

单矿物中熔体包裹体研究进展及地质指示意义

郭玲利¹, 魏俊浩¹, 周圣华²

(1. 中国地质大学资源学院, 武汉 430074; 2. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012)

[摘要] 熔体包裹体是矿物在生长过程中捕获的原始岩浆, 能有效的保留大量主矿物结晶和周围岩浆介质的物理化学信息, 是岩浆演化和成矿过程的良好指示剂。文章从熔体包裹体在主矿物中的赋存状态, 均一化试验和测试技术等方面总结了目前的研究进展, 并结合具体的矿床揭示熔体包裹体对岩浆和成矿方面的指示意义。同时笔者也建议, 将熔体包裹体信息和岩石学、地球化学、找矿学联系起来, 可以加深对岩浆演化过程的了解程度, 提高勘查找矿的效果。熔体包裹体作为一种较新的微区分析对象具有十分广阔的应用前景。

[关键词] 熔体包裹体 研究进展 岩浆演化 成矿过程

[中图分类号] P588.11; P611 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2009)01-0036-05

0 引言

熔体包裹体由被封存在矿物中的原始岩浆组成, 能有效的保存大量有关其主矿物形成时周围岩浆介质的物理化学信息, 是研究成矿作用和岩浆演化的原始样品^[1]。近年来随着测试技术的快速发展, 特别是激光剥蚀等离子体质谱仪的应用, 使得分析单矿物中熔体包裹体的化学成分成为可能^[2]。通过重熔后的熔体包裹体相对淬火的包裹体和基质玻璃化学元素的变化对比来研究导致这些变化的原因^[3,4], 推断岩浆结晶环境和熔体平衡条件。特别是熔体包裹体中金属元素的特征^[3,4]可反映矿床的形成环境和指示矿床的成因。

熔体包裹体的赋存状态、均一化研究和测试技术, 以及由此所揭示的岩浆演化过程和成矿作用, 是目前微区研究领域的重要课题, 也是国内外地学界近年来不断探索和完善的热点问题。为此, 本文重点总结了熔体包裹体的最新研究进展, 并对其在地质过程解释中的指示意义进行了评述, 以期该领域能在勘查找矿中引起重视。

1 熔体包裹体研究进展

1.1 赋存状态

熔体包裹体赋存的主矿物广泛, 主要是玄武质

安山岩中的长石和辉石^[5]、矽卡岩中的石榴子石^[6]、流纹岩中的石英^[4]、玄武岩中的橄榄石^[3]、安山岩中的闪石^[7], 少量异常包裹体见于铬铁矿^[8]中。

熔体包裹体的形态在矿物晶体生长的不同阶段往往表现出很大的变化。由于熔体的不可塑性, 主矿物留给的空间基本就是包裹体的形态, 赵劲松^[6]指出这一过程近似等容体系, 熔体包裹体的形态没有固定性, 多为多相包裹体, 以熔体相为主, 少见气相和液相。不同主矿物中的熔体包裹体赋存特点也不同, Halter 等^[7]发现辉石中熔体包裹体在火山岩中很常见, 但在侵入岩中极少出现; 长石中熔体包裹体一般沿晶体生长线分布, 而在石英中包裹体分布没有此规律, 各种形态都可见。

1.2 均一化研究

熔体包裹体均一化研究是测试分析前的重要步骤。目前利用的是高温显微均一法, 它是唯一能够使包裹体恢复到被捕获时的初始状态的试验方法。李霓等^[9]曾使用 Leitz1350 对长白山天池 3 期火山喷出岩中的熔体包裹体进行高温热台均一研究, 得出包裹体的大小、是否含子矿物、升温速率和升温次数等与其所测均一温度密切相关。在加热的过程中还要遵循一定的规则, 要考虑在加热过程中包裹体壁的重结晶, 在包裹体内玻璃未软化前加热温度增

[收稿日期] 2008-05-14; [修订日期] 2008-07-03。

[基金项目] 教育部博士点基金项目(编号: 20040491502)和长江学者创新团队发展计划共同资助。

[第一作者简介] 郭玲利(1984—), 女, 2007年毕业于中国地质大学(武汉), 获学士学位, 在读硕士生, 现主要从事矿床学和矿产勘查工作。

加较快,越到后期,加热速度越慢。夏林圻^[10]曾总结出酸性火山岩熔体包裹体均一化试验的总时间不应少于 8~12 小时,中性火山岩中熔体包裹体加热试验的总时间可控制在 4~8 小时,基性火山岩总时间应缩短至 2~4 小时,而超基性火山岩中应小于 2 小时。

