

地质温度计在郟庐断裂带南段低温糜棱岩中的尝试

王勇生 朱 光 王道轩 宋传中 刘国生

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:在缺少糜棱岩形成温度资料的情况下,糜棱岩的形成深度、与所叠加岩石的关系、变质演化、抬升-剥露历史、矿物的变形机制、同位素年龄数据的解释等一系列问题就很难得到正确合理的解释。适用于低温条件下的白云母-绿泥石地质温度计、白云母-黑云母地质温度计和绿泥石成分温度计仅在区域变质岩中应用过,从未在糜棱岩中使用。本文利用郟庐断裂带南段(安徽段)韧性剪切带内糜棱岩中同构造新生的白云母、黑云母和绿泥石,首次尝试上述 3 种地质温度计在糜棱岩中的应用。糜棱岩中新生矿物组合及长石变形行为显示,糜棱岩的变形温度为 350℃~450℃。利用白云母-黑云母地质温度计和绿泥石地质温度计获得的温度值分别为 672℃~1116℃和 470℃~520℃,高于糜棱岩的形成温度,指示这 2 个地质温度计不适用于计算低温糜棱岩的形成温度。而利用白云母-绿泥石地质温度计获得的温度值与糜棱岩的形成温度相吻合,这表明在上述 3 种低温地质温度计中,只有白云母-绿泥石地质温度计适用于低温糜棱岩的形成温度测定。

关键词:郟庐断裂带;糜棱岩;白云母-绿泥石地质温度计;白云母-黑云母地质温度计;绿泥石成分温度计

中图分类号:P588.33+2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2005)04-0625-09

韧性剪切带的研究是断裂构造研究的一个重要方面,而韧性剪切带中糜棱岩形成温度的测定则是其中最重要的内容之一。在缺少形成温度资料的情况下,糜棱岩的形成深度、与所叠加岩石的关系、变质演化、抬升-剥露历史、矿物的变形机制,以及同位素年龄数据的解释等一系列问题就很难得到正确合理的解释。例如,在同位素年龄解释过程中,如果糜棱岩形成温度高于测年矿物的封闭温度,则只能得到一个冷却年龄;而如果糜棱岩的形成温度低于测年矿物的封闭温度,则先存矿物就不适于测年,只能选择同构造矿物进行年龄测定^[1]。因而,糜棱岩形成温度的测定已成为断裂构造研究中一个极其重要的环节。

虽然已有许多学者提出了各种共生矿物对地质温度计,并用来计算构造热事件的发生温度,但其中大多数地质温度计只适用于中-高温情况下,而适用于低温情况下的地质温度计却很少。目前,能够用于低温条件下(变质程度不高于中绿片岩相,温度小于 500℃)的地质温度计仅有黑云母-白云母地质温度计^[2]、绿泥石成分地质温度计^[3-4]和白云母-绿泥石地质温度计^[5]。但这些地质温度计自提出以来只在区域变质岩中应用过,目前仍处于探索研究阶段。即使应用于区域变

质岩中,也存在一定的争议^[2+7]。

到目前为止,这些地质温度计从未在糜棱岩中应用。由于糜棱岩的形成温度对韧性剪切带变质演化的研究具有十分重要的意义,且很难用其他方法获得,因而上述地质温度计能否在韧性剪切带中常见的低温糜棱岩形成温度测定中给出正确的温度值,值得进行研究。根据郟庐断裂带南段(安徽段)的走滑韧性剪切带中低温糜棱岩的同构造结晶生长的绿泥石、白云母、黑云母的化学成分,首次利用白云母-绿泥石矿物对、白云母-黑云母矿物对和绿泥石成分地质温度计测得韧性剪切带低温糜棱岩中的变形温度。

1 地质背景与样品描述

郟庐断裂带是中国东部的一条巨型断裂带,总体呈 NNE 走向,在中国境内延伸 2400 多千米,该断裂带将大别-苏鲁造山带左行错移 550 km 左右^[6],其间北北东向延伸的张八岭隆起带是造山带顺郟庐断裂带牵引弯曲的残留部分(图 1)。在大别造山带东缘,该断裂带叠加在造山带变质杂岩之上。研究区位于大别造山带东缘和张八岭隆起的郟庐断裂带南段(安徽段),剪切带内的糜棱岩叠加在榴辉岩的围岩片麻

收稿日期:2004-08-29;改回日期:2005-03-17

基金项目:国家自然科学基金项目(40272094)资助。

作者简介:王勇生,男,1977 年生,博士,从事成岩成矿动力学方面研究;E-mail:yshw9007@sina.com。

岩之上,该片麻岩围岩曾经遭受了角闪岩相退变质作用。

郟庐断裂带南段地表出露为大型左旋走滑韧性剪切带,也是整个断裂带上糜棱岩类出露最好的地段,出现了一系列绿片岩相粗糜棱岩、糜棱岩、超糜棱岩、千糜岩等。笔者所采用的样品为采自于郟庐断裂带南段的糜棱岩,这些糜棱岩都叠加在高角闪岩相的区域变质岩之上(张八岭隆起南段为肥东群,大别山东缘为大别杂岩)。在剪切带糜棱岩的形成过程中普遍伴随有绿片岩相退变质作用。经显微镜下鉴定(表1),石英普遍由于动态重结晶而广泛细粒化,少数残斑普遍具波状、带状消光或由长条形的亚颗粒构成,局部出现核-幔构造。长石主要以残斑形式存在,其变形特征表现既有脆性碎裂,又有塑性拉长,部分样品内以塑性拉长为主。样品中白云母明显表现为残斑和基质白云母两个时代(图2-a)。白云母残斑长轴粒径大于 200 μm,变形十分强烈,普遍出现了波状

