

岫岩陨石撞击坑的证实

陈鸣, 肖万生, 谢先德, 谭大勇, 曹裕波

中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

E-mail: mchen@gig.ac.cn

2009-09-03 收稿, 2009-10-22 接受

中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-YW-140)、国家自然科学基金(批准号: 40872041)和中国科学院院长特别基金资助

摘要 保存完好 1.8 km 直径的岫岩陨石坑位于我国辽东半岛北部低山丘陵地区. 最近, 在该坑中心位置实施了科学钻探, 钻孔深度为 307 m. 钻孔揭露了坑内上部 107 m 厚的湖泊相沉积物, 以及下部厚度为 188 m 的角砾岩堆积透镜体. 坑内填充的角砾岩是不同程度冲击变质岩石的混合堆积物. 所揭示的坑内地质和地层结构、坑唇基岩和坑内填充角砾岩中石英击变面状页理、以及冲击熔融岩石等特征, 证实了该坑的陨石撞击起源.

关键词

岫岩陨石坑
冲击变质
角砾岩
击变面状页理
玻璃

岫岩陨石坑位于我国辽宁省鞍山市岫岩满族自治县, 距离县城东北方向直线 16 km. 该坑坐落在辽东半岛北部低山丘陵地区(图 1(a)), 地理坐标为 40°21'55"N, 123°27'34"E. 陨石坑按形态分类为简单碗形坑(图 1(b)). 自从 20 世纪 90 年代以来, 该坑的成因引起了我国科技人员的关注. 在排除了火山口成因后, 覃功炯等^[1]和赵树明^[2]首先提出该坑可能为陨石撞击起源. 陈鸣^[3]2007 年对该坑开展了岩石和矿物冲击变质的初步调查, 在靠近坑唇的变形基岩中发现了含“击变面状页理”(planar deformation features, 即PDFs)的石英颗粒, 这个发现为该坑的成因研究提供重要线索.

撞击靶岩和矿物的冲击变质特征是判别一个撞击构造成因的关键证据^[4~9]. 矿物的特殊变形和相变特征, 包括石英击变面状页理、矿物击变玻璃和冲击引起的高压多形转变等, 被普遍接受为冲击变质和陨石撞击坑的诊断性证据^[4,5]. 此外, 地质钻探是陨石坑研究的一个重要技术途径, 钻孔岩芯不仅提供坑内地质和地层结构资料, 而且为岩石矿物冲击变质研究提供关键的样品. 为了查明岫岩陨石坑的起源, 我们于 2009 年在该坑实施了科学钻探.

1 陨石坑地质概况和科学钻探

岫岩陨石坑(图 2(a))形成在下元古界辽河群里尔峪组变质岩系中, 该岩系由浅粒岩、角闪岩、大理岩、片麻岩和变质玄武岩等组成^[1]. 陨石坑平面形状近似五边形, 直径约为 1800 m(图 2(b)). 现在的坑底到坑唇山峰最大高程差约为 200 m. 陨石坑形态保存良好. 坑唇顶部和两侧山坡普遍被厚度达数米的风化土壤、残积和坡积物覆盖, 局部有零星基岩(主要为浅粒岩)出露. 坑底被第四系湖泊相沉积覆盖.

我们在陨石坑坑内底部中心点布置了一个钻孔, 开孔直径 130 mm, 终孔直径 90 mm. 在穿越 107 m 厚的湖泊相沉积物后, 钻孔进入由岩石碎屑或石块组成的角砾岩层(图 3), 岩石角砾最大块体直径达 30 cm. 角砾岩层在坑内构成一个厚达 188 m 的角砾岩透镜体. 图 4 是根据钻孔地层资料描绘的陨石坑剖面结构示意图.

钻孔岩芯表明, 在陨石坑底部 107~149 m 深度区间, 角砾岩主要由浅粒岩、片麻岩、角闪岩和少量玄武岩及大理岩碎块组成, 这些岩块大部分未发生冲击变质或仅经受微弱程度的冲击变质. 另外, 在这个深度区间收集到了少量含有岩石熔体玻璃的多相角砾岩(poly-

mict breccia), 这类角砾岩由浅粒岩、片麻岩、角闪岩、玄武岩和大理岩碎屑, 岩石熔体玻璃碎片, 以及细粒基质等组成(图 5(a)). 这些含熔体多相角砾岩由弱冲击变质和强烈冲击变质岩石混合碎屑组成. 钻孔在 127~133 m 深度区间遇到含有粗粒岩屑的砂层. 钻孔 149~204 m

