维普资讯 http://www.cqvip.com

第13卷 第4期 西安地质学院学报 Vol.13 No.4
1991 年11月 JOURNAL OF XI'AN COLLEGE OF GEOLOGY Nov. 1991

实验标定的一种地质温压计及其应用

杨 家 喜
（西安地质学院地勘系）

提要 本文简略回顾了堇青石-石榴石-矽线石-石英地质温压计的研究历史，并介绍由Aranovich等人完成的最新实验研究。以内蒙古南部贺兰山群的麻粒岩相矽线石榴堇青片麻岩的温压计算为例，用Aranovich等人实验标定的温压计计算结果与石榴石-堇青石Fe-Mg交换反应温度计和石榴石-斜长石-矽线石-石英压力计的计算结果相当吻合；而应用含有假定的热力学参数的哈奇森的温压计与其它温压计计算结果有较大差别，温度明显偏低，与岩石形成于麻粒岩相变质条件这一地质事实不符。

关键词 地质温压计；变质岩石学；贺兰山群

堇青石-石榴石-矽线石-石英是高级泥质变质岩中常见的矿物组合，它还见于一些麻粒岩（堇青石麻粒岩）和热接触变质带中的角岩。这一矿物组合往往是岩石中实际矿物组合所包含的一个亚组合，而实际矿物组合的P-T稳定域不大于其任意一个亚组合的P-T稳定域。因此如果能利用这一矿物组合获得其温度压力值，也就确定了岩石形成的温度压力条件。早在1936年柯尔仁斯基就指出这一组合是一个潜在的温度压力指示计。后来Marakushev（1965）以定性的热力学分析方法指出堇青石-石榴石-矽线石-石英共生组合在FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2体系中是双变组合，铁镁矿物石榴石和堇青石的成分是由温度压力条件决定的。反过来，由实测的石榴石和堇青石的成分，应当可以确定温度压力条件。

对于一个平衡共生的矿物组合而言，意味着组合中所包含的所有矿物相及其端员矿物相组分之间可能存在的所有反应都达到平衡。人们使用了不同的方法来标定矿物反应的平衡条件，包括实验方法、经验方法和两者的混合方法。现代变质岩岩石学及有关地质问题的研究已开始利用合适的已标定的矿物反应作为温度压力计来获得岩石形成的温度压力条件。

从70年代初开始，为了建立一个适用的温度压力计，人们对堇青石-石榴石-矽线石-石英平衡作了大量实验和理论研究，其中心内容就是标定如下两个端员多相平衡反应：

$$① \quad \frac{1}{3}Mg_3Al_2Si_3O_{12}+\frac{2}{3}Al_2SiO_5+\frac{4}{5}SiO_2=\frac{1}{2}Mg_2Al_4Si_5O_{18}$$

$$② \quad \frac{1}{3}Fe_3Al_2Si_3O_{12}+\frac{2}{3}Al_2SiO_5+\frac{4}{5}SiO_2=\frac{1}{2}Fe_2Al_4Si_5O_{18}。$$

只要标定了这两个端员反应，则共生的石榴石、堇青石的成分就可以用于确定岩石形成的温

1990—11—15 收稿

作者简介：杨家喜，男，34岁，讲师，本文系处女作。（陕西·西安）

维普资讯 http://www.cqvip.com

度、压力条件。

居里（Currie，1971，1974）最早对堇青石-石榴石-矽线石-石英平衡作了实验研究，他发现共存的堇青石和石榴石之间Fe-Mg分配系数明显地与温度和压力呈函数关系，并试图标定反应①和反应②。但由于实验时反应时间短，居里未能在实验中再现在岩石中实测的堇青石-石榴石间的Fe-Mg分配系数。哈奇森等（Hutcheson et al.，1974）[3]最早具体应用了这一温压计，他们将反应①和反应②的平衡条件的热力学公式联立起来，代入在岩石中实测的堇青石和石榴石的成分参数，就可以求出温度压力值。在哈奇森的公式中，部分热力学数据取自于Froese（1973）和Robie（1967）的热力学数据表，部分为计算值，还有一些假定值。张儒瑗等（1983）[1]在《矿物温度计和矿物压力计》一书中收集了哈奇森的温压计。由于含有不确定的热力学参数，哈奇森的温压计不能得到广泛的接受。

