

变质核杂岩的定义、类型及构造背景

G. A. Davis^{1,2} 郑亚东³

(1. Department of Earth Sciences, University of Southern California, Los Angeles, CA 90089-0740;

2. 中国地质大学地球科学与资源学院 北京 100083; 3. 北京大学地质学系 北京 100871)

摘要 :伸展变质核杂岩 (mcc) 的基本特征包括 : (1) 缓倾至中等倾角的具有大规模位移的 (几十千米) 区域至准区域性延伸的主拆离断层 ; (2) 与断层相关的糜棱片岩和片麻岩下盘 (包括可能出露更深层次的非糜棱化结晶岩) ; (3) 上盘上地壳基底岩和/或表壳岩层。关键的一点是 , 所有变质核杂岩是沿地壳深部 (大于 10~15 km) 大型拆离断层大规模地壳伸展和地壳切除 (缺失) 的产物。我们认为 , 地壳剖面无大规模缺失的以基底为核的穹隆状杂岩不是一般构造定义上公认的变质核杂岩。变质核杂岩形成于同缩短期和缩短期后的多种构造环境中。由于前期或同期的缩短作用 , 变质核杂岩似乎都发育在地壳强烈增厚的区域。绝大多数 (但显然并非全部) 变质核杂岩都与岩浆作用有密切的时空关系。变质核杂岩起控制作用的拆离断层一般生根于中地壳或直接位于石英变为晶质塑性的韧性转化带下的深处 , 但有些拆离断层切穿大部或整个地壳。大多数变质核杂岩总体上具有不对称或简单剪切的构造几何特征 , 但有些变质核杂岩呈现较为对称的边界拆离断层。

关键词 : 变质核杂岩 ; 拆离断层 ; 糜棱岩前锋 ; 地壳切除

中图分类号 : P588.3 P54 文献标识码 : A 文章编号 : 1671-2552 (2002) 04-05-0185-08

1 概 述

1979 年 , George H. Davis 和 Peter Coney 首次将广泛分布于北美西部科迪勒拉造山带中一套独特的伸展构造和岩石组合命名和定义为变质核杂岩 (metamorphic core complex)。与一般设想相反 , 该“变质核杂岩”术语并非是指整个造山带的变质核或轴带 , 而只是指科迪勒拉造山带东部位于各个山脉中心 (或核) 内所见的变质岩区。Davis 和 Coney^[1] 指出 , 东科迪勒拉造山带 , 从加拿大到墨西哥西北大约 25 条新生代山脉 , 具有以下共同的地质要素 : (1) 穹隆或拱曲形态 ; (2) 断层包围的内部变质岩核 , 有某些山脉中为更深层的非糜棱质结晶岩 ; (3) 上覆的“拆离带” (décollement zone) ; (4) 山脉两翼的上盘岩石 , 通常是未变质表壳岩层及其基底。虽然最初认为变质核杂岩的成因与伸展作用有关 , 但其伸展作用的性质和几何特征并不清楚 , 存有很大争议。

Brian Wernicke 在《自然》杂志上发表的《盆地

中的低角正断层 : 伸展成因的推覆构造》一文在概念上突破了对科迪勒拉变质核杂岩的成因认识^[2]。在该文中 , Wernicke 提出这一类断层是缩短低角逆冲断层的伸展对应构造。这些断层现一般称为拆离断层 (detachment faults) , 其大规模位移可将韧性剪切 (糜棱岩化) 的下盘岩石相对上盘非糜棱岩化并遭受了强烈脆性破裂拉伸的岩石向上运移^[2]。后来 , 在 80 年代发表的许多论文扩展和修改了 Wernicke 的成因模式^[3-8]。

科迪勒拉造山带中缓倾正断层及包含它们的变质核杂岩的认识很快导致其它山系中变质核杂岩的发现。中国境内首批确认的拆离断层及相关变质核杂岩包括高喜马拉雅的藏南拆离系^[9-10] , 北京北部的河防口拆离断层及云蒙山变质核杂岩^[11-12] 和中蒙边界上的亚干变质核杂岩^[13]。

2 变质核杂岩

2.1 定义和基本特征

在中国也不例外 , 对变质核杂岩的性质和定义

同样存在一些误解。并非所有具有核部变质岩或岩浆岩的穹隆组合都是变质核杂岩,即便是变质或岩浆核被韧性剪切的糜棱状或片麻状岩石所围限;也并非所有具有下盘结晶岩的低角正断层都是变质核杂岩型拆离断层。在“中国东部—蒙古中生代伸展构造现场研讨会”上(呼和浩特,2001年7月),作者曾应邀总结了80年代期间研究确认的科迪勒拉变质核杂岩的特征及有关关键构造和岩石要素的定义。本文正是对这一总结的介绍,并就变质核杂岩研究中的一些重要问题进行讨论。

