豆荚状铬铁矿床包括高铬型和高铝型, 两种矿床的形成环境和机制各不相同。弧后弧前盆地、岛弧、大洋中脊、转换断层均可能是豆荚状铬铁矿形成的理想构造环境, 越来越多的学者认为豆荚状铬铁矿为深部地幔成因。铬铁矿是我国急缺的战略矿产, 需要加大重要铬铁矿带隐伏矿体的找矿力度。

**关键词:** 铬铁矿; 资源现状; 地质特征; 找矿方向; 中国

**中图分类号:** P613; P618.33 **文献标识码:** A

生产能力来算, 不考虑采矿损失率和贫化率, 保有储量最多也只能开采 12 年<sup>[1-4]</sup>。

## 0 引言

铬铁矿是生产不锈钢不可替代的原材料, 我国目前是世界最大的不锈钢消费国<sup>[1]</sup>, 而我国铬铁矿资源匮乏, 矿床规模小, 分布区域不均衡, 开发利用条件差, 铬铁矿找矿虽得到高度重视, 但由于找矿难度大等种种原因一直没有大的突破。1990 年以来我国铬铁矿的年均消费量超过  $100 \times 10^4$  t, 由于供需严重失衡, 近几年铬铁矿进口量增长显著<sup>[1-4]</sup>, 铬铁矿成为我国急缺的战略矿产。

## 1 我国铬铁矿资源现状

据不完全统计, 截至 2004 年底, 我国共有铬铁矿产地 53 处, 矿石储量  $221.33 \times 10^4$  t<sup>[1]</sup>。全国已探明的铬铁矿床中, 富矿 ( $w(\text{Cr}_2\text{O}_3) > 32\%$ ) 占全国总储量的 49%, 主要分布在西藏、内蒙古、新疆和甘肃 4 省区 (占总储量的 84.3%)<sup>[2-3]</sup>。我国铬铁矿矿床具有规模小、品位低、冶炼成本高的特点, 铬铁矿年生产能力约  $22 \times 10^4$  t<sup>[5]</sup>。2007 年统计数据显示, 世界上铬矿石年产量约  $900 \times 10^4$  t, 中国仅占 0.16%<sup>[1]</sup>。以目前的年

## 2 铬铁矿矿床的主要类型及产出环境

### 2.1 主要类型

原生铬铁矿床主要有 2 种基本类型: 一类是主要产于古老地台的层状镁质-超镁质杂岩中的层状铬铁矿矿床; 另一类为主要产于显生宙蛇绿岩中的豆荚状铬铁矿矿床<sup>[1]</sup>。完整的蛇绿岩剖面有 2 个部位赋存铬铁矿: 一是莫霍面以上堆晶岩中的层状 (或似层状) 铬铁矿, 二是莫霍面以下地幔橄榄岩中的铬铁矿<sup>[1,6-8]</sup>。前者通常形成无工业价值的小型铬铁矿床, 后者多形成具工业价值的豆荚状铬铁矿床<sup>[1]</sup>。豆荚状铬铁矿为冶金级矿石 ( $w(\text{Cr}_2\text{O}_3) > 40\%$ ,  $N(\text{Cr})/N(\text{Fe}) > 1.7 \sim 2$ ) 的重要来源, 也是耐火型铬铁矿 ( $w(\text{Al}_2\text{O}_3) > 20\%$ ) 的唯一来源<sup>[9-11]</sup>。豆荚状铬铁矿矿床依其矿石中  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量可分为高铝和高铬 2 种类型。高铝的铬铁矿矿石通常  $w(\text{Al}_2\text{O}_3) > 20\%$ ,  $w(\text{Cr}_2\text{O}_3) < 45\%$ , 属耐火级矿石; 高铬的矿石  $w(\text{Al}_2\text{O}_3) < 20\%$ ,  $w(\text{Cr}_2\text{O}_3) > 45\%$ , 属冶金级矿石<sup>[12-13]</sup>。根据中国蛇绿岩研究还划分出一种高铬高铝型 ( $\text{Cr}^\# = 100\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al}) >$

收稿日期: 2012-09-20; 改回日期: 2013-02-28; 责任编辑: 赵庆

作者简介: 周勇 (1987-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。通信地址: 天津市河东区大直沽八号路田帝大厦 1014 房间, 天津地质矿产研究所; 邮政编码: 300170; E-mail: zhouyong310@mails.gucas.ac.cn

60~<60)<sup>[14]</sup>。

## 2.2 产出环境

高铬型豆荚状铬铁矿矿床系指产于 PPG(地幔橄榄岩(peridotite)+辉石岩(pyroxenite)(±异剥橄榄岩)+辉长岩(gabbro))系列蛇绿岩套地幔橄榄岩中的矿床,是原始地幔岩高度熔融的最终产物<sup>[8,12,30]</sup>。高铝型豆荚状铬铁矿床系指产于 PTG(地幔橄榄岩(P)-橄长岩(T)-橄辉长岩(G))系列蛇绿岩套地幔橄榄岩中,以高铝( $w(\text{Al}_2\text{O}_3) > 20\%$ )、低铬( $w(\text{Cr}_2\text{O}_3) < 45\%$ )为特征的铬铁矿床<sup>[6,13]</sup>。高铝型铬铁矿形成于扩张脊(MOR)、弧后盆地等环境,高铬型铬铁矿形成于弧前盆地、岛弧等环境<sup>[8]</sup>。狭窄的上地幔岩浆通道或孔穴为豆荚状铬铁矿理想的堆积部位<sup>[11]</sup>,弧后弧前盆地、岛弧、大洋中脊、转换断层均可能是豆荚状铬铁矿形成的理想构造环境<sup>[1,8,10-11,21,24,26-27,31-33]</sup>。