消光、扭折,部分还发生了强烈褶皱弯曲。基质中大量同构造结晶的白云母颗粒细小,最大者其长轴粒径不超过 30 μm,大多数颗粒为 10 μm 左右,常沿糜棱面理分布。角闪岩相退变质过程中形成的黑云母颗粒粗大,仍基本保持原有矿物的颗粒大小,其粒径明显大于糜棱岩化过程中新形成的基质黑云母。基质中的黑云母颗粒细小,粒径多为 10~20 μm(图2-b)。绿泥石或交代先存矿物,或沿糜棱面理定向分布。交代其他矿物的绿泥石是糜棱岩化过程中由早期的角闪石、黑云母退变而来,广泛的退变质使早期暗色矿物很少残留(图2-c)。由于糜棱岩中的流体主要沿糜棱面理活动,因而沿糜棱面理定向分布的基质矿物应是自流体中结晶产生的。沿糜棱面理定向分布的绿泥石颗粒细小,与其他矿物的边界紧密结合,明显指示为糜棱岩中的基质矿物,而其沿糜棱面理的定向分布也充分说明了这些基质绿泥石是从流体中结晶产生的。因



图1 郟庐断裂带糜棱岩样品采样位置示意图

Fig.1 Sketch map showing the sampling location of mylonite samples in the Tanlu fault zone



图 2 郟庐断裂带糜棱岩显微照片

a—两世代白云母;b—新生的基质黑云母;c—由黑云母退变形成的绿泥石;d—共生的白云母-黑云母矿物对;e—共生的白云母-绿泥石矿物对;
Qz—石英;Mus—残斑白云母;Ser—基质白云母;Chl—绿泥石;Bi—黑云母;Feld—长石

Fig.2 Photomicrographs of mylonites from the Tan-Lu fault zone

a—Two generations of muscovite;b—Neogenic biotite in matrix;c—Chlorite formed by retrogression of biotite;
d—Coexisting muscovite-biotite pair;e—Coexisting muscovite-chlorite pair;Qz—Quartz;Mus—Motar muscovite;
Ser—Matrix muscovite;Chl—Chlorite;Bi—Biotite;Feld—Feldspar

而,糜棱岩基质中的矿物组合为动态重结晶的石英+白云母+绿泥石±黑云母±钠长石,部分样品中含有绿帘石(表 1),属于典型的绿片岩相变质矿物组合。

糜棱岩基质中新生矿物组合及矿物的变形现象与变形温度密切相关。据此可以进行变形温度估算。本次糜棱岩样品基质矿物组合(表 1),特别是其中新生黑云母的出现,指示变形环境至少为中绿片岩相。众所周知,绿片岩相的温度范围为 300℃~500℃^[7],而中绿片岩相温度范围为 350℃~450℃。Simpson^[8]、Tullis and Yund^[9]对天然变形岩石中长石脆-韧性转换温度的详细研究显示,低绿片岩相下长石呈脆性变形,中绿片岩相下开始显示以位错蠕变为标志的塑性变形,而进入高绿片岩相-低角闪岩相长石呈现为以动态重结晶为标志的塑性变形。这一转换温度发生在 400℃~550℃。Passchier & Trouw^[11]也指出,400℃以下长石呈现为显微破裂,在 400℃~500℃时长石变形主要表现为塑性拉长、波状消光及形成亚颗粒和核-幔构造,而在 500℃以上则长石的动态重结晶占优势。根据这些判别标准,对所分析的糜棱岩的形成温度估算见表 1。

电子探针分析由中国地质大学(武汉)测试中心利用日本产 JCSA-733 电子探针探测仪完成的。实验电压:15kV;电流:20nA。 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的元素分子数是采用电价差法计算的,计算步骤为:①按照标准阳离子法计算矿物晶体化学式中各阳离子的系数;②算出阳离子总电价,该电价与矿物的理论电价之差即为 Fe^{3+} 的阳离子系数;③根据 Fe^{3+} 的系数反推出 Fe_2O_3 的质量百分数;④按照 $Fe^{2+}=Fe_{总}-Fe^{3+}$ 求出 Fe^{2+} 的阳离子系数,据此反推出 FeO 的真实质量百分数;⑤由各氧化物的质量百分数计算得到各阳离子在晶体化学式中的系数。电子探针分析结果及获得的各阳离子系数见表 2。

分析工作中所选用的白云母、黑云母和绿泥石颗粒细

表 1 郯庐断裂带南段低温糜棱岩镜下鉴定特征及估算温度
Table 1 Diagnostic features of low-temperature mylonites
in the southern part of the Tanlu fault zone

样品号	采样位置	基质矿物组合	残斑矿物组合	长石变形特征	温 度
No1	大别山东缘	Qz+Mus+Chl+Bi+Ab	Qz+Mus+Feld	显微破裂+塑性拉长	350℃ ~ 450℃
No2	大别山东缘	Qz+Mus+Chl+Bi+Ab	Qz+Mus+Feld	显微破裂+塑性拉长	350℃ ~ 450℃
No3	大别山东缘	Qz+Mus+Chl+Bi+Ab	Qz+Mus+Feld	显微破裂+塑性拉长	350℃ ~ 450℃
No4	大别山东缘	Qz+Mus+Chl+Bi+Ab	Qz+Mus+Feld	显微破裂+塑性拉长	350℃ ~ 450℃
No5	大别山东缘	Qz+Mus+Chl+Bi+Ab	Qz+Mus+Feld	塑性拉长为主	400℃ ~ 450℃
T15-1	大别山东缘	Qz+Mus+Chl+Bi+Ep	Qz+Mus+Feld	显微破裂+塑性拉长	350℃ ~ 450℃
T15-5	大别山东缘	Qz+Mus+Chl	Qz+Mus+Feld	塑性拉长为主	400℃ ~ 450℃
T19-11	大别山东缘	Qz+Mus+Chl+Bi	Qz+Mus+Fel+Bi	塑性拉长为主	400℃ ~ 450℃
T28-4	大别山东缘	Qz+Mus+Chl+Ep	Qz+Mus+Feld	显微破裂+塑性拉长	300℃ ~ 400℃
No6-2	张八岭隆起	Qz+Mus+Chl+Bi	Qz+Mus+Feld	显微破裂+塑性拉长	350℃ ~ 450℃
No20	张八岭隆起	Qz+Mus+Chl+Bi	Qz+Mus+Fel+Bi	显微破裂+塑性拉长	350℃ ~ 450℃

