

科学钻探——深化岩石学研究的金钥匙

张晓西¹ 杨经绥² 张 惠¹ 胡郁乐¹ 苏德辰²

(1. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 岩石学的研究对象是岩石, 但离开具体的岩石标本是无法进行岩石学研究的, 而要开展深入的岩石学研究, 仅仅依靠从地表获取的岩石样品是远远不够的, 还需要获得来自地球深处的岩石标本, 这就只能依靠钻探工程了。科学钻探可以为岩石学研究提供来自地球深部的岩石样品, 而开展对这些来自地球深处、携带大量信息的连续岩心进行系统研究, 必然会促进岩石学的发展。而岩石学研究成果又能够为钻探施工提供设计依据, 同时, 深入的岩石学研究对钻探工程提出的要求还能够促进钻探技术的发展。科学的进步离不开技术的支撑, 只有充分重视钻探工程才是真正重视地学研究、重视岩石学研究。

关键词: 科学钻探; 岩石学; 岩石可钻性; 钻探技术

中图分类号: P634 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000 - 3657(2013)03-0681-13

1 前 言

钻探工程是利用工程技术手段在地质体上钻凿向地心方向延伸孔洞的一个工程门类。岩石学是研究岩石的成分、结构构造、产状、分布、成因、演化历史及其与成矿作用之关系等的学科。前者的工作对象是各类地质体, 而地质体又是由不同类型的岩石构成的, 这些岩石的性质如何, 直接影响钻探工程的经济技术指标和工程技术目标的实现程度。岩石学的研究对象也是岩石, 离开具体的岩石标本是无法进行岩石学研究的, 而要开展深入的岩石学研究, 仅仅依靠从地表获取的岩石样品还是远远不够的, 还需要获得来自地球深处的岩石标本, 这就只能依靠钻探工程了。

如何根据岩石学研究成果多快好省地完成钻探工程, 为岩石学研究提供尽可能好的来自地球深处的岩石标本进而促进岩石学的发展, 就需要在开展科学钻探项目时地质学家与钻探工程师的紧密合作与相互支持, 这也是科学与技术相辅

相成的生动而又具体的体现。

2 科学钻探与岩石学研究的相关性

2.1 钻探工程的内涵

中国钻井技术是继火药、指南针、印刷术和造纸术之后, 中国科学技术史上的第五大发明。正是钻井技术的发明, 使得世界工业先进国家竞相大规模地勘探和开发利用石油、天然气成为现实, 引起了一场意义深远的世界能源结构大变革, 从而使人类社会进入了以石油、天然气为主要燃料的时代, 标志着一个崭新的工业时代的来临。

正如科学的目标在于“认识并揭示客观世界的本质和发展规律”而技术的目标和任务却是对“客观世界的控制、利用和改造”一样, 地质工作的目标是研究地球奥秘进而为国民经济建设和人类生存的可持续发展服务, 钻探工程则是千方百计地利用现代工程技术领域中的最新技术进步来为地学研究提供研究对象和各种判据, 即为地质工作服务。

收稿日期: 2013-04-03; 改回日期: 2013-04-24

基金项目: 深部探测 SinoProbe-05(201011064)项目资助。

作者简介: 张晓西, 男, 1957年生, 教授, 主要从事钻探新技术、新工艺、新方法的研究与钻探工程专业教学; E-mail: zxxcug@126.com。

钻探工程技术内涵由钻探工艺和钻探设备构成,而设备服务于工艺。

总之:地质是目的,工艺是方法,设备是手段。钻探工程在国民经济建设各个领域中都能得到应用,地质矿产勘探钻进;水文水井钻进;工程地质勘查、基础工程施工钻进;油气井钻进;爆破孔钻进(采矿、物探);科学钻探(海洋、湖泊、大陆、环境、冰川、外星);地热、干热岩钻采;水力采矿;核废料掩埋、二氧化碳掩埋等;地质灾害治理(边坡锚固、抗滑桩、止水帷幕等);非开挖铺管;文物考古钻探;竖井钻凿(矿山、地下核试验等);抢险救灾(地下灭火、通风孔等);……

虽然岩石学上利用火山岩携带的深源捕虏体,也可获取携带深部地质信息的实物标本,但通常人们还是认为取心钻进是人们获取地球深部实物资料的唯一方法与手段。岩心既能反映地层的矿物组成、化学成分,又能表征地层的空间结构、地质构造等。通过观察、分析、研究岩心,可全面地推断出岩心所在深度的原位状况。地球物理方法虽然也可用于获取地球内部信息,但由于地球物理方法检测的是一个物性参数的集合,其解释依赖于大量地层或岩石物理参数的标定,并且其所获各种基础信息的解释结果包含着大量的主观推测与判断,不能完全反映原位岩石的客观组成与存在,而且解释者不同,其解释结果可能截然不同,即通常所说的地球物理数据的多解性。

钻孔还可以为孔中物探提供测井通道,进而获取更为直接的各种地层地质信息,结合与所获岩心、岩样、流体等实物资料的分析对比,从而深化地学研究(图1)。

2.2 科学钻探的内涵

科学钻探是为满足地学研究的目的而实施的钻探工程,它是通过钻孔获取岩心、岩屑、岩层中的流体(气体和液体)以及进行地球物理测井和在钻孔中安放仪器进行长期观测,来获取地下岩层中的各种地质信息,进行地学研究。

只要是满足以上条件的钻探活动皆可称之为科学钻探,而不论其钻探的区域、钻孔的深浅和钻孔直径的大小。按照区域划分,可分为大洋科学钻探、大陆科学钻探、湖泊钻探、冰心钻探和外空钻探。科学钻孔的深度可浅至数毫米(美国火星钻探),深至数千米、甚至上万米,世界上最深的科学钻孔是深度为

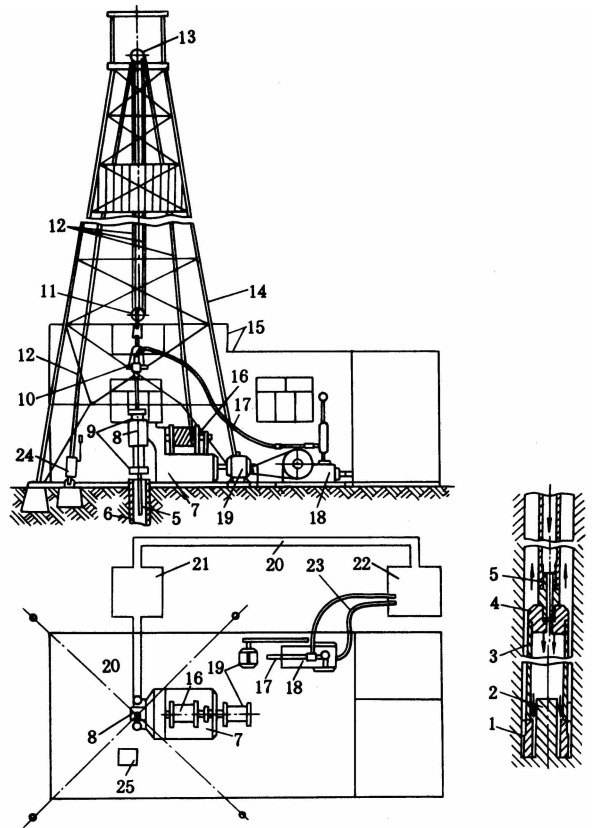


图1 常规岩心钻探示意图

- 1—钻头;2—岩心;3—岩心管;4—异径接头;5—钻杆柱;6—孔口(导向);7—钻机;8—回转器;9—卡;10—提引水龙头;11—游动滑车;12—钢丝绳;13—天车;14—塔腿;15—机房;16—升降机;17—高压软管;18—水泵;19—电动机;20—循环槽;21—沉淀池;22—吸水池;23—吸水管;24—指重表;25—立根台