均一后的包裹体才能进一步采用测试技术分析其初始成分并获得它的捕获温度。因此,选择熔体包裹体样品时是有一定要求的。夏林圻^[10]指出一定要选择没有泄漏,密封性好且挥发分不饱和的熔体包裹体。如果岩浆在捕获时已经饱和或过饱和挥发分,即此时岩浆中的挥发流体与岩浆呈一种不兼容的状态,这样的样品很难均一,即使均一了也没有直接的岩石学意义,不能代表主矿物的最低结晶温度

1.3 测试技术

熔体包裹体测试技术近年来得到了长足的发展。由第一代电子探针分析(EMP)到第二代离子微探针(SIMS)和质子诱导 X 射线(PIXE)等都为研究岩浆演化和追溯矿质来源提供了重要的技术支持。但这些方法在测试时有很多的限制条件:包裹体必须均一并且被抛光至样品表面且主矿物的化学组成简单。对于不饱和挥发分的硅酸盐包裹体均一是可能的,而对于硫化物熔体包裹体其均一温度很高并且很难淬火,这样就使得普通的微分析对它的成分测定有很大的挑战性^[7];同时样品抛光过程中会人为造成包裹体的破坏,主矿物组分简单又限制了样品分析的全面性。

激光剥蚀等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)的发明应用基本解决了熔体包裹体均一化的难题,其最大的优点是剥蚀深度可达 100 μm ,直径在 4~300 μm ,并避免了均一的先决条件,同时在加热过程中也不至于包裹体被烧爆,在抛光至样品表面时不会损失大量的包裹体。对各种仪器的参数对比罗彦等^[11]曾做过详细的报告。通过激光束可以分析包裹体中的主量、微量元素^[12],得出背景值、主矿物熔融值、主矿物和包裹体一起熔融、纯主矿物熔融值。除了熔体包裹体中的主量、微量元素研究,挥发分无论是溶解在岩浆中还是出熔相都有效的控制了岩浆的密度和粘度,它们可用以研究火山喷发前岩浆的初始状态特征。目前对熔体包裹体挥发分的测试方法主要有:电子探针、离子探针、傅立叶变换红外光谱、拉曼光谱等。各种测试仪器都有它的优缺点。其中电子探针是目前应用最为广泛的方法,它具有

极好的空间分辨率($\sim 1\mu\text{m}$)和易于分析、测试方便的优点。但它不能测出水的含量,对 Fe 也只能测定总铁含量。激光拉曼光谱能够测定包裹体总的气相及液相中的 SO_4^{2-} 、 HS^- 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 等离子含量,但对 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 F^- 等离子含量无法测定^[13]。在运用这些仪器测定挥发分的时候要根据具体的情况选择最为合适的方法。

2 熔体包裹体的地质指示意义

2.1 岩浆演化

熔体包裹体是岩浆结晶相最有代表性的样品,它们能够反映有关岩浆演化独一无二的控制条件^[14]。大量研究表明,岩浆的演化具有阶段性^[7],在上侵的过程中熔体与主矿物一般都是不平衡的^[3]。通过包裹体和主矿物的化学成分对比,显示熔体的成分并不单一^[7],同时特定子矿物的存在又可指示岩浆演化的环境^[15]。

Streck 等^[5]发现 Arenal volcano 玄武质安山岩的阶段性演化不仅仅是简单的后期捕获和熔体交换。通过对辉石中熔体包裹体和主矿物的成分测试发现有相同的低镁值趋势,暗示它们在捕获或者被捕获后经受成分的更改。另外的样品显示与主矿物低镁值平衡线相近。基质玻璃中的 MgO 、 $\text{Mg}^\#$ 值和 Al_2O_3 存在正的相关关系,说明在晚期逃逸的包裹体和周围的熔体发生了交换,而基质和熔体包裹体间低镁值的不同又显示主矿物的结晶是导致这些变化的主要原因。熔体包裹体、主矿物和基质玻璃间成分的相关关系显示岩浆演化是分阶段的。

熔体包裹体中的成分特点和主岩的不相同,表明熔体和主矿物间并未达到平衡。Rowe 等^[3]通过淬火后的普通包裹体的流体温度模拟岩浆的化学组成,得到研究区的熔体成分平衡系数很低并且高铁,而主岩中却缺乏这种高铁特征。磁铁矿的存在是导致这种变化的主要原因,同时它和橄榄石共存说明岩浆当时演化的环境为氧化环境^[15]。