注:Qz-石英;Mus-白云母;Chl-绿泥石;Bi-黑云母;Ep-绿帘石;Ab-钠长石;Feld-长石。

小,沿糜棱面理定向分布,明显表现为受糜棱岩化过程中流体活动的控制,显示所选矿物皆为糜棱岩化过程中新生的、以基质形式存在的同构造结晶生长的矿物。显微镜下观察显示,所选择的矿物并未出现与其他矿物的交代现象,共生的白云母-黑云母(图 2-d)、白云母-绿泥石(图 2-e)矿物对中矿物为紧密共生接触、接触界线相互吻合,明显表现为糜棱岩化过程中同期新生的。

2 白云母-黑云母地质温度计的应用

从 20 世纪 70 年代开始,地质学家们就开始研究白云母与黑云母成分变化的岩石学意义。Thompson^[12]发现黑云母中 Fe-Mg 会随着变质程度的增高而发生变化,并且白云母与黑云母中系统组分的变化可以作为变质等级的函数。Hoisch^[2]在此基础上,根据反应方程 $KMg_3(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$ (金云母)+ $KAl_2(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$ (白云母)= $K(MgAl)Si_4O_{10}(OH)_2$ (绿帘石)+ $K(Mg_2Al)(Al_2Si_2)O_{10}(OH)_2$ (富镁黑云母),利用共生的白云母与黑云母中 Mg-契尔马克组分的交换 ($[MgSiAl_2]^{Mg}=[MgSiAl_2]^{Bi}$)建立了白云母-黑云母对地质温度计。

假定白云母组分的活度系数为 1,通过多元回归的方法求得反应方程式的热力学表达式中的未知数。回归结果的误差均为 1σ 的标准偏差,回归的多元相关系数为 0.92。由此可以得到白云母-黑云母的温度计算公式:

$$T = \frac{500.110 + 0.014789P - 878.745(X_{Mg}^{Bi} - X_{Mg}^{Bi}) - 4532.67[X_{Mg}^{Mus} (X_{Mg}^{Mus} - 2)]}{1 + 0.0237527R \ln K_{Rl}^{ideal}} \quad (1)$$

其中 T 为温度,单位为 K; P 为压力,单位为 bar; $R = 8.3144 \text{ J/K}$; X_{Mg}^{Bi} 、 X_{Mg}^{Mus} 分别为 Mg 和 Al 在黑云母和白云母六次配位阳离子中的摩尔分数(上标 Bi 表示黑云母, Mus 表示白云母),其计算式分别为 $Mg_{Bi}/3$ 、 $(Al+Si-4)_{Bi}/3$ 、 $Mg_{Mus}/2$ 。

$K_{Rl}^{ideal} = 27[(Mg/^{11}Al)^{Mus}/(Mg/^{11}Al) Bi]$,其中 Mg_{Bi} 、 Mg_{Mus} 分别表示黑云母和白云母中 Mg 的元素分子数。

本文利用郯庐断裂带南段糜棱岩化过程中同构造形成的白云母与黑云母,作为地质温度计计算了 5 个样品(No4、T15-1、No6-2、No20、T19-11)的 7 个二云母矿物对(其中样品 No4 和 T-19-11 各包括两个矿物对)的形成温度,获得的 7 个温度值。其温度值介于 $672^\circ\text{C} \sim 1116^\circ\text{C}$ 之间,远高于由矿物组合以及长石变形特征所估计的温度,而且此温度结果显示了很大的随机性。采自同一采场(程坂)的两个样品 No4 和 T19-11 的温度分别为 861°C 、 672°C 和 949°C 、 838°C (表 3),最大相差 277°C ,而且同一样品中两个不同的矿物对所计算的温度也相差 $100^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$,远高于温度计的误差范围。郯庐断裂带南段糜棱岩样品中虽然有黑云母的出现,但每个样品中都存在有绿泥石,且没有出现石榴石、夕线石、红柱石等更高级变质矿物,明显表现为中-低绿片岩相变质的产物,形成温度不应高于 450°C 。但计算结果显示,利用该地质温度计计算获得的温度明显高于糜棱岩的形成温度。

之所以会产生这种情况,笔者认为不外乎两种原因:一是由于糜棱岩化过程相对短暂, Mg 在矿物对之间的分配没有达到平衡;二是白云母与黑云母的成分受到原岩成分的影响。前文已述,笔者所选择的矿物全部为糜棱岩化过程中新生的。相对于区域变质作用,糜棱岩化过程虽然短暂,但由于共生矿物为糜棱岩化过程中新生的,如果 Mg 在白云母-黑云母矿物对中的分配只受温度控制,则在这些新生矿物生长的过程中,元素平衡分配到生成的共生矿物内。时间短暂可能会导致新生矿物的颗粒较小,但不会影响到共生矿物之间元素的分配。因而可以排除糜棱岩化作用时间的短暂对元素分配的影响。郯庐韧性剪切带内中-低绿片岩相变质的糜棱岩是叠加在高角闪岩相变质岩之上的。先存的富镁的矿物,如角闪石等,发生退变质作用而消失,而其中的镁则可能进入到新生成的矿物当中,造成同构造白云母和黑云母中具有

表 2 郟庐断裂带糜棱岩中白云母、黑云母和绿泥石电子探针分析结果 (%)

Table 2 Microprobe analyses of coexisting muscovite, biotite and chlorite in mylonites from the Tanlu fault zone