Fig.1 Conventional core drilling schemes

- 1—Bit;2—Core;3—Core barrel;4—Reducing joint;5—Drill stem;6—Guiding;7—Rig;8—Rotary spindle;9—Chuck;10—Swivel;11—Traveling block;12—Wire rope;13—Crane;14—Tower leg;15—Service room;16—Hoist;17—High-pressure hose;18—Pump;19—Motor;20—Recirculating tank;21—Settling pond;22—Suck pool;23—Suck hose;24—Weight indicator;25—Standpipe plate

12262 m 的科拉超深钻(俄罗斯)。

众所周知,地球是一个物质极不均匀、结构极为复杂的地质体或自然系统。矿物是组成地球的“细胞”,而岩石则是矿物的聚合体。由于许多矿物与岩石的硬度都非常大,强度极高,再加上地质作用又极其复杂,所以很难对地球内部进行直观的观察与研究,导致在地球科学中的假说门类繁多,各种理论很难统一。

然而,科学思想与假说要上升为理论,必然需要通过实际的检验。但普通科学研究领域中的实验室仿真模拟研究等方法却因地球自身的特殊性而很难

实现,只能通过采取地学热点问题所关注的焦点地区的岩石样品而通过现有技术手段来进行观察、研究以搜寻相关证据,科学钻探就是在这种背景下应运而生的。

事实上,经过大洋钻探计划在全球各大洋上进行取心钻探,为地质学家们提供了大量来自地球深处、携带了大量原始信息的岩心样品,用直接证据验证了海底扩张和板块俯冲的模式,也因此证实了板块构造的预测,从而使全球板块构造学成为目前普遍公认的理论,也使得板块构造学说成为20世纪的重大科学成就之一。显然,尽管大陆漂移和海底扩张的假说早在100多年以前就已经有人提出,但是如果没有大洋科学钻探计划的资料和检验,还是不可能上升为板块构造学说的。

2.3 钻探技术人员应该了解岩石学基本知识

钻探的对象是岩石。在钻探生产过程中,不论是钻进、取心、防斜、纠斜,还是保护孔壁、维持冲洗液正常循环等,皆与地层有关,即与岩石有关。因此研究岩石的性质,研究岩石的矿物组成、结构构造、岩石形成条件和成岩后的变化以及外力场的作用,是非常必要的。目前钻探生产中主要采用机械方式破碎岩石,主要碎岩工具有各种超硬材料如硬质合金、金刚石复合片以及金刚石等制成的不同类型的钻头。

岩石结构构造的变化、岩石中矿物组成以及颗粒大小、矿物的自形程度、矿物颗粒间的相互关系、矿物结晶顺序等对岩石物性影响极大,而岩石物性是指导钻探施工的重要依据之一。岩石学包含的内容非常丰富,与钻探工程有关且钻探技术人员应该着重了解的相关岩石学知识,应该包括以下主要内容。

岩石的自然性质,是岩石在生成过程、构造变动和风化过程中自然形成的特性。

岩石的密度和孔隙度——岩石的密度和孔隙度取决于岩石的成因类型、物质成分和结构构造特征,同时也与岩石埋藏的深度有关。在一般情况下,岩石密度愈大,强度也愈大;孔隙度愈大,则岩石的强度愈小。

岩石的含水性及透水性——岩石的孔隙越大,裂隙越多,水对它的影响就越大。在孔隙度很小的岩石中,例如岩浆岩,用水浸透后,强度无明显降低。但在孔隙度很大的岩石中,例如石灰岩,用水浸透后,则强度明显下降。岩石的含水性及透水性在钻探过

程中无论是对钻孔稳定、钻进效率等都有很大影响。

对岩石的特性了解越充分,钻探技术中相关关键技术措施的采取才会更有针对性,而运用岩石学对不同类型岩石特性的分析结果,结合钻探工程的特点,为钻探工程在不同地层条件下科学施工制定合理经济技术指标定额标准的一个极其重要的参数就是岩石的可钻性级别。

岩石可钻性是表示钻进过程中岩石破碎的难易程度,岩石可钻性分级对钻探实际生产来说非常重要,它是合理选择钻进方法、钻头类型和结构、钻进规程参数的依据,也是制订钻探生产定额和编制钻探生产计划的依据。岩石可钻性是个多变量函数,其首先受岩石性质,特别是岩石力学性质的影响,也受技术条件(碎岩方式及其加载条件等)的影响。

既然岩石物性与钻探施工有着密不可分的关系,作为钻探工程师,在进行钻探工程施工设计时最希望了解的就是地层岩石的物性参数。而在形形色色的物理性质中我们则有选择性地研究那些直接或间接影响岩石破碎过程的物理性质,如粘结状态、孔隙度、密度、结构和构造等。岩石的力学性质是物理性质的延伸,它在外载作用下才表现出来,通常表现为岩石抵抗变形和破坏的能力,如强度、硬度、弹性、脆性、塑性和研磨性等。通常最需要了解的岩石物性指标是岩石的强度,因为强度是固态物质在外载(静或动载)作用下抵抗破坏的性能指标,而钻探的目的就是按照设计需要有效破坏岩石。影响岩石强度的因素基本上可分为自然因素和工艺因素两大类。

在实际钻进中,深部孔底的岩石在地层重量和液柱压力的作用下,处于多向应力状态。它的力学性质和地表作单轴试验时是很不相同的。为了合理地设计破碎岩石工具和制定钻进规程,必须研究多向压缩下的岩石性质。三轴应力试验是测定岩石在三向应力状态下的强度和变形的良好手段^[1]。

如果岩石学的研究成果能够根据地表研究结果推断岩石随深度增加而可能发生的变化,则钻探工程师就有可能制定尽可能优化的钻探工艺策略;研制最有针对性的碎岩工具、选择合适的钻井液体系、优选合理的钻进工艺规程参数、提前制定预防孔内事故的技术措施以及一旦发生孔内事故而依次采用的处理措施等。如果岩石学的相关研究成果对深部的预测结果足够准确,钻探工程施工的针对性

毫无疑问会更加接近优化钻进的目标。

3 科学钻探如何满足岩石学研究的需要和促进岩石学发展?

地球上的岩石是地球历史的忠实记录,而作为地质学的一个重要分支,岩石学是认识地球历史不可缺少的内容。通过研究岩石的成分、结构构造、产状、分布等以了解有关岩石的成因、形成年龄及其时空分布规律,可以对解决目前地质学界所关注的各种问题作出重大的贡献^[9]。

但无论是岩相学还是岩理学,都需要了解岩石的物质组成与物性特征。然而对于同一种岩石,虽然名称相同,物质组成与化学成分完全一致,但随着深度的不同,岩石物性会有较大的变化。对于钻探工作者来说,研究相同岩石不同埋深条件下的物性变化是为了制定合理的钻进工艺规程参数、设计制作高效碎岩工具、研发高性能钻井液体系等,目的是为了多快好省地钻达目的层。

例如,德国北部某油田的主要地层是一种砂岩,从上到下岩性没有大的变化,但随着深度增加,岩石的可钻性变差,机械钻速到 4500 m 深度之后只有上部 2000 m 以上孔深的五分之一,后根据地层岩石样品所进行的三轴压力实验证明了上覆地层压力对深部地层的压实压密作用导致岩石强度发生巨大变化的事实。实验表明,同是砂岩,随深度(围压)增加,其在受外载下的变形与破坏形态都发生了巨大变化,体现在岩石物性参数上就是强度大幅度提高,对于钻探工程来说,意味着碎岩难度加大,如不采取有效技术措施,钻探效率将大幅度下降。

对于地质学家来说,长期以来习惯于从地表露头采样进行岩石学研究,但露头的岩石根在哪里?如果要追根求源,随着深度的增加,从岩石学内涵看岩石的变化有哪些?变化的原因何在?变化的意义何在?这是一个很有趣的课题,是岩石学研究无法回避的根本问题:从表面走向深入。