变质核杂岩是大陆高应变伸展环境中发育的一套构造和独特岩石单位的组合。该组合具有3个不可缺少的或必要的构造要素:(1)主拆离断层——大规模位移(几十千米)的准区域至区域性的低(倾)角(典型情况下小于 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$)正断层;(2)下盘——与断层相关的糜棱状片岩、片麻岩和可能出露的更深层次的非糜棱状结晶岩;如果存在原位于韧性转化带以上的下盘岩石,拆离断层上段之下则无糜棱岩;(3)上盘——含多世代正断层的上地壳基底岩和/或表壳岩层。因此,变质核杂岩不仅是一些人所认为的那样,是指拆离断层(有些情况下为多重拆离断层,见下文)下的糜棱岩和变质岩组合,而且也包括拆离断层本身和位移其上上盘岩石以及上盘的伸展构造。

变质核杂岩其实质就是大规模地壳伸展和地壳沿主拆离断层切除(缺失)的结果!这些断层位移量可达数十千米。出露面积可达几千平方千米以上。下盘糜棱状岩石(典型情况下为高绿片岩或角闪岩相变质程度,大约 $400\sim 550^{\circ}\text{C}$)与上盘表壳岩石及其结晶基底的并置要求这些断层具有很大的位移。富含石英和云母的糜棱状岩石呈现韧性流变,因为这些矿物在深处(一般深度大于 $10\sim 15\text{ km}$)表现为晶质塑性;而剪切前的其它矿物组分,如长石、角闪石、绿帘石和石榴石等,则顺剪切流动方向排列并伴之以脆性破裂。变质核杂岩的下盘糜棱状岩石(可厚达几千米)一般具有显著的S-L组构,并产于中地壳韧性转化带内或紧接其下形成的。变质核杂岩中的拉伸线理具有区域性一致的趋向,但由于变质核杂岩的褶皱(见下文),线理的倾伏方向可以相反。

中地壳岩石的构造剥露,即在韧性转化带内或之下的塑性变形岩石位移至地表或近地表,要求切除分隔上下盘岩石、厚度上可观的上地壳剖面

(大于 $10\sim 15\text{ km}$)。这种切除作用是确定变质核杂岩必要的地质和几何先决条件!因此,我们认为,中国境内文献中已称为变质核杂岩而无地壳剖面重要缺失的一些穹隆状杂岩,如江西的武功山穹隆^[4],不是一般接受的构造定义上的变质核杂岩。

2.2 拆离断层及其下盘岩石组合

除少数例外,在70年代中期以前,地质学家很少认识低角正断层。构造地质学教科书中一般所表示的正断层是在主正应力 σ_1 直立和 σ_3 水平情况下形成的高角度(60° 左右)断层。主要是出于这一观念,科迪勒拉和其它造山带中变质核杂岩的低角伸展拆离断层曾广泛地作为新岩石和下伏老岩石之间的特殊不整合或逆冲断层。现在我们认识到,这一类断层是造山带中的常见构造,尽管在低角正断层如何形成和初始倾角问题上尚有争议(见下文)。

逆冲断层常将深层热的岩石推覆在浅层较冷的岩石之上,而伸展拆离断层所产生的效应则正好相反。变质核杂岩的拆离断层是生根于中或下地壳不断演化的以宽广的晶体塑性流动带为特点的剪切带中。这些糜棱岩中的一些岩石在断层位移过程中向上运移至拆离断层的下盘,韧性剪切带的较高层次仍贴附在上盘的深部基底^[5]。当拆离断层热的下盘相对其较冷的上盘岩石向上运动时,形成一显著易于识别的从韧性到脆性的断层岩序列^[6]。这一下盘断层岩序列中的每个较新组分发育于断层之下依次递进变窄的带中。形成于深部的糜棱状片岩和片麻岩在地表的剥露是拆离断层下盘大规模位移的特征和变质核杂岩的“变质的”组分。如果拆离断层的位移不足以将韧性剪切的岩石带到地表,如意大利中部活动的Altoberina低角正断层^[6]或科罗拉多河伸展区的中新世Chemehuevi拆离断层^[7],其上、下盘并不构成一变质核杂岩。

随着下盘糜棱岩抬升至较高的地壳层次,那些最贴近拆离断层的糜棱岩则经历退化变质的剪切作用,在更浅的一些层次上则发生角砾化,结果形成变质核杂岩的绿泥石化角砾岩,其厚度可达几十至几百米(显然,绿泥石化角砾岩的形成要求糜棱母岩含有铁镁矿物)。在更高和更冷的一些层次上,最邻近拆离断层的绿泥石化角砾岩遭到强烈的碎裂作用,而被微角砾岩(一般厚度小于1米)叠置。如果保存下来,微角砾岩直接位于拆离断层之下。沿拆离断层,断层泥则可有可无。但据我们的经验,断层泥往往出

