

## 含镍蛇纹石的综合利用现状

张本曰, 刘丹, 郭锐, 赵连兵

(昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 镍蛇纹石中含有大量的镍、镁、铁等资源, 但其中的镍等主要以类质同象的形式赋存, 采用常规选矿工艺难以实现其中有用矿物的综合利用。本文针对镍蛇纹石中镍、镁、铁、硅等的综合利用做一个简单地介绍, 并根据现有的工艺分析推测出镍蛇纹石研究中具有潜力的一些研究方向。

**关键词:** 镍蛇纹石; 镍、镁; 冶金化学; 综合利用

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.04.003

中图法分类号: TD952

文献标志码: A

文章编号: 1000-6532 (2020) 04-0013-08

### 1 引言

蛇纹石是超基性岩经中低温交代作用或中低区域作用后其中的橄榄石和辉石发生蛇纹岩化作用形成的, 是一种天然的含镁硅酸盐矿物, 是由硅氧四面体和氢氧镁八面体结合而成的 1:1 型层状结构硅酸盐矿物, 主要可分为利蛇纹石、叶蛇纹石和纤维蛇纹石。蛇纹石矿有特定的时空分布和成矿规律。矿石中六配位的 Mg 可以被  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  等置换, 当蛇纹石中的大量的  $\text{Mg}^{2+}$  被  $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  等以类质同象形式取代时, 就会形成镍蛇纹石等亚种<sup>[1]</sup>。利蛇纹石<sup>[2]</sup>为板状结构, 克服其结构中四面体和八面体片直接的不协调性的方式为原子位置的内部调整; 纤蛇纹石为管状结构, 八面体片在外, 四面体片在内, 在空间上形成卷曲, 以克服单元层间的不协调性, 叶蛇纹石结构则呈现交替波状弯曲, 此结构抵消单元层间不协调性的效果更好。虽然各种蛇纹石的结构不同, 硅、镁的含量也不同, 但采用化学成分分析并不能将其分开, 目前应用最多的方式为拉曼光谱分析<sup>[3-4]</sup>, 这可以很好地将三种蛇纹石分开。蛇纹石颜色通

常为绿色, 还有少量为浅灰、白色以及黄色, 具有油脂光泽, 纤维状蛇纹石具有丝绢光泽<sup>[5]</sup>。我国蛇纹石资源丰富且分布广泛, 主要分布在西部地区, 如青海、四川和陕西省。蛇纹石是一种重要的硅酸盐矿物, 其主要成分为硅和镁, 另外还伴生有一定量的镍、钴和铬等<sup>[6]</sup>。目前, 对于蛇纹石的晶体结构等与物化性能间的关系研究比较充分, 已经形成了完整的理论, 但是对于其表面性质研究较少, 尚未形成系统的理论, 一些研究结论具有唯一性, 适用与约束条件尚不明确, 这限制了蛇纹石资源在新领域的高效应用<sup>[7-8]</sup>。

当蛇纹石作为矿石中的脉石部分时, 虽然有较好的亲水性, 但在浮选过程中依然很容易进入硫化矿精矿中, 给后续工艺带来影响<sup>[9]</sup>。而对于镍蛇纹石, 主要是蛇纹石晶格中的镁被镍取代, 这是蛇纹石中镍的主要存在形式, 当这部分镍达到边界品位以上, 就具有回收价值<sup>[10]</sup>。目前比较认可的镍矿主要分为三种: 硫化镍矿、氧化镍矿以及砷化镍矿。部分蛇纹石在成矿过程中铁、镍等以类质同象的形式取代镁, 形成具有开采潜力的

收稿日期: 2019-06-27; 改回日期: 2020-08-12

作者简介: 张本曰 (1996-), 男, 硕士。

氧化镍矿<sup>[11]</sup>。镍是一种密度大、高导电导热性的银白色金属,高化学稳定性。镍不仅可以被用来制作不锈钢、高镍合金钢、合金钢结构和永磁材料等,还可用于制作陶瓷颜料、防腐镀层、化肥、耐火材料以及电池<sup>[12]</sup>。镍是一种还原剂,同时也可作为石油化工中有效催化剂。含镍蛇纹石中可回收利用资源主要有镍、镁、铂、铁、铬和硅等。

目前,对于蛇纹石的研究主要集中在其作为脉石矿物在硫化矿浮选中的影响以及采用各种浮选药剂来降低其对浮选过程的恶化,对于蛇纹石矿物中的有用组分的利用研究相对较少。本文主要针对蛇纹石中镍含量相对较多(一般为0.1%~0.4%)的镍蛇纹石中的镍、镁、铁、硅等有用组分的综合利用做一个简单的介绍。