样品号	矿物	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	G ₂ O ₃	Total	Si	Ti	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Cr
No1	白云母	48.11	0.43	33.23	2.62	0.00	0.74	0.00	0.46	8.12	0.00	93.70	3.21	0.02	0.79	1.82	0.07	0.07	0.00	0.07	0.00	0.03	0.35	0.00
	绿泥石	27.03	0.00	19.67	23.83	0.63	14.82	0.00	0.00	0.00	0.00	85.98	2.85	0.00	1.15	1.29	1.64	0.41	0.06	2.33	0.00	0.00	0.00	0.00
	白云母	48.56	0.48	33.52	3.03	0.00	1.02	0.01	0.78	7.79	0.00	95.19	3.19	0.02	0.81	1.79	0.06	0.09	0.00	0.10	0.00	0.05	0.33	0.00
No2	绿泥石	27.48	0.01	19.13	25.66	0.70	15.18	0.02	0.00	0.00	0.00	88.18	2.84	0.00	1.16	1.17	1.62	0.54	0.06	2.34	0.00	0.00	0.00	0.00
	白云母	48.44	0.65	33.12	2.64	0.00	1.18	0.02	0.69	8.29	0.00	95.01	3.20	0.03	0.80	1.77	0.07	0.07	0.00	0.12	0.00	0.04	0.35	0.00
	绿泥石	27.58	0.00	18.55	24.80	0.64	13.54	0.01	0.00	0.00	0.06	85.18	2.96	0.00	1.04	1.31	1.97	0.24	0.06	2.17	0.00	0.00	0.00	0.01
No3	白云母	48.20	0.61	32.45	3.25	0.01	1.07	0.02	0.68	8.59	0.00	94.89	3.20	0.03	0.80	1.74	0.11	0.07	0.00	0.11	0.00	0.04	0.36	0.00
	绿泥石	26.32	0.06	19.34	24.23	0.50	13.12	0.04	0.00	0.00	0.04	83.65	2.87	0.00	1.13	1.36	1.90	0.28	0.05	2.13	0.01	0.00	0.00	0.00
	白云母	47.21	0.61	30.92	3.16	0.00	1.26	0.00	0.48	9.31	0.00	92.94	3.22	0.03	0.78	1.70	0.10	0.07	0.00	0.13	0.00	0.03	0.40	0.00
No5	绿泥石	25.16	0.03	18.59	24.96	0.60	13.66	0.08	0.00	0.00	0.20	83.28	2.77	0.00	1.23	1.18	1.67	0.56	0.06	2.24	0.01	0.00	0.00	0.02
	白云母	48.33	0.62	32.82	2.77	0.00	1.10	0.01	0.53	7.43	0.00	93.60	3.22	0.03	0.78	1.80	0.10	0.05	0.00	0.11	0.00	0.03	0.32	0.00
	绿泥石	28.77	0.12	19.50	24.14	0.83	16.98	0.06	0.00	0.00	0.12	90.51	2.87	0.01	1.13	1.16	1.49	0.47	0.07	2.52	0.01	0.00	0.00	0.01
T15-5	白云母	48.88	0.97	33.32	3.52	0.00	0.90	0.00	0.13	9.14	0.00	96.88	3.23	0.03	0.77	1.81	0.10	0.05	0.00	0.11	0.00	0.07	0.63	0.00
	绿泥石	27.74	0.04	20.48	24.35	1.36	15.63	0.00	0.00	0.00	0.00	89.60	2.91	0.01	1.09	1.23	1.49	0.47	0.07	2.56	0.01	0.00	0.00	0.01
	白云母	48.43	0.52	33.56	2.91	0.00	1.03	0.00	1.12	7.50	0.00	95.07	3.19	0.03	0.81	1.79	0.10	0.06	0.00	0.10	0.00	0.07	0.31	0.00
T-28-4	绿泥石	28.03	0.00	19.57	23.43	0.76	15.65	0.02	0.00	0.00	0.01	87.47	2.89	0.00	1.11	1.27	1.59	0.39	0.07	2.41	0.00	0.00	0.00	0.00
	白云母	48.07	0.50	30.33	4.55	0.02	1.78	0.00	0.17	8.53	0.04	93.99	3.24	0.03	0.76	1.65	0.15	0.09	0.00	0.18	0.00	0.01	0.37	0.00
	黑云母	37.84	1.69	17.23	18.17	0.38	10.69	0.00	0.04	10.07	0.00	96.10	2.80	0.09	1.20	0.30	0.69	0.39	0.02	1.18	0.00	0.00	0.48	0.00
No4	白云母	49.23	0.59	33.64	3.01	0.00	1.14	0.00	0.72	7.67	0.00	95.99	3.20	0.03	0.80	1.78	0.09	0.07	0.00	0.11	0.00	0.05	0.32	0.00
	黑云母	38.09	1.82	18.81	18.85	0.21	10.34	0.00	0.01	10.05	0.17	98.35	2.76	0.10	1.24	0.37	0.84	0.27	0.01	1.12	0.00	0.00	0.47	0.01
	白云母	49.63	0.49	27.66	4.94	0.00	2.57	0.00	0.00	9.20	0.00	94.49	3.34	0.02	0.66	1.54	0.18	0.09	0.00	0.26	0.00	0.00	0.40	0.00
T-15-1	黑云母	37.97	2.37	15.63	15.36	0.74	12.01	0.02	0.04	10.51	0.17	94.82	2.82	0.13	1.18	0.20	0.45	0.46	0.05	1.33	0.00	0.00	0.50	0.01
	白云母	47.88	0.19	30.36	5.05	0.00	1.60	0.00	0.06	9.33	0.00	94.48	3.23	0.01	0.77	1.65	0.19	0.09	0.00	0.16	0.00	0.00	0.40	0.00
	黑云母	35.96	2.28	15.58	22.91	0.35	7.25	0.03	0.00	10.35	0.00	94.71	2.78	0.13	1.22	0.20	0.92	0.50	0.02	0.84	0.00	0.00	0.51	0.00
No6-2	白云母	49.13	0.44	31.67	4.59	0.00	1.42	0.00	0.05	10.00	0.00	97.29	3.23	0.03	0.77	1.81	0.10	0.05	0.00	0.11	0.00	0.07	0.63	0.00
	绿泥石	27.59	0.02	18.87	29.31	0.58	12.11	0.02	0.01	0.00	0.00	88.51	2.91	0.01	1.09	1.23	1.49	0.47	0.07	2.56	0.01	0.00	0.00	0.01
	白云母	49.41	1.28	30.15	4.24	0.00	1.40	0.00	0.15	9.65	0.00	96.27	3.27	0.06	0.73	1.62	0.16	0.07	0.00	0.14	0.00	0.01	0.41	0.00
No20	黑云母	35.32	3.35	15.81	21.14	0.35	7.76	0.00	0.00	9.98	0.00	93.71	2.75	0.20	1.25	0.20	1.01	0.33	0.02	0.90	0.00	0.00	0.50	0.00
	白云母	50.39	0.76	28.83	4.98	0.00	2.02	0.00	0.00	8.22	0.00	95.20	3.34	0.04	0.66	1.60	0.17	0.09	0.00	0.20	0.00	0.00	0.35	0.00
	黑云母	36.96	2.31	16.32	21.09	0.47	7.95	0.00	0.07	10.13	0.15	95.44	2.81	0.13	1.19	0.27	0.96	0.35	0.03	0.90	0.00	0.01	0.49	0.01
T-19-11	白云母	48.83	0.84	29.21	4.83	0.00	1.72	0.00	0.13	9.56	0.00	95.11	3.28	0.04	0.72	1.60	0.21	0.05	0.00	0.17	0.00	0.01	0.41	0.00
	黑云母	37.02	1.78	17.20	19.15	0.44	8.71	0.00	0.18	10.20	0.00	94.69	2.80	0.10	1.20	0.34	0.78	0.39	0.03	0.98	0.00	0.01	0.49	0.00