## 3 铬铁矿矿床地质特征

我国发现的铬铁矿矿床均为豆荚状铬铁矿矿床<sup>[1]</sup>。豆荚状铬铁矿最早发现于 200 多年前哈萨克斯坦乌拉尔山区古生代蛇绿岩内<sup>[10]</sup>,它是地幔环境中唯一含铬的矿物,也是结晶最早的矿物。具有高密度( $4 \sim 4.9 \text{ g/cm}^3$ )、高硬度(8±)、耐高温( $1\ 200 \sim 1\ 300\text{ }^\circ\text{C}$ )<sup>[15-22]</sup>和抗腐蚀性的特点,能够历经长期的地质作用(变形、变质)而不发生重大变化<sup>[11,23]</sup>。豆荚状铬铁矿是蛇绿岩套地幔岩中特征矿产<sup>[9-10,14-15,24-28]</sup>,常见于方辉橄榄岩地幔构造岩内(相当于中等-快速扩张中心,单向扩张速度  $2 \text{ cm/a}$ )<sup>[27]</sup>,是鉴别蛇绿岩最有效的地质标志之一,对于探索早期板块构造及大洋岩石圈演化意义重大<sup>[11]</sup>。豆荚状铬铁矿为具有纯橄岩包壳的不规则矿体,多呈狭窄透镜状、岩墙状,由于压扁拉长褶皱变形,构造形态不规则且分布无规律<sup>[9-10,23-24]</sup>。豆状结构常出现于铬铁矿体边缘或内部,并保留于构造橄橄榄岩内未受强烈构造变形的部位,普遍认为豆瘤状和豆壳状结构是豆荚状铬铁矿原生的特征岩浆结构<sup>[9,15,29]</sup>。

### 3.1 高铬型铬铁矿床

高铬型铬铁矿床以大道尔吉、罗布莎、东巧、依拉山、索伦山等矿床为代表。

大道尔吉铬铁矿矿区位于甘肃省肃北县盐池湾乡,矿体直接围岩为纯橄橄榄岩。共圈定矿体 371 个,其中矿石量  $> 10^4 \text{ t}$  的矿体达 32 个。矿体成群出

现,分段较为集中,地表形成了 10 个矿群,多数为盲矿体。矿体规模一般较小,普遍长  $20 \sim 80 \text{ m}$ ,厚  $0.8 \sim 3.0 \text{ m}$ ,延伸达  $40 \text{ m}$ ;储量  $> 10^4 \text{ t}$  的矿体长度可达  $60 \sim 160 \text{ m}$ ,厚  $4 \sim 10 \text{ m}$ ,延伸长  $157 \text{ m}$ 。贫矿体以透镜状和扁豆状为主,而中、富矿体多呈脉状、扁豆状及团块状。矿石矿物以铁尖晶石为主,含少量磁铁矿及微量的黄铜矿、黄铁矿、镍黄铁矿、镍铁矿、砷镍矿、针镍矿、方铅矿、辉砷钴矿等<sup>[34]</sup>。大道尔吉蛇绿岩中的铬铁矿床包括 2 种成因类型矿石:一是具工业价值的堆积成因铬铁矿;二是地幔成因的铬铁矿,其规模极为有限。大道尔吉堆积铬铁矿床产于蛇绿岩内的堆积纯橄岩中,矿体主要由各种浸染状矿石组成的贫矿与围岩纯橄岩呈过渡关系。矿床的成因机制是超镁铁质岩浆的分离结晶作用,区别于产在蛇绿岩基底的地幔橄榄岩中的豆荚状铬铁矿<sup>[30,35]</sup>。富矿石中平均  $w(\text{Cr}_2\text{O}_3) = 33.73\%$ ,铬铁比  $2.0 \sim 2.48$ ;贫矿石平均  $w(\text{Cr}_2\text{O}_3) = 11.78\%$ <sup>[34]</sup>。

东巧铬铁矿矿区位于西藏安多县西南,矿体围岩主要为纯橄橄榄岩,方辉橄橄榄岩次之。矿区共有矿体 130 个,矿体数量多,但规模小。经统计,长度  $> 20 \text{ m}$  的矿体约占总矿体数的  $12\%$ ,长度  $< 5 \text{ m}$  的约占  $75\%$ ,其余在  $5 \sim 20 \text{ m}$  之间。矿石以中、粗粒半自形-他形致密块状和准致密块状为主,中-细粒浸染状次之,局部见斑杂状、豆状构造。矿石平均  $w(\text{Cr}_2\text{O}_3) = 34.8\%$ ,铬铁比为  $3.78$ <sup>[34]</sup>。

依拉山铬铁矿矿区位于西藏那曲县郭嘉乡境内,矿体产于纯橄橄榄岩相带与方辉橄橄榄岩相带的接触带,其直接围岩为纯橄橄榄岩。矿体成群成带出现,其中 1 号矿群共圈定 23 个主要矿体和一些小矿体。矿体普遍长  $20 \sim 40 \text{ m}$ ,延伸长  $12 \sim 25 \text{ m}$ ,厚  $0.6 \sim 10.5 \text{ m}$ 。矿石以中等浸染状和稠密浸染状为主,稀疏浸染状和致密块状次之。矿石平均  $w(\text{Cr}_2\text{O}_3) = 32.66\%$ ,铬铁比为  $2.50$ <sup>[34]</sup>。

索伦山铬铁矿矿区位于白云鄂博西北,岩体主要由方辉橄橄榄岩和纯橄岩组成,局部出露少量含透辉石的低辉方辉橄橄榄岩和高辉方辉橄橄榄岩。索伦山岩体中绝大多数工业矿体均产于纯橄岩-方辉橄橄榄岩杂岩带的纯橄岩透镜体中。矿体的形态和产状复杂多样,呈豆荚状、透镜状、矿巢、矿瘤等,但以透镜状常见。矿体规模变化较大,一般长几十米,最长可达  $300 \text{ m}$ ;延深一般几十米,最深  $150 \text{ m}$ ;厚几十厘米,最厚达  $7.28 \text{ m}$ 。矿体产状与其赋存的围岩纯橄岩完全一致,即随纯橄岩透镜体产状变化而变化。矿石多属浸染状贫矿石,其品位大多为  $10.68\% \sim$