毫无疑问,科学钻探项目的实施就是为地学研究建造深入地球内部的望远镜,而这个望远镜的服务领域是广阔的,岩石学研究理所当然应该成为重点之一。

为了研究地层深处的岩石,就应该获得尽可能保持地下原始状态的岩石样品,该项工作对钻探工程提出了很高的要求。要采取地下原状样品,就必须

研发保压取心工具,使所获得的深部岩心尽可能保持原始地层压力状态被采取至地表,并在一种保压状态下提交实验室进行快速分析研究,以尽可能多地获取岩石的各项原始参数,尽可能保持岩石的形成与形成时的地质环境特征。钻探工程要尽可能保持岩心品质以最大限度地保留岩石在地下深处携带并保留的微构造特征,为研究大陆动力学以及总结分析岩浆建造、变质建造和沉积建造的时空分布规律等提供研究线索。

到目前为止,ICDP 开展的近百项科学钻探项目的半数以上的研究目标中均涉及岩石学内容,而我国已经完成的中国大陆科学钻探工程项目研究大陆板块汇聚边界构造,岩石学的相关内容在研究中的地位更加突出。而研究陨石撞击、火山喷发与火山机制等科学钻探项目的科学目标的实现均需依靠对所采取岩心的岩石学研究。

3.1 中国大陆科学钻探工程岩心为变质岩石学研究提供研究依据

举世瞩目的中国大陆科学钻探工程科钻一井为地质学家们提供了数千米宝贵的岩心,通过对这些来自地下深处的岩心样品的深入研究,结合地球物理测井、录井等技术手段,地质学家们建立了数十条剖面。而这些岩心也对岩石学和地球动力过程的深入研究起到了极其重要的作用,仅 2005 年第 2 期的《岩石学报》就集中发表了地质学家们依据从科钻一井中获取的岩心深入研究而形成的近 30 篇有关论文。正是通过对这些岩心的研究,地质学家们找到了大陆地壳物质深循环的证据、发现了新型合金矿物、描绘了超高压变质作用的 P-T-t 轨迹、确定了不同深度地下岩石的应力状态,等等,而这一系列重要成果的获得均以科学钻探项目的实施与科钻一井所获取的大量岩心为前提和基础。例如,曾庆理等对中国大陆科学钻探(CCSZ)主孔中 318~380 m(a)、420~470 m(b)和 530~600 m(c)深度分布的三段高铁钛榴辉岩(图 2)进行了岩石磁学和岩相学研究,结果表明 a、b 两段样品代表了新鲜或轻度退变质榴辉岩的磁性特征,但就研究的代表性样品的磁性岩石学特征而言,b 段样品显示的退变质程度稍高于 a 段;c 段榴辉岩样品密度最大,主要为新鲜榴辉岩,氧逸度明显高于 a、b 两段样品,且存在大量出溶过程形成的以薄层结构为标志特征的赤铁矿-钛铁矿固溶体,可能是样品高天然剩磁的主要原因,而磁性变异

特征与某些地质过程之间具有很好的对应关系^[9]。显然,仅凭地表岩石采样是无法得到这一成果的,只有通过科学钻探获取的连续岩心样品,才有可能展开相关系列研究。

图 3 显示的是在科钻一井中获取的岩心在地表应力释放后片化的结果。这样的岩心对岩石学研究的重要性不言而喻。根据该岩心在地下的埋深,结合地表测试和井中物探,地质学家们会获取一系列与

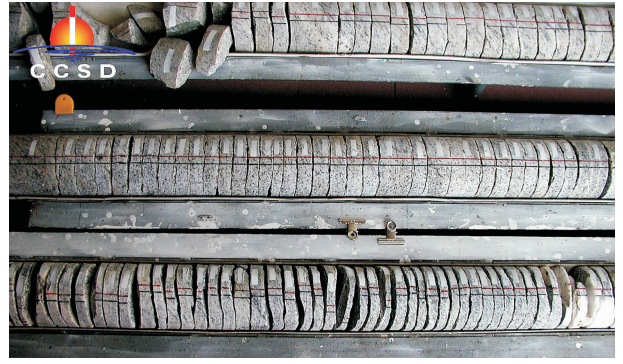
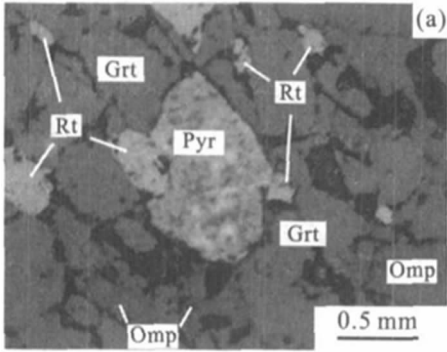
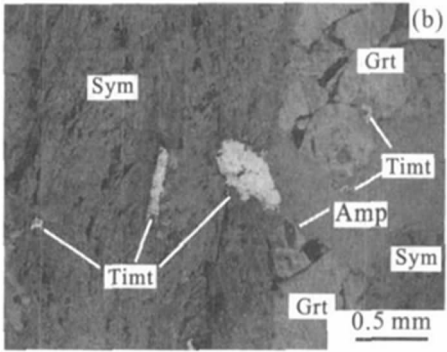


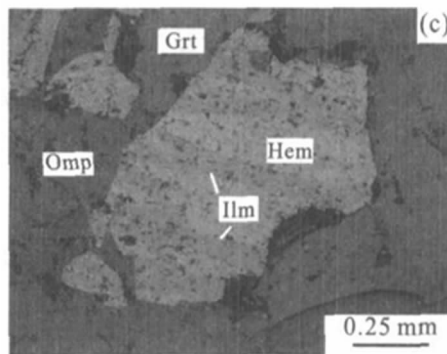
图 3 中国大陆科学钻探工程中获取的部分岩心严重片化
Fig.3 Cookies-shaped cores collected from CCSD-1 well



a. 45号样 (342.30 m)



b. 62号样 (463.97m)



c. 90号样 (587.00 m)

图 2 三段榴辉岩典型样品的光学显微照片(反射光)
矿物代号: Grt—石榴石;Hem—赤铁矿;Ilm—钛铁矿;
Omp—绿辉石;Pyr—黄铁矿; Rt—金红石; Sym—后成合晶;
Timt—钛磁铁矿; Amp—角闪石

Fig.2 Photomicrographs of representative samples from 3 subunits respectively

地表同类岩样大相径庭的研究结果。

钻探工程师根据不同钻探目的对采取样品的要求而研发不同的取心工具,以满足地质学家们对岩心需求的不同要求,常用的取心工具已达数十种之多。

3.2 科学钻探为陨石撞击地球提供直接证据

众所周知, 陨石撞击是地球岩石圈所经受的重要地质过程之一, 撞击的巨大能量在局部改变了被撞击部位的岩石圈结构。据称世界上已发现 176 个陨石撞击坑,但其中的三分之一掩埋在地表之下,只能依靠地球物理手段才能发现。而出露在地表的那些陨石坑也随着岁月的流逝, 撞击的痕迹也逐渐模糊,地质学家们迫切希望了解撞击过程、撞击环境的急剧变化及生态系统的恢复过程、撞击对海平面变化、气候及沉积环境的影响等。“国际陨石坑科学界对陨石坑判别的诊断性证据是被撞击靶岩发生的冲击变质结果,关键证据包括撞击形成的超高压矿物,矿物击变面状页理,矿物击变玻璃等。坑的形态和其他地质和地球化学特征通常作为陨石坑的附加判别依据”^[4]。

当然,在陨石撞击引起的高温超高压条件下,地表岩石中的常见造岩矿物石英有可能转变为高密度的柯石英。地球上第一个被确定的陨石撞击坑(巴林杰陨石坑)就主要归因于柯石英的发现^[4]。地球上大约 15%的陨石坑中已经找到撞击形成的柯石英。柯石英被国际科学界确定为地表陨石撞击构造的诊断性证据之一。但确定陨石坑即证明天体撞击地球的事实的确存在之后,如何重建撞击过程并判断由于撞击而造成的种种地质变化,则必须依靠来自陨石坑底部深部地下地层样品,而获取这些样品的唯一手段只能是钻探。