深度区间主要由灰黑色角闪岩碎屑组成, 碎屑最大直径约为 10 cm, 这些角闪岩角砾未发生明显的冲击变质. 钻孔 204~260 m 深度区间由弱冲击变质浅粒岩、片麻岩和少量角闪岩混合碎屑组成. 钻孔 260~295 m 深度区间含大量的石质角砾岩(lithic breccia)和含熔体多相

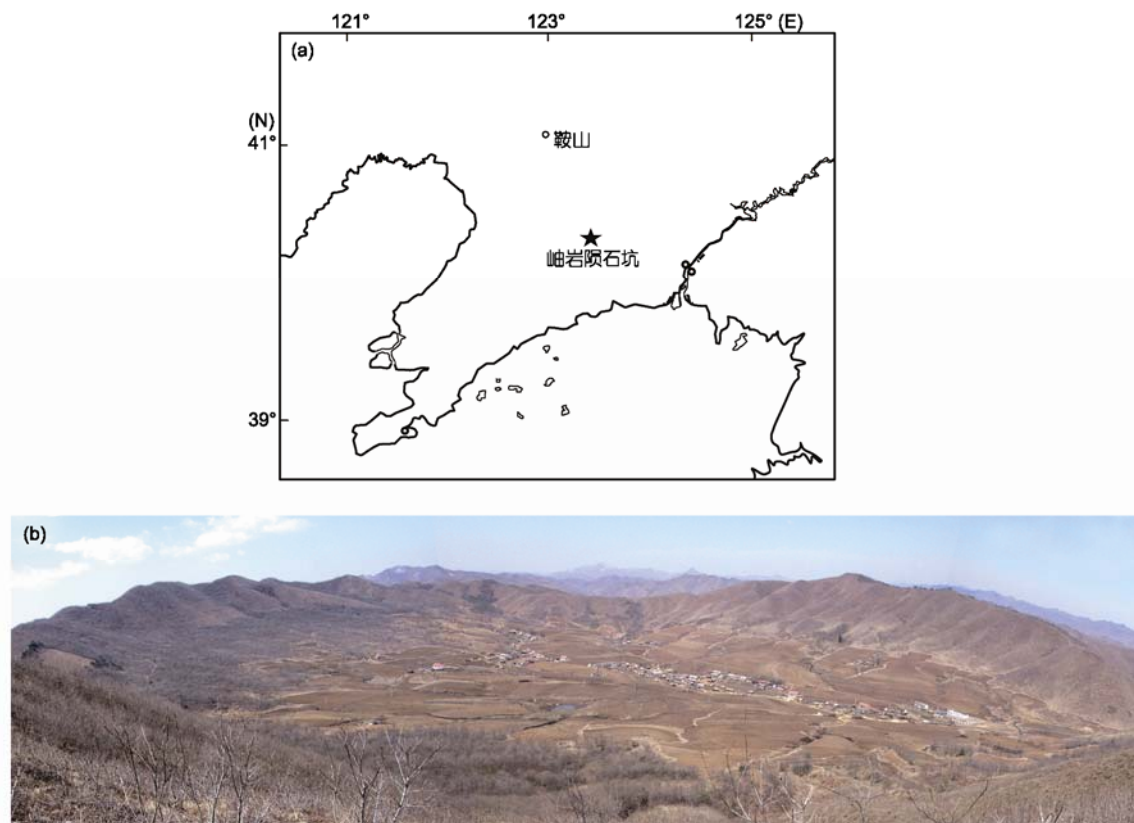


图 1 岫岩陨石坑在辽东半岛的地理位置(a)和岫岩陨石坑全景照片(b)