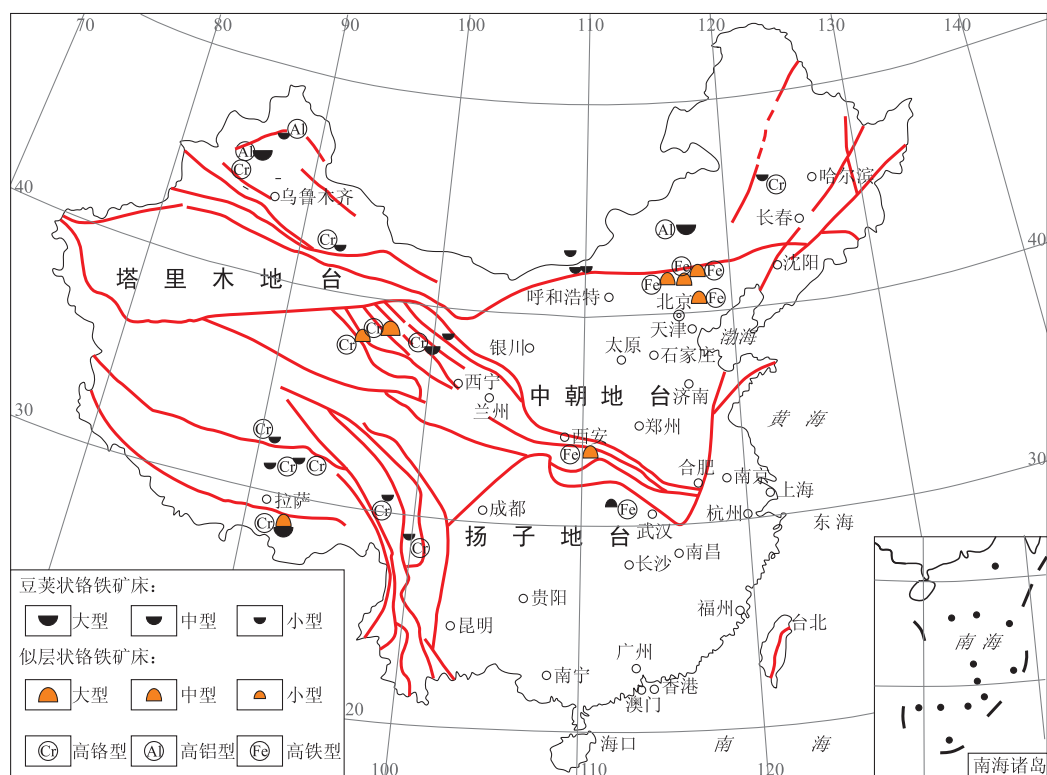
图 1 中国铬铁矿分布图<sup>[14]</sup>

Fig. 1 Distribution of chromite deposits in China

31.59%,少数矿区个别矿体品位较高,可达40%~50%或以上,最低品位8%左右,但铬铁比较高,为3.03~3.06<sup>[14]</sup>。

### 3.2 高铝型铬铁矿矿床

高铝型铬铁矿矿床既可与高铬型铬铁矿矿床同时产于某一地幔橄榄岩的不同部位(如菲律宾的马欣洛克及圣安东尼奥岩体,古巴的卡马圭岩体,澳大利亚的库拉克岩体)<sup>[36]</sup>,也可单独产于地幔橄榄岩中(如菲律宾的卡邦岸岩体,新疆的萨尔托海岩体及洪古勒楞岩体,内蒙贺根山岩体)<sup>[12]</sup>。

萨尔托海铬铁矿矿区位于克拉玛依市北,是高铝型豆荚状铬铁矿床的典型代表,产于蛇绿岩块的地幔橄榄岩中。该矿床与一套橄长岩和辉长岩类岩石紧密伴生,矿体周围常被薄的绿泥石壳所包裹。本区铬铁矿的形成分为两个阶段:第一阶段是原始地幔岩经高度熔融形成高铬铬铁矿,第二阶段形成高铝铬铁矿。交代作用伴随新生单斜辉石和斜长石的形成。原始地幔岩的高度熔融以及基性熔体在地幔橄榄岩中的形成和存在是萨尔托海铬铁矿形成的先决条件<sup>[12]</sup>。

洪古勒楞铬铁矿矿区位于新疆维吾尔自治区和布克赛尔县东南,洪古勒楞岩体由地幔橄榄岩和堆

晶岩组成,地幔橄榄岩主要为低辉方辉橄榄岩,纯橄岩数量少、规模小,或呈透镜状产于前者之中,或呈薄壳包在铬铁矿周围。这些岩石普遍蛇纹石化强烈。此外,可见少量较新鲜的二辉橄榄岩透镜体。岩体赋存两类铬铁矿:一类为堆晶岩中的似层状铬铁矿;另一类为地幔橄榄岩中的豆荚状铬铁矿。似层状铬铁矿为堆晶成因,工业价值不高;豆荚状铬铁矿为熔融残余成因,工业铬铁矿均属此类<sup>[14]</sup>。

贺根山铬铁矿矿区位于内蒙古锡林郭勒北,分布于内蒙古一大兴安岭海西褶皱带的蛇绿岩套内的贺根山岩块中。该蛇绿岩块主要由地幔橄榄岩、堆积岩和基性熔岩组成。铬铁矿矿体主要赋存于地幔橄榄岩相内的纯橄岩脉内,或被薄层的纯橄岩(数厘米到数米)外壳包围,矿体成群和成带分布。白文吉等<sup>[37]</sup>认为铬铁矿矿石不是上地幔岩经局部熔融的产物,局部熔化残余模式<sup>[30,38-39]</sup>用于解释其成因是不合适的。铬铁矿浆源自上地幔较深部位。

玉石沟铬铁矿矿区位于青海省祁连县北西。矿区共有矿体254个,其中较大的矿体多集中于纯橄岩相带中。矿体成群出现,分段集中。地表矿体规模小,长数十厘米至十余米,宽数厘米至数米。矿体形态较为复杂,有巢状、透镜状、长条状、豆荚状及不规