继居里的实验研究之后，Henson和Green（1973）、Weisbrod（1973）、Henson（1977）、Holdaway和Lee(1977)、Newton和Wood(1979)、Martignole和Sisi（1981）、Lonker（1981）等人相继对堇青石-石榴石-矽线石-石英平衡作了实验和理论研究。这些研究的侧重方面有所不同，并且在以下几个方面发生了分歧而导致争论：(1)有关反应的 P-T 位置和斜率；（2）P_{H_2O}/P_{soliel} 的重要性；(3)堇青石中水含量对镁-堇青石和铁-堇青石活度的影响。争论逐渐深化了对这一平衡和有关矿物的热力学行为的认识，为后来Aranovich等人（Aranovich et al.，1983）[2]为建立一个适用的温压计而实验标定反应①和反应②奠定了基础。这些研究确认了一个重要事实，即反应①和反应②的平衡曲线具有明显不同的斜率，甚至有些研究者认为铁端员反应②具有负的斜率，在P-T空间中两条平衡曲线以足够大的角度相交。这个特点是联立两个反应的平衡条件的热力学公式而同时求解温度压力值所必须的。在实际应用于岩石学研究而求解温度压力值时，类质同象矿物（石榴石和堇青石）的成分是实测的，不可避免地含有测试误差。如果两条平衡曲线以很小的角度相交，则很小的测量误差就可能带来显著的温度压力值的计算误差。

Aranovich的实验标定

为了建立一个适用的温压计，Aranovich和Podlesskii（1983）[2]用天然和人工合成的矿物研究了堇青石-石榴石-矽线石-石英平衡。实验中流体相使用了纯H_2O和H_2O-CO_2混合物，实验结果表明至少在$CO_2/H_2O \leqslant 1$的条件下，H_2O-CO_2混合物流体相对平衡反应的影响与纯H_2O流体相的影响是一样的。根据在700～750 ℃、4～8×10^8 Pa条件下平衡的堇青石-石榴石-矽线石-石英组合的P-T-X数据，Aranovich等对反应①和反应②标定的平衡条件分别为：

$$RT\ln K_{Mg} - 1201 - 3.62T + 0.45213P = 0 \qquad (1)$$

$$RT\ln K_{Fe} + 4933 - 6.288T + 0.487P = 0 \qquad (2)$$

式中R——气体常数，其值为1.987；T——平衡温度；P——平衡压力。在应用这一温压计时，只要将平衡常数$K_{Mg} = X_{Mg}^{Cord}/X_{Mg}^{Gar}$ 和$K_{Fe} = X_{Fe}^{Cord}/X_{Fe}^{Gar}$（$X_{Mg}^{Cord}$ 和 X_{Fe}^{Cord} 为堇青石中镁端

维普资讯 http://www.cqvip.com

员和铁端员分子的摩尔分数，X_{Mg}^{Gar} 和 X_{Fe}^{Gar} 为石榴石镁端员和铁端员分子的摩尔分数）分别代入（1）和（2）式中，并联立求解，就可以求出温度和压力值。

堇青石和石榴石间的Fe-Mg交换反应为：

$$\frac{1}{3}Mg_3Al_2Si_3O_{12}+\frac{1}{2}Fe_2Al_4Si_5O_{18}=\frac{1}{3}Fe_3Al_2Si_3O_{12}+\frac{1}{2}Mg_2Al_4Si_5O_{18}。$$

