

L. D. 梅纳特

梅纳, L D

矽卡岩矿物

张秋明

矽卡岩矿床的识别和分类是以其矿物成分为基础。虽然许多矽卡岩矿物是典型的造岩矿物,但是有些并不多见,并且大多数矿物成分有变化,根据这些变化可以获得有关矽卡岩形成环境的重要信息。

对矽卡岩分类和勘查最有用的矿物是那些出现于所有矽卡岩类型并且显示出明显的成分变化的矿物,如石榴石、辉石和角闪石。例如,含锰辉石即钙锰辉石几乎只产于矽卡岩。只要有它存在,即使没有进一步的证明资料,也可以确定这种矽卡岩类型。如果可以获得成分信息,则可用端员的摩尔百分比来表示一种矿物的成分。在许多矽卡岩系统中,铁含量的变化是最重要的参数,因此,许多矿物可以简单地用矿物铁的端员来描述。

矿物在矽卡岩矿床中的时、空排列一直是研究的焦点。正如 D. M. 伯特(1977)指出的那样,欧洲的研究人员通常强调矽卡岩矿床中的矿物空间分带,而北美的研究人员则强调矿物的时间分带。这两类分带矽卡岩中都有,两者的叠加可形成特有的复杂型式。在大多数矽卡岩中,矽卡岩与大理岩接触带上存在一种近源石榴石、远源辉石和符山石(或蔷薇辉石-硅灰石类,如硅灰石、锰硅灰石或蔷薇辉石)的一般分带型式。另外,在较大分带型式中,矽卡岩各个矿物可以显示出颜色或成分的规律性变化。例如,近处产出的石榴石通常显暗红褐色,较远处产出的石榴石变为浅褐色,而大理岩前缘附近的石榴石则呈淡绿色。辉石颜色变化不太明显,但是一般反映出朝大理岩前缘方向铁和(或)锰逐渐增多。对于某些矽卡岩系统来说,这些分带型式可以延伸好几公里,可以成为一种重要的勘查标志。

以绿帘石、角闪石、绿泥石及其他含水矿物相形式出现的矽卡岩退化蚀变矿物通常受构造控制,并叠加在进化分带序列上。因此沿断层、地层接触面或侵入体接触面常常有一个富含含水矿物的带。这种晚期矿物相的叠加现象很难同空间分带序列区分开来,这是因为交代流体发生了渐进反应。重要的是要认识到,含水矿物不一定代表退化蚀变作用。例如在矽卡岩早期蚀变阶段,锡矽卡岩中通常氟的强烈活动在高温下可使许多含水矿物稳定下来。总的来说,较浅部矽卡岩系统的退化蚀变作用比较强烈、普遍。在某些浅的与斑岩铜矿有关的矽卡岩系统中,广泛的退化蚀变作用几乎完全清除了进化石榴石和辉石。

### 形成深度

控制矽卡岩大小、形态和蚀变类型的基本因素之一是形成深度。地质测压的定量研究通常利用矿物平衡、流体包裹体或者将这两种方法结合起来估算变质作用深度。定性方法包括地层再造或其他地质再造和火成结构的解释。通过简单观察冷凝边、斑岩基质粒度、深成岩体形态以及有无角砾岩化和脆性断裂存在,可以在野外区分较浅的和较深的环境。深度对变质作用的影响主要与侵入前、侵入期间和侵入后围岩的温度有关。假设某一造山带的平均地温梯度约每公里 35℃,在 2 公里深处侵入前围岩的温度为 70℃,而在 12 公里深处则为 420℃。因此,在局部火成活动提供附加热流的情况下,受 400~700℃ 温度影响的岩石的体积可以是相当大的,而且这种效应持续的时间在较深部矽卡岩周围比在较浅部矽卡岩周围

要长。另外,周围较高的温度可以影响深成岩体的结晶历史,并且最大限度地减少矽卡岩矿物的退化蚀变量。

深部范围较大、强度较高的变质作用可以影响主岩的透水性,减少与交代流体发生反应的碳酸盐数量。

矽卡岩形成深度还可影响主岩的力学性质。在深部矽卡岩环境中,岩石一般是以韧性形式而不是破裂形式发生变形。在深部,侵入体与沉积岩的接触面一般近乎平行于层理;或者深成岩体沿层面侵入,或者使沉积岩发生褶皱或流动,直至这些沉积岩同侵入接触面排列成行。因此,较深处形成的矽卡岩可看作相对于相关深成岩体及其变质晕来说较小的狭窄外壳。