则状,呈雁行状排列。隐伏矿体规模较大,普遍长 15~200 m,厚数米至十余米,延伸长 14~78 m。矿体形态简单,多为巢状、囊状、扁豆状及似层状。从空间上的排列形式来看,走向上为雁行式,倾向上为正叠瓦式。矿石矿物以铬尖晶石为主,黄铁矿、磁铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿次之,含微量铂族元素硫化物等。矿石类型主要为致密块状、稠密浸染状和稀疏浸染状。矿石平均  $w(\text{Cr}_2\text{O}_3) = 30.16\%$ ,铬铁比为 2.55<sup>[34]</sup>。玉石沟铬铁矿床为高铬高铝型(过渡型)铬铁矿床<sup>[6,40]</sup>,可分为产于堆积超镁铁岩中的堆积铬铁矿床和产于地幔橄榄岩中的豆荚状铬铁矿床两种类型。堆积铬铁矿床由玄武岩浆分离结晶作用形成,豆荚状铬铁矿床由地幔岩部分熔融作用形成<sup>[40]</sup>。

## 4 铬铁矿成因机制

莫霍面以下含铬铁矿的地幔橄榄岩均显示上部偏基性、下部偏酸性的垂直熔融分带;莫霍面以上堆晶岩浆房中上部为偏酸性的辉长岩(更富钙、铝),下部为偏基性的纯橄岩(或橄长岩,更基性)岩浆分异垂直分带刚好相反,给出了地幔橄榄岩中的豆荚状铬铁矿具有不同的构造背景及成因模式的提示<sup>[8,12,14]</sup>。产于堆晶岩中的层状铬铁矿床由岩浆重力分异作用、岩浆结晶分异作用等形成,为岩浆成因,为众多学者所公认。但对产于地幔橄榄岩中的豆荚状铬铁矿成因的认识众说纷纭。半个世纪以来主要有 3 种不同的见解,初期为岩浆成因说,中期出现地幔熔融残余成因说,近期则盛行寄主橄榄岩-熔体反应成因说<sup>[8]</sup>。而目前地幔成因说越来越被人们所接受。

### 4.1 岩浆成因

20 世纪初及更早前的研究者将豆荚状铬铁矿与层状铬铁矿视为同物,认为是镁铁质-超镁铁质岩浆(或玄武质岩浆)分异作用的产物,属晚期岩浆矿床,强调岩浆就地分异作用<sup>[41]</sup>;铬铁矿为高温含少许挥发分的岩浆(或熔体)晚期结晶而又重熔再造的产物<sup>[42]</sup>。豆荚状铬铁矿床成因的早期思想以 Thayer, Dickey 和 Greenbaum 为代表<sup>[43]</sup>。豆荚状铬铁矿独特的瘤状和球状结构是层状铬铁矿所不具有的,提示了上地壳中不具备其形成条件,其大多数来源于作为同源包体的含铬铁矿岩体在再活化和再侵位过程中的变形<sup>[44]</sup>;豆荚状铬铁矿为岩浆袋中的堆积体,后作为同源包体下沉到残余地幔中<sup>[45]</sup>;下

地壳层状铬铁矿体嵌入上地幔岩石中形成豆荚状铬铁矿<sup>[46]</sup>;铬尖晶石熔滴聚集成矿浆,矿浆与岩浆熔离并结晶形成铬铁矿<sup>[47]</sup>。

### 4.2 熔融成因

熔融成因论者认为豆荚状铬铁矿成分的广泛变化源于不同程度的部分熔融<sup>[13]</sup>。豆荚状铬铁矿的成分变化与寄主橄榄岩的熔融程度高低有关,如 Cr 随熔融程度的增高而增高,铬铁矿在微小的岩浆房中下沉<sup>[48]</sup>;Cassard 等<sup>[49]</sup>通过对豆荚状铬铁矿的微构造(lineation)研究,认为豆荚状铬铁矿形成于上地幔内小而陡的槽穴状岩浆房中<sup>[15]</sup>;Leblance 等<sup>[50]</sup>认为铬铁矿是在“开放体系岩墙状构造”中沉淀的。豆荚状铬铁矿是原始地幔岩高度熔融再造的产物<sup>[8,14,30]</sup>。金振民等<sup>[51]</sup>所做的熔融实验已证实富铬矿浆直接结晶则形成高铬铬铁矿,若在亚固相状态与基性熔体发生再平衡则形成高铝铬铁矿<sup>[13]</sup>。高铬型豆荚状铬铁矿床是原始地幔岩高度熔融的最终产物<sup>[12,30]</sup>。鲍佩声等<sup>[13]</sup>提出了高铝铬铁矿是原始地幔岩不同程度部分熔融再造的产物,其成矿模式有中低熔再造成矿模式和高熔再造-再平衡成矿模式 2 种。中低熔型岩体因熔融程度低而缺失含矿杂岩带,矿浆含铬偏低,矿床规模小;高熔型岩体的熔融再造与含高铬型矿床的岩体相似,均以形成含矿杂岩带及富铬矿浆为特征。铬铁矿  $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$  值很低反映了熔体来自低度亏损的幔源区<sup>[52]</sup>。控制铬铁矿  $\text{Cr}/\text{Al}$  变化的因素是熔体成分<sup>[48,53]</sup>、超基性岩浆的分离结晶作用<sup>[54-56]</sup>、熔体的温度<sup>[57]</sup>、铬铁矿形成的深度<sup>[58]</sup>,铬铁矿的  $\text{Al}/\text{Cr}$  值是压力的函数<sup>[59]</sup>。

高铬型和高铝型铬铁矿由不同成分的母岩浆结晶而成。高铬型铬铁矿母岩浆为玻安岩(boninitic magma),而高铝型为拉斑玄武质岩浆(tholeiitic magma);铬铁矿是岩石(方辉橄榄岩)与熔体(母岩浆)反应(rock/melt interaction)的产物,而豆荚状矿体周围的薄壳纯橄岩是熔体交代寄主方辉橄榄岩形成的<sup>[16,20,32,60-66]</sup>。从构造环境上来说,高铬型铬铁矿与俯冲带(SSZ)上方对应,而高铝型铬铁矿与扩张脊对应。