岩浆在演化的过程中普遍存在不混容现象^[16]。Halter 等^[7]根据大量标本观察、全岩地球化学、同位素和地质年代学方面的数据反演了 Farallon Negro Volcanic Complex 火山岩浆演化的过程:从最早的 9.7Ma 火山侵入到 6.5Ma 的最后的次火山的侵位。观察各类型岩浆中熔体包裹体的主量元素和大部分微量元素对 SiO_2 做的线性图,发现富集在长英质岩浆和铁镁质岩浆的熔体包裹体的元素线性关系是相似的。暗示了富硅和贫硅的岩浆有二次混合,而不

是部分结晶导致的结果。

2.2 成矿演化

熔体包裹体形成于高压条件下并被包裹在相对不能压缩的斑晶中,因而可以保留在岩浆熔体结晶前各种元素的原始含量方面的信息。特别是其中赋存的金属元素的特点能够指示矿床的成因^[6]、矿质的来源^[17]、成矿温压及深度^[4,7,18]等信息。作为微区分析最直接的证据,熔体包裹体在成矿方面的指示意义已被更多的发掘。

接触交代型矿床的熔体包裹体出现的明显两相不混熔现象和矿床形成的物理化学条件是岩浆砂卡岩成因的直接证据^[6]。赵斌等^[19]对我国几个典型的砂卡岩矿床进行研究,发现大多数砂卡岩石榴子石中普遍存在熔体包裹体,并且均一温度变化范围大,在 380℃ ~ 1300℃ 温度范围内都可见到,说明砂卡岩中石榴子石是从砂卡岩岩浆缓慢结晶而成,进而矿床是岩浆砂卡岩成因。对于汽水热液矿床,熔体包裹体和早期岩浆汽水热液中的流体包裹体共存就是成矿元素出溶过程的反演^[20]。Yang 等^[21]曾对位于西太平洋 Manus 弧后盆地的 Pacmanus 汽水热液域进行研究,发现熔体包裹体在一定程度上记录了从岩浆分馏中释放的岩浆流体与各类型矿床特别是 VMS 型矿床的密切关系。熔体包裹体中矿质元素随岩石孔隙度和火山岩成分不同而变化(图 1)。

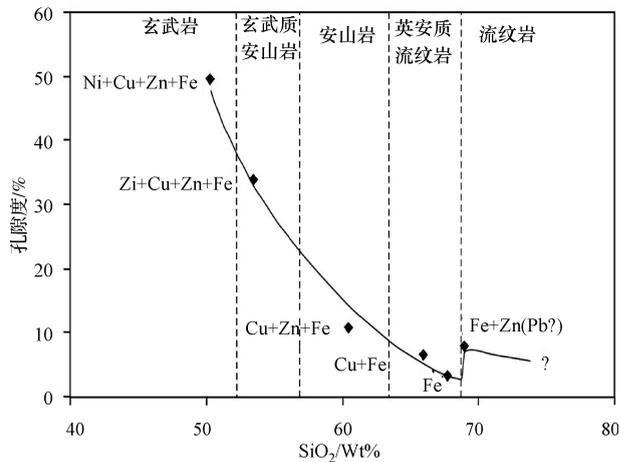


图 1 典型样品熔体包裹体中矿质元素沉淀随 SiO_2 和岩石孔隙度的变化关系图^[20]

另外,熔体包裹体本身的出现还能对成矿物质的来源提供参考依据。常海亮等^[22]经对西华山黑钨矿-石英脉绿柱石中熔融包裹体的成分研究发现,岩浆成矿热液并不是单一的,在岩浆分异的晚期富 SiO_2 的残余熔体也有产生黑钨矿-石英脉的可能

性。这种残余熔体是花岗质岩浆通过结晶分异作用形成的一种与水质流体不混容的残余熔体,富含 SiO_2 、 Al_2O_3 和挥发分,使岩浆和热液得以长期共存,在绿柱石、黄玉等矿物中产生与流体包裹体共存的熔体包裹体。韧性剪切带中熔体包裹体的存在打破了韧性剪切带型金矿流体性质为热液的传统观点。李兆麟等^[17,23]等在河台韧性剪切带、新疆乔尔山和粤西河台韧性剪切带矿床含金石英脉中首次发现了熔体包裹体,从而推断成矿流体为熔体溶液,金矿的形成过程曾经历过高温硅酸盐熔体的作用阶段,该熔体属熔体-溶液性质。

熔体包裹体中金属元素特征更能反映直接的成矿环境。尤其对于岩浆矿床,金属元素在深部是气态的^[4]。喷出地表的岩浆在向上运移的过程中会经历脱气作用而不会富集金属元素^[4]。因而对于岩浆型铜矿床应该在深部赋存,通过含水流体形成的压力环境,推测气体形成的深度,从而间接的估算金属元素的赋矿位置。常海亮^[22]在黑钨矿-石英脉中发现熔体包裹体和不混熔包裹体,根据两者的共存可以获得有关矿脉充填时的压力,为勘探找矿深度提供依据。另外,熔体结晶过程中压力的变化是结晶环境压力曲线上的一点,用激光拉曼等离子质谱仪能够根据包裹体中气体的含量和成分估算它被捕获时的压力,为熔体形成压力区间提供数据参考^[18]。