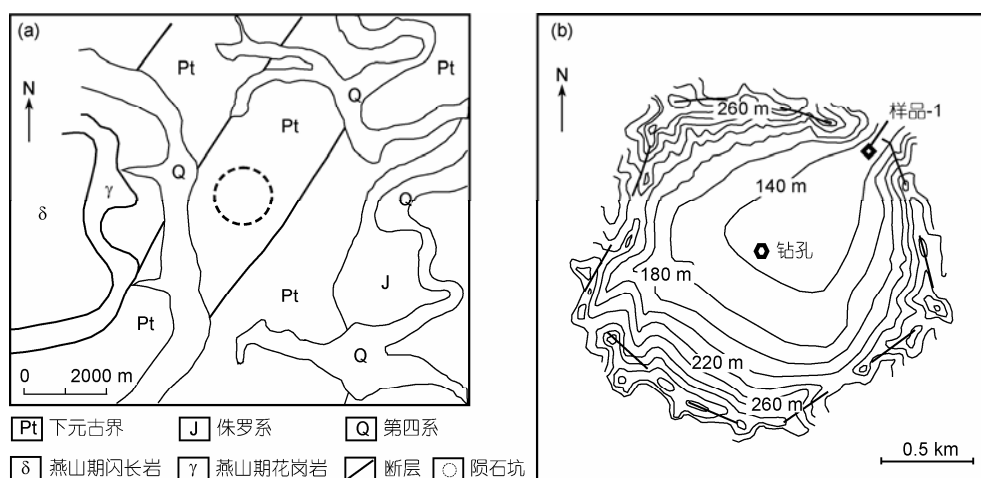


图 2 区域地质示意图(a)和岫岩陨石坑地形示意图(b)

根据文献 [10] 编制, (b) 中标明了钻孔及取样位置

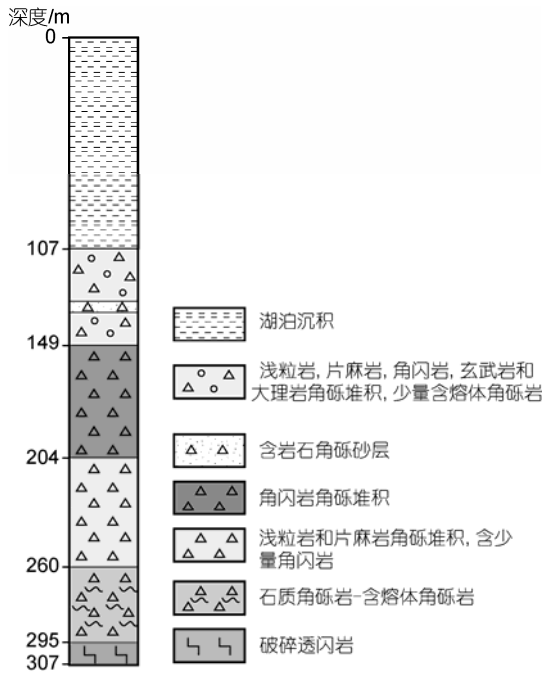


图3 钻孔地层示意图

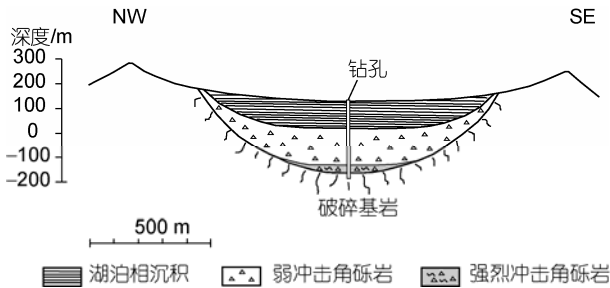


图4 岫岩陨石坑剖面结构示意图

角砾岩。石质角砾岩由浅粒岩和片麻岩组成，而含熔体多相角砾岩由浅粒岩、片麻岩和角闪岩碎屑和岩石熔体

玻璃等组成(图 5(b))。这个层位岩石显示强烈的冲击变质特征并含有大量岩石熔体玻璃碎片。在钻孔 295~307 m 深度区间，回收的岩芯是透闪岩碎块，这些岩石碎块可能代表陨石坑底部碎裂基岩或粗大岩石角砾。

2 冲击产生的岩石熔体玻璃

在钻孔 107~149 和 260~295 m 深度提取的多相角砾岩均含有岩石熔体玻璃。因此，这类岩石被称为含熔体多相角砾岩。玻璃碎片呈卵形、液滴形、条带状或不规则状产出(图 6(a))，粒度由几十微米到若干厘米不等，在角砾岩中分布不均匀。一些玻璃体胶结在岩石碎块表面上形成包裹层或覆盖物(图 6(b))。此外，一些强烈变形的片麻岩被厚度达 4 mm 的玻璃脉体切割。在光学显微镜透射光下，玻璃呈现褐色、暗褐色或无色。手标本玻璃体显现暗褐色或黑色。显然，存在成分不同的多种岩石熔体玻璃。对某些玻璃碎片的电子探针分析获得的分析结果为：44.51 wt% SiO_2 ，0.07 wt% Na_2O ，0.16 wt% K_2O ，7.55 wt% Al_2O_3 ，0.05 wt% Cr_2O_3 ，19.73 wt% FeO ，16.16 wt% MgO ，1.75 wt% CaO ，0.04 wt% MnO ，总量为 90.02 wt%。这种玻璃与该区域某些角闪岩成分相似，分析结果总量偏低表明玻璃中含有较多的挥发份。