## 2 综合利用现状

### 2.1 含镍蛇纹石中镍、镁的综合利用

蛇纹石中的镍主要以类质同象的形式存在,嵌布粒度较细,故采用一般的物理选矿方法不能将其富集<sup>[13]</sup>。镍蛇纹石中的镍含量相对其他镍矿含量较低,故大规模单一提取镍并不合理,故常和其他金属同时提取,如镁、铁等。目前,含镍蛇纹石中镍、镁的提取方法主要有化学冶金方法、浮选法以及植物提取等,其中化工冶金方法主要涉及有色金属冶金、粉末冶金、以及真空冶金等方面。有色金属冶金工艺主要包括湿法冶金、火法冶金以及电冶金等。湿法冶金工艺主要包括酸浸以及还原-氨浸等方法。值得注意的是,冶炼过程中,因其MgO含量高,故能耗较高,增加冶炼成本,同时这也会影响镍的回收<sup>[14]</sup>。虽然文中将化工冶金方法进行了分类,但实际应用中往往是多种冶金工艺共同应用才能实现有用矿物的综合利用。

#### 2.1.1 化学冶金方法在含镍蛇纹石中的应用

##### 2.1.1.1 有色金属冶金在含镍蛇纹石中的应用

有色金属冶金工艺包括湿法冶金、电冶金、火法冶金等,其中应用最多的主要是湿法冶金技术,

而火法冶金则主要在铅冶金行业中占据主要地位<sup>[15]</sup>。有色金属是支撑国家发展的重要资源,需求量巨大,且呈逐年递增的趋势,这使得有色金属提取技术的发展面临严峻的考验<sup>[16]</sup>。为了获得更好的选矿指标,常规选矿方法已经不足以支撑有色金属的需求,直接在选矿过程中采用有色金属冶金工艺开始进入选矿工作者的视野。对于难选的氧化矿,无论是火法冶金、电冶金,还是上文提到的湿法冶金,都具有各自的优势,但因为发展时间相对较短,其各自的潜力还未被完全发掘出来,仍需继续探索和发展。在实际应用中,对于有色金属的冶金工艺,有时需要多种冶金工艺同时应用来实现其合理利用。

#### (1) 火法冶金、电冶金在含镍蛇纹石中的应用:

火法冶金工艺作为一种古老的方法常应用于提取纯金属中,在实际应用中其主要应用于铅冶金行业。就火法冶金的过程来说,主要包括选矿、冶炼、精炼三个阶段;电冶金工艺则主要是以电能为主的冶金工艺,根据其电能转化形式的不同可分为电热冶金和电化冶金,目前来说,电冶金工艺主要用来生产铝<sup>[17]</sup>。在处理镍蛇纹石时,火法冶金、电冶金工艺还没有单独的应用,一般是二者同时应用再配合其他选矿工艺来实现其中有用矿物的综合利用。

丁泓兵等<sup>[18]</sup>将含镍蛇纹石、碳酸钠和C质还原剂按比例混匀后造球,在700~950℃下焙烧1~3h,冷却后破碎,在磁场强度8000~12000高斯下磁选,得到镍精矿,镍精矿与C质还原剂混合,电炉冶炼,得到镍铁和含硅酸镁的矿物熔渣,所得矿物熔渣加入真空反应器中,加入助剂和还原剂,控制真空度为1000~1200 kPa、温度1300~1600℃,收集镁蒸气,冷凝,得到结晶镁。

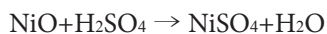
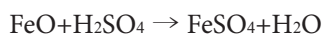
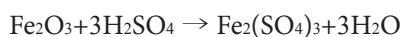
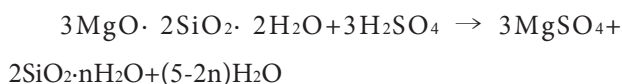
#### (2) 湿法冶金在含镍蛇纹石中的应用

湿法冶金是有色金属冶金中应用最多的。湿法冶金就是金属原料在酸性或者碱性介质中进行化学处理或者进行有机溶剂萃取提取有用组分再采用水溶液萃取等方法去除杂质得到纯金属的过程。

主要方法包括离子沉淀法、共沉淀法、置换沉淀法、有机溶剂萃取法以及离子交换法等。湿法冶金的主要过程包括浸出、净化和制备金属等过程<sup>[19]</sup>。现阶段湿法冶金正朝向矿浆电解、生物冶金、膜分离和机械活化浸出等方向发展<sup>[20]</sup>。

#### (a) 酸浸法在含镍蛇纹石中的应用

酸浸是用无机酸水溶液作浸出剂的矿物浸出工艺，是化学选矿中常用的浸出方法之一。酸碱的原理就是将矿石中的有用元素以离子形式进入溶液中，其他的元素则尽可能的留在滤饼中。以硫酸为例，蛇纹石与硫酸反应的主要化学反应方程式如下：