Aranovich和Podlesskii在其实验中还同时标定上述反应的平衡条件为：

$$RT\ln K_D-6134+2.67T-0.03535P=0 \qquad (3)$$

其中平衡常数 $K_D=X_{Mg}^{Cord}/X_{Fe}^{Cord}\times X_{Fe}^{Gar}/X_{Mg}^{Gar}$。这一反应具有很小的 ΔV（体积变化）值，在 P-T 空间中其平衡曲线几乎直立，因此是一个很好的地质温度计。而且其适用范围较广，只要岩石中含有共生的石榴石和堇青石就行，不必要求岩石的矿物组合必须含有矽线石。将（3）式与别尔丘克等（Perchuk et al., 1983）[6]实验标定的石榴石-堇青石Fe-Mg交换反应地质温度计[（4）式]比较，两者是非常接近的。

$$t℃=\frac{3020+0.018P}{\ln k_D+1.287}-273 \qquad (4)$$

斯皮尔（F.S.Spear, 1989）在《确定变质作用 P-T-t 轨迹的岩石学方法》一文中提到Aranovich和Podlesskii的实验标定是堇青石-石榴石-矽线石-石英温压计的最新标定(Spear于1989年7月在华盛顿召开的28届国际地质大会期间举行的 P-T-t 轨迹短训班的讲稿）。在Aranovich等的工作之后，文献中仍然可以看到有关的文章，但研究内容没有涉及到对Aranovich和Podlesskii的标定的修正，而多偏重于以实测和实验的方式讨论堇青石晶格管道中流体相的成分和含量与温压条件的关系。Aranovich等在其实验和标定中考虑到了堇青石在矿物学特征上的这一特殊性，实验是在纯 H_2O 流体相和 H_2O-CO_2 混合物流体相中进行的，并且根据实验结果得出至少在 $CO_2/(H_2O+CO_2)\leqslant\frac{1}{2}$ 时 H_2O-CO_2 混合物流体相对平衡的影响与纯 H_2O 流体相对平衡的影响是一样的这一结论。另外，石榴石和堇青石间的Fe-Mg交换反应与流体相的成份无关，因此公式（3）或公式（4）的适用范围更广。

应用实例

Aranovich 等将其实验标定的温压计应用于计算Ivalojoki-Inarijarvi麻粒岩的变质温压条件，所得温度压力值与用其它地质温压计求得的数据相当吻合（Aranovich et al., 1983）。贺兰山群变质岩系中含有少量黑云紫苏麻粒岩和角闪紫苏麻粒岩，指示顶峰变质作用达到麻粒岩相的低温部分。按矿物的电子探针分析结果（表1）进行计算，得出端员矿物的摩尔分数和应用地质温压计计算的温度压力值(表2)。所使用的温压计分别为：①Aranovich的堇青石-石榴石-矽线石-石英温压计，即式(1)和式(2)联立求解；②Aranovich的石榴石-堇青石Fe-Mg]交换反应温度计，即式(3)和牛顿(Newton et al.,1981)[4]的石榴石-斜长石-矽线石-石英压力计联立求解；③别尔丘克(Perchuk et al., 1983)的石榴石-堇青石Fe-Mg交换反应温度计，即式(4)与牛顿的石榴石-斜长石-矽线石-石英压力计联立求解；④哈奇森(Hutcheson et al.,1974)的堇青石-石榴石-矽线石-石英温压计。在这四组温度压力值

维普资讯 http://www.cqvip.com

表 1 石榴石、堇青石和斜长石的电子探针分析数据

Table 1 Compositions of garnet, cordierite and plagioclase of a sillimanite-cordierite-garnet-two feldspar gneiss sample from the Helanshan Group, Souther Inner Mongolia(electron microprobe analyses)

矿物名称	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MgO	MnO	CaO	Na_2O	K_2O
石榴石	37.46	0.03	23.12	0.14	33.83	4.71	0.46	0.83	0.09	0.00
堇青石	46.46	0.03	36.36	0.05	9.05	7.39	0.06	0.00	0.20	0.00
斜长石	58.06	0.10	27.07	0.00	0.00	0.04	0.04	6.57	9.37	0.09