注:白云母、黑云母阳离子数以 O=11 为基数,绿泥石阳离子数以 O=14 为基数。

较高的 Mg 含量。由温度计计算公式可以看出,在所有参数中,对温度结果影响最大的就是 X_{Mg}^M 。并且由于 $[X_{Mg}^M(X_{Mg}^M-2)]$ 项的系数是一个相对较大的数值, X_{Mg}^M 微小的变化将会引起温度计算结果较大的变化。进行电子探针分析的共生白云母-黑云母矿物对中的白云母 MgO 的含量变化于 1.185%~2.678%之间(表 2),而用于推导二云母地质温度计的白云母中 MgO 变化于 0.705%~0.788%(Hoisch, 1989),从而造成了温度计算结果的异常。

自 Hoisch^[9]提出白云母-黑云母地质温度计以来,很少有地质学者应用此温度计进行变质温度的计算,即使是在区域变质作用温度的计算中也很少有学者应用。这说明该温度计可能存在一定的问题,但到目前为止,并没有学者对此进行专门探讨。本次研究表明,共生的白云母-黑云母矿物对中 Mg 的含量除受温度控制以外,还受到原岩成分和流体作用的影响。如果原岩富 Mg,则退变质作用中形成的矿物可能也富 Mg,从而导致温度计算结果出现偏差。计算结果也显示,利用白云母-黑云母地质温度计计算获得的温度明显高于糜棱岩的形成温度。因而,该地质温度计并不适用于含有较多富 Mg 矿物的岩石。

3 绿泥石成分温度计的应用

许多研究者已经注意到绿泥石中 Si 的减少或 Al^{IV} 的增加与沉积岩的埋藏深度或变质岩的变质等级具有很好的正相关性^[3,13-15]。Cathelineau and Nieva^[14]发现 Al^{IV} 和温度之间有较好的对应关系,可以用来作为温度计使用。Cathelineau^[9]提出了绿泥石中 Al^{IV} 和温度 $T(^{\circ}C)$ 的对应关系式:

$$T = -61.92 + 321.98 Al^{IV} \quad (3)$$

但是,一些学者认为,作为一个地质温度计,仅考虑绿泥石中 Al^{IV} 的变化是不够的。他们认为应该将其他与温度有关的因素也考虑进来。Jowett^[4]考虑到绿泥石中 $Fe/(Fe+Mg)$ 的变化,将公式(3)修正为:

$$Al_C^{IV} = Al^{IV} + 0.1[Fe/(Fe+Mg)], T = 319Al_C^{IV} - 69 \quad (4)$$

该地质温度计适用于 $Fe/(Fe+Mg) < 0.6$ 的绿泥石。

绿泥石成分地质温度计以其简单的形式而受到广大地质学者的欢迎,但一些学者认为绿泥石受流体或原岩成分影响太大,在水-岩比高时,绿泥石成分接近于流体成分,水-岩比低时,绿泥石成分接近于原岩成分,因此没有温度指示意义^[6]。Caritat et al^[16] 在世界上 6 个不同的地区取样,然后用 Cathelineau^[9] 和 Jowett^[4] 的方法计算温度。在 Al_2O_3 含量为 15.5%~20.0%, $Fe/(Fe+Mg) < 0.6$ 的 3 个样品中,获得了与由其他方法获得的可信的温度值一致的温度数据,显示了绿泥石成分地质温度计在一定条件下是可靠的。

笔者利用 Cathelineau^[9] 和 Jowett^[4] 方法在糜棱岩中同构造产生的绿泥石成分地质温度计获得了 5 个样品的 7 组温度值,计算得到的温度(470℃~520℃)在地质温度计误差范围内