现在上盘的底部。总之,变质核杂岩的下盘岩石揭示了构造抬升至韧性过渡带之上的递进过程和越来越冷及越来越脆性的叠加过程。

Wernicke^[2]最初提出变质核杂岩的下盘糜棱岩形成于深部拆离的韧性剪切带内。拆离断层与沿拆离断层处所形成的糜棱岩间的这种直接成因关系看来对大多数变质核杂岩有效。然而,加州东南部的维普尔山变质核杂岩的研究^[7,15]表明,维普尔拆离断层下的糜棱岩在浅构造层次上离开拆离断层,进入其下盘(图1)。这些下盘糜棱岩的顶部边界称为“糜棱岩前锋”,它代表一近水平的中地壳韧性剪切带,其形成时代早于运动学相关的拆离断层。这些糜棱岩前锋以及其下的糜棱岩被新的、陡的、在运动学上与其相关的维普尔拆离断层切割,并将这些老糜棱岩向上带入下盘(图1)。内蒙呼和浩特变质核杂岩中观察到同样的现象(Davis, Zheng and Darby, 撰稿中)。

2.3 拆离断层的几何特征

低角正断层作用的形成机制仍在争论,认识还很肤浅。然而,将变质核杂岩中所有低倾角主拆离断层视为初始陡倾断层(约 60°)在后来持续的地壳伸展过程中旋转至变缓的意见^[8]是不正确的。有些变质核杂岩的拆离断层初始的倾角可能为中等到陡倾,例如,西土耳其区(约 $40^\circ\sim 60^\circ$)^[9]。然而,意大利

中部地震性活动正断层(约 30°)^[16]和希腊哥林斯湾北的地震性活动正断层(约 20°),都是低角度,并沿这些低角正断层能够并确实发生了滑动^[20]。下科罗拉多河伸展走廊区对中新世拆离断层的地质学、热年代学、热压力学和古地磁研究提供了令人信服的证据,表明区域主拆离断层初始活动为低倾角(小于 $25^\circ\sim 30^\circ$)^[21-23]。

大量的地层学证据表明,大规模位移的低角变质核杂岩拆离断层在活动时可以切割地壳表面。最有力的证据是在区域伸展过程中,下盘糜棱岩和绿泥石化角砾岩遭到侵蚀,糜棱岩和绿泥石化碎屑的搬运越过拆离断层沉积到上盘的拆离断层的上叠盆地中^[24],而随着下伏拆离断层的持续位移,该盆地通过正断层而伸展。在加州东南部的维普尔山区,剥露的下盘糜棱岩的大型战鹰-库伯盆地滑坡(约 100 km^2)穿过活动的维普尔拆离断层滑入一拆离断层上叠盆地。该滑动岩块后来被上盘正断层切断并沿之旋转,沿拆离断层本身的实际错位约 10 km ^[25]。

演化了的或成熟的变质核杂岩拆离断层的几何形态并不简单,其中许多具有波瓦状形态,显示有枢纽与伸展方向平行的背形和向形。这一曲面几何特征有时解释为伸展作用后拆离断层的褶皱。虽然有些情况下有可能是褶皱^[26],但有些加州南部(金斯

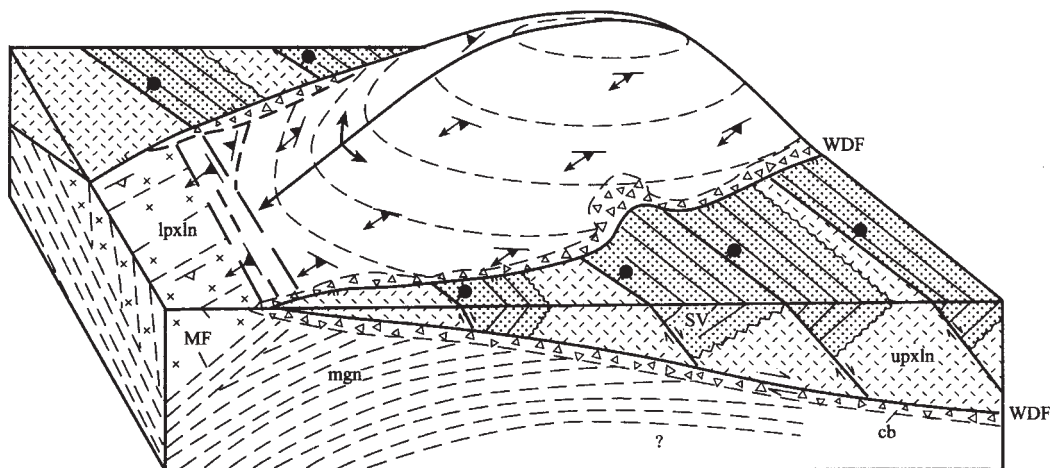


图1 美加州东南部维普尔山变质核杂岩图示^[15]

Fig. 1 Diagram of the Whipple Mountain metamorphic core in southeastern California, USA 上方朝北,图宽约30千米,垂向比例高度放大,地形起伏约1千米。WDF维普尔山拆离断层,MF糜棱岩前锋(见正文),lpxln下盘结晶岩(主要为元古宙片麻岩),mgn糜棱片麻岩,具有糜棱面理和线理,cb绿泥石化角砾岩;upxln上盘结晶岩(主要为元古宙片麻岩和花岗岩,但与图中的下盘结晶岩不同),sv中新世沉积岩与火山岩。背形拱起并非拆离断层和核杂岩的褶皱作用所致,拆离断层具有初始的背形状波瓦构造(见正文和图2)。沿图右侧的波瓦状褶皱很可能与维普尔变质核杂岩发育时的均衡上隆有关(见图3)。