表 2 端员矿物的摩尔分数和计算的温度压力值

Table 2 Mole fractions of end members in garnet,Cordierite and plagioclase and calculated femperature and pressure values

石榴石	堇青石	斜长石	T℃	$P\times10^5$ Pa	温压计
$X_{Fe}=0.7743$	$X_{Fe}=0.4062$	$X_{An}=0.2780$	751	5791	①
$X_{Mg}=0.1909$	$X_{Mg}=0.5685$	$X_{Ab}=0.7176$	747	5102	②
$X_{Mn}=0.0104$	$X_{Mn}=0.0053$	$X_{Or}=0.0046$	744	5055	③
$X_{Ca}=0.0244$			643	4644	④

中，前三组数据相当吻合，温度值几乎完全一致，而压力值相差不足800×10^5Pa，表明Aranovich和Podlesskii实验标定的温压计是适用的。第四组数据与其它三组数据有显著差别，温度值与麻粒岩相变质条件不符，表明含有假定的热力学数据的哈奇森的温压计是不完善的。

参 考 文 献

1 张儒瑗，从柏林.矿物温度计和矿物压力计.北京：地质出版社，1983：189～192

2 Aranovich L Ya and Podlesskii K K. The cordierite—garnet—sillimanite—quartz equilibrium, experiments and application In S K Saxena, Ed., kinetics and Equilibrium in Mineral Reaction. Advances in Physical Geochemistry, 1983(3), 173～198

3 Hutcheson I, Froese E and Gordan T M. The assemblage quartz—sillimanite—garnet—cordierite as an indicator of metamorphic conditions in the Daly Bay complex. N.W.T., Contrib.Mineral. Petrol., 1974, 29～34, 44

4 Newton R C and Haselton H T. Thermodynamics of the garnet—plagioclase—Al_2SiO_5—quartz geobarometer. In R C Newton et al., Eds., Thermodynamics of Minerals and Melts, Springer—Verlag, New York, 1981, 13～47

5 Perchuk L L and Lavrent'eva I V. Experimental investigation of exchange equilibria in the system cordierite—garnet—biotite. In S K Saxena, Ed., Kinetics and Equilibrium in Mineral Reaction, Advances in physical Geochemistry, 1983(3), 199～239

维普资讯 http://www.cqvip.com

AN EXPERIMENT-CALIBRATED GEOTHERMOBAROMETER AND ITS APPLICATION

Yang Jiaxi
(*Xi'an College of Geology*)

Abstract This paper briefly reviews the study history of cordierite-garnet-sillimanite-quartz geothermobarometer, and then introduces an experimentai calibration by Aranovich et al. As an example of application to the sillimanite-garnet-cordierite gneiss of granulite facies from the Helanshan Group of southern Inner Mongolia, the estimate of Aranovichs geothermobarometer is consistent with that obtained by means of garnet-cordierite Fe-Mg exchange reaction geothermometer and garnet-plagioclase-sillimanite-quartz geobarometer. The estimate of the Hutchesons geothermometer, however, differs from others and thus is in contradiction to the metamorphic condition of granulite facies.

Key Words geothermometer, garnet-cordierite geothermometer, metamorphic petrology, Helanshan Group

敬告新老订户

西安地质学院学报1992年起交邮局发行

《西安地质学院学报》是以反映我院教学、科研成果为主的以地质科学为中心内容的综合性学术刊物，目前辟有基础地质与矿产地质、水文地质与工程地质、应用地球物理及大地测量与工程测量等栏目。

本刊为季刊，每期定价2.00元，全年8.00元，每季末月15日出版，由西安市邮局向国内总发行，全国各地邮局均可订阅，**国内邮发代号：52—98**；国外发行由中国国际图书贸易总公司（北京399信箱，**国外代号：Q4115**）或中国出版对外贸易总公司（北京782信箱）负责办理。如有临时需要本刊者，可直接向西安市雁塔路6号（710054）本刊编辑部联系订阅。

西安地质学院学报编辑部