吴照洋<sup>[6]</sup>等将蛇纹石原矿磨至-0.074 mm 95%，在温度为95℃的条件下与盐酸反应2h，过滤，所得滤液在1000 mL的三口烧瓶中通空气氧化5 min，加入双氧水氧化15 min，在70℃的水浴加热情况下以恒流泵以20 r/min的速度滴加混合沉淀剂（20%的NaOH和浓氨水的混合碱液，配比为2:1）调pH值，过滤、洗涤即得铁镍混合物；符剑刚<sup>[21]</sup>等将含镍蛇纹石在磨矿浓度20%~60%的情况下粗碎至0.074~2 mm，在高压釜中搅拌并加入pH值为0.5~3的强酸，在温度90~220℃、压强110~230 kPa的情况下酸压煮浸出30~240 min，反应完全后过滤，得到含镍镁的浸出液，采用分布沉淀法分离，回收镍镁产品，或采用溶剂萃取、离子交换分离富集并回收镍镁资源；何章兴<sup>[10]</sup>将含镍蛇纹石矿磨矿后加入硫酸加压浸出，过滤，所得浸出液加入碳酸钠调pH值除铁，过滤后滤液加入硫化钠调节pH值除镍，得到硫化镍沉淀，滤液为含镁溶液，加入氢氧化钠调节pH值，沉淀氢氧化镁，经过洗涤、煅烧得到氧化镁；王晖<sup>[22]</sup>等采用多段逆流酸浸工艺，将含镍蛇纹石磨碎后加

入浸出剂等搅拌后浸出渣循环浸出，在综合回收镍、镁资源的基础上有效降低了生产成本；钟少燕<sup>[23]</sup>等针对内蒙某镍蛇纹石的矿石特点，将矿石磨至合适粒度后采用两段逆流浸出工艺，并对滤液进行深度过滤，最终综合回收其中的镍、镁、铁、钴等。

#### (b) 氨浸法在含镍蛇纹石中的应用

氨浸法是湿法冶金中常用的方法，采用氨或氨与盐作为浸出剂浸出有用矿物。氨浸法是最早应用于处理氧化镍矿的湿法冶金方式，目前，此法广泛用于铜、镍、钴等的冶炼。还原-氨浸即采用一定的还原剂还原有用矿物，再采用氨浸的方法浸出有用矿物。氨浸法与矿物反应主要有两种形式，第一种是利用其碱的性质，溶解矿物中的酸性化合物；第二种是利用其可以与某些金属离子形成络合物的性质使这些离子以络合物形式进入溶液中。当镍矿石中同时含有铜或钴时，氨浸法则很难将其有效分离，故目前采用氨浸法处理镍矿的工厂几乎全部是上世纪70年代建设的，且只有四家，应用于处理镍蛇纹石的研究则更少<sup>[24]</sup>。

刘慧<sup>[12]</sup>将蛇纹石磨至-74 μm，加入黄铁矿以及活性炭作为还原剂进行还原焙烧，得到焙砂，将焙砂加入氨水进行湿磨后加入氨水、碳酸铵再通入空气进行氨浸，固液分离后所得浸出液进行煅烧，可得氧化镍，通入氢气还原可得金属镍。

比较酸浸和氨浸两种方法，可以看出在蛇纹石领域氨浸法应用较少，主要有三方面原因。其一，蛇纹石中同时含有镍、钴等，其氧化物经还原后转化为金属镍、钴等，二者都易与氨形成络合离子，从而难以实现二者的分离<sup>[25]</sup>；其二，虽然理论上氨浸法相对于酸浸法更适宜于处理高镁矿石，因为酸浸过程中镁会消耗大量的酸，同时镁还会作为杂质进入溶液中，使得浸出液成分复杂，难以净化，但在本文中Mg主要作为有价元素加以回收，故氨浸法的优势并不明显<sup>[26]</sup>；其三，氨浸过程中需要保证有足够的温度、氨量以及足够的氧分压，而酸浸则更加简单易行，这都限制了氨浸法在蛇

纹石领域的应用。

### 2.1.1.2 粉末冶金在含镍蛇纹石中的应用

粉末冶金技术<sup>[27-28]</sup>是以金属粉末或金属粉末与非金属粉末的混合物作为原料,经过成形和烧结,制造金属材料、复合材料以及各种类型制品的工艺技术,粉末冶金制成品具有化学性能。近年来粉末冶金工艺正在飞速发展,逐渐应用到选矿过程中。粉末冶金工艺耗能低,利用率高,所制备的材料性能好,故其发展具有重要的意义<sup>[29]</sup>。虽然粉末冶金技术近年来正飞速发展,但是与国外工业仍有很大差距,尤其是在选矿中的应用,更是应用较少,但是因其本身的优势,笔者认为这将会成为未来选矿中的一个重要方向。另外,无论蛇纹石还是含镍蛇纹石,其本身镁的含量较高,故在实现镍蛇纹石中镁的综合回收方面粉末冶金工艺更具优势。

宋宁等<sup>[30]</sup>对含镍蛇纹石进行活化预处理后球磨至  $-74\ \mu\text{m}$ ,用硫酸进行常规浸出或者微波浸出,用  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  调 pH 值除铁,所得浸出液调温至  $30\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ ,搅拌,加入  $\text{Na}_2\text{S}$  调 pH 值沉淀重金属离子,所得净化液加入  $\text{NaOH}$  调 pH 值沉淀镍,除镍后加入氧化剂和氨水调 pH 值并陈化  $30\sim 60\text{ min}$  后过滤除锰,得到硫酸镁精液,浓缩后在  $30\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$  的超声恒温水浴中搅拌,后加入氨水或  $\text{NaOH}$  调 pH 值并保温陈化  $30\sim 60\text{ min}$  后洗涤,得到  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  沉淀,干燥研磨后得到  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  纳米粉体。