相反,浅处的主岩一般是由于断裂作用而不是褶皱作用变形的。在 M. T. 艾诺迪(1982)评述过的 13 个较浅部矽卡岩矿床中,大多数的侵入接触面与层理明显不整合,矽卡岩切穿层理,并大批地替代了有利的层理,其大小等于或超过了(出露的)相关深成岩体。与浅部侵入相关的强烈水力压裂作用大大提高了主岩的透水性,这不仅对与火成作用有关的交代流体的渗透来说,而且对晚期可能较冷的雨水流体的渗透来说都是如此。大气水的注入和后来矽卡岩矿物在退化蚀变期间的破坏乃是浅部环境中形成的矽卡岩的明显特征之一。

已知在现代地热系统和海底热泉喷口处目前正在形成最浅(和最年轻)的矽卡岩。这些矽卡岩代表了岩浆活动的远处显示。出露的火成岩(在岩心中)主要是具有冷凝边和很细粒到隐晶基质的薄岩墙和岩床。

### 重要矽卡岩矿床类型的一般特征

矽卡岩矿床可以根据其描述性特征(如原岩成分、岩石类型、具有经济价值的主要金属)以及成因特点(如流体运动机制、形成温度和岩浆波及范围)加以归类。现今研究人员一般趋于接受一种描述性的矽卡岩分类,其方法是先根据具有经济价值的主要金属对矽卡岩进行分类,然后根据成分、构造或成因变化来修订各类矽卡岩。近来对 7 个主要矽卡岩类型(Fe、Au、W、Cu、Zn、Mo 和 Sn)进行了大量研究,其他一些矽卡岩类型(包括 F、C、Ba、Pt、U 和稀土元素)在局部地区是重要的。

#### 铁矽卡岩

最大的矽卡岩矿床是铁矽卡岩矿床。开采这种矽卡岩的目的是获取其中所含的磁铁矿,虽然也可有少量的 Cu、Co、Ni 和 Au,但是通常回收的唯一矿产是铁。许多矿床规模很大(储量 > 5 亿吨,其中含 Fe 3 亿吨以上),主要由磁铁矿组成,只含少量的硅酸盐脉石。有些矿床含大量铜,并且过渡为较典型的铜矽卡岩。大洋岛弧中的钙质铁矽卡岩与侵入到石灰岩和火山岩围岩中的富铁深成岩体伴生。在某些矿床中,内矽卡岩的数量可以超过外矽卡岩的数量。矽卡岩矿物主要包含石榴石和辉石,以及少量的绿帘石、黑柱石和阳起石,所有这些矿物均富铁。相反,镁质铁矽卡岩与不同构造环境中的各种深成岩体伴生;共同特点是它们都产在白云质围岩中。在镁质矽卡岩中,主要矽卡岩矿物,如镁橄榄石、透辉石、方镁石、滑石和蛇纹石,都不含很多铁。因此,溶液中的铁一般形成磁铁矿而不是钙铁榴石和钙铁辉石。据报道,在俄罗斯的许多矽卡岩矿床中,钙质矽卡岩叠加在镁质矽卡岩上。另外,许多其他类型矽卡岩中含有块状磁铁矿矿囊,可局部开采铁。这些矿床大都产在白云质岩层中,或者产在事先经历了镁交代作用的带内。

## 金砂卡岩

高品位金(5~15 克/吨)砂卡岩矿床是相对还原的,开采的只是贵金属,贱金属没有发生有经济价值的富集。其他金砂卡岩氧化程度较高,金品位(1~5 克/吨)较低,所含的其他金属如 Cu、Pb 和 Zn 经济价值不大。其他几种类型砂卡岩,特别是铜砂卡岩,含有数量足以成为矿床副产品的金(0.01~>1 克/吨),少数砂卡岩矿床虽然所含的贱金属品位具有经济价值,但是正在开采的只是金。大多数高品位金砂卡岩与还原性(含钛铁矿,  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} < 0.75$ )的闪长岩-花岗闪长岩深成岩体和岩墙/岩床杂岩体伴生。这些砂卡岩以富铁辉石(通常  $> \text{Hd}_{50}$ )为主,近源带可能含有丰富的过渡型钙铝铁榴石。其他常见矿物包括钾长石、方柱石、符山石、磷灰石和高氯铝闪石。远源/早期带含有黑云母±钾长石角岩,可从块状砂卡岩向外延伸几百米。由于这些矿床中的沉积岩具有富含碎屑的碳质性质,因此大多数砂卡岩颗粒较细。有些金砂卡岩含有不寻常的晚期葡萄石或硅灰石退化蚀变产物。大多数金是以银金矿形式出现,与各种铋矿物和碲化物矿物包括自然铋、赫梯铋矿、硫铋铜矿和黑铋金矿紧密伴生。