国际大陆科学钻探组织(ICDP)实施的有关陨石撞击的项目有:切萨皮克湾钻探(Chesapeake Bay Drilling Project); 希克苏鲁伯科学钻探(Chicxulub Scientific Drilling Project); 博苏姆推湖科学钻探(Lake Bosumtwi Drilling Project); 埃尔古古伊恩湖科学钻探(Lake El'gygytgyn Drilling Project)。

其中影响比较大的有墨西哥的尤卡坦(Chicxulub)科学钻探和俄罗斯的埃尔古古伊恩湖(Lake El'gygytgyn)科学钻探,两个项目所取得的成果极大地推进了地质学家们对天体撞击地球的认识。很显然,这些成果的获得是离不开通过科学钻探所获取的大量携带着丰富证据及其他信息的岩心的。

3.2.1 墨西哥尤卡坦陨石坑科学钻探(Chicxulub - Scientific Drilling Project)(图 4~6)

科学界普遍认为,6500 万年前,一颗巨大的陨石撞击了尤卡坦半岛,从而造成地球的一次巨大灾难,导致当时地球上包括恐龙在内的 2/3 的动物物种消亡^[9]。但事实到底如何,此次撞击是否发生过、何时发生、撞击的规模到底有多大等等,都是地质学家们关心的问题,也是解释地球生物演化进程不可或缺的一个重要方面。

地质学家们认为^[10]陨石撞击成坑过程可大致分为:压缩挤压、开掘成坑和成坑后的调整等三个阶段,当陨石撞击地球表面时,它所引起的瞬时(1 秒

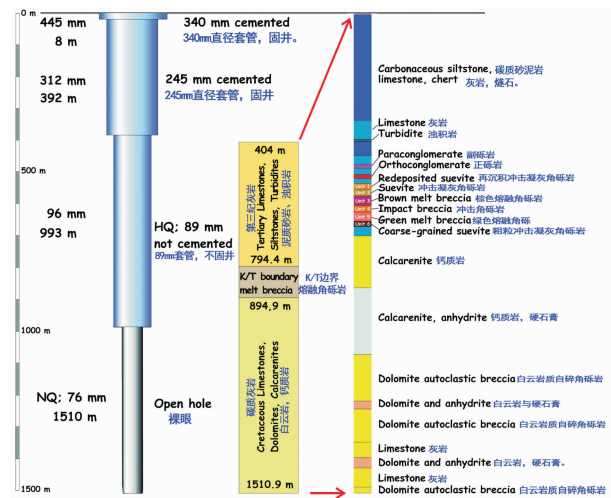


图 4 尤卡坦科学钻探 YAX-1 钻孔结构和最终获取的地质剖面

Fig.4 YAX-1 structure of Yucatan Scientific Drilling and the final lithological profile (after Lothar Wohlgenuth et al., 2004)

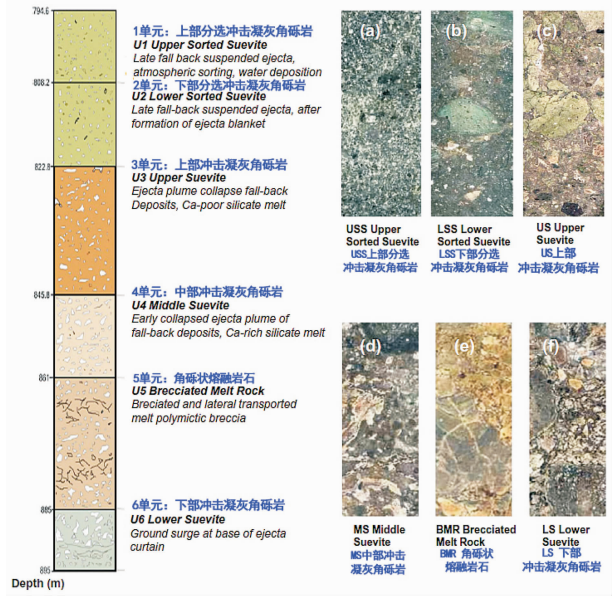


图 5 从尤卡坦科学钻探获取岩心中可以清晰地看到撞击所产生的碎屑和角砾^[8]

Fig.5 Debris and breccia produced by impacting clearly observed in cores collected from Yucatan scientific drilling (after Miriam Velasco-Villareal et al., 2011)

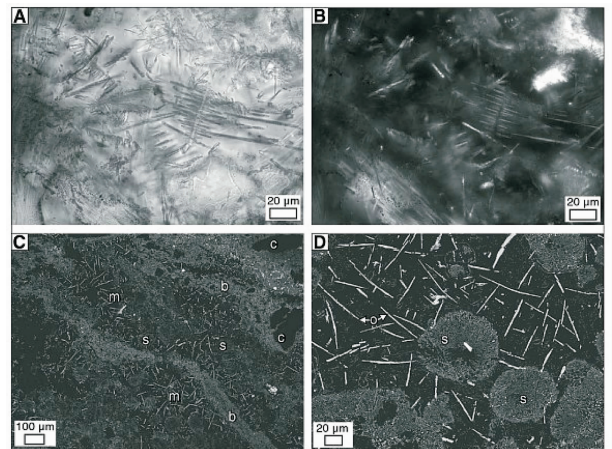


图 6 通过岩心,还可以清晰地观察到由于猛烈撞击而产生的熔融现象^[1]

Fig.6 Melting phenomenon by strong impacting clearly observed through the core collected from scientific drilling hole (after Lutz Hecht et al., 2004)

至 1 微秒)动态高压(数十至数百个 GPa)和高温(大于 1500℃),必然导致陨石撞击坑(astroblems)的生成并使周围岩石发生变质作用,这便是撞击变质作用(impact metamorphism)。

地质学家们希望通过科学钻探了解撞击发生后地壳熔化到何种程度;熔化的物质如何与天体物质融为一体;撞击时所产生的典型岩石的喷射和沉淀情况。但陨石撞击坑既经形成,首先要受到后期表生作用的侵蚀和破坏,然后就是后期构造作用的叠加和再造。陨石撞击坑后期改造过程包括:滑坡、侵蚀、充填还有火山作用和均衡调节等。所以时代较老、规模小的陨石撞击坑常常难以保存。显然只有钻探,才能拨开漫长岁月给陨石撞击这类重大事件所蒙上的迷雾,通过获取深埋地下的岩心所携带的各种证据来研究撞击对被撞击区域的地质环境所带来的变化,特别是岩石中所保留的角砾、熔融碎片等更是进行撞击作用还原的关键证据。该科学钻探从获取的连续岩心柱中获取了大量证据,其中 Yaxcopoil-1 号孔钻达 1511 m(2001 年至 2002 年),贯穿了 100 余米厚的冲击砾岩和冲击凝灰角砾岩,通过对所获岩心的大量系统分析研究,还原并验证了 6500 万年前的惊天撞击过程及其给地球带来的巨大变化^[7]。

3.2.2 埃尔古古伊恩湖科学钻探(El'gygytgyn Drilling -Project)

俄罗斯北极圈以北 100 km 处的埃尔古古伊恩湖(Lake El'gygytgyn)已被地质学家们证明是 360 万年前形成的一个碰撞陨坑。

虽然地质学家们根据地表地质调查工作已经通过所发现的柯石英等标志矿物确定了陨石撞击发生的事实,但深入研究这次撞击所产生的一些重大变化、重建撞击瞬间的动力学过程则必须在陨石坑中获取不同层位的岩石样品,通过分析、研究不同深度的岩石特性,从而量化判断撞击结果及其因此而对环境的影响程度。