3 冲击变质石英

浅粒岩、片麻岩和角闪岩是岫岩陨石坑地区产出的 3 类主要岩石。石英是浅粒岩和片麻岩中的主要矿物。我们分析了靠近坑唇基岩(浅粒岩)中的岩石样品(图 2(b))。结果表明，这些岩石的冲击变质程度较弱，但在大约十分之一的岩石薄片中找到含有一组击变面状页

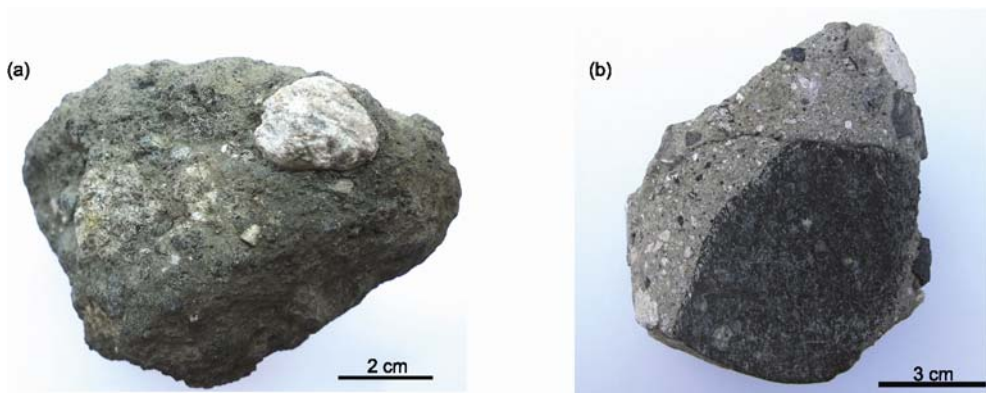


图5 含熔体多相角砾岩

(a) 从钻孔 140 m 深度位置收集的含熔体多相角砾岩; (b) 从钻孔 290 m 深度位置收集的含熔体多相角砾岩

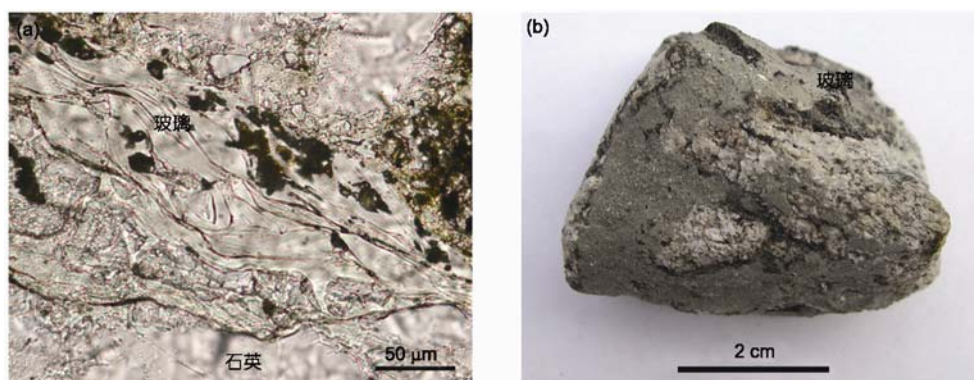


图 6 冲击产生的岩石熔体玻璃

(a) 含熔体多相角砾岩中具有流动条纹的硅酸盐熔体玻璃, 单偏光; (b) 黏附在一块片麻岩角砾(浅灰色)表面的暗褐色硅酸盐熔体玻璃

理的石英颗粒(图 7(a)). 石英中击变面状页理宽 $1\sim 2\ \mu\text{m}$, 相邻页理间隔 $<5\ \mu\text{m}$, 页理平行于石英的 $c(0001)$ 方向. 含多组击变面状页理的石英颗粒在该处没有被发现.