### 4.3 地幔成因

大多数学者认为豆荚状铬铁矿形成于上地幔,但近年的研究表明铬铁矿可能形成于下地幔<sup>[1]</sup>。中国地质科学院地质研究所在西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中发现了金刚石,并在铬铁矿中找到八面体假象蛇纹石<sup>[67]</sup>,Bai 等<sup>[68]</sup>在罗布莎和东巧也发现了可能含金刚石的地幔橄榄岩和豆荚状铬铁矿,实验表明

其形成深度达 400 km,代表地幔过渡带深度的矿物<sup>[69]</sup>。在罗布莎铬铁矿中发现了典型原生相的 Os-Ir 合金、Os-Ir-Ru 合金、Pt-Fe 合金、Ir-Ni-Fe 合金等,形成于 150 km 深度以下,后作为捕虏晶被地幔柱搬运到浅部<sup>[70]</sup>。Bird 等<sup>[71]</sup>认为产于铬铁矿中的铁镍金属和 Os-Ir 合金是下部地幔结晶的产物。白文吉等<sup>[28]</sup>在罗布莎豆荚状铬铁矿的人工重砂中发现了 60~70 种地幔矿物群,揭示了其存在的下地幔超高压矿物组合。远东 Koryak 高原蛇绿岩和铬铁矿中也发现了自然金属(如金、铜、铬、铁及自然硅等),反映其形成的下地幔环境。罗布莎铬铁矿中还发现可能是由更高压相的斯石英(形成压力  $p > 9$  GPa)在压力降低的环境下相变形成的呈斯石英假象的柯石英<sup>[72]</sup>,认为铬铁矿可能来自地幔深部(形成深度  $> 300$  km)。在罗布莎铬铁矿发现钼铌矿与原位金刚石共生<sup>[73]</sup>,表明金刚石产自铬铁矿,指示其形成于高温高压( $t > 2\ 000\ ^\circ\text{C}$ ,  $p > 5$  GPa)环境。在康金拉矿区和香卡山矿区的铬铁矿中也发现了金刚石,并且在康金拉铬铁矿床的容矿地幔橄榄岩中发现了金刚石等异常地幔矿物,扩展了金刚石超高压矿物的空间分布,为探讨铬铁矿的成因提供了新的重要证据<sup>[73-75]</sup>。在俄罗斯极地乌拉尔铬铁矿中也发现了金刚石等异常地幔矿物,并在金刚石中发现纳米级柯石英包裹体,证明金刚石为原生产物,提供了铬铁矿为地幔成因的关键证据<sup>[76]</sup>。高温高压实验证明铬铁矿中硅金红石是在超高压环境下形成,通过对碳硅石研究,认为其可能来自下地幔<sup>[77-78]</sup>。另外,徐向珍<sup>[79]</sup>在地幔橄榄岩中发现地壳成因的老锆石,提出罗布莎的地幔橄榄岩和铬铁矿可能是地幔柱成因。

## 5 铬铁矿找矿方向与资源前景

面对我国铬铁矿资源紧缺的局面,需从全球的角度来看待铬铁矿的成矿作用与壳-幔演化的成因联系<sup>[80]</sup>,转变对豆荚状铬铁矿的成因和找矿方向的认识。杨经绥等<sup>[1]</sup>提出铬铁矿的物质不一定来源于容矿的地幔橄榄岩,产有豆荚状铬铁矿的地幔橄榄岩体的规模和矿床储量没有直接关系,小岩体也可有挖掘出大矿的前景。王方国等<sup>[34]</sup>认为地表矿少,盲矿体多,若发现有呈雁行式和叠瓦式规律分布的矿体,则很有可能赋存大的矿体。根据罗布莎铬铁矿矿体主要产于壳-幔边界(岩石莫霍面)以下的一

定层位、一定岩相构造带内及其显示的矿带分布规律,王希斌等<sup>[80]</sup>认为当前的首要目标是在铬铁矿床成矿带中找矿,而不应仅限于地表和浅部“就矿找矿”,需进一步加大矿带中深部下矿段隐伏矿体的找矿力度。他预测西藏罗布莎、香卡山和康金拉 3 个矿区铬铁矿远景规模有望大大提升。

中国尤其西藏发育数条规模巨大的蛇绿岩带,十分有必要开展新一轮铬铁矿资源调查评价工作。西藏普兰地幔橄榄岩体与罗布莎岩体和俄罗斯乌拉尔的拉依兹地幔橄榄岩类似,而后两者均发现了大型铬铁矿床,因此非常有必要开展普兰超镁铁质岩体及该区其他几个大岩体(如东波岩体( $400\text{ km}^2$ )和休古嘎布岩体( $700\text{ km}^2$ ))的铬铁矿前景调查<sup>[1]</sup>。王方国等<sup>[34]</sup>指出雅鲁藏布江中段和青藏高原西部新疆、青海地区是中国铬铁矿资源的潜在远景区。内蒙古索伦山—贺根山铬铁矿成矿带也具有良好的找矿前景。铬的成矿专属性决定了超基性岩体是潜在找矿对象,加强对研究程度低的超基性岩体的研究,有可能会找到新的铬铁矿床。黄圭成等<sup>[81]</sup>在雅鲁藏布江蛇绿岩带西段达巴—休古嘎布蛇绿岩带中发现有一定前景的铬铁矿化点。鲍佩声等<sup>[14]</sup>认为藏南雅鲁藏布江—狮泉河超基性岩带西段、藏北超基性岩带的东段与西段、内蒙古超基性岩北岩带西段、祁连山超基性岩带的西部和东部地区以及东准噶尔地区研究程度较低,找矿潜力巨大。攀枝花地区的层状超镁铁—镁铁岩岩体含有较高的钛铬铁矿<sup>[82]</sup>,这会不会是一种新的铬铁矿类型?就该类铬铁矿,王登红等<sup>[83]</sup>认为扬子地台西南缘以及华北地台北缘都是有利的找矿部位。