### 2.1.1.3 真空冶金在含镍蛇纹石中的应用

真空冶金是在有色金属冶金的基础上发展起来的。真空冶金方法主要包括真空熔炼技术、真空蒸馏技术、真空精炼技术以及真空热处理技术,真空冶金最大的特点是在低于标准大气压的条件下进行冶金作业,可以有效避免金属氧化,有效清除金属中的杂质和气体<sup>[31]</sup>。同时,真空冶金技术可以是金属中碳的脱氧能力增强,提高合金质量<sup>[32]</sup>。真空冶金技术对所有增容反应都有积极影响,可以减少冶炼过程中气体的输入,控制内外物质的交换<sup>[33]</sup>。矿石进行真空冶金必须满

足矿物被预先还原这一前提,常用的还原剂有碳、铝、硅等。

卢惠民等<sup>[34]</sup>将蛇纹石、助剂、还原剂、催化剂混合形成混合原料在加热炉中合适的真空度下加热升温,还原,使镁以蒸汽形式逸出,收集镁蒸气得到结晶镁。

综上所述,冶金工艺在含镍蛇纹石领域具有重要地位。虽然各种冶金工艺均能实现含镍蛇纹石中镍、镁的回收,但技术上仍有巨大差异。有色金属冶金虽然在国内的含镍蛇纹石矿的处理中应用较多,但其流程相对较长,资源利用率低,同时对环境的危害也较大,不利于国家对绿色产业的发展;真空冶金在冶炼过程中因为氧气含量低,与外界的交流程度也更弱,故可在减少氧化反应的同时减少对环境的影响,具有传统有色金属冶金无法比拟的优势;采用粉末冶金工艺制备的材料在其性能以及可靠性方面具有其他工艺制备的材料无法比拟的优势。真空冶金、粉末冶金虽然相对传统的有色金属冶金在蛇纹石领域应用较少,但根据国家对绿色工艺的要求,二者依旧是未来发展的重要方向。

### 2.1.2 浮选法在含镍蛇纹石中的应用

蛇纹石中的镍主要为氧化镍矿,只有少量的硫化镍矿,采用常规浮选方法很难将其回收,故常采用还原硫化的方法将氧化镍转换为硫化镍,再采用浮选的方法将其回收。硫化过程中加入少量的黄铁矿有利于反应的进行,原因可解释为少量的黄铁矿正在焙烧过程中受热分解,生成单质硫以及硫化亚铁,前者可在碳热还原过程中使氧化镍矿生成镍黄铁矿,在后续的浸出过程中分解成硫化镍<sup>[35]</sup>。

李锐等<sup>[11]</sup>将蛇纹石和碳粉、黄铁矿按一定的比例混合后在有氮气保护的  $800\text{ }^\circ\text{C}$  的硅碳管炉中焙烧  $6\text{ h}$ ,冷却后磨至  $-0.074\text{ mm}$  下进行浮选,加入六偏磷酸钠作抑制剂,丁黄药和 Z-200 作捕收剂,CMC 作镁矿物的抑制剂,浮选精矿进行三段酸浸,得到镁含量仅为  $7.15\%$  的镍精矿;孙大勇<sup>[36]</sup>等针

对双龙镍蛇纹石矿的特点采用摇床粗选-粗选中矿再选-摇床混合精矿浮选工艺流程,调节磨矿细度和浮选药剂制度,最终获得精矿镍品位 8.20%,镍回收率 14.09% 的优良指标。

值得注意的是,浮选过程对原矿要求较高,同时影响因素较多,且使用的药剂对环境有较高的污染性,故浮选法在蛇纹石选镍中应用较少。寻找高效且环保的药剂或合理可行且环境友好的选矿工艺必将是未来蛇纹石研究的主体方向。

### 2.1.3 植物提取在含镍蛇纹石中的应用

对于超镁铁质的矿石,植物提取是一种环境友好的选矿方法,用于从低品位天然金属富集土壤等次经济矿体中提取微量元素。植物提取对于镍超累积植物,例如地中海植物和十字花科植物,可以在地上组织中积累大量的镍,收获的镍超累积植物焚烧后形成的灰经过加工可以回收金属镍以及镍产品,例如镍铁、镍盐或者镍催化剂等<sup>[37]</sup>。目前镍的植物提取国外应用较多,例如加利西亚<sup>[37]</sup>、印度尼西亚<sup>[38]</sup>、奥地利<sup>[13]</sup>等。

## 2.2 含镍蛇纹石中铁的综合利用

国内外对于含镍蛇纹石中的铁元素直接生产铁的研究较少,主要是以铁沉淀物的形式进行收集,作为工业原料,但是其附加值较低,故其中铁的回收利用不如镍、镁受重视,将蛇纹石中的铁作为副产品生产铁的相关化工产品如铁红或者与镍共同沉淀,作为生产铁镍合金的原料,不仅可以解决生产中铁的利用问题,还可以提高整体的生产效益<sup>[6,13]</sup>。