## 钨砂卡岩

钨砂卡岩产于大多数大陆,与主要造山带中的钙碱性深成岩体伴生。成群出现的钨砂卡岩与被巨大的高温变质晕包围的粗粒等粒岩基(含伟晶岩和细晶岩岩墙)伴生。这些特征总起来表明这是一种深部环境。深成岩体通常是新鲜的,只是在接触带附近才有少量的矽英石和斜长石-辉石内砂卡岩带。普遍见于钨砂卡岩环境的高温变质晕含有丰富的由混合碳酸盐-泥岩岩系形成的钙硅酸盐角岩和类砂卡岩。这类变质钙硅酸盐矿物反映出原岩的成分和结构,并且可以在野外和室内与矿石级的交代砂卡岩区分开来。

R. J. 纽伯里等人(1981)根据容矿岩石成分(碳质的还是赤铁矿质的)、砂卡岩矿物成分(三价铁的还是二价铁的)和相对深度(变质温度及有无充氧地下水参与)将钨砂卡岩划分为还原的和氧化的两类。还原钨砂卡岩中的早期砂卡岩矿物组合以钙铁辉石为主,含有少量钙铝铁榴石和伴生有浸染状细粒富钼的白钨矿(钼钙矿)。晚期石榴石是亚钙质的,含大量(高达 80 摩尔%)锰铝榴石和铁铝榴石。这种亚钙石榴石与早期浸染状白钨矿的淋滤作用及其作为粗粒、常常受脉控制的低钼白钨矿的再沉淀有关。它还与硫化物矿物(如磁黄铁矿、辉钼矿、黄铜矿、闪锌矿和毒砂)和含水矿物(如黑云母、角闪石和绿帘石)的进入有关。在氧化型钨砂卡岩中,钙铁榴石比辉石更丰富,白钨矿贫钼,三价铁矿物比二价铁矿物更常见。一般来说,氧化型钨砂卡岩一般比还原型钨砂卡岩小,尽管这两类砂卡岩系统中的最高品位通常都与含水矿物和退化蚀变作用有关。

## 铜砂卡岩

铜砂卡岩可能是世界上最丰富的砂卡岩类型。它们尤其常见于大洋和大陆环境中与俯冲作用有关的造山带。铜砂卡岩大都与 I 型、磁铁矿系列、钙碱性和斑岩深成岩体伴生,其中许多深成岩体含有同源火山岩、网状细脉、脆性碎裂和角砾岩化以及强烈的热液蚀变。所有这些特征表明铜砂卡岩是在较浅的环境中形成的。

大多数砂卡岩紧靠岩株接触带产出,相对氧化的砂卡岩的矿物成分主要是钙铁榴石,其他矿物包括透辉石、符山石、硅灰石、阳起石和绿帘石。赤铁矿和磁铁矿普遍见于大多数铜砂卡岩矿床,白云质围岩的存在与块状磁铁矿矿脉是一致的,后者可局部规模开采铁。铜砂卡岩通常是分带的,深成岩体附近产出的是块状石榴石岩,从接触带向外辉石增多,最后在大

理岩接触带附近产出符山石和(或)硅灰石。另外,石榴石可以发生颜色分带,在深成岩体附近为暗红褐色,在远处为绿色和黄色。硫化物矿物成分和金属比值也可相对于源岩深成岩体发生系统分带。一般来说,在深成岩体附近黄铁矿和黄铜矿最富,向外黄铜矿增多,最后在大理岩接触带附近的硅灰石带中产出斑铜矿。在含钙镁橄榄石的铜矽卡岩中,主要 Cu-Fe 硫化物是斑铜矿-辉铜矿,而不是黄铁矿-黄铜矿。