顿-Halloran山、圣克里门托、Chemehuevi和维普尔-鹿皮拆离断层)和内蒙大青山(呼和浩特)拆离断层表明,这些“褶皱”是拆离断层面中平行于断层滑动方向的原始波瓦状或沟槽构造(图2)。例如,中新世的金斯顿-Halloran山波瓦状拆离断层切割下盘中的中生代平面状逆冲断层^[7]。拆离断层波瓦状构造的波长及波幅是可变的,从100~200 m到大于1 000 m^[7];波瓦构造两翼的倾角从几度到近40°。科罗拉多河下游区一些变质核杂岩下盘岩石的古地磁研究揭示变质核杂岩并未褶皱,其平行于伸展的“背形状”主拆离断层为一原始的波瓦状构造^[3]。

有时,变质核杂岩的主拆离断层并非都形成于地壳伸展的初期。具有大规模位移的成熟的拆离断层经历了与地壳伸展作用方向成高角度的褶皱作

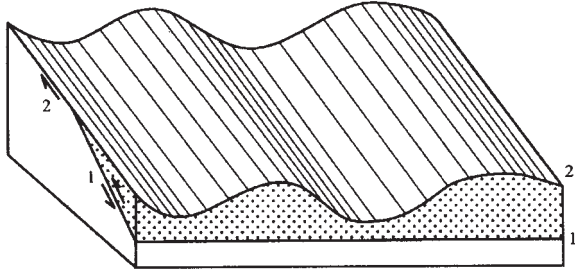


图2 平行与地壳伸展作用和拆离滑动方向的波瓦状拆离断层示意图

Fig. 2 Diagram showing the imbricated detachment faults parallel to the direction of crustal extension and detachment slip

1—拆离断层下盘中有一较老的平面状逆冲断层,该断层未经褶皱,表明波瓦构造为拆离断层的初始形态,而非褶皱构造;
2—波瓦状拆离断层

用。这种褶皱作用一般归因于地壳不均匀减薄时均衡所诱导的断层弯曲。这种褶皱作用导致主拆离断层弯曲上段的废弃和滑动的停止,从而形成较新的、较为平面状的断层分支。这些分支断层一般向上切入原先的上盘岩石,称之为切除(excise-ment)(图3)^[8]。在几何学上,当形成与滑动方向成高角度的褶皱叠加在与滑动方向平行的原始波瓦构造上时,可形成拆离断层及其上下盘的“盆地-穹隆”的平面干涉图型(图1)。

3 变质核杂岩的类型与构造环境概述

3.1 构造背景

在世界上大多数显生宙造山带中,现已发现与

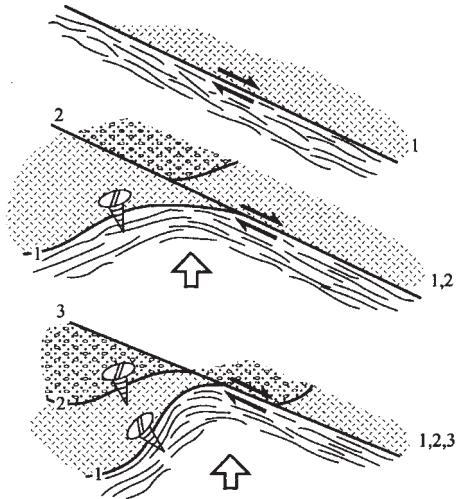


图3 垂直于波瓦状构造横剖面中所见的大型拆离断层系的递进演化

Fig. 3 Progressive evolution of a large-scale detachment fault system as seen in the cross section and perpendicular to corrugations

图中表示三个主要岩石类型:拆离断层下盘糜棱片麻岩(平行线符);上盘较老的未糜棱岩化结晶岩(随机短字符);不整合于上盘结晶岩上的表壳岩层(点及小椭圆符)
1—初始拆离断层伸展过程中的上隆,可能是由于减薄地壳中的均衡调节导致拆离断层的褶皱 2—褶皱作用使初始拆离断层上部的倾向反转,形成一新的切割原上盘的面状分支拆离断层 3—持续隆升过程中拆离断层褶皱后形成更新的拆离断层

70年代末首先在北美科迪勒拉区相似的变质核杂岩。显然,满足上述3个构造和岩石判别标志的变质核杂岩具有不同的几何特征、构造环境和年龄。下列文献中的实例显示,变质核杂岩可形成于不同构造背景:

(1)大洋板块俯冲期的大陆边缘弧内背景,例如美国科迪勒拉科罗拉多河下游伸展走廊的中新世维普尔山变质核杂岩和其他核杂岩^[8,15];

(2)俯冲期弧后背景,如希腊爱琴海渐新世—中新世末的Ios变质核杂岩^[28-30];