所谓生产氧化铁红<sup>[13]</sup>,即蛇纹石经酸浸或者碱浸后调节 pH 值沉淀铁,所得沉淀主要有非晶形的  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\alpha\text{-FeOOH}$  沉淀和黄铵铁矾沉淀,后两者可作为生产氧化铁红的前驱体,由于黄铵铁矾沉淀在使用过程中会产生有害气体,故多采用控制 pH 值、反应温度以及加料速度等条件生成  $\alpha\text{-FeOOH}$  沉淀,煅烧后即得到氧化铁红。

肖景波等<sup>[39]</sup>在合适的工艺条件下将蛇纹石加工过程中生成的沉淀物进行精致、洗涤、酸解、

还原、净化、氧化、沉淀、煅烧后制得质量合格的高纯氧化铁产品,为蛇纹石的综合利用开辟了新的途径,同时,也为含镍蛇纹石中铁的综合利用提供了新的思路。

## 2.3 含镍蛇纹石中硅的综合利用

蛇纹石中的主要成分为  $\text{MgO}$  以及二氧化硅,其中的硅主要用来制备白炭黑以及纳米纤维白炭黑。白炭黑不仅是橡胶材料的优良补强剂,而且应用于造纸业中还可增强纸张白度、强度等,另外,在化工行业其也是不可或缺的填料<sup>[39]</sup>。目前,从蛇纹石矿物中提取白炭黑正逐渐发展为国内外研究的重点<sup>[40-41]</sup>。对于制备纳米纤维白炭黑,此法适应于处理蛇纹石石棉。蛇纹石石棉纤维表面存在的大量  $\text{OH}^-$  在酸性条件下与  $\text{H}^+$  反应,使得  $\text{Mg}^{2+}$  裸露, $\text{H}^+$  浓度足够大时,可完全溶出其中的  $\text{MgO}$ ,残余固体是高纯度的  $\text{SiO}_2$  纳米纤维状物质<sup>[42]</sup>。此法制成的纳米纤维白炭黑质轻、化学稳定性好、耐高温、绝缘性好,同时因为石棉中的镁被溶解到溶液中,这降低了石棉的生理毒性。酸浸过程中蛇纹石中的硅主要以无定形二氧化硅的形态存在,反应活性较高,是制备普通白炭黑的良好原料。

陈虹<sup>[43]</sup>将蛇纹石酸浸渣经碱溶、中和沉淀后分离干燥,得到符合 GB/T3061-1999 要求的白炭黑;陈虹<sup>[44]</sup>将青海蛇纹石加入盐酸和水玻璃和氯化钠溶液搅拌,控制反应温度和时间,过滤,得到符合 HG/T 3061-1999 要求的白炭黑;吕宪俊等<sup>[45]</sup>将蛇纹石酸浸渣碱溶后制备水玻璃,再将水玻璃凝胶、老化、烘干后粉碎,得到成品白炭黑;杨睿<sup>[46]</sup>将蛇纹石酸浸渣与碱反应制备水玻璃,将水玻璃加酸酸化、陈化后得到白炭黑。

## 2.4 含镍蛇纹石中其他有价金属的综合利用

蛇纹石中除了含有大量的硅、镁以及少量的镍、铁外,还含有一定量的铝、钙、钴等。朱萍<sup>[47]</sup>等采用溶剂萃取法对蛇纹石浸出液中的金属离子进行萃取分离,实现了  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等的分离;代群威等利用黑曲霉菌对蛇纹石尾矿进行了微生

物浸出,实现了钴资源的回收利用以及废物的资源化处理;陈彦国<sup>[48-49]</sup>等在盐酸介质中,以二(2-乙基己基)二硫代磷酸作为萃取剂,在 pH=1 的条件下萃取 30 min,钼的萃取率可达 98%,这为对于含镍蛇纹石中钼的萃取提供了思路。

### 3 结 语

我国有着丰富的优良蛇纹石资源,加强蛇纹石类矿物的表面性质的方面的理论研究,形成系统的理论,找到一条普适性的蛇纹石类矿物的综合利用之路,推动蛇纹石类矿物在新领域中的应用,是未来选矿工作者一个非常有潜力的研究方向;另外,寻找一条既经济合理有环境友好的蛇纹石类矿物的综合利用之路,这不仅可以保证企业效益,又符合我国现阶段产业结构升级、发展模式转变的战略需求,推动绿色产业的发展。