埃尔古古伊恩科学钻探项目^[10]通过在陨石坑的

几个关键部位(坑边、坑边湖底、坑中心)进行不同深度的钻探取心,获取了携带着大量原始撞击信息的连续岩心,为地质学家们深入研究陨石撞击机制提供了重要实物资料。

该科学钻探项目在 2008 年秋季开钻,经过当年冬季和 2009 年春季的连续施工,于 2009 年 5 月完工,之所以在冬季施工,是借助于冬季结冰而在冰面上安装设备并进行钻探作业。湖中心的钻孔(图 7)穿过湖底 315 m 的沉积层,所获取的上部 110 m 岩心主要记录了 360 万年来的气候变化信息,这些岩心就是一部记录这 360 万年气候变迁的历史档案。后面的岩心则主要是为陨石撞击事件及陨石坑形成机制提供物证,及在岩心中发现只有强烈撞击瞬间的高温超高压才能形成的新矿物(图 8)以及由强烈冲击之后所形成的冲击角砾岩(图 9)、冲击凝灰角砾岩(图 10)等标志层。

图 9 岩心中部的那些泡沫状深灰色夹杂物是玻璃状熔岩,其表明一些岩石在撞击时受到过 2000°C 以上的高温。

显然,陨石撞击所产生的巨大冲击能量在形成陨石坑的同时还形成了标志性的冲击角砾岩,这些角砾岩中含有大量熔融的或部分熔融的玻璃质碎屑,而如果没有钻探工程从地下深处采取岩心,地质学家们将很难直接观察到相关证据,当然也就无法结合实物证据开展一系列深入的实验室测试分析等研究工作。

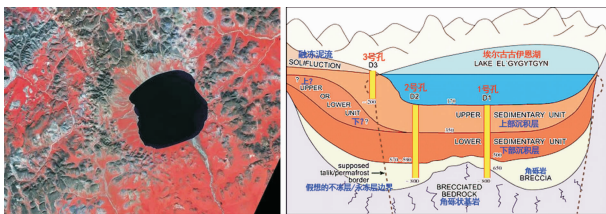


图 7 埃尔古古伊恩湖及科学钻探工程孔位设计 (Photo ©: C. Koeberl, Univ. Vienna)

Fig.7 Lake El'gygytgyn and scientific drilling position design (Photo ©: after C. Koeberl, Univ. Vienna)



图 8 研究岩心中的因猛烈撞击而形成的矿物有利于了解陨坑形成机制 (Photo ©: C. Koeberl, Univ. Vienna)

Fig.8 Studies of shocked minerals in the rocks which provide information for the mechanics of crater formation (Photo ©: after C. Koeberl, Univ. Vienna)



图 9 岩心携带的玻璃状熔岩证据(Photo ©: C. Koeberl, Univ. Vienna)

Fig.9 Evidence of melt-bearing impact breccia, also called a suevite (Photo ©: after C. Koeberl, Univ. Vienna)



图 10 冲击凝灰角砾岩(Photo ©: C. Koeberl, Univ. Vienna)

Fig.10 Suevite(Photo ©: after C. Koeberl, Univ. Vienna)

3.3 科学钻探能够深化火山岩与火山机制研究

火山运动与火山岩研究是地球科学中一个永恒的课题,但至今人们还不十分清楚地下岩浆的活动规律,通过对活火山的科学钻探可以通过原位的测量与取样,帮助人们了解岩浆在地壳中的物理和化学活动规律,探索地壳的结构和岩浆运移条件,帮助人们研究火山喷发规律,有效监测和预防火山喷发导致的灾害。

ICDP 将火山系统和热流机制作为主要研究内容的项目有 11 个,分别是:(1)意大利的 Campi Flegrei 火山口钻探 (Drilling at Campi Flegrei Caldera, Southern Italy, 尚未实施);(2)美国的夏威夷火山钻探项目 (Hawai'i Scientific Drilling Project);(3)冰岛深部钻探项目 (Iceland Deep Drilling Project, 第一阶段钻探已经完成);(4)美国夏威夷 Koolau 火

山钻探项目 (2000 年钻探);(5)法属留尼汪岛 Fournaise 火山深部地热钻探 (Deep Geothermal Drillings on Piton De La Fournaise Volcano, La Réunion);(6)美国的长谷火山钻探 (Volcanic Systems and Thermal Regimes, 1998 年钻探);(7)俄罗斯 Mutnovsky 火山科学钻探 (Mutnovsky Scientific Drilling Project);(8)芬兰 Outokumpu 深部钻探 (The Outokumpu Deep Drilling Project, 2004 年钻探);(9)美国蛇河科学钻探 (Snake River Scientific Drilling Project);(10)日本云仙火山钻探 (Unzen Scientific Drilling Project, 2003—2004 年钻探);(11)德国 KTB 科学钻探计划。

其中较为著名的是美国的夏威夷科学钻探项目和日本的云仙科学钻探项目。

3.3.1 夏威夷科学钻探项目 (Hawai'i Scientific Drilling Project)

夏威夷科学钻探项目是美国国家科学基金会资助强度最大的项目^[4],试图通过实施主孔深度为 15000 英尺 (4 198 m) 的钻孔,获取连续岩心,供多达 24 所大学及科研机构以及各国科学家进行全方位研究。除了研究火山机制之外,研究焦点还集中在 3 个方面:(1)火山灾害;(2)地球磁场变迁史;(3)火山群地下深部的地下水运动。

夏威夷科学钻探已经获得的科学结果表明,钻探可以系统获取岩浆演化过程、地幔结构、岩石圈动力学以及地下火山环境的热、成岩、水文和微生物演化方面的信息,科学钻探提供的这些信息对发展和验证地幔岩浆活动模型(图 11)至关重要。

图 12 是一个典型的针状角砾岩样品,手指所指处是粘土,其正常颜色应该是绿色的,但被上覆侵入岩浆的高温烘烤成白色,岩心深度为 11000 英尺 (约 3607 m)。

图 13 岩心,红色部分是充填在枕状角砾岩碎屑之间的粘土类材料,其原本为典型绿色或黑色的那种粘土,在高温作用下形成图中颜色。

图 14 照片显示岩心中含有丰富的橄榄石晶体。而地质学家们最为吃惊的是,岩心表明在如此深处 (>3700 m) 还含有大量玄武碎屑岩(图 15),彻底更新了地质学家们的固有观念,相关深入研究还在进行之中。

地质学家们在所获取的岩心中各取所需,在科学钻探所获取的岩心中已经采样 2423 个作为分析

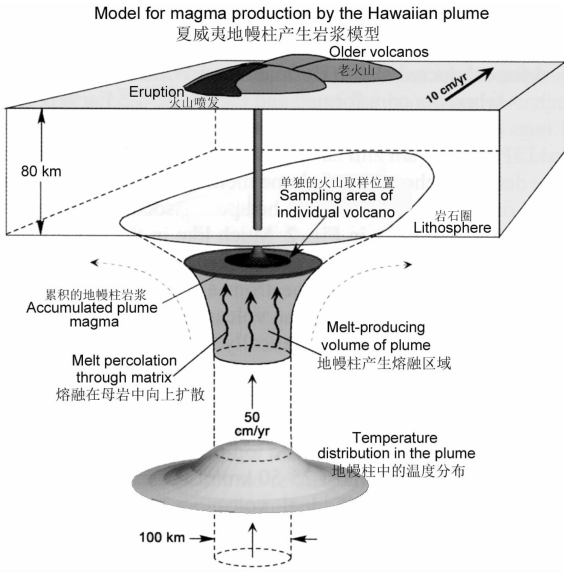


图 11 夏威夷地幔柱产生岩浆模型^[12]

Fig.11 Model for magma production by the Hawaiian plume (after Su DC, and Yang JS, 2010)