(3)陆—陆碰撞带中具有平行汇聚方向的同造山伸展作用的上板块,如高喜马拉雅新第三纪下板块推进期的藏南拆离断层系^[9-10]和意大利亚平宁山北部的晚中新—上新世下板块后撤时的Alpi Apuane变质核杂岩^[6];

(4)陆—陆碰撞带中同造山期从挤入体中侧向逃逸构造,如中阿尔卑斯中新世和以后的Rhône-Sim-

plon拆离断层-Leopontine穹隆变质核杂岩^[32-33]和东阿尔卑斯的中新世Tauern构造窗变质核杂岩^[34-35];

(5) 陆-陆碰撞带中的后造山垮塌,部分沿重新活动的同造山逆冲断层,如挪威南部加里东造山带的泥盆纪Nordfjord-Sogn拆离断层^[36-37]和俄罗斯横过贝加尔的一些早白垩世变质核杂岩^[38];

(6) 与雁行状板内走滑断层系相关的走滑伸展区,如加州死谷的黑山,时代可能为上新世-全新世的“龟背”构造^[39]和不列颠哥伦比亚和华盛顿州时代可能为始新世的Omineca一些变质核杂岩^[41];

(7) 近岸海中活动的海底扩张裂谷系向陆缘的扩展或可能的转换,如巴布亚新几内亚的第四纪Woodlark-D'Entrecasteaux裂谷系^[42-43];

(8) 与板块边界相互作用的关系不清、成因不明的板内伸展区,如阴山(大青山)^[44]和燕山(云蒙山)白垩纪变质核杂岩^[42,45]。

3.2 变质核杂岩的形成与地壳增厚和岩浆作用的关系

这些不同的核杂岩最突出的共同特征是它们发育于缩短变形和地壳增厚的大陆造山带内。这是1984年Coney和Harms根据科迪勒拉地区的研究提出的^[46]。之后,Dewey将其作为一般规律应用到全球范围^[47]。变质核杂岩的形成与岩浆作用之间虽无绝对的关系,但伸展作用与岩浆活动间的时空密切关系是绝大多数变质核杂岩的特征。但华北云蒙山和爱琴海很可能是其中的例外。例如,在北京北部的云蒙山变质核杂岩中,下盘中的岩浆作用发生于缩短作用期间的159~128 Ma (U/Pb年龄^[42]),而云蒙山区的后造山拆离断层和变质核杂岩的发育在此之后,形成于120~110 Ma^[42,45]。虽然燕山带别处有同时代的碱性岩浆侵入,但云蒙山变质核杂岩的下盘没有发现同伸展的岩浆活动。位于前期地壳增厚的阿尔卑斯造山带中的爱琴海弧后变质核杂岩的形成也无岩浆活动。岩浆作用与变质核杂岩伸展作用间的因果关系问题,即岩浆活动诱导或有利于地壳伸展,抑或岩浆活动是伸展作用的产物,不是本文的课题。然而文献的回顾表明,不同变质核杂岩区两种因果关系都可能存在。

3.3 变质核杂岩拆离断层的根部深度

科迪勒拉和其它地区的大多数变质核杂岩似乎都深入到中地壳内的韧性剪切带,而未进入下地壳或壳幔边界。该结论的证据之一是拆离断层下盘

一般为高绿片岩相至低-中角闪岩相的糜棱片麻岩,而无来自更深层次、变质程度更高、经韧性剪切的片麻岩类。然而,主要例外之一是不列颠哥伦比亚和华盛顿州东北部Omineca南带的一些大型始新世拆离断层。一般认为,这些断层切过全部或大部分地壳^[41]。根据地震反射资料,Slocan湖断层位移达20~30 km,以30°左右的倾角进入下地壳,可能将莫霍面错开几千米或并入地壳底部附近一近水平的拆离带^[41,48]。另一条Omineca断层,西新港断层,也解释为深部成因。该断层现分割形成于30~35 km深处的糜棱状下盘岩石和形成于10 km左右的上盘岩石^[40]。挪威加里东造山带的Nordfjord-Sogn拆离断层带形成5 km厚的糜棱岩带,现倾角为5~10°,原深度可能为30~40 km,位移50~100 km^[47]。

3.4 拆离断层的根部几何特征

有必要说明拆离断层倾角型式的多样性。在科迪勒拉的广大地区,例如下科罗拉多河伸展区,核杂岩具有统一的拆离断层倾向(N60°E±)。与此相似,华北阴山-燕山带中核杂岩的主拆离断层(云蒙山、大青山和亚干-翁奇海尔罕变质核杂岩)扎根于南东方向。然而,其他变质核杂岩的拆离断层的几何形态复杂得多。西Omineca带中的多重拆离断层一般倾向西,而东Omineca拆离断层主要倾向东。这两个不同的拆离断层系的年代不同。西倾的拆离断层主要活动期在45~52 Ma间,而东倾的拆离断层一般较老(58~52 Ma)^[41]。浆作用早于并跨越这些地壳伸展时间段。Omineca倾向相反的拆离断层之间具有极其复杂的几何关系(参见参考文献[40])。其它具有边界拆离断层背向核部、倾向相反的变质核杂岩包括意大利北部的Alpi Apuane^[41]和土耳其西部的中Menders变质核杂岩^[49]。