近年来采用新技术新方法寻找铬铁矿的例子也不乏少数:利用高精度磁测,余中明等<sup>[84]</sup>在藏南雅鲁藏布江—狮泉河超基性岩带中发现矿体;利用高精度航磁,王德发等<sup>[85]</sup>在藏南中部发现了 5 条强磁异常带和 2 个强磁异常群;利用无线电信号,M. Bayrak<sup>[86]</sup>能根据超基性岩体和铬铁矿的电阻差异区分二者;通过航磁数据的反转,H. Jean 等<sup>[87]</sup>展示了地壳岩石和地幔岩石明显的区别,这些都为铬铁矿的找矿提供了有力的线索。

## 6 结论

我国铬铁矿资源形势非常严峻,建议深入开展豆荚状铬铁矿成矿理论的研究;利用新技术新方法,

加强已知铬铁矿的外围以及深部隐伏矿体的找矿；探究新的铬铁矿类型。

### 参考文献：

- [1] 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.
- [2] 胡德文,马成义,陈甲斌. 我国铬铁矿供需状况及其可持续供应对策探讨[J]. 矿产保护与利用,2004(3):9-11.
- [3] 陈向阳,谢群. 中国铬铁矿的现状与展望[J]. 甘肃科技纵横,2006,35(5):38.
- [4] 张友平,周渝生,李肇毅. 我国不锈钢原料资源和生产进展[J]. 特殊钢,2008,29(6):17-19.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 兰朝利,何顺利,李继亮. 蛇绿岩铬铁矿形成环境和成矿机制[J]. 甘肃科学学报,2006,18(1):53-56.
- [8] 鲍佩声. 再论蛇绿岩中豆荚状铬铁矿的成因——质疑岩石/熔体反应成矿说[J]. 地质通报,2009,28(12):1741-1761.
- [9] Thayer T P. Principal features and origin of podiform chromite deposits, and some observations on the Gulemen-Soridag district, Turkey[J]. Econ Geol, 1964(59): 1497-1524.
- [10] Leblanc M, Nicolas A. Ophiolitic chromitites[J]. International Geological Review, 1992,34: 653-686.
- [11] 李江海,牛向龙,黄雄南,等. 豆荚状铬铁矿:古大洋岩石圈残片的重要证据[J]. 地学前缘,2002,9(4):235-246.
- [12] 鲍佩声,王希斌,郝梓国,等. 对富铝型豆荚状铬铁矿床成因的新认识——以新疆萨尔托海铬铁矿床为例[J]. 矿床地质,1990,9(2):97-111.
- [13] 鲍佩声,王希斌. 富铝型豆荚状铬铁矿床的成矿模式[J]. 地球学报,1997,18(1):25-39.
- [14] 鲍佩声,王希斌,彭根永. 中国铬铁矿床[M]. 北京:科学出版社,1999:1-350.
- [15] Lago B, Rabinowicz M, Nicolas A. Podiform chromitite ore bodies: A genetic model[J]. J Petrol, 1982,23: 103-126.
- [16] Melcher F, Grum W, Simon G, et al. Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a study of solid and fluid inclusions in chromite[J]. Jour. Petrol, 1997, 38 (10):1419-1458.
- [17] Ballhaus C. Origin of podiform chromite deposits by magma mingling[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 156: 185-193.
- [18] Edwards S, Pearce J, Freeman J. New insights concerning the influence of water during the formation of podiform chromite[C]//Dilek Y, Moores E M, Elthon D, et al. Ophiolites and Oceanic Crust: New Insights From Field Studies and the Ocean Drilling Program. Geological Society Special Paper, Boulder, Colorado, 2000, 349: 139-147.
- [19] Mei-fu Zhou, Wenji Bai. The origin of the Podiform chromite deposits[J]. Mineral Deposits, 1992, 13(3):242-249.
- [20] Mei-Fu Zhou, Robinson P T, Malpas J, et al. Podiform chromitites in the Luobusa ophiolite (Southern Tibet): Implication for melt/rock interaction and chromite segregation in the upper mantle [J]. Jour. Petrol, 1996, 37(1): 3-21.
- [21] Mei-fu Zhou, Sun M, Keays R R, et al. Controls on platinum-group elemental distributions of podiform chromitites: a case study of high-Cr and high-Al chromitites from Chinese orogenic belts[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, 62:677-688.
- [22] Mei-fu Zhou, Malpas J, Robinson P T, et al. Crystallization of podiform chromitites from silicate magmas and the formation of nodular textures [J]. Resource Geology, 2001, 51 (1): 1-6.
- [23] 陈征,李江海,黄雄南,等. 豆荚状铬铁矿豆状结构成因机制探讨——以遵化地区豆荚状铬铁矿为例[J]. 地学前缘, 2004,11(1):215-223.
- [24] Nicolas A. Structures of Ophiolites and Dynamics of Oceanic Lithosphere[M]. Kluwer Academic Publishers, 1989: 223-252.
- [25] 周美付,白文吉. 对豆荚状铬铁矿床成因的认识[J]. 矿床地质,1994,13(3):242-249.
- [26] Arai S, Matsukage K. Petrology of a chromite micropod from Hess Deep, equatorial Pacific: a comparison between abyssal and Alpine-type podiform chromitites [J]. Lithos, 1998, 43(1): 1-14.
- [27] Nicolas A, Azri H A. Chromite-rich and chromite-poor ophiolites: the Oman case[M]//Peter T. Ophiolite genesis and evolution of the oceanic lithosphere. 1991: 261-274.
- [28] 白文吉,杨经绥,方青松,等. 西藏蛇绿岩地幔中的主要自然金属矿物[J]. 地学前缘,2004,11(1):179-188.
- [29] Li Jianghai, Kusky T M, Huang Xiongnan. Archean podiform chromitites and mantle tectonites in ophiolitic Mélange, North China Craton: A record of early oceanic mantle processes[J]. GSA Today, 2002, 12(7):4-11.
- [30] 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(2): 166-181.
- [31] Pearce J A, Lippard S J, Robert S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites[M]//Kokelaar B P, Howells M F. Marginal Basin Geology, Volcanic and Ancient Marginal Basins. London: Black-well Scientific Publication, 1984:77-94.
- [32] Proenza J A, Gervilla F, Melgarejo J C, et al. Al-rich and Cr-rich chromitites from the Magarí-Baracoa ophiolitic belt (eastern Cuba): Consequence of interaction between volatile-rich belts and peridotites in Suprasubduction mantle [J]. Econ. Geol, 1999, 94: 547-566.
- [33] Yumul G P. The Acoje block platiniferous dunite horizon, Zambales ophiolite complex, Philippines: melt type and associated geochemical controls[J]. Resource Geology, 2001, 51 (2): 165-174.
- [34] 王方国,杨君雅,陈莉. 青藏高原的蛇绿岩与铬铁矿[J]. 地质