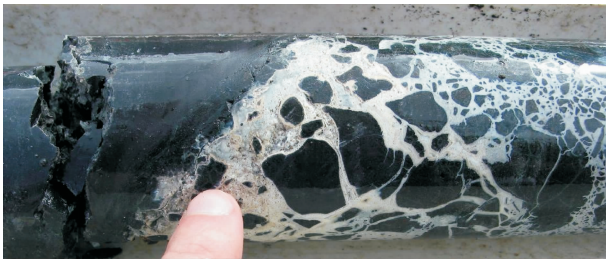


图 12 岩心中富含入侵的橄榄石和一个厚厚的枕状角砾岩 (Photo ©:ICDP)

Fig.12 Rocks recovered comprising an olivine-rich intrusion and a thick pillow breccia (Photo ©:after HSDP)

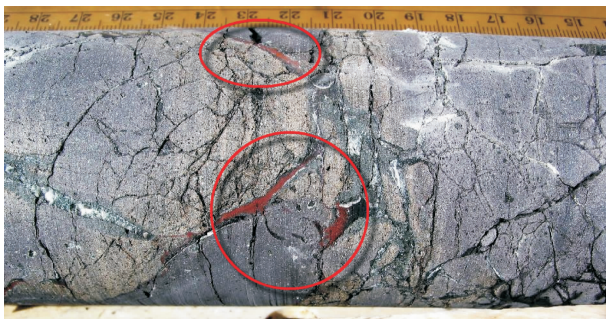


图 13 从岩心可以明确看到碎屑之间充填着红色脉体 (Photo©:ICDP)

Fig.13 Reddish material in the matrix between clasts of the core (Photo©:after HSDP)

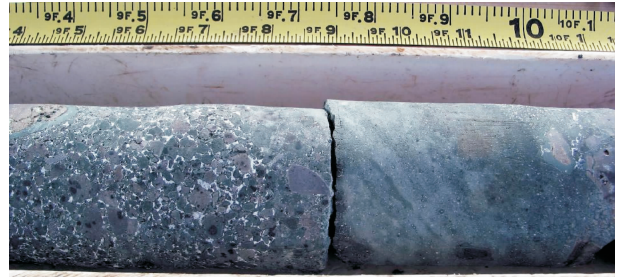


图 14 富含橄榄石的枕状熔岩 (11,508 英尺深,约 3773m) (Photo©:ICDP)

Fig.14 Olivine-rich pillow lava and pillow breccia (11,508', about 3773m) (Photo©:after HSDP)

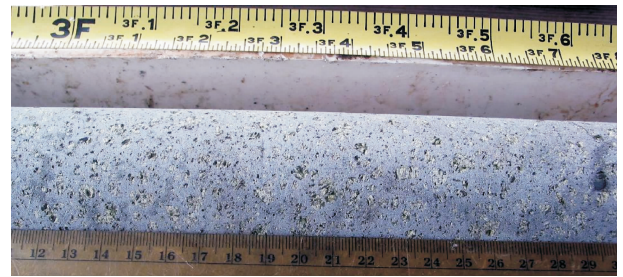


图 15 含大量玄武碎屑岩的岩心 (Photo©:ICDP)

Fig.15 Core including a lot of hyaloclastite (Photo©:HSDP)

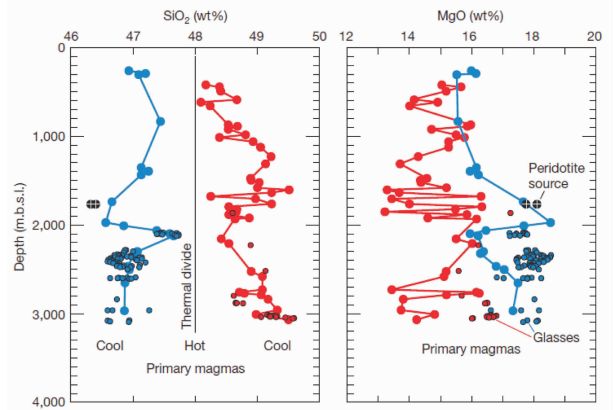


图 16 夏威夷科学钻探 2 号孔 (HSDP2) 全孔岩心辉石岩中 SiO₂ 和 MgO 含量的变化^[13]

Fig.16 Variations in SiO₂ and MgO content of pyroxenite primary magma compositions for glasses and whole rocks with depth in the HSDP2 drill core (after Claude Herzberg, 2006)

样品,分别进行了薄片、微探针、X 射线荧光(XRF) (图 16)、地球物理、地球化学等多种分析,这些研究工作得以深入进行并不断推出新的研究成果,应该

归功于科学钻探所获取的岩心样品。

3.3.2 日本云仙科学钻探 (Unzen Scientific Drilling -Project)

云仙火山位于日本九州岛 (32°46'11'' N,130°17'11'' E),距离长崎东部大约 40 km,是世界著名的活火山之一,是联合国减灾十年计划中的火山类自然灾害代表,因为云仙火山是一个非常危险的火山类型的典型代表。史载 1792 年曾经发生过大喷发,且喷发后 1 个月,这个火山群的一个“老成员”Mayuyama 火山斜坡倒塌,致使滑落的山体坠入海洋,引发海啸。塌方和海啸共造成超过 1.5 万人死亡,是日本历史上最为严重的火山灾难,该火山 1991 曾再次喷发。

ICDP 批准了日本地质学家提出的云仙火山科学钻探计划(USDP),钻探工作分两个阶段实施(图 17^[14]),第一阶段是在火山侧翼钻进 2 个钻孔(USDP-1 和-2),初步了解其基本地质构造以及实验测试必须经过高温考验的各种钻探工具和钻探材料,第二阶段则是直接钻入岩浆喷发管道(USDP-3 和-4)^[10]。地质学家们期望通过该项目,深入了解云仙火山的喷发与形成历史及其富含二氧化硅的粘稠岩浆的喷发机制,以便提高人类对火山、地震等地质灾害有效地监测和预报的能力。

该项目已经于 2004 年完成。项目通过 4 个科学钻探钻孔,获取了大量宝贵的岩心(图 18~21),使得地质学家们得以直接观察梦寐以求的来自火山通道不同位置的实物样品^[15-16]。

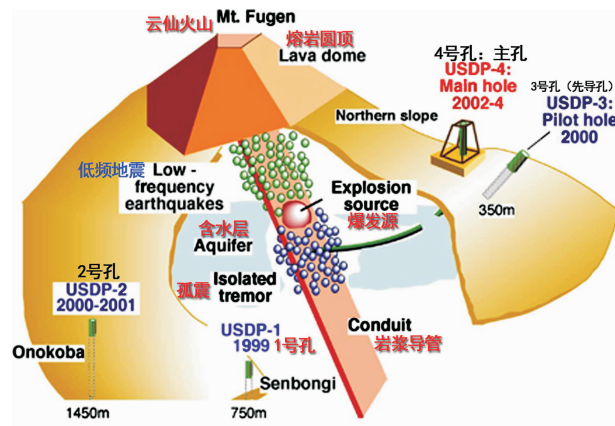


图 17 日本云仙科学钻探 (Setsuya Nakada and John Eichelberger, 2004)

Fig.17 Unzen Scientific Drilling Project(after Setsuya Nakada and John Eichelberger, 2004.)