3.5 先存构造对拆离断层形成的控制问题

最后,有必要注意有些变质核杂岩拆离断层的形成独立于大陆地壳中先存的构造或各向异性。内华达、加州和亚利桑纳州的下科罗拉多河区的拆离断层,作为原始低至中等倾角的剪切带,切割面理陡倾的元古界结晶岩,与上地壳中生代缩短构造不平行。Omineca变质核杂岩区,尽管有些较新的西倾拆离断层可能复活先存西倾的逆冲断层,但老的东倾拆离断层却切割这些先存的西倾逆冲断层^[41]。在挪威南部的加里东褶皱带中,初始的造山后伸展作用导致沿主要向东逆冲的逆冲断层的反向滑动,但沿

像 Nordfjord-Sogn 一类拆离断层的后续伸展和地壳垮塌却切断逆冲断层围限的造山楔^[7]。华北倾向南东的云蒙山白垩纪拆离断层切割了较老的、与向南逆冲的中地壳推覆体有关的韧性剪切带^[2,45]。然而向西,内蒙大青山南东倾的白垩纪拆离断层看来大部分受结晶基底中近平行的较老逆冲断层所控制 (Davis, Zheng, Darby, 撰文中)。

4 结 论

伸展变质核杂岩 (mcc) 的基本特征包括: (1) 缓倾至中等倾角的具有大规模位移的 (几十千米) 区域至准区域性延伸的主拆离断层; (2) 断层相关的糜棱片岩和片麻岩下盘 (包括可能出露更深层次的非糜棱化结晶岩); (3) 上盘上地壳基底岩和/或表壳岩层。关键的一点是, 所有变质核杂岩是沿地壳深部 (大于 10~15 km) 大型拆离断层大规模地壳伸展和地壳切除 (缺失) 的产物。我们认为, 地壳剖面无大规模缺失的以基底为核的穹隆状杂岩不是一般公认的构造定义上的变质核杂岩。

变质核杂岩形成于同缩短期和缩短期后的多种构造环境中。由于前期或同期的缩短作用, 变质核杂岩似乎都发育在地壳过度增厚的区域。绝大多数但显然并非全部变质核杂岩都与岩浆作用有密切的时空关系。变质核杂岩起控制作用的拆离断层一般生根于中地壳或直接位于石英变为晶塑性的韧脆性转化带下的深处, 但有些拆离断层切穿大部或整个地壳。大多数变质核杂岩总体上具有不对称或简单剪切的构造几何特征, 但不列颠哥伦比亚南部、华盛顿州、意大利北部和土耳其西部等地的变质核杂岩发育较为对称的边界拆离断层。许多拆离断层具有原生的平行滑动方向的波瓦构造。许多拆离断层的原始倾角一般很缓 (小于 35~40°), 而有些在伸展地壳中的旋转前原始倾角也可能较陡。活动的缓倾的拆离断层发育与其滑动方向成高角度的褶皱是很常见的, 这可导致主拆离断层弯曲上段的废弃和形成新的较平的断层分支。这些断层分支一般向上切入早先的上盘岩层。最后, 拆离断层的发育可完全与上地壳中先存构造或各向异性无关, 但有些受其控制。

致谢: 南加州的 Brian Darby 多次阅读了本文文稿并绘制了图 3, 使之更为明晰。非常感谢美国科学基金委员会和中国国家自然科学基金委员会自 1987

年以来对作者的长期资助。作者欢迎通过电子邮件讨论本文内容或有关变质核杂岩地质问题 (gdavis@usc.edu or ydzheng@geoms.geo.pku.edu.cn)。

参考文献:

- [1] Davis G H and Coney P J. Geologic development of the Cordilleran metamorphic core complexes [J] *Geology*, 1979, 7: 120~124.
- [2] Wernicke B. Low-angle normal faults in the Basin and Range Province: nappe tectonics in an extending orogen [J] *Nature*, 1981, 291: 645~648.
- [3] Davis G H. Shear-zone model for the origin of metamorphic core complexes [J] *Geology*, 1983, 11: 342~347.
- [4] Wernicke B. Uniform-sense normal simple shear of the continental lithosphere [J] *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1985, 22: 108~125.
- [5] Davis G A, Lister G S and Reynolds S J. Structural evolution of the Whipple and South mountains shear zones, southwestern United States [J] *Geology*, 1986, 14: 7~10.
- [6] Howard K and John B E. Crustal extension along a rooted system of imbricate low-angle faults: Colorado extensional corridor, California and Arizona [A] in: Coward, M. P. et al eds. *Continental extensional tectonics* [C] Geological Society Spec. Pub, 1987, (28): 299~311.
- [7] Davis G A and Lister G S. Detachment faulting in continental extension: Perspectives from the Southwestern U. S. Cordillera [J] *Geol. Soc. America Special Paper*, 1988, 218: 133~159.
- [8] Lister G S and Davis G A. The origin of metamorphic core complexes and detachment faults formed during Tertiary continental extension in the northern Colorado River region, U. S. A [J] *Journal of Structural Geology*, 1989, 12: 65~94.
- [9] Burchfiel B C and Royden L H. North-south extension within the convergent Himalayan region [J] *Geology*, 1985, 13: 679~682.
- [10] Burchfiel B C, Chen Z, Hodges K V et al. The south Tibetan detachment system, Himalayan orogen: Extension contemporaneous with and parallel to shortening in a collisional mountain belt [J] *Geol. Soc. America Spec. Paper*, 1992, 269: 41.
- [11] Davis G A and Zheng Yadong. A possible Cordillera-type metamorphic complex beneath the Great Wall near Hefangkou, Huairou County, northern China [J] *Geol. Soc. America Abstract with Program*, 1988, 20: 324.
- [12] Davis G A, Qian X, Zheng Y et al. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmeng Shan: A metamorphic core complex north of Beijing, China [A] in Harrison, M. and Yin, A. eds, *Rubey Volume: Tectonics of Asia* [C] Cambridge Univ. Press, 1996. 253~280.
- [13] Zheng Y, Wang S, Wang Y. An enormous thrust nappe and extensional metamorphic core complex newly discovered in