具有很好的一致性。采自(老丁)采场同一的两个样品(No1 和 T-28-4)的温度相差不超过 20℃,而且样品 No1 中由两个不同的绿泥石颗粒计算获得的温度差在 10℃以内。另外两个采自程坂采场的样品(No2 和 No3)的温度相差约 40℃,样品 No3 中获得的 2 个温度值相差不超过 20℃,反映了该温度计良好的稳定性。笔者等所采用绿泥石样品 Al_2O_3 含量为 18.0%~20.0%, $Fe/(Fe+Mg) < 0.6$ (表 2,表 3),满足 Caritat et al^[16] 的要求,但是温度计算结果却高于由矿物组合和长石变形特征所估算的温度。

绿泥石成分温度计一个很大的缺点是没有考虑绿泥石种类的不同,而不同的绿泥石种类则具有不同的 Si 原子数,也就是不同种类的绿泥石的 Al^{IV} 不同。前文已述,郟庐断裂带的糜棱岩是叠加在高角闪岩相变质的岩石之上的。因而,在糜棱岩化过程中容易产生由黑云母、角闪石、石榴石等矿物的蚀变产物的铁绿泥石。而且,退变质过程中,这些矿物的成分进入流体,再由流体结晶产生绿泥石。此时,也容易产生铁绿泥石。电子探针分析的绿泥石全部为铁镁绿泥石(表 2)。而铁镁绿泥石是一种硅含量相对较低的绿泥石,从而导致相同温度条件下 Al^{IV} 的增加,产生高于实际温度的温度值。

绿泥石成分温度计适用于沉积岩的低温区域变质,但从未有地质学者将其应用于相对较高温度的糜棱岩化过程中。本文在糜棱岩化过程中应用此地质温度计,主要目的就是探讨该地质温度计能否更加广泛的应用。由前文计算数据可以看出,由绿泥石成分地质温度计获得的温度值在误差范围内具有很好的一致性,并且在满足 Al_2O_3 含量 15.5%~20.0%, $Fe/(Fe+Mg) < 0.6$ 时绿泥石成分地质温度计具有良好的稳定性,但可能由于绿泥石种类的变化而导致在相同的温度条件下 Si 的减少和 Al^{IV} 的增加,而产生相对较高的温度值。因而,绿泥石成分地质温度计可以通过适当的校正,尽量消除由于种类变化而产生的偏差以后,可以应用于低温糜棱岩的温度测定。这方面需要今后进一步的测试与研究。

4 白云母-绿泥石地质温度计的应用

库托夫^[5]根据共存的白云母和绿泥石之间 Al^{IV} 的分配特征,建立了白云母-绿泥石地质温度计。白云母-绿泥石地质温度计的计算精度为 $\pm 20^{\circ}C \sim \pm 60^{\circ}C$ 。白云母与绿泥石中 X_{Al}^{Ms} 和 X_{Al}^{Chl} 参数分别表示白云母与绿泥石中 Al^{VI} 与所有六配位阳离子数的比值,其计算式为:

$$X_{Al}^{Ms} = \frac{Al^{VI}}{Al^{VI} + Mg + Fe^{2+} + Fe^{3+} + Mn + Ti},$$

$$X_{Al}^{Chl} = \frac{Al^{VI}}{Al^{VI} + Mg + Fe^{2+} + Fe^{3+} + Mn + Ti} \quad (5)$$

将计算求得的 X_{Al}^{Ms} 和 X_{Al}^{Chl} 参数值投在共存的白云母-绿泥石 Al 分配等温线图(图 3),即可获得共生白云母与绿泥石的形成温度。

表 3 郯庐断裂带南段糜棱岩样品温度计算结果
Table 3 Results of temperature calculation of mylonite samples
from the southern segment of the Tanlu fault zone

样品号	采样位置	计算方法	计算温度 (°C)	Fe/(Fe+Mg)
No1	大别山东缘老丁地区	白云母-绿泥石地温计	480	—
	大别山东缘老丁地区	白云母-绿泥石地温计	440	—
No2	大别山东缘程坂地区	白云母-绿泥石地温计	430	—
	大别山东缘程坂地区	白云母-绿泥石地温计	350	—
No3	大别山东缘程坂地区	白云母-绿泥石地温计	350	—
	大别山东缘程坂地区	白云母-绿泥石地温计	350	—
No5	大别山东缘虎山咀地区	白云母-绿泥石地温计	450	—
T15-5	大别山东缘虎山咀地区	白云母-绿泥石地温计	410	—
T-28-4	大别山东缘老丁地区	白云母-绿泥石地温计	440	—
No6-2	张八岭隆起寨山地区	白云母-绿泥石地温计	370	—
No1	大别山东缘老丁地区	绿泥石成分地温计	497 (C), 500 (J)	0.46
	大别山东缘老丁地区	绿泥石成分地温计	502 (C), 506 (J)	0.48
No2	大别山东缘程坂地区	绿泥石成分地温计	471 (C), 475 (J)	0.50
	大别山东缘程坂地区	绿泥石成分地温计	493 (C), 497 (J)	0.50
No3	大别山东缘程坂地区	绿泥石成分地温计	514 (C), 518 (J)	0.49
	大别山东缘程坂地区	绿泥石成分地温计	514 (C), 518 (J)	0.49
No5	大别山东缘虎山咀地区	绿泥石成分地温计	490 (C), 492 (J)	0.43
	大别山东缘老丁地区	绿泥石成分地温计	486 (C), 489 (J)	0.45
T-28-4	大别山东缘老丁地区	绿泥石成分地温计	486 (C), 489 (J)	0.45
	大别山东缘程坂地区	白云母-黑云母地温计	861	—
No4	大别山东缘程坂地区	白云母-黑云母地温计	672	—
	大别山东缘程坂地区	白云母-黑云母地温计	672	—
T-15-1	大别山东缘虎山咀地区	白云母-黑云母地温计	1116	—
T-19-11	大别山东缘程坂地区	白云母-黑云母地温计	949	—
	大别山东缘程坂地区	白云母-黑云母地温计	949	—
No6-2	张八岭隆起寨山地区	白云母-黑云母地温计	838	—
	张八岭隆起寨山地区	白云母-黑云母地温计	872	—
No20	张八岭隆起王铁地区	白云母-黑云母地温计	797	—