### 参考文献:

- [1] 陈彦国,陈鸣.蛇纹石的性质与利用的研究进展[J].化学世界,2018,59(2):65-73.
- Chen Y G, Chen M. Progress on the Properties and Applications of the Serpentine [J]. Chemical World, 2018, 59 (2): 65-73.
- [2] 杜攀,陈文超,王海增.硅酸镁材料及其应用[J].盐业与化工,2013,42(10):1-6.
- Du P, Chen W C, Wang H Z. Magnesium Silicates and Its Applications [J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2013, 42 (10): 1-6.
- [3] 申婷婷,张立飞,陈晶.俯冲带蛇纹岩的变质过程[J].岩石学报,2016,32(4):1206-1218.
- Shen T T, Zhang L F, Chen J. Metamorphism of Subduction Zone Serpentine [J]. Acta Petrologica sinica, 2016, 32 (4): 1206-1218.
- [4] 庞博,程坤,王玉凯.矿山胶结充填发展现状及展望[J].现代矿业,2015(559):28-30,33.
- Pang B, Cheng K, Wang Y K. Development Status and Prospect of Cemented Filling in Mines [J]. Modern Mining, 2015 (559): 28-30, 33.
- [5] 赵玉卿,黄秉雄,刘磊,等.蛇纹石、绿泥石、滑石的可浮性及抑制方法综述[J].矿产综合利用,2018(2):7-11.
- Zhao Y Q, Huang B X, Liu L, et al. Summary of Serpentine, Chlorite, Talc Floatability and Rejecting [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018 (2): 7-11.
- [6] 吴照洋,郑水林,桂经亚.从含镍蛇纹石中提取和富集镍的研究[J].化工矿物与加工,2011(9):9-12.
- Wu Z Y, Zheng S L, Gui J Y. Study on Extracting and Concentrating Nickel from Nickeliferous Serpentine [J]. Industrial Minerals & Processing, 2011 (9): 9-12.
- [7] 李桂金,赵平,白志民.蛇纹石表面特性[J].硅酸盐学报,2017,45(8):1204-1210.
- Li G J, Zhao P, Bai Z M. Surface Characteristics of Serpentine [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45 (8): 1204-1210.
- [8] 李治杭,韩跃新,李艳军,等.蛇纹石表面特性研究[J].东北大学学报,2018,39(3):404-408.
- Li Z H, Han Y X, Li Y J, et al. Surface Property of Serpentine [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39 (3): 404-408.
- [9] 成朋飞,孙伟,胡岳华,等.起泡剂对细颗粒蛇纹石浮选的影响及其机理[J].中南大学学报,2018,49(2):261-267.
- Cheng P F, Sun W, Hu Y H, et al. Effect and Mechanism of Frothers on Flotation of Fine Serpentine [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49 (2): 261-267.
- [10] 何章兴.含镍蛇纹石矿综合利用技术研究[D].长沙:中南大学,2010.
- He Z X. Study on Comprehensive Utilization Technology of Nickel Bearing Serpentine Ore [D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [11] 李锐,都兴红,邓水林,等.含镍蛇纹石浮选降镁试验研究[J].矿产综合利用,2013(4):18-21.
- Li R, Du X H, Deng S L, et al. Research on the Process of Magnesium-decreasing in Flotation for the Serpentine Containing Nickel [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2013 (4): 18-21.
- [12] 刘慧.还原-氨浸法富集会理含镍蛇纹石中镍的研究[D].沈阳,东北大学,2012.
- Liu H. The Study for Extract of Nickel in Serpentine from Huili by Reduction-Ammonia Leaching [D]. Shenyang, Northeastern University, 2012.
- [13] 王刚.由蛇纹石制取硫酸镍及氧化铁红工艺研究[D].合肥,合肥工业大学,2012.
- Wang G. Study on the Technology of Producing Nickel Sulfate and Iron Oxide Red from Serpentine [D]. Hefei, Hefei University of Technology, 2012.
- [14] 胡志凯,谈伟军,曾克文,等.某高镁铜镍矿石浮选试验[J].金属矿山,2018(3):81-84.
- Hu Z K, Tan W J, Zeng K W, et al. Flotation Tests of a Nickel-copper Ore with High Magnesium [J]. Metal Mine, 2018 (3): 81-84.
- [15] 黄永,刘忠臣,贾绣敏,等.有色金属提取冶金技术现状及发展趋势分析[J].当代化工研究,2018:142-143.