- Sino-Mongolian boundary area [J] Science in China (Series B), 1991, 34 (9): 1145~1153.
- [14] Faure M, Sun Y, Shu L et al. Extensional tectonics within a subduction-type orogen: The case study of the Wugongshan dome (Jiangxi Province, southeastern China) [J] Tectonophysics, 1996, 263: 77~106.
- [15] Davis G A. Rapid upward transport of mid-crustal mylonitic gneisses in the footwall of a Miocene detachment fault, Whipple Mountains, southeastern California [J] Geologische Rundschau, 1988, 77 (1): 191~209.
- [16] Boncio P, Prozzetti F and Lavecchia G. Architecture and siesmotectonics of a regional low-angle normal fault in central Italy [J] Tectonics, 2000, 19: 1038~1055.
- [17] John B E. Geometry and evolution of a mid-crustal extensional fault system: Chemehuevi Mountains, southeastern California [A] in: Coward M P et al eds. Continental extensional tectonics [C] Geol. Soc. London Spec. Pub. 1987, (28): 313~335.
- [18] Buck W R. Flexural rotation of normal faults [J] Tectonics, 1988, 7: 959~973.
- [19] Gessner K, Ring U, Johnson C et al. An active bivergent-rolling-hinge detachment system: Central Menderes metamorphic core complex in western Turkey [J] Geology, 2001, 29: 611~614.
- [20] Sorel D. A Pleistocene and still-active detachment fault and the origin of the Corinth-Patras rift, Greece [J] Geology, 2000, 28: 83~86.
- [21] John B E and Foster D A. Structural and thermal constraints on the initiation angle of detachment faulting in the southern Basin and Range: The Chemehuevi Mountains case study [J] Geol. Soc. America Bull., 1993, 105: 1091~1108.
- [22] Pease V, Foster D, Wooden J et al. The Northern Sacramento Mountains history and detachment faulting. p. 199~237 in Mac Niocaill, C. and Ryan, P. eds, Continental tectonics [C] Geol. Soc. London Spec. Pub. 1999, 164: 199~237.
- [23] Livaccari R F and Geissman J W. Large-magnitude extension along metamorphic core complexes of western Arizona and southeastern California: Evaluation with paleomagnetism [J] Tectonics, 2001, 20: 625~648.
- [24] Friedmann S J and Burbank D W. Rift basins and supradetachment basins. Intracontinental extensional endmembers [J] Basin Research, 1995, 7: 109~127.
- [25] Yin A and Dunn J F. Structural and stratigraphic development of the Whipple-Chemehuevi detachment fault system, southeastern California: Implications for geometrical evolution of domal and basinal low-angle normal faults [J] Geol. Soc. America Bull., 1992, 104: 659~674.
- [26] Avigad D, Ziv A and Garfunkel Z. Ductile and brittle shortening, extension-parallel folds and maintenance of crustal thickness in the central Aegean (Cyclades, Greece) [J] Tectonics, 2001, 20: 277~287.
- [27] Davis G A, Fowler T K, Bishop K M et al. Pluton pinning of an active Miocene detachment fault system, eastern Mojave Desert, California [J] Geology, 1993, 21: 627~630.
- [28] Lister G S, Banga G and Feenstra A. Metamorphic core complexes of Cordilleran type in the Cyclades, Aegean Sea [J] Geology, 1984, 12: 221~225.
- [29] Vandenberg L C and Lister G S. Structural analysis of basement tectonites from the Aegean metamorphic core complex of Ios, Cyclades, Greece [J] J. Struct. Geology, 1996, 18: 1437~1454.
- [30] Avigad D, Garfunkel Z, Jolivet L et al. Back arc extension and denudation of Mediterranean eclogites [J] Tectonics, 1997, 16: 924~941.
- [31] Carmignani L and Kligfield R. Crustal extension in the Northern Apennines: The transition from compression to extension in the Alpi Apuane core complex [J] Tectonics, 1990, 9: 1275~1304.
- [32] Mancktelow N S. Neogene lateral extension during convergence in the Central Alps: Evidence from interrelated faulting and backfolding around the Simplonpass (Switzerland) [J] Tectonophysics, 1992, 215: 295~317.
- [33] Steck A and Hunziker J. The Tertiary structural and thermal evolution of the Central Alps—compressional and extensional structures in an orogenic belt [J] Tectonophysics, 1994, 238: 229~254.
- [34] Selverstone J. Evidence for east-west crustal extension in the Eastern Alps: Implications for the unroofing history of the Tauern window [J] Tectonics, 1988, 7: 87~105.
- [35] Ratschbacher L, Friewsch W, Linzer H-G et al. Lateral extrusion in the Eastern Alps, Part 2: Structural Analysis [J] Tectonics, 1991, 10: 257~273.
- [36] Andersen T B. Extensional tectonics in the Caledonides of southern Norway, an overview [J] Tectonophysics, 1998, 285: 333~351.
- [37] Fossen H. Extensional tectonics in the Caledonides: Synorogenic or postorogenic [J] Tectonics, 2000, 19: 213~224.
- [38] Zorin Y A. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia [J] Tectonophysics, 1999, 306: 33~56.
- [39] Holm D K and Wernicke B. Black Mountain crustal section, Death Valley extended terrain, California [J] Geology, 1990, 18: 520~523.
- [40] Doughty P T and Price R A. Tectonic evolution of the Priest River complex, northern Idaho and Washington: A reappraisal of the Newport fault with new insights on metamorphic core complex formation [J] Tectonics, 1999, 18: 375~393.
- [41] Parrish R R, Carr S D and Parkinson D L. Eocene extensional tectonics and geochronology of the southern Omineca