在钻孔岩芯中收集的含熔体多相角砾岩展示强烈的冲击变质, 而且包含许多发育击变面状页理的石英颗粒. 石英颗粒发育一组到四组不等的击变面状页理. 图 7(b)是一颗含二组击变面状页理的石英碎屑, 样品取自 140 m 深度的含熔体多相角砾岩. 图 7(c)是一颗含四组击变面状页理的石英颗粒, 产出在含熔体多相角砾岩中的浅粒岩岩屑中, 样品来源于 290 m 深度.

4 讨论和结论

简单碗形撞击坑通常被大量撞击抛射回落的岩屑和从坑唇壁上滑落的岩块和岩屑所充填, 形成陨石坑内填充体或角砾岩透镜体^[11]. 直径 1.2 km 的Barringer陨石坑是一个保全较为完好的简单陨石坑, 其坑内角砾岩透镜体厚度约为 200 m^[12]. 直径 1.1 km 的Pretoria

Saltpan陨石坑中角砾岩透镜体厚度约为 60 m^[13]. 直径 1.8 km 的Lonar陨石坑中角砾岩透镜体厚达 235 m^[14]. 岫岩陨石坑中角砾岩透镜体厚度约为 188 m, 这个厚度与已经揭示的简单陨石坑一般构造特征相似. 坑内角砾岩填充体被厚度超过 100 m 的湖泊相沉积物所覆盖, 这个巨大的角砾岩透镜体存在显然表明自形成后未经剥蚀. 岫岩陨石坑的碗状形态和坑内厚层角砾岩堆积表明陨石坑保存较为完好.

岫岩陨石坑内角砾岩透镜体由不同冲击变质程度岩石角砾或岩屑组成. 尽管通过钻探岩芯揭示的岩石冲击熔融规模很有限, 但角砾岩中硅酸盐熔体玻璃的发现表明了靶岩发生了部分撞击熔融. 含熔体多相角砾岩在 107~149 和 260~295 m 深度区间的岩芯中均有发现. 总的特征是, 坑内角砾岩透镜体上、中部 107~260 m 深度范围角砾岩冲击变质程度较弱, 底部 260~295 m 深度范围的石质角砾岩和含熔体多相角砾岩冲击变质程度较强. 陨石坑中相对弱冲击变质角砾岩堆

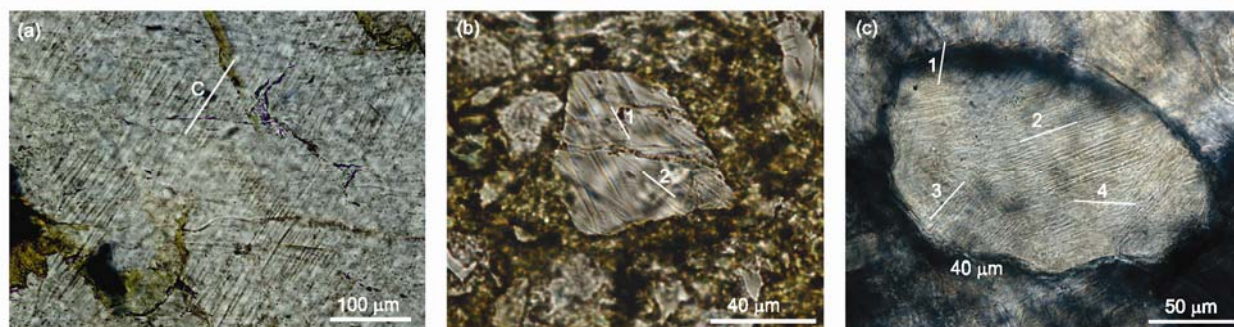


图 7 石英击变面状页理

(a) 采集于坑唇基岩(浅粒岩)中的石英颗粒发育一组击变面状页理, 取样位置标注在图 2(b) (样品一), $c(0001)$ 代表石英的晶体方向, 正交偏光; (b) 含熔体多相角砾岩中含有两组击变面状页理(图中数字标注了二组页理方向)的石英碎屑, 单偏光; (c) 含熔体多相角砾岩中浅粒岩岩屑石英颗粒含有 4 组击变面状页理(图中数字标注了四组页理方向), 正交偏光