图 18 USDP-4 孔 1753.3~1754.3 m 段岩心 (Setsuya Nakada, Kozo Uto, et al. 2005)

Fig.18 Cores of USDP-4 from the depth of 1753.3 m to 1754.3m(after Setsuya Nakada, Kozo Uto, et al., 2005)

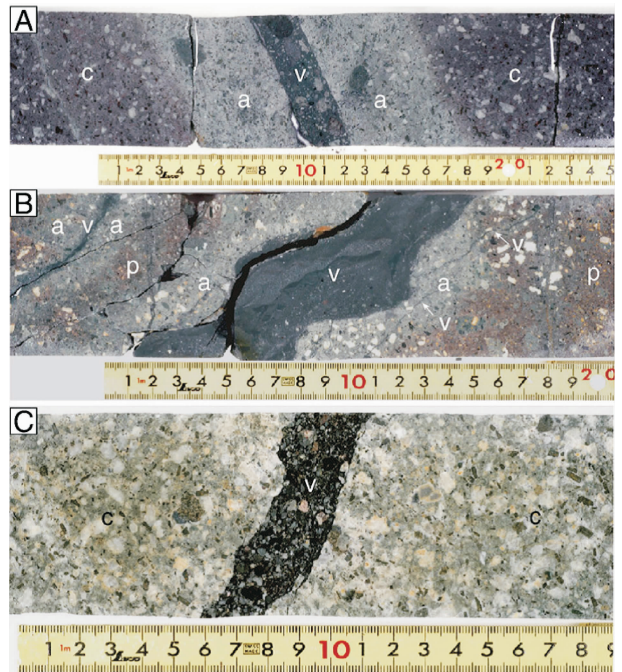


图 19 火山碎屑岩脉 (左侧是孔口方向) (Yoshihiko Goto, et al.2008)

A—锯开后的 C2 岩心; B—锯开后的 C11 岩心; C—锯开后的 C5 岩心; a: 浅绿色蚀变带; c: 安山碎屑岩; v: 暗绿色火山碎屑岩脉; p: 复矿碎屑火山角砾岩

Fig.19 Volcanic veins. Uphole on the left side. (after Yoshihiko Goto, et al.2008)

A—Sawn slab of C2 core. B—Sawn slab of C11 core. C—Sawn slab of C5 core; a: Pale green, altered zones, c: Large andesite clast, v: Dark green volcanoclastic vein, p: Polymict volcanic breccia

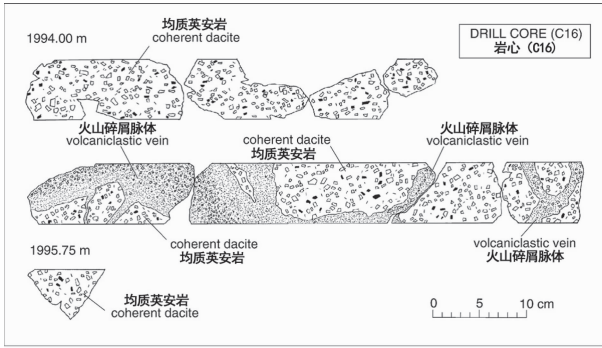


图 20 锯开 C16 岩心(1994.00~1995.75 m)后完成的素描 (Yoshihiko Goto et al., 2008)

Fig.20 Sketch of volcaniclastic veins in coherent dacite. Sawn slab of C16 core (1994.00–1995.75 m) (after Yoshihiko Goto et al., 2008)

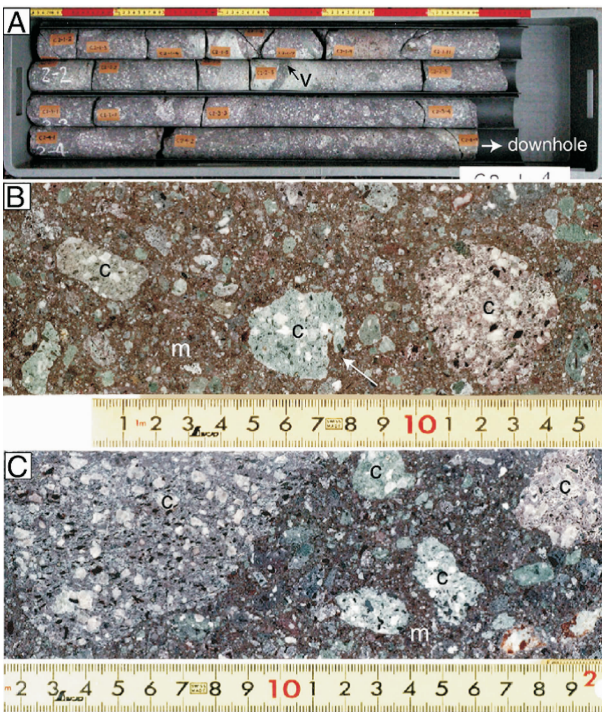


图 21 复矿碎屑火山角砾岩(左侧是孔口方向) (Yoshihiko Goto et al., 2008)

Fig.21 Polymict volcanic breccia facies. Uphole on the left side(after Yoshihiko Goto et al., 2008)

由于获取了深埋地下的岩心,才使得地质学家有机会直接观察、鉴定岩石的结构、构造、物质成分等细节,通过这些细节研究相关地质过程。

由于获取了深埋地下的岩心,才使得地质学家

有机会根据岩心做出反映岩石诸多构造特点的素描图像。

图 20 是锯开 C16 岩心(1994.00~1995.75 m)后完成的素描,从素描中可以清晰地看到火山碎屑岩脉在英安岩中,火山碎屑岩脉宽至 90 mm。岩脉最宽处部分显示了一个分级的内部形式,这种量化的分析研究,有利于达到多种地质研究目标。

由于有了岩心,地质学家才能根据岩心样品携带的种种信息来追踪其物理化学变化过程。例如地质学家们通过钻取的 C2 岩心(图 19),从岩心上可以看到火山碎屑岩脉(V)偶发在角砾岩中(A),通过锯开后的 C2 岩心平面(B),可以看出角砾岩由多种由安山岩、英安岩碎屑组成的碎屑岩(c),浅红棕色的细小安山岩、英安岩碎屑则形成细小脉体(m)。碎屑从暗绿色变成浅红棕色,而绿色则是因绿泥石和绢云母蚀变造成的。需要注意的是中间那些高度无序排列的暗绿色碎屑显示了局部流体轮廓(箭头所示),那些细小的浅红棕色碎屑含有赤铁矿,表明有氧化作用。通过锯开后的 C4 岩心(C),可以发现其与 C2 岩心的物质构成和结构形式相同。

由于有了岩心,地质学家们才有可能利用岩心

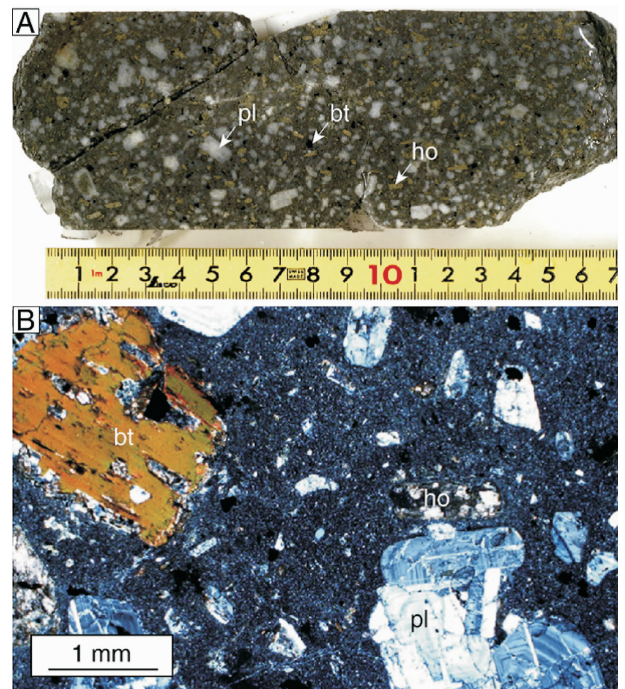


图 22 英安岩岩相显微照片 (Yoshihiko Goto, et al.2008)
Fig.22 Coherent dacite facies(after Yoshihiko Goto et al., 2008)