- belt, British Columbia and Washington [J]. *Tectonics*, 1988, 7: 181~212.
- [42] Hill E J, Baldwin S L and Lister G S. Unroofing of active metamorphic core complexes in the D'Entrecasteau Islands, Papua New Guinea [J]. *Geology*, 1992, 20: 907~910.
- [43] Abers G A, Mutter C Z and Fang J. Shallow dips of normal faults during rapid extension: Earthquakes in the Woodlark-D'Entrecasteaux rift system, Papua New Guinea [J]. *J. Geophys. Research*, 1997, 102: 15301~15317.
- [44] Darby B J, Davis G A and Zheng Y. Evolving geometry of the Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China [J]. *Geol. Soc. America Abstracts with Programs*, 2001, 33 (3): A~32.
- [45] Davis G A, Zheng Y, Wang C et al. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China. In Hendrix, M. S and Davis, G. A. eds., *Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution of central and eastern Asia — from continental assembly to intracontinental deformation* [J]. *Geol. Soc. America Memoir* 2001, 194.
- [46] Coney P J and Harms T A. Cordilleran metamorphic core complexes: Cenozoic extensional relics of Mesozoic compression [J]. *Geology*, 1984, 12: 550~554.
- [47] Dewey J F. Extensional collapse of orogens. *Tectonics*, 1988, 7: 1123~1139.
- [48] Cook F A. The reflection Moho beneath the southern Canadian Cordillera. *Canadian Jour* [J]. *Earth Sciences*, 1995, 32: 1520~1530.

Metamorphic core complexes: Definition, types and tectonic setting

G.A. Davis^{1,2} ZHENG Yadong³

(1. *Department of Earth Sciences, University of Southern California, Los Angeles, CA 90089-0740, USA*;

2. *Institute of Geology and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083 China*;

3. *Department of Geology, Peking University, Beijing 100871*)

Abstract: The essential characteristics of extensional metamorphic core complexes (mcc's) include (a) the presence of a master low-to moderate-dipping detachment faults with large displacement (several tens of kilometers) and regional to subregional extent, (b) a lower plate (footwall) of fault-related mylonitic schists and gneisses, and deeper non-mylonitic crystalline rocks that may or may not be exposed, and (c) an upper plate (hanging wall) of upper crustal basement rocks and/or supracrustal strata. The critical aspect of all mcc's is that they are the result of major crustal extension and crustal excision (omission) along master detachment faults that place deep (>10–15km) crustal rocks beneath supracrustal strata and/or their underlying basement. Domed basement-cored complexes that lack major omission of crustal section are not, in the writer's opinion, mcc's in the generally accepted tectonic definition.

Mcc's form in a wide variety of tectonic environments, both syn- and post-contractional. All appear to have developed in regions of crustal overthickening due to prior or synchronous contraction, and by far most, but apparently not all, mcc's have close spatial and temporal relationships to magmatism. Their controlling detachment faults most commonly root into the mid-crust at depths within or just below the brittle-ductile transition where quartz becomes crystal-plastic, but some faults cut across most or all of the crust. The majority of mcc's have overall tectonic geometries of asymmetric or simple shear, but some other complexes have more symmetrical development of bounding detachment faults.

Keywords: metamorphic core complex; detachment fault; mylonitic front; crustal excision