- 通报, 2009, 28(12): 1762-1768.
- [35] 鲍佩声, 王希斌. 对大漠尔吉铬铁矿床成因的新认识[J]. 矿床地质, 1989, 8(1): 3-18.
- [36] Leblanc M, Violette J F. Distribution of Aluminium-Rich and Chromium-Rich chromite pods in ophiolite peridotites[J]. Econ. Geol., 1983, 78(2): 293-301.
- [37] 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.
- [38] Arai S. Dunite-harzburgite-chromite complexes as refractory residue in the Sangun-Yamaguchi zone, Western Japan[J]. Petrol., 1980, 21: 141-165.
- [39] Sinigoi S, Comin-Chiaramonti P, Demarchi G, et al. Differentiation of partial melts in the mantle: Evidence from the Bal-muccia peridotite, Italy[J]. Contrib Mineral Petrol, 1983, 82: 351-359.
- [40] 周会武, 李志林. 玉石沟铬铁矿床的成因[J]. 甘肃地质学报, 1995, 4(1): 44-53.
- [41] Fisher L W. Origin of chromite deposits[J]. Econ. Geol., 1929, 24: 691-721.
- [42] Samposon E. Magmatic chromite deposits in Southern Africa [J]. Econ. Geol., 1932, 27: 113-144.
- [43] 兰朝利, 何顺利, 李继亮. 蛇绿岩铬铁矿形成环境和成矿机制[J]. 甘肃科学环境, 2006, 18(1): 53-56.
- [44] Thayer T P. Gravity differentiation and magmatic replacement of podiform chromite deposit[J]. Econ. Geol. Monograph, 1969, 4: 132-146.
- [45] Dickey J S. A hypothesis of origin for podiform chromite deposit[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1975, 39(6/7): 1061-1062.
- [46] Greenbaum D. The Chromitiferous Rocks of the Troodos Ophiolite Complex, Cyprus [J]. Economic Geology, 1977, 72: 1175-1194.
- [47] 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.
- [48] Neary C R, Brown M A. Chromites from the Al' Ays complex, Saudi Arabia, and Semail complex, Oman[R]//Institute of Applied Geology, Kingdom of Saudi Arabia; Bulletin, 1979(3): 193-205.
- [49] Cassard D, Nicolas A. Structure classification of chromite pods in Southern New Caledonia[J]. Econ. Geology, 1981, 76: 805-831.
- [50] Leblanc M, Ceuleneer G. Chromite crystallization in multicellular magma flow: Evidence from a chromitite dyke in the Oman ophiolite[J]. Lithos, 1992, 27: 231-257.
- [51] 金振民, 关白, Kohlstedt D L, 等. 铬铁矿预富集和上地幔部分熔融关系的实验研究[J]. 地质论评, 1996, 42(5): 424-429.
- [52] Georgiou E, Xenophontos C. Chromite occurrences and associated plutonic rocks in the Akapnou Forest[C]//Malpas J, Moores E M, Panayiotou A, et al. Ophiolites; Oceanic Crustal Analogues. Proceedings of the symposium "Troodos 1987": Nicosia, Cyprus, 1990: 585-592.
- [53] Thayer T P. Chemical and structural relations of ultramafic and feldspathic rocks in Alpine intrusive complexes: Ultramafic and related rocks[M]. John Wiley & Sons, Inc, 1967: 222-239.
- [54] Yuan Qilin. The genetic connection between the segregation veins of troctonite-diabase-gabbro and chromite[J]. Science Geologic Sinica, 1966(1): 32-49.
- [55] Irvine T N. Chromium spinel as petrogenetic indicator[J]. Petrologic application; Can. Jour. Earth Sci., 1967, 4: 71-103.
- [56] Konstantopoulou G, Eliopoulos M E. Geochemistry of the Vourvouris chromite ores Greece[C]//Ophiolites; Ocean Crustal Analogues. 1990: 605-613.
- [57] Dickey J S, Yoder H S. Partitioning of aluminium and chromium between clinopyroxene and spinel[J]. Carnegie Inst. Wash. Yearb., 1971, 71: 384-392.
- [58] Brown M. Textural and geochemical evidence for the origin of some chromite deposits in the Oman Ophiolite[C]//Ophiolites; Proceedings of the International Ophiolites Symposium (Nicosia, Cyprus, 1979). 1980: 714-721.
- [59] Malpas J, Strong D F. A comparison of chrome spinels in ophiolites and mantle diapirs of Newfoundland[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1975, 39(6/7): 1045-1060.
- [60] Roberts S R. Ophiolitic chromitite formation: A marginal basin phenomenon[J]. Econ. Geol., 1988, 83: 1034-1036.
- [61] Mei-Fu Zhou, Robinson P T, W-J Bai. Formation of podiform chromitites by melt/rock interaction in the upper mantle[J]. Mineral. Deposita, 1994, 29: 98-101.
- [62] Mei-Fu Zhou, Robinson P T. Origin and tectonic environment of podiform chromite deposits[J]. Econ. Geol., 1997, 92: 259-262.
- [63] Mei-Fu Zhou, Robinson P T, Malpas J, et al. REE and PGE geological constraints on the formation of dunites in the Luobusa ophiolite, Southern Tibet[J]. Jour. Petrol., 2005, 46(3): 615-639.
- [64] Rollinson H. Chromite in the mantle section of the Oman ophiolite: A new genetic model[J]. The Island Arc, 2005, 14: 542-550.
- [65] Tamura A, Arai S. Unmixed spinel in chromite from the Iwana-dake peridotite complex, Hokkaido, Japan-A reaction between peridotite and highly oxidized magma in the mantle wedge [J]. Amer. Mineral., 2005, 90: 473-480.
- [66] Uysal I, Tarkian M, Sadiklar M B, et al. Platinum-group-element geochemistry and mineralogy of ophiolitic chromites from the Kop Mountains, NE Turkey[J]. Can. Mineral., 2007, 45: 355-377.
- [67] 杨凤英, 康志琴, 刘淑春. 蛇纹石的八面体假象及其成因的初步探讨[J]. 矿物学报, 1981(1): 52-54.
- [68] Bai Wenji, Zhou Meifu, Robinson P J. Possibly diamond-bearing mantle peridotites and podiform chromitites in the Luobusa and Dongqiao ophiolites, Tibet[J]. Can. J. Earth Sci., 1993, 30: 1650-1659.