最大的铜矽卡岩与矿化的斑岩铜矿深成岩体伴生。这些矿床的斑岩矿石和矽卡岩矿石合计可以超过 10 亿吨,其中可从矽卡岩中回收铜超过 5 百万吨。矿化的深成岩体展示出特有的钾硅酸盐和绢云母蚀变,可以分别与矽卡岩中的进化石榴石-辉石和退化绿帘石-阳起石对比。铜矽卡岩中普遍存在强烈退化蚀变现象,在某些与斑岩有关的矿床中,这种蚀变作用可以破坏掉大部分进化石榴石和辉石。矿化的深成岩体极少发生内矽卡岩蚀变,相反,与铜矽卡岩伴生的无矿岩株则含有丰富的绿帘石-阳起石-绿泥石内矽卡岩,矽卡岩退化蚀变现象不强烈。某些铜矿床产有粗粒阳起石-黄铜矿-黄铁矿-磁铁矿矿石,但是只含零星的进化石榴石-辉石矽卡岩。这些矿床提供的线索表明,某些铜和铁矽卡岩与具有火山成因和正岩浆亲缘关系的矿床有关。

### 锌矽卡岩

锌矽卡岩大都产于或者与俯冲作用或者与裂谷作用有关的大陆环境。开采这些矿床为的是获取锌、铅和银矿石,但是锌通常占主导地位。锌矽卡岩品位也高( $10\sim 20\% \text{Zn} + \text{Pb}$ ,  $30\sim 300$  克/吨 Ag)。相关火成岩成分的变化范围宽,可从闪长岩到高硅花岗岩。它们也可产于各种地质环境,包括深部岩基到浅部岩墙-岩床杂岩体直至地表火山喷发岩。

可以根据几种标志(包括离岩浆源的距离,形成温度、矽卡岩矿物与硫化物矿物的相对比例和矿体的几何形状)对锌矽卡岩进行分类。P. K. M. 梅高等人(1988)着重指出,在许多锌矽卡岩矿区,“从与侵入体有关的矿化作用向外渐变为无侵入体的矿石,说明那些缺少已知侵入关系的矿区可能尚未追索到其端部。”同样,大多数锌矽卡岩矿区可从富矽卡岩的矿化作用往外渐变为贫矽卡岩矿石,矿脉和块状硫化物矿体(如果可含矽卡岩矿物,那也很少)。然而,在这种系统中有矽卡岩矿物(如石榴石和辉石)存在是重要的,因为这表明这种受到限制的地球化学环境完全不同于其他矿石类型,如同样含有 Zn-Pb-Ag 矿石但绝对不含矽卡岩矿物的密西西比河谷型矿床。

除 Zn-Pb-Ag 金属含量外,还可根据独特的富锰和富铁矿物、沿构造和岩性接触面产出以及矽卡岩中心没有明显的变质晕,将锌矽卡岩同其他矽卡岩类型区分开。这些矿床中几乎所有的矽卡岩矿物,包括石榴石、辉石、橄榄石、黑柱石,蔷薇辉石-硅灰石类、角闪石、绿泥石和蛇纹石,都可以富锰。在某些矿床中,沿流体流动通道辉石:石榴石比值和辉石中的锰含量有规律地升高。这种特征已经用来识别近源和远源矽卡岩以及各单个矽卡岩矿床中的近源和远源带。锌矽卡岩产于大的岩浆-热液系统的远源部分,这一产出特点在出露差的地区也可能是一种行之有效的勘查指南,即使矿床不大。

### 钼矽卡岩

钼矽卡岩大都与淡色花岗岩伴生,其规模可从高品位较小矿床到低品位大矿石量的矿床。许多小矿点还见于与伟晶岩、细晶岩及其他淡色岩石有关的前寒武纪稳定克拉通。大多数钼矽卡岩含有各种金属,包括 W、Cu、Zn、Pb、Bi、Sn 和 U,有些钼矽卡岩含多金属,需要同时回收多种金属,为的是更经济地开采矿床。Mo-W-Cu 是最常见的共生组合,某些钨矽卡

岩和铜矽卡岩含有可回收钼的带。大多数钼矽卡岩产于粉砂质碳酸盐岩或钙质碎屑岩中。美国蒙大拿州的坎尼万谷矿床是个值得注意的例外,该矿床产在白云岩中。钙铁辉石是所报道的钼矽卡岩中最常见的钙硅酸盐矿物,其次是钙铝铁榴石(含少量铝榴石组分)、硅灰石、角闪石和萤石。这种矽卡岩矿物成分表明是一种氟活动强烈的还原环境。