而对于接触交代型矿床,赵劲松等^[6]对长江中下游大冶到城门山一带的 18 个熔体包裹体进行研究,发现其主要成分接近辉石的硅酸盐相和石榴子石的碳酸盐相,由硅酸盐和碳酸盐两相的粘度等物理参数的不同还可以对矿床的空间分布做出预测。碳酸盐的粘度较小,和粘度相对较大的岩体接触时受比重的限制必然会影响接触面的构造特征,而中酸性岩浆的浅成-中浅成侵位深度在大的范围内限制了矿体的空间位置。

另外熔体包裹体在特殊主矿物中的出现在大的范围内可以限制矿床形成的物理化学环境。Halter 等^[7]曾对 Farallon Negro 火山岩中安山-英安质大量硅质和硫化物熔体包裹体进行研究,发现大部分闪石主矿物中的包裹体包含大量在岩浆混合过程中矿物结晶之前的铁镁质熔体,大部分的铁镁质熔体只在闪石中出现暗示了结晶环境不能超过闪石出现的温压和盐度的限制条件,即压力超过 350MPa,温度在 1000℃ 左右,水含量超过 6wt%。

3 结论及建议

成功的熔体包裹体研究必须基于包裹体在封闭后密封性好的前提,因此,对各种主矿物中赋存的包裹体进行仔细的显微观察和高温加热均一试验,选择可靠的包裹体样品是开展包裹体研究的基础。随着测试技术的快速发展,单矿物中熔体包裹体的成分测试已初有进展。因而,与主矿物和寄主岩石相比,它无疑是更好的有关岩浆演化和成矿演化的指示剂。

随着测试技术的逐步发展,熔体包裹体的应用将会越来越广泛,作为一种较新的地质分析对象,还存在许多值得探讨和改进的领域,具体如下:

1) 进一步提高熔体包裹体的测试精度。由于熔体包裹体成分的微区性和结构的复杂性,测试的检出限和灵敏度将会直接影响分析结果。特别是激光剥蚀的直径限制在 $4 \sim 300 \mu\text{m}^{[11]}$,熔体包裹体的镜下观测本身有一定的难度,再加上大小的制约使得分析的全面性和可操作性大打折扣。

2) 加大对中酸性岩浆演化的研究。目前国内外熔体包裹体分析主要集中在基性-超基性等深源岩浆的演化上。作为探讨岩浆演化最初始的证据,熔体包裹体的作用显而易见,因而备受地质学者的青睐。但演化后期的产物是整个岩浆演化过程中不可缺少的一部分。除了理论研究上全面性的要求外更是与当今矿业最为密切的岩浆类型,对其上侵过程中与周围介质的平衡性、物理化学环境等特征进行追溯,在一定程度上可为模拟岩浆侵位模式提供参考信息。

3) 加强熔体包裹体研究和成矿过程方面的结合。前人对熔体包裹体大都限于成分分析等地球化学方面的理论研究,对其实际的找矿应用较少。而熔体包裹体中所含的金属元素是矿床赋矿层位、成矿环境等的天然指示剂。已知矿床中熔体包裹体的均一温度、形态、成分等和周围岩浆介质的对比特点在一定程度上可以反映矿床的成因、矿质来源、成矿温压等信息。将这一微区找矿的证据和其它物化探异常、地质异常、成矿规律等结合起来,或许可以降低找矿预测的风险度。

可以预测,随着测试技术和理论知识的逐步完善,未来熔体包裹体研究将会与成矿作用探讨密切相连。

[参考文献]

[1] 卢焕章,李秉伦,沈昆,等.包裹体地球化学[M].北京:

地质出版社,1990,182-192.