注:(C)为利用 Cathelineau^[3]的方法求得的温度值,(J)为利用 Jowett^[4]的方法求得的温度值。

靳是琴等^[7]利用此地质温度计获得了甘肃皋兰群绿泥二云斜长片岩的形成温度(430 °C);刘永江等^[8]利用白云母-绿泥石温度计计算了阿尔金断裂变形岩石的形成温度为270 °C~350 °C。他们利用此温度获得的结果与其他方法获得的温度结果能够较好的对应,反映了该地质温度计的可靠性。

笔者利用白云母-绿泥石地质温度计计算所得到的 5 个样品的 7 个温度值位于 350 °C~480 °C 之间,其中 6 个温度值介于 350 °C~450 °C 之间,并且其中 4 个温度值介于 430 °C~450 °C 之间,仅有一个温度大于 480 °C(表 3)。No3 样品的两个温度完全相同,均为 350 °C;No1 样品的两个温度值相差 40 °C,为该温度计的正常误差范围。与相邻样品温度比较,样品 No1 中的 480 °C 的温度值可能是由于测量误差所造成的。同一采场(老丁)的样品 T-28-4 的温度值为 440 °C,与 No1 在误差范围内一致。而另外两个采自同一采场(程坂)的样品 No2 和 No3 的温度相差 80 °C,高于正常温度计的误差范围。这可能是由于采自于不同的小剪切带而造成的。所以,可以认为大别山东缘郯庐断裂带中的韧性剪切带的形成温度为 400 °C 左右,温度范围为 350 °C~450 °C。该温度范围与由矿物组合和矿物变形特征所估计的温度相吻合。

白云母-绿泥石地质温度计适用于变质等级不高于绿片岩相黑云母带的变质作用。而郯庐断裂带南段糜棱岩的形成温度估计恰好界于上述变质作用的温度范围内。本文计算结果显示,由白云母-绿泥石地质温度计获得的温度结果与由变质矿物组合、长石矿物变形特征所估算的温度具有很好的

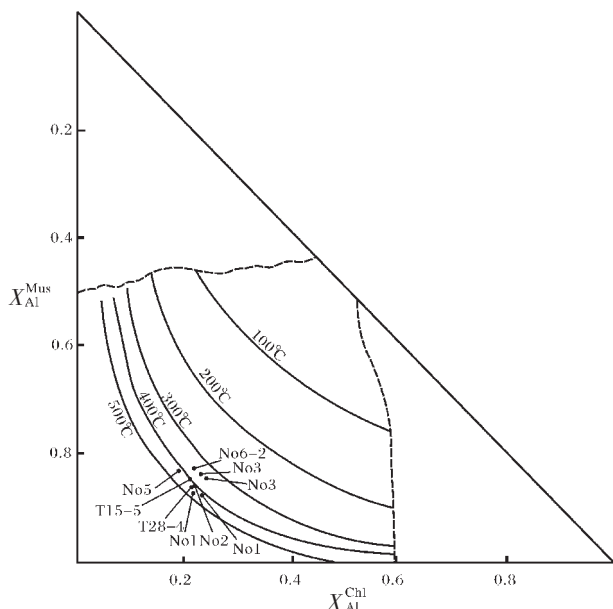


图 3 共存的白云母-绿泥石 Al 分配等温线图
(据 KOTOV, 1975)

Fig.3 Isothermal lines of Al partition between coexisting muscovite and chlorite(after KOTOV, 1975)

一致性,反映了白云母-绿泥石地质温度计适用于低温糜棱岩的温度测定。

白云母-绿泥石地质温度计也是以 Al^M 随温度的变化为

基础而建立的,并采用 Al^{IV} 和其他阳离子的比值,大大降低了由于绿泥石种类变化而产生的偏差。一般认为,绿泥石成分不稳定,这也正是大多数研究者否定与绿泥石有关的温度计的理由。但白云母-绿泥石地质温度计综合考虑了 Al^{IV} 和所有阳离子比值,大大降低了绿泥石成分中任何一项的变化而对温度结果产生的影响,因而可以得到较为可靠的温度值。总之,本次测定结果以及前人研究表明,白云母-绿泥石地质温度计适用于低温糜棱岩的温度测定。

5 结 语

与区域变质作用相比,糜棱岩化过程是一个相对复杂的地质过程,它是包括温度、时间、压力、流体活动、动力作用等在内的各种因素综合作用的过程。本次实际测试计算结果表明,白云母-黑云母地质温度计、绿泥石成分地质温度计和白云母-绿泥石地质温度计在糜棱岩化过程中具有不同的适用性,主要表现为:

(1)虽然糜棱岩化过程时间相对短暂,但并不影响 Mg 在共生的白云母和黑云母之间的平衡分配。但由于白云母与黑云母的成分受到原岩成分的影响,糜棱岩中共生白云母与黑云母中 Mg 的含量不再具有温度指示意义。由于本次所选样品中 Mg 含量较高,且由该地质温度计获得的温度明显高于糜棱岩的形成温度,反映了该地质温度计并不适用于含有较多富 Mg 矿物的岩石。

(2)由于受原岩成分影响,糜棱岩化过程中产生相对低硅、富 Al^{IV} 的铁绿泥石,从而导致相同温度条件下 Si 的减少, Al^{IV} 的增加,产生高于实际温度的温度值。但由绿泥石成分地质温度计获得的温度值具有很好的稳定性,因而可在经过适当的校正之后应用于低温糜棱岩的温度测定。

(3)由于综合考虑了 Al^{IV} 和所有阳离子比值,大大降低了绿泥石成分中任何一项的变化而对温度结果产生的影响,因而由白云母-绿泥石地质温度计可以得到较为可靠的温度值。本文由白云母-绿泥石地质温度计计算获得的温度值具有很好的一致性,与由矿物组合和长石变形特征估算的温度值能够很好地吻合。并且,前人的研究也验证了该温度计的可靠性。因而,白云母-绿泥石地质温度计适用于低温糜棱岩温度测定。