- [69] Chen M, Goresy A E, Gillet P. Ringwoodite lamellae in olivine: Clues to olivine-ringwoodite phase transition mechanisms in shocked meteorites and subducting slabs [J]. *Pnas*, 2004, 101: 15033–15037.
- [70] Bai W J, Robinson P T, Fang Q S, et al. The PGE and base-metal alloys in the podiform chromitites of the Luobusa ophiolite, Southern Tibet [J]. *Canadian Mineralogist*, 2000, 38: 585–598.
- [71] Bird J M, Meibom A, Frei R, et al. Osmium and lead isotopes of rare Os, Ir, Ru minerals: Derivation from the core-mantle boundary region? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 170: 83–92.
- [72] Yang Jingsui, Larissa D, Bai Wenji, et al. Green II. Diamond-and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet [J]. *Geology*, 2007, 35(10): 875–878.
- [73] 杨经绥, 张仲明, 李天福, 等. 西藏罗布莎铬铁矿体围岩方辉橄榄岩中的异常矿物 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(7): 1445–1452.
- [74] 徐向珍, 杨经绥, 巴登珠, 等. 雅鲁藏布江蛇绿岩带的康金拉铬铁矿中发现金刚石 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(7): 1453–1462.
- [75] Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Chen Songyong, et al. An unusual mantle mineral group from chromitite orebody Cr-11 in the Luobusa ophiolite of the Yarlung-Zangbo suture zone, Tibet [J]. *Journal of Earth Science*, 2009, 20(2): 284–302.
- [76] 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.
- [77] Ren Yufeng, Fei Yingwei, Yang Jingsui, et al. SiO<sub>2</sub> solubility in rutile at high temperature and pressure [J]. *Journal of Earth Sciences*, 2009, 20(2): 274–283.
- [78] Trumbull Robert B, Yang Jingsui, Robinson Paul T, et al. The carbon isotope composition of natural SiC (moissanite) from the Earth's mantle: New discoveries from ophiolites [J]. *Lithos*, 2009, 113: 612–620.
- [79] 徐向珍. 藏南康金拉豆荚状铬铁矿和地幔橄榄岩成因研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2009: 145.
- [80] 王希斌, 周详, 郝梓国. 西藏罗布莎铬铁矿床的进一步找矿意见和建议 [J]. *地质通报*, 2010, 29(1): 105–114.
- [81] 黄圭成, 徐德明, 雷义均, 等. 西藏西南部达巴—休古嘎布绿岩带铬铁矿的找矿前景 [J]. *中国地质*, 2007, 34(4): 668–674.
- [82] 骆耀南. 攀枝花地区新阶含钛铬铁矿的层状超镁铁-镁铁岩岩体的矿化特征 [J]. *地球化学*, 1981(1): 66–74.
- [83] 王登红, 骆耀南, 屈文俊. 中国西南铂族元素矿床地质、地球化学与找矿 [M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [84] 余中明. 高精度磁测技术在铬铁矿勘探中的应用效果——仁布超基性岩体为例 [J]. *地质找矿论丛*, 2006, 21(增刊): 165–167.
- [85] 王德发, 刘英才, 熊盛青. 西藏铬铁矿接替资源航磁勘查及找矿方向探讨 [J]. *地质通报*, 2007, 26(4): 476–482.
- [86] Bayrak M. Exploration of chrome ore in southwestern Turkey by VLF-EM [J]. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 2002, 5(2): 35–46.
- [87] Jean H, Bedard B, Brassard A. Tremblay. Genetic classification of chromitite deposits, and structural implications of new results of geophysical inversion of aeromagnetic data on the Thetford Mines ophiolite, southern Quebec [J]. *Abstracts with Programs-Geological Society of America*, 2000, 32(1): 4.

## Present situation, geological features and prospecting direction of chromite in China

ZHOU Yong<sup>1,2</sup>, LI Junjian<sup>2</sup>, DUAN Ming<sup>2</sup>

(1. Chinese Academy of Geological sciences Graduate school, Beijing 100037, China;

2. Tianjin Institute of Geology and Mineral resources, Tianjin 300170, China)

**Abstract:** Chromite deposits in China are generally medium-small sized podiform ones and unevenly distributed with poor exploration and utilization condition. The podiform chromite deposits are composed of both high Cr and High Al ores with different ore-forming mechanism. Backarc and forearc basin, island arc and middle ocean ridge ridge and transform fault are possibly favorable settings for podiform chromite formation. More and More scholars consider that podiform chromite is formed in deep mantle. Chromite is a strategic mineral resource and is in shortage in China and almost entirely imported. Therefore prospecting of blind chromite deposits in the known chromite ore-forming belts should be strengthened.

**Key Words:** chromite; resource situation; geological features; prospecting direction; China