- [2] Ulrich T. Applications of quantitative single fluid inclusion analysis using laser ablation ICP-MS[J]. Earth Science Frontiers(China university of geosciences, Beijing),2003,10(2):379-393.
- [3] Rowe M C, Nielsen R, Kent A J. Anomalously high Fe contents in rehomogenized olivine-hosted melt inclusions from oxidized magmas[J]. American Mineralogist, 2006,91:82-91.
- [4] Kamenetsky V S, Danyushevsky L D. Metals in quartz-hosted melt inclusions; Natural facts and experimental artifacts[J]. American Mineralogist, 2005,90:1674-1678.
- [5] Streck M J, Wacaster S. Plagioclase and pyroxene hosted melt inclusions in basaltic andesites of the current eruption of Arenal volcano, Costa Rica[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2006,157:236-253.
- [6] 赵劲松. 大冶-城门山矽卡岩矿床石榴子石和辉石中熔融包裹体成分研究[J]. 地球化学,2003,32(6):540-550.
- [7] Halter W E, Pettke T, Heinrich C A. Laserablation ICP-MS analysis of silicate and sulfide melt inclusions in an andesitic complex I: analytical approach and data evaluation[J]. Contrib Mineral Petrol, 2004,147:385-396.
- [8] Streck M J, Wacaster S. Plagioclase and pyroxene hosted melt inclusions in basaltic andesites of the current eruption of Arenal volcano, Costa Rica[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2006,157:236-253.
- [9] 李霓, Metrich N, 樊祺诚. 长白山天池火山全新世3期浮岩长石斑晶中熔体包裹体高温热台实验研究[J]. 地震地质, 2007,29(3):459-469.
- [10] 夏林圻. 岩浆岩中的熔体包裹体[J]. 地学前缘,2002,9(2):403-414.
- [11] 罗彦,胡圣虹,刘勇胜,等. 激光剥蚀等离子体质谱仪微区分析新进展[J]. 分析化学,2001,29(11):1345-1352.
- [12] Halter W E. Major to trace element analysis of melt inclusions by laser-ablation ICP-MS: methods of quantification[J]. Chemical Geology, 2002,183:63-86.
- [13] 李霓. 熔融包裹体及其挥发分研究概况及分析方法简[J]. 地球与环境,2004,32(3~4):14-20.
- [14] Spadler C, O'Neill H S, Kamenetsky V S. Survival times of anomalous melt inclusions from element diffusion in olivine and chromite[J]. Nature, 2007,447(17):303-306.
- [15] Sisson T W and Grove. Experimental investigations of the role of H₂O in calc-alkaline differentiation and subduction zone magmatism[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1993,113:143-166.
- [16] 李福春,朱金初,金章东. 熔融包裹体研究的最新进展[J]. 世界地质,2000,19(1):8-14.
- [17] 李兆麟,翟伟,李文,等. 河台韧性剪切带金矿床成矿物理化学条件研究及熔融包裹体的发现[J]. 岩石学报,2000,16(4):513-520.
- [18] 陈勇,周琪瑶,颜世永,等. 激光拉曼光谱技术在获取流体包裹体内压中的应用及讨论[J]. 地球学报,2006,27(1):69-73.
- [19] 赵斌,李院生,赵劲松. 岩浆成因矽卡岩的包裹体证据

- [J]. 地球化学, 1995, 24(2): 198-201.
- [20] Harris A C, Kamenetsky V S. Melt Inclusions in Veins: Linking Magmas and Porphyry Cu Deposits[J]. Science, 2003, 302(19): 2109-2111.
- [21] Yang K, Scott S D. Magmatic Degassing of Volatiles and Ore Metals into a Hydrothermal System on the Modern Sea Floor of the Eastern Manus Back-Arc Basin, Western Pacific[J]. Economic geology, 2002, 97: 1079-1110.
- [22] 常海亮, 汪雄武, 王晓地, 等. 西华山黑钨矿-石英脉绿柱石中熔融包裹体的成分[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(3): 260-268.
- [23] 李兆麟, 翟伟, 黄栋林, 等. 新疆乔尔山和粤西河台韧性剪切带金矿床中熔融包裹体的发现及矿床成因[J]. 矿床地质, 2001, 20(3): 208-215.

Research Progress and Geological Significance of Melt Inclusions in Single Minerals

GUO Ling-li¹, WEI Jun-hao¹, ZHOU Sheng-hua²

- (1. Faculty of earth resource, China University of Geosciences, Wuhan 430074;
2. China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012)

Abstract: Melt inclusions are the captured origin magma during the growing of minerals. It's the right indicator of magma evolution and mineralogical process which can reserve physical chemistry information about essential mineral growing and medium around mostly. This article summarizes the research progress through such aspects: the state melt inclusions in essential minerals, homogeneous experiment, testing technology and so on. Besides that, the indicating information of melt inclusions to magma and mineralizing is also revealed. At the same time, this paper suggests that contact the melt inclusions data with petrology, geochemistry, micro-EXPLORATION in order to improve the understanding degree and EXPLORATION technology. Melt inclusions as a new micro-analyzing object have quite abroad application foreground.

Key words: melt inclusions, research progress, magma evolution, mineralization process