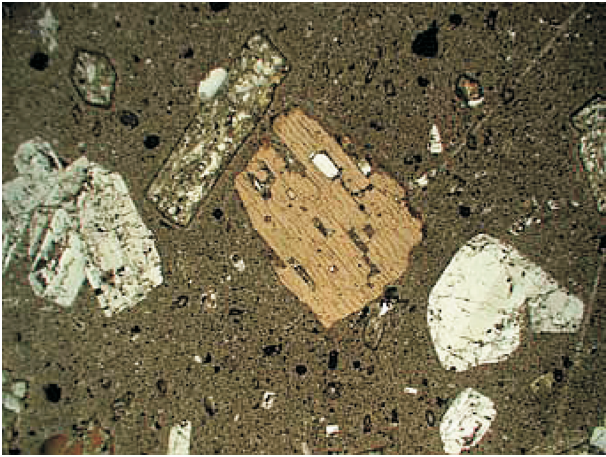


图 23 火山岩浆导管熔岩岩样的显微照片显示了热液蚀变结果 (Setsuya Nakada, Kozo Uto, et al. 2005)

Fig.23 Microphotograph of conduit lava, showing hydrothermal alteration (after Setsuya Nakada, Kozo Uto et al., 2005)

制成的薄片(图 22)对目标岩石进行微观研究,从而从中发现导致岩石特性发生变化的内在原因与相关机制。

显微照片(图 23)表明样品基质是隐(脱玻化)和角闪石(左上)被替换为绿泥石、碳酸盐和金红石型的组合,与新鲜的黑云母晶体(中心)形成对比(图片所示可视范围约 2 mm 宽)。

显然,如果没有科学钻探获取关键部位地下深处岩心样品,地质学家们将无法通过直接观察物证而开展有针对性的深入研究,对一些重要地质现象的解释也将因缺乏重要证据而无法得到正确结论。

毫无疑问,随着中国科学钻探项目的不断开展,越来越多的来自不同地区、不同地下、不同深度的岩心会进入地质学家们的实验室,这些携带了大量有待解读的地球奥秘信息的岩心必然会促进地学研究各个领域的发展,岩石学同样会因此而得到快速发展。

4 结 论

(1) 岩石学的深入研究需要来自地下深处的实物样品,科学钻探可以为岩石学研究提供来自地球深部的岩石样品从而促进岩石学的发展;

(2) 钻探技术是服务于地学要求的工程技术,而地学研究对采取地层深处样品的需求能够促进钻探技术的发展;

(3) 岩石学研究中有岩物性等成果能

够为钻探施工提供设计依据;

(4) 科学的进步离不开技术的支撑,地球科学领域也是如此,只有充分重视钻探工程才是真正重视地学研究,只要合理应用钻探技术,就必然能通过钻探获取的岩心深化地学研究。

致谢:文中部分图片(已注明)引自公益性国际大陆科学钻探组织网站(<http://www.icdp-online.org/>)面向全球公众发布的相关科学钻探项目进展情况的每日新闻(daily news),并已获得使用授权,这些科学钻探项目分别是:希克苏鲁伯科学钻探 CSDP (Chicxulub Scientific Drilling Project), 埃尔古古伊恩湖科学钻探 EDP (Lake El'gygytgyn Drilling Project), 夏威夷火山钻探项目 HSDP (Hawai'i Scientific Drilling Project), 云仙火山钻探 USDP (Unzen Scientific Drilling Project), 特此鸣谢!

参考文献 (References):

- [1] 汤凤林, A.Г.加里宁, 段隆臣. 岩心钻探学[M]. 第二版. 武汉:中国地质大学出版社, 2009.
Tang Fenglin, A. G. Калинин, Duan Longchen, Core Drilling (second edition) [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2009, (in Chinese).
- [2] 路凤香, 桑隆康, 邹金华, 等. 岩石学[M]. 北京:地质出版社, 2002.
Lu Fengxiang, Sang Longkang, Wu Jinhua, et al. Petrology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002(in Chinese).
- [3] 曾庆理, 刘庆生, 邱宁. 中国大陆科学钻探主孔高铁钛榴辉岩的磁性岩石学 [J]. 地球科学——中国地质大学学报. 2009, 34(6): 993-998.
Zeng Qingli, Liu Qiongheng, QIU Ning. Magnetic petrology of the high Fe-Ti eclogite from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) main hole [J]. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 2009, 34 (6): 993-999 (in Chinese with English abstract).
- [4] Chen Ming, Xiao Wansheng, Xie Xiande, et al, Xiuyan crater, China: Impact origin confirmed [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55: 1777-1781.
- [5] <http://www.cnki.com>.
- [6] 游振东, 刘嵘. 陨石撞击构造作用的研究现状与前景 [J]. 地质力学学报, 2008, 14(1): 23-36.
You Zhendong, Liu Rong. Metamorphic collisional mélange in the Dabie Mountains, eastern China [J]. Journal of Geomechanics, 2008, 14(1): 23-36 (in Chinese with English abstract).
- [7] Lothar Wohlgemuth, Eckhard Bintakies, Jochem KüCK, et al. Integrated deep drilling, coring, downhole logging, and data management in the Chicxulub Scientific Drilling Project (CSDP), Mexico [J]. Meteoritics & Planetary Science, 2004, 39, (6): 791-797.
- [8] Miriam Velasco -Villareal, Jaime Urrutia -Fucugauchi, Mario

- Rebolledo-Vieyra, et al, Paleomagnetism of impact breccias from the Chicxulub crater—Implications for ejecta emplacement and hydrothermal processes, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2011, 186: 154–171.
- [9] Lutz Hecht, Axel Wittmann, Ralf –Thomas Schmitt, et al, *Meteoritics & Planetary Science*, 2004, 39(7):1169–1186.
- [10] http://www.geo.umass.edu/lake_e/index.html <http://www.geologie.uni-koeln.de/elgygytgyn.html>.
- [11] <http://www.gps.caltech.edu/MagLab/>.
- [12] 苏德辰, 杨经绥. 国际大陆科学钻探(ICDP)进展[J]. 地质学报, 2010, 84(6):877–882.
- Su Dechen, Yang Jingsui. *Advances of International Continental Scientific Drilling Program* [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(6): 873–885(in Chinese with English abstract).
- [13] Claude Herzberg. Petrology and thermal structure of the Hawaiian plume from Mauna Kea volcano [J]. *Nature*, 2006, 444,doi: 10.1038/nature05254.
- [14] Setsuya Nakada, John Eichelberger, Looking Into a Volcano: Drilling Unzen[J]. *Geotimes*, 2004, 49(3):14–17.
- [15] Setsuya Nakada, Kozo Uto, Sumio Sakuma, John C. Eichelberger and Hiroshi Shimizu, Scientific Results of Conduit Drilling in the Unzen Scientific Drilling Project (USDP) [J]. *Scientific Drilling*, 1: 18–22. doi:10.2204/iodp.sd.1.03.2005.
- [16] Yoshihiko Goto, Setsuya Nakada, Masaru Kurokawa, et al. Character and origin of lithofacies in the conduit of Unzen volcano, Japan [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008, 175: 45–59.

Scientific drilling—the golden key to in-depth petrologic study

ZHANG Xiao-xi¹, YANG Jing-sui², ZHANG Hui¹, HU Yu-le¹, SU De-chen²

(1. *China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China*; 2. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*)

Abstract: Rock is the research object of petrology; nevertheless, if specific rock samples are not sufficient, petrologic research is impossible. In the in-depth study of the petrology, the mere dependence on rock samples obtained from the surface is not enough. The rock samples collected from deep earth are necessary, and the acquisition of such samples can only rely on drilling engineering. Scientific drilling can obtain the rock samples from deep earth, and researches can be carried out on the cores which carry a lot of information concerning the deep earth, and this will surely promote the development of petrology. At the same time, the research results of petrology can provide the basis for the design of drilling engineering. In addition, the in-depth study of the petrology can promote the development of the drilling technology due to its special requirement for drilling cores. Without technical support, the progress of science is impossible. Only by paying full attention to drilling engineering can importance be truly attached to geological study and to the research on petrology.

Key words: scientific drilling; petrology; rock drillability; drilling technology

About the first author: ZHANG Xiao-xi, male, born in 1957, bachelor, professor, mainly engages in the study and teaching of drilling engineering, E-mail: zxxcug@126.com.