致谢: 本文的电子探针测试工作得到了中国地质大学(武汉)刘慧芳老师和陆琦老师的帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献 (References):

[1] Dodson, M. H. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1973, 40:159~174.
 [2] Hoisch T D. A muscovite-biotite geothermometer[J]. *Am. Miner.* 1989, 74: 565~572.
 [3] Cathelineau M. Cation site occupancy in chlorites and illites as a

function of temperature[J]. *Clay Miner.* 1988, 23: 471~485.
 [4] Jowett E C. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer. GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting (Toronto, May 27~29, 1991) [J]. Program with Abstracts. 1991, 16, A62.
 [5] Котов Н В. Мусковит-хлоритовый палеотермометр [J]. Докл. АН СССР, Т. 1975, No3: 222~227.
 [6] Walshe J L. A six-component chlorite solid solution model and the conditions of chlorite formation in hydrothermal and geothermal systems[J]. *Econ. Geol.* 1986, 81: 681~703.
 [7] Essene E J. The current status of thermobarometry in metamorphic rocks[J]. *Am. Miner.* 1989, 74: 1~44.
 [8] 朱光, 宋传中, 王道轩, 等. 郟庐断裂带走滑时代的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学研究及其构造意义[J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, 31(3): 250~256.
 Zhu Guang, Song Chuazhong, Wang Daoxuan, et al. Studies on $^{40}Ar/^{39}Ar$ thermochronology of strike-slip time of the Tan-Lu fault zone and their tectonic implications[J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 44(11):1002~1009(in Chinese).
 [9] Simpson C. Deformation of granitic rocks across the brittle-ductile transition[J]. *Journal of Structural Geology*, 1985, 7: 503~511.
 [10] Tullis J, Yund R A. Diffusion creep in feldspar aggregates: experimental evidence[J]. *Journal of Structural Geology*. 1991, 13(9): 987~1000.
 [11] Passchier C W, Trouw R A J. *Microtectonics*[M]. Berlin: Springer, 1996, 40~41.
 [12] Thompson A B. Mineral reactions in pelitic schist: I. prediction of P-T-X(Fe-Mg) phase relations[J]. *American Journal of Science*. 1976, 276:401~424.
 [13] McDowell S D, Elders W A. Authigenic layer silicate minerals in borehole Elmore 1, Salton Sea geothermal field, California, USA [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1980, 74:293~310.
 [14] Cathelineau M, Nieva D. A chlorite solid solution geothermometer: the Los Azufres (Mexico) geothermal system [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1985, 91:235~244.
 [15] Hillier S, Velde B. Octahedral occupancy and the chemical composition of diagenetic (low-temperature) chlorites [J]. *Clay Miner.* 1991, 26: 149~168.
 [16] Caritat P D, Hutcheon I, Walshe J L. Chlorite geothermometry: a review[J]. *Clays and Clay Minerals*. 1993, 41(2):219~239.
 [17] 靳是琴, 李鸿超. 成因矿物学概论[M]. 长春: 吉林大学出版社, 1984.119~120.
 Jin Shiqin, Li Hongchao. *Conspectus of Genetic Mineralogy*[M]. Changchun: Jilin University Press, 1984. 119~120(in Chinese).
 [18] 刘永江, 叶慧文, 葛晓虹, 等. 阿尔金断裂变形岩激光微区 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄[J]. *科学通报*, 2000, 2101~2104.
 Liu Yongjiang, Ye Huiwen, Ge Xiaohong, et al. Laser probe $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of mica on the deformed rocks from Altyn Fault and its tectonic implications, western China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(4):322~325(in Chinese).

An attempt to apply three geothermometers in the interpretation of low-temperature mylonites in the southern segment of the Tanlu fault zone

WANG Yong-sheng, ZHU Guang, WANG Dao-xuan,
SONG Chuan-zhong, LIU Guo-sheng

(College of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: Owing to lack of formation temperature data of mylonites, such problems as the formation depth, metamorphic evolution, deformation mechanism, exhumation history of mylonites, relation with host rocks and explanation of isotopic age data are difficult to interpret correctly and reasonably. The muscovite-chlorite geothermometer, muscovite-biotite geothermometer and chlorite compositional geothermometer that are suited to the low-temperature conditions have only been used in the interpretation of regional metamorphism of sedimentary rocks and have never been used for mylonites of ductile shear zones. In this paper an attempt is first made to apply the above-mentioned three geothermometers in mylonite by using syn-tectonic neogenic muscovite, biotite and chlorite of mylonites in a ductile shear zone in the southern segment (Anhui segment) of the Tanlu fault zone. According to the neogenic mineral assemblages and deformation behaviors of feldspars, the deformation temperatures of the Tanlu fault zone range between 350°C and 450°C. The temperatures obtained using the muscovite-biotite geothermometer and chlorite compositional geothermometer range between 672°C and 1116 °C and between 470°C and 520 °C respectively, being higher than the deformation temperatures of mylonites in the ductile shear zone, which suggests that the two geothermometers are not applicable to calculation of the formation temperatures of low-temperature mylonite. The temperatures obtained using the muscovite-chlorite geothermometer coincide with the deformation temperatures of mylonites in the Tanlu ductile shear zone, which suggests that among the above-mentioned three geothermometers, only the muscovite-chlorite geothermometer is applicable to the measurements of the formation temperatures of low-temperature mylonites.

Key words: Tanlu fault zone; mylonite; muscovite-chlorite geothermometer; muscovite-biotite geothermometer; chlorite compositional geothermometer

About the first author: WANG Yong-sheng, male, born in 1977, doctor candidate, engages in the study of petrogenetic and metallogenetic dynamics; E-mail: yshw9007@sina.com.