积区域底部出现强烈冲击变质角砾岩堆积区域这一现象已在包括Lonar, Brent, West Hawk Lake等多个陨石坑中被发现, 它的形成被解释为瞬间形成的坑穴壁滑落的结果^[14], 这部分滑落的角砾岩冲击变质程度较高。

在自然界中, 石英击变面状页理的形成仅可通过大规模陨石撞击引起的冲击波作用形成^[4,5,9,10,12], 是靶岩矿物受冲击而产生的一种特殊效应, 任何其他地质作用不能复制这种效应。石英击变面状页理的形成是冲击波作用下发生变形和局部的非晶化转变结果, 它与一般的面状裂隙相区别的最关键要素是页理面平直,

页理宽度为 $<2\ \mu\text{m}$, 相邻页理间隔 $<5\ \mu\text{m}$ 。我们在岫岩陨石坑中找到的石英击变面状页理均符合这个基本特征。靠近坑唇基岩的石英颗粒主要发育一组击变面状页理, 而熔体多相角砾岩中石英颗粒发育多组击变面状页理。由于石英击变面状页理发育的组数随着冲击压力变大而增加^[15,16], 含多组击变面状页理的石英颗粒形成区域应更接近于陨石撞击点位置。

我们的研究表明, 岫岩坑内角砾岩透镜体、岩石熔体玻璃和石英击变面状页理的发现提供了明确的冲击变质证据, 证实了该坑的撞击起源。

致谢 地质钻探由辽宁省冶金地质勘查局四〇四队承担完成。岫岩满族自治县人民政府对该项研究给予了支持和帮助。感谢审稿人对本文提出的建设性修改意见。

参考文献

- 1 章功炯, 卢登蓉, 欧强, 等. 罗圈里撞击坑铂族元素异常及粗铂矿的发现及其意义. 地学前缘, 2001, 8: 333—338
- 2 赵树明. 在辽东半岛中部岫岩满族自治县内发现一撞击构造——陨石坑. 国土资源遥感, 200, 3: 27
- 3 陈鸣. 岫岩陨石坑: 撞击起源的证据. 科学通报, 2007, 52: 2777—2780
- 4 Chao E C T. Shock effects in certain rock-forming minerals. Science, 1967, 156: 192—202^[DOI]
- 5 French B M, Short N M. Shock Metamorphism of Natural Materials. Baltimore: Mono Book Corp, 1968
- 6 Stöffler D. Deformation and transformation of rock-forming minerals by natural and experimental shock processes: 1. Behaviour of minerals under shock compression. Fortschr Mineral, 1972, 49: 50—113
- 7 Stöffler D. Deformation and transformation of rock-forming minerals by natural and experimental processes: 2. Physical properties of shocked minerals. Fortschr Mineral, 1974, 51: 256—289
- 8 Grieve R A F, Langenhorst F, Stöffler D. Shock metamorphism in nature and experiment: II. Significance in geoscience. Meteorit Planet Sci, 1996, 31: 6—35
- 9 Keoberl C. Mineralogical and geochemical aspects of impact craters. Mineral Mag, 2002, 66: 745—768^[DOI]
- 10 辽宁省地质局第一区调大队. 岫岩幅和大孤山幅, 1:200 000 区域地质调查报告, 1976
- 11 French B M. Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-metamorphic Effects in Terrestrial Meteorites Impact Structure. LPI Contribution No. 954, Lunar and Planetary Institute, Houston. 1998
- 12 Kring D A. Guidebook to the Geology of Barringer Meteorite Crater, Arizona. LPI Contribution No. 1355, Lunar and Planetary Institute, Houston, 2007
- 13 Reimold W U, Keoberl C, Pareidge T, et al. Pretoria Salpan crater: Impact origin confirmed. Geology, 1992, 20: 1079—1082^[DOI]
- 14 Fredriksson K, Dube A, Milton D J, et al. Lonar Lake, India: An impact crater in basalt. Science, 1973, 180: 862—864^[DOI]
- 15 Trepmann C, Spray J G. Shock-induced crystal-plastic deformation and post-shock annealing of quartz: Microstructural evidence from crystalline target rocks of the Charlevoix impact structure, Canada. Eur J Mineral, 2006, 18: 161—173^[DOI]
- 16 Ferrière L, Keoberl C, Ivanov B A, et al. Shock metamorphism of Bosumtwi impact crater rocks, shock attenuation, and uplift formation. Science, 2008, 322: 1678—1681^[DOI]