- Huang Y, Liu Z C, Jia X M, et al. Current Situation and Development Trend of Nonferrous Metals Extraction Metallurgy Technology [J]. Chemical Intermediate, 2018:142-143.
- [16] 杨媛媛. 有色金属提取技术在冶金行业发展前景 [J]. 管理及其他, 2018:107,109.
- Yang Y Y. Development Prospect of Nonferrous metals Extraction Technology in Metallurgical Industry [J]. Management and other, 2018: 107, 109.
- [17] 王宏阳. 有色冶金化工过程原理浅析 [J]. 当代化工研究, 2018(5):30-31.
- Wang H Y. Analysis of Principle of Nonferrous Metallurgy Chemical Industry Process [J]. Chemical Intermediate, 2018(5):30-31.
- [18] 丁泓兵, 汪玉涛. 用含镍蛇纹石富集镍精矿的方法 [P]. 中国:CN103451417A, 2013.
- Ding H B, Wang Y T. Enrichment of Nickel Concentrate with Serpentine Containing Nickel [P]. China. CN103451417A, 2013.
- [19] 孙永达. 湿法冶金的研究进展 [J]. 科技创新导报, 2017,29:100-101.
- Sun Y D. Research Progress of Hydrometallurgy [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2017,29:100-101.
- [20] 刘维平, 邱定蕃, 卢惠民, 等. 湿法冶金新技术进展 [J]. 矿冶工程, 2003,23 (5):39-42,46.
- Liu W P, Qiu D F, Lu H M, et al. New Advances in Hydrometallurgical Technology [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2003,23 (5):39-42,46.
- [21] 符剑刚, 王晖, 谢海恣. 一种从含镍蛇纹石中综合高效回收镍镁资源的方法 [P]. 中国:CN101016581A, 2007.
- Fu J G, Wang H, Xie H Y. A Method of Comprehensive and Efficient Recovery of Nickel and Magnesium Resource from Nickel Bearing Serpentine [P]. China: CN101016581A, 2007.
- [22] 王晖, 符剑刚, 顾帼华, 等. 含镍蛇纹石矿的多段逆流酸浸工艺 [P]. 中国:CN101058852A, 2007.
- Wang H, Fu J G, Gu G H, et al. Multi Stage Countercurrent Acid Leaching of Nickel Bearing Serpentine Ore [P]. China:CN101058852A, 2007.
- [23] 钟少燕, 徐海涛. 镍蛇纹石浸出试验研究 [J]. 有色矿冶, 2012,28 (1):21-23.
- Zhong S Y, Xu H T. Study on Leaching Test of Garnierite Ore in Inner Mongolia [J]. Nonferrous Mining and metallurgy, 2012,28 (1):21-23.
- [24] 杨晓霞. 镍矿的湿法冶金研究现状与发展前景 [J]. 世界有色金属, 2010:44-45.
- Yang X X. Research Status and Development Prospect of Hydrometallurgy of Nickel Ore [J]. Technology & Equipment, 2010:44-45.
- [25] 李洪桂. 浸出过程的理论基础及实践 [J]. 稀有金属与硬质合金, 1995 (120): 14-19.
- Li H G. Theoretical Basis and Practice of Leaching Process [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 1995 (120): 14-19.
- [26] 杨新生. 氨浸过程浅析 [J]. 有色矿冶, 1993 (1), 34-37.
- Yang X S. Analysis of Ammonia Leaching Process [J]. Nonferrous Mining and metallurgy, 1993 (1): 34-37.
- [27] 房顶, 尹延国, 张国涛. 铁基粉末冶金材料表面渗硫及其摩擦学性能 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (6): 156-160.
- Fang D, Yin Y G, Zhang G T. Surface Sulfurizing of Iron-based Powder Metallurgy Material and Its Tribological Properties [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (6): 156-160.
- [28] 段家欢. 浅析粉末冶金材料及冶金技术发展 [J]. 世界有色金属, 2018:16-18.
- Duan J H. Development of Powder Metallurgy Materials and Metallurgical Technology [J]. Metallurgical smelting, 2018:16-18.
- [29] 陈梦婷, 石建军, 陈国平. 粉末冶金发展状况 [J]. 粉末冶金工业, 2017,27 (4):66-72.
- Chen M T, Shi J J, Chen G P. Development of Powder Metallurgy [J]. Powder Metallurgy Industry, 2017,27 (4):66-72.
- [30] 宋宁, 杜景红, 陈为亮, 等. 含镍蛇纹石活化酸浸制备氢氧化镁纳米粉体的方法 [P]. 中国:CN101456565A, 2009.
- Song N, Du J H, Chen W L, et al. Preparation of Nanometer Magnesium Hydroxide Powder by Acid Leaching of Nickel Containing Serpentine: China. CN101456565A [P]. 2009.
- [31] 潘发友, 胡沙. 真空冶金技术的开发及应用 [J]. 化工设计通讯, 2017, 43 (7): 253-254.
- Pan Y F, Hu S. Development and Application of Vacuum Metallurgy Technology [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2017, 43 (7): 253-254.
- [32] 张勇. 有色金属真空冶金的技术分析 [J]. 世界有色金属, 2019:29-31.
- Zhang Y. Technical Analysis of Nonferrous Metal Vacuum Metallurgy [J]. Metallurgical smelting, 2019:29-31.
- [33] 姚晨光. 真空冶金技术的开发及应用分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2016 (5): 46-47.
- Yao C G. Development and Application Analysis of Vacuum Metallurgy Technology [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2016 (5): 46-47.
- [34] 卢惠民, 吴广志. 一种真空热还原含镍蛇纹石矿制备金属镁及副产品的的方法 [P]. 中国:CN107523700A, 2017.
- Lu H M, Wu G Z. A Method of Preparing Metal Magnesium and Byproducts by Vacuum Thermal Reduction of Nickel Bearing Serpentine [P]. China: CN107523700A, 2017.
- [35] 都兴红, 刘慧, 景涵, 等. 黄铁矿在氧化镍矿焙烧氨浸过程中的作用 [J]. 东北大学学报, 2012, 33 (12):1750-1753.
- Du X H, Liu H, Jing H, et al. Effect of Pyrite in Roasting-

Ammonium Leaching of Nickel Oxide Ore [J]. Journal of Northeastern University( Natural Science),2012, 33(12):1750-1753.