### 锡矽卡岩

锡矽卡岩几乎只与通常由于裂谷事件引起的陆壳部分熔融所产生的高硅花岗岩伴生。锡矽卡岩可以根据一些标志,如近源的还是远源的、钙质的还是镁质的、富矽卡岩的还是贫矽卡岩的、富氧化物的还是富硫化物的,以及云英岩的还是矽卡岩的等标志加以划分,遗憾的是,少数锡矽卡岩是互不相容的。同钼矽卡岩一样,许多大型锡矽卡岩系统可发生从富矽卡岩到贫(或无)矽卡岩的分带。M. T. 艾诺迪等人(1981)强调指出,有一条共同的线索将几种锡矽卡岩矿床联系起来,这就是矿石及其伴生火成岩中有一套特征性的痕量元素(Sn、F、B、Be、Li、W、Mo 和 Rb)。这套痕量元素可用来将锡矽卡岩同所有其他矽卡岩类型区分开。

应当强调指出,锡矽卡岩存在一些矿物学特征。从采矿观点来看,最重要的是锡可以进入硅酸盐矿物,如石榴石、榍石和符山石,这部分锡是不能进行经济回收的。早期含锡矽卡岩矿物广泛的退化或云英岩化蚀变,可以释放出这些锡,并使其沉淀在氧化物或硫化物矿石中。因此,矽卡岩的破坏性蚀变阶段在锡矽卡岩矿床中特别重要。最引人注目的矿体产于发生块状硫化物或氧化物交代但象石榴石这类钙硅酸盐矿物中的锡没有重大损失的大型矽卡岩区的远源部分。

除上述矽卡岩类型外,还有其他一些矽卡岩类型,如富稀土元素的矽卡岩、铂族元素矽卡岩、与区域变质环境中交代作用有关的矽卡岩等等。

## 岩石成因与构造环境

大型矽卡岩矿床大都直接与火成活动有关。一些人讨论过火成岩成分与矽卡岩类型间的大致关系(图1)。锡和钼矽卡岩通常与经过强烈分异的高硅深成岩体伴生。铁矽卡岩一般与低硅富铁的比较原始的深成岩体伴生。其他重要特征包括各单个深成岩体的氧化状态、大小、结构、侵位深度和构造环境。例如,锡矽卡岩几乎只与可以说明是S型或非造山成因的还原性钛铁矿系列深成岩体伴生。这些深成岩体一般是在初期裂谷作用可能引起地壳物质部分熔融的稳定克拉通中形成的。许多金矽卡岩也是同还原性钛铁矿系列深成岩体伴生。不过,金矽卡岩深成岩体通常为基性低硅深成岩体,可能不是通过地壳沉积物质的熔融形成的。相反,与铜矽卡岩特别是与斑岩铜矿伴生的深成岩体是经过强烈氧化的含磁铁矿I型深成岩体,与那种同俯冲作用有关的岩浆弧有关。这些深成岩体一般是斑状的,