[36] 孙大勇, 孙建喜. 双龙镍蛇纹石矿脱泥浮选试验研究 [J]. 矿产综合利用, 2016 (1):25-27,52.

Sun D Y, Sun J X. Experiment Research on Desliming Flotation of Nickel Serpentine Ore [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2016 (1):25-27,52.

[37] Andrea C P, Carmela M, Beatriz R G, et al. Implementing nickel phytomining in a serpentine quarry in NW Spain [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2019,197:1-13.

[38] Saeed F, Michel C, Simon B B, et al. Characterization of Weda Bay nickel laterite ore from Indonesia [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2019, 196: 270-281.

[39] 肖景波, 夏娇彬, 陈居玲. 由蛇纹石制备高纯氧化铁的研究 [J]. 无机盐工业, 2014,46 (11):30-34.

Xiao J B, Xia J S, Chen J L. Preparation of High Purity Ferric Oxide from Serpentine [J]. Inorganic Chemicals Industry,2014,46 (11):30-34.

[40] 周良玉, 尹荔松, 周克省, 等. 白炭黑的制备、表面改性及应用研究进展 [J]. 材料导报, 2003, 17 (11):56-59.

Zhou L Y, Yin L S, Zhou K S, et al. Recent Developments in Silica Research: Preparation, Surface Modification and Application [J]. Materials Review,2003, 17 (11):56-59.

[41] 杨保俊, 于少明, 单承湘. 蛇纹石综合利用新工艺 [J]. 矿冶工程, 2003,23 (1):47-49,53.

Yang B J, Yu S M, Shan C X. A New Technology of Comprehensive Utilization of Serpentine [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2003,23 (1):47-49,53.

[42] 李世青, 倪文, 刘波, 等. 采用蛇纹石石棉制备纳米纤维白炭黑 [J]. 中国粉体技术, 2011, 17 (3):30-32.

Li S Q, Ni W, Liu B, et al. Preparation of Nano Fiber Silica with Serpentine Asbestos [J]. China Powder Science and Technology,2011, 17 (3):30-32.

[43] 陈虹, 于少明, 田雪, 等. 由蛇纹石酸浸渣制取白炭黑工艺研究 [J]. 化工矿物与加工, 2010 (4):20-23,29.

Chen H, Yu S M, Tian X, et al. Preparation Technology of Silica from Serpentine Acid Leaching Residue [J]. Industrial Minerals & Processing,2010 (4):20-23,29.

[44] 陈虹. 青海蛇纹石深加工及综合利用新工艺研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学大学, 2010.

Chen H. Study on a New Technology of Fine Processing and Comprehensive Utilization of Qinghai Serpentine [D]. Hefei: Hefei University of Technology,2010.

[45] 吕宪俊, 唐建英. 利用蛇纹石制取氧化镁和白炭黑 [J]. 化工矿山技术, 1997,26 (1):40-42.

Lv X J, Tang J Y. Extracting Magnesium Oxide and White Carbon from Taxoite [J]. Industrial Minerals & Processing,1997,26 (1):40-42.

[46] 杨睿. 蛇纹石中有价组分的综合回收利用 [D]. 东北: 东北大学, 2013.

Yang R. Comprehensive recycling of Valuable Constituent in Serpentine [D]. Northeast, Northeastern University,2013.

[47] 代群威, 谭媛, 董发勤, 等. 蛇纹石尾矿中钴和镍的微生物浸取效果 [J]. 矿物学报, 2010, s1 (27):103-104.

Dai Q W, Tan Y, Dong F Q, et al. Microbial Leaching of Cobalt and Nickel from Serpentine Tailings [J]. Acta Mineralogica Sinica,2010, s1 (27):103-104.

[48] 陈彦国, 何治柯. 蛇纹石中钼的萃取 [J]. 应用化工, 2003,32 (5):57-58.

Chen Y G, He Z K. Extraction of Palladium in Serpentine [J]. Applied Chemical Industry,2003,32 (5):57-58.

[49] 陈彦国. D2EHDTPA 萃取蛇纹石中钼的研究 [J]. 稀有金属, 2004,28 (2):432-433.

Chen Y G. Extraction of Palladium from Serpentine Using D2EHDTPA [J]. Chinese Journal of Rare Matels,2004,28(2):432-433.

## Comprehensive Utilization Status of Nickel-containing Serpentine

Zhang Benyue, Liu Dan, Guo Rui, Zhao Lianbing

(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan, China)

**Abstract:** Nickel serpentine contains a large amount of resources such as nickel, magnesium and iron, but nickel is mainly in the form of isomorphism. It is difficult to realize the comprehensive utilization of useful minerals by conventional mineral processing. In this paper, a comprehensive introduction to the comprehensive utilization of nickel, magnesium, iron, silicon, etc. in nickel serpentine is made. Based on the existing process analysis, some research directions with potential in the study of nickel serpentine are inferred.

**Keywords:** Nickel serpentine; Nickel and magnesium; Metallurgical chemistry; Comprehensive utilization