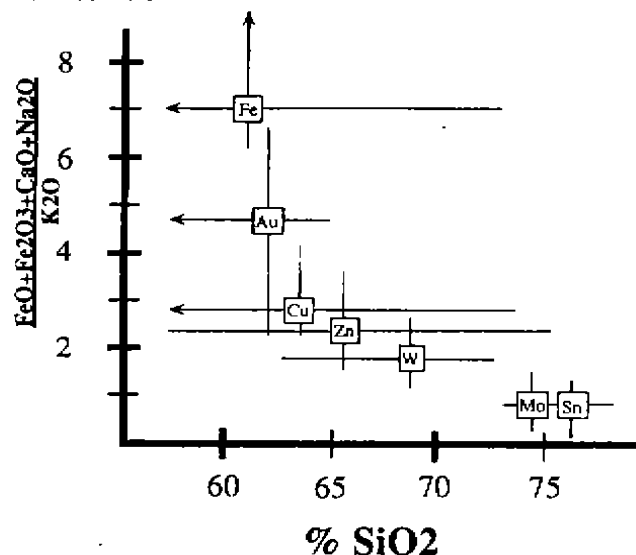


图1 与不同矽卡岩类型相关的深成岩体的平均成分

侵位于地壳浅层。钨砂卡岩与表明是较深部环境的较大的粗粒等粒深成岩体或岩基杂岩体伴生。

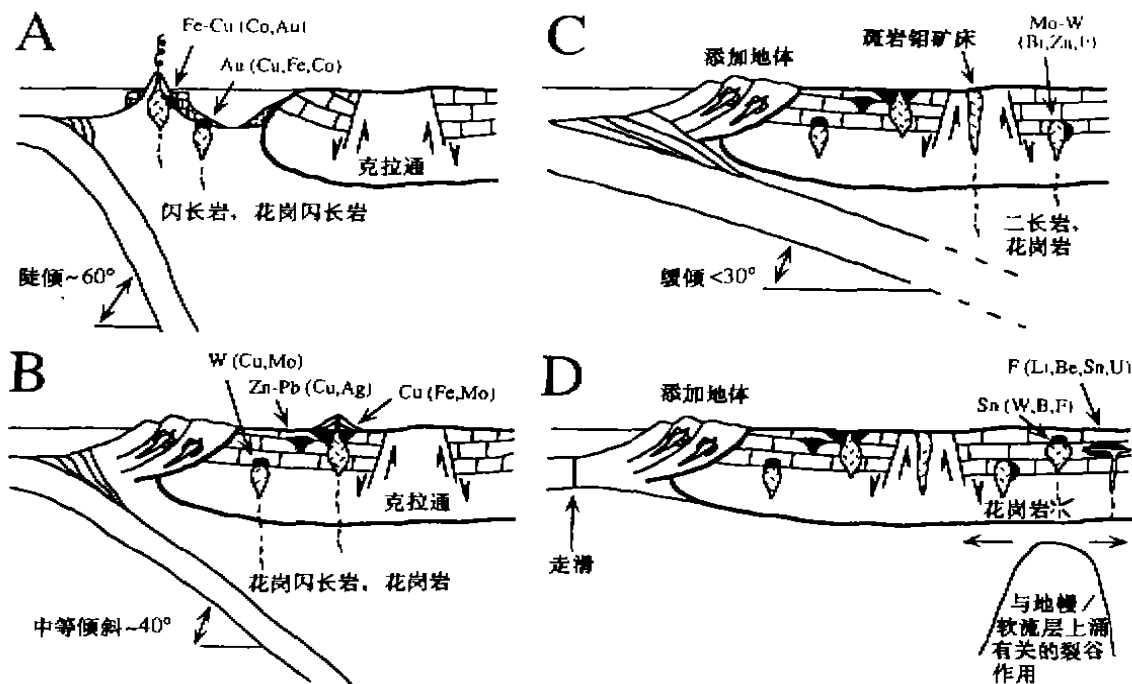


图2 形成砂卡岩的理想构造模式：(A)大洋俯冲和弧后盆地环境；(B)具有添加大洋地体的大陆俯冲环境；(C)过渡性小角度俯冲环境；(D)俯冲后或大陆裂谷作用的环境

砂卡岩矿床一种行之有效的构造分类应当能划分常常产在一起的砂卡岩类型，并可区分为特定构造环境所特有的砂卡岩类型。例如，钙质铁-铜砂卡岩矿床事实上是产在大洋岛弧区的唯一的砂卡岩类型(图2A)。许多这类砂卡岩还富Co、Ni、Cr和Au。另外，某些有经济价值的砂卡岩看来产在与大洋火山弧有关的弧后盆地中。

绝大多数砂卡岩矿床同那种与陆壳下面的俯冲作用有关的岩浆弧伴生(图2B)。深成岩体的成分范围可从闪长岩到花岗岩，但是主要贱金属砂卡岩类型之间的差别看来反映局部地质环境(形成深度、构造和流体通道)胜过反映岩石形成作用的基本差别。相反，产于这种环境的金砂卡岩是与可能代表某种有限的岩石形成史的明显还原的深成岩体有关。

对从稳定陆壳加大洋地体的下面的俯冲作用向俯冲期后构造的转变了解不多。与低角度俯冲有关的岩浆活动可能具有更多的地壳影响，下行岩板的运动可能引起局部裂谷作用。在这个阶段，岩浆弧可能加宽或进一步向内陆迁移。深成岩体为花岗岩成分，相关砂卡岩富Mo或W-Mo，其次是Zn、Bi、Cu和F(图2C)。其中许多砂卡岩最好叫多金属砂卡岩，局部地方Au和As很重要。

某些砂卡岩同那种与俯冲作用有关的岩浆活动无关。这些砂卡岩可能与继主期俯冲作用之后发生的S型岩浆活动有关，或者可能与原先是稳定的克拉通的裂谷作用有关。深成岩体具花岗岩成分，通常含有原生白云母、黑云母，深灰色石英大晶体、晶洞、云英岩型蚀变和异常的放射性。相关砂卡岩富锡或氟，但是通常有许多其他元素存在，并且可能具有经济价值(图2D)。与之有关的一套元素包括W、Be、B、Li、Bi、Zn、Pb、U、F和稀土元素。

(张秋明摘译)