岫岩陨石坑：撞击起源的证据

陈 鸣

(中国科学院广州地球化学研究所，广州 510640. E-mail: mchen@gig.ac.cn)

摘要 迄今为止，世界上已发现 176 个陨石撞击坑. 对辽宁省岫岩满族自治县的一个环形构造的岩石冲击效应、矿物变形微结构特征以及地貌特征等进行了研究. 该环形构造是一个直径 1.8 km、深 150 m 的碗状坑. 在坑内变形基岩石英颗粒中发现了击变面状页理(PDFs)，这是判断该坑陨石撞击起源的诊断性标志. 坑区内冲击角砾岩和岩石震裂锥的产状，以及撞击形成的地貌特征等均与陨石撞击作用结果相符合. 这是中国第一个被证实的陨石撞击坑.

关键词 陨石撞击坑 冲击变质 击变面状页理 石英 岫岩

陨石坑是大的流星体、小行星或慧星撞击行星及其卫星表面形成的一种特殊环状地质构造. 到目前为止，地球上已发现的陨石撞击坑数量为 176 个，分布在世界上 32 个国家(Earth Impact Database, 2007, http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/index.html). 从 20 世纪 80 年代开始，中国学者对中国的陨石坑开展了系列的调查和研究，找到了一批疑似陨石坑的环状地质构造 [1~10]. 在国际陨石坑资料库中(http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/index.html)，中国版图上陨石坑数目仍然为零. 中国陨石坑研究没有取得突破的主要原因，是未能获得证实陨石撞击成因的关键证据. 国际学术界将陨石撞击坑判别的诊断性标准明确为撞击坑岩石造岩矿物石英和长石中发育击变面状页理(planar deformation features, PDFs)[11~17]，中国学者在过去研究中未曾报告这方面的证据.

位于辽宁省岫岩满族自治县苏子沟镇的一个环形构造是中国学者曾经关注过的一个疑似陨石坑. 该坑地貌为一环形坑，当地居民称之为称为圈里. 20 世纪 70 年代初，辽宁省地质局第一区测大队在本区开展区域地质调查时将这一地质现象描述为旋涡状构造. 1982~2004 年期间，赵树明 [10]通过航空遥感地质构造解译和实地观察，推断该坑为陨石撞击形成. 1998~2001 年，覃功炯等人 [9]通过地质填图和人工重砂等样品分析，也认为该坑形成与陨石撞击作用有关. 然而，过去的研究工作均没有取得坑区岩石和矿物冲击变质的资料，特别是缺失石英等矿物的击变面状页理等关键证据，该坑的陨石撞击成因未被证实.

本文报道了对岫岩这个环形构造的岩石冲击效应、矿物微结构特征、和其他地质地貌特征的初步研究结果，提供了陨石撞击作用的关键证据，证实了该坑的陨石撞击起源.

1 地质和地貌概况

本区地层为下元古界辽河群里尔峪组变质岩，主要岩性为变粒岩、浅粒岩，含少量大理岩和混合岩. 在坑区范围，浅粒岩是主要岩性，约含 50 vol%(vol%示体积百分，下同)石英、45 vol%长石、4 vol%云母、少量角闪石、石榴子石、磷灰石、金红石等副矿物. 浅粒岩中石英和长石粒度一般为 1~5 mm.

岫岩陨石撞击坑位于辽东半岛中部丘陵地带(40°21′55″N，123°27′34″E)，在平面上呈现为近五边形到似圆形. 该坑形态呈碗状(图 1)，直径为 1.8 km，坑底与坑唇山脊高差为 135~230 m，平均 150 m. 坑底中央区海拔高度约 140 m.

坑唇山脊和坡地有厚度为 0.5~6 m 的风化浮土. 坑底覆盖了较厚的泥岩和泥炭土等第四系湖沼相沉积物. 坑唇坡地沟谷局部可见变形破碎基岩和角砾岩出露. 坑的东北方向有个 V 形缺口，沿着该缺口通道可从坑外直接进入到坑内底部. 整个坑区被小灌木和庄稼等植被所覆盖.

2 陨石撞击作用和岩石矿物冲击变质特征

通过研究发现与撞击作用相关的特征包括：造岩矿物石英中的冲击变形微结构，岩石震裂锥，与撞

2007-08-24 收稿，2007-09-25 接受

中国科学院院长基金(2007 年)特别支持项目、国家自然科学基金(批准号: 40672035)资助项目

击过程和坑内岩石抛射相关的放射状沟谷地貌，冲击角砾岩等.

2.1 石英中的击变面状页理

经过对坑区岩石露头的系统采样和分析，在坑底河沟出露的碎裂变形基岩(浅粒岩)中，找到了发生强烈变形的石英颗粒，在其中发现了冲击作用产生的面状页理(PDFs)(图 2)，其特征与著名的德国里斯(Ries)陨石坑石英击变面状页理相同 [11]. 在岩石薄片上，可观测到石英颗粒中的面状页理产生为类似片晶状的结构，片晶状薄片在石英颗粒中密集均匀分布，相邻薄片平行排列，单个薄片厚度<1 μm，薄片间距 2~5 μm. 通常在一个石英颗粒切面上可以观测到 1~3 组薄片. 平行排列的薄片可以切穿整个石英颗粒，也可以沿着晶体颗粒边缘局部发育. 在光学显微镜上，发育面状页理的石英颗粒干涉色一般比正常石英偏低. 正交偏光下高放大倍数可以观测到平行排列的片晶状结构实际上是由非均质与均质的薄片相间排列而成. 非均质的薄片仍具有石英的晶体结构特征，而均质薄片发生了强烈变形甚至玻璃化.

2.2 震裂锥

震裂锥一般呈顶尖底圆的锥状岩块，单个锥体的大小为数厘米或更大，锥面上布满了纵向的沟槽，它是撞击作用形成的一种特殊类型的震裂构造. 我们在坑唇的浅粒岩中，找到了这种震裂锥. 图 3 展示了一个震裂锥，在它的圆锥面上有大量类似于擦痕状的纵向沟槽. 这种规则和光滑的沟槽可以形成在硬度较大的石英颗粒上. 在坚硬的浅粒岩中形成震裂锥，表明冲击作用在岩石局部产生的极高的应力状态，导致局部滑动产生，形成特殊纹理的锥面.

2.3 冲击角砾岩

坑内岩石露头存在两种类型的冲击角砾岩，一种是碎屑状角砾岩(图 4(a))，另一种是部分熔融角砾岩(图 4(b)). 碎屑状角砾岩直接覆盖在强烈破碎变形的基岩之上，角砾大小变化很大，从几毫米到十多厘



图 1 岬岩陨石撞击坑全景照片

该坑呈碗状形态，坑唇北部(图左上方)和东部(图右上方)展示弧形坡地和放射状沟谷. 坑的底部覆盖较厚的第四系湖沼相沉积物. 整个坑区被小灌木和庄稼等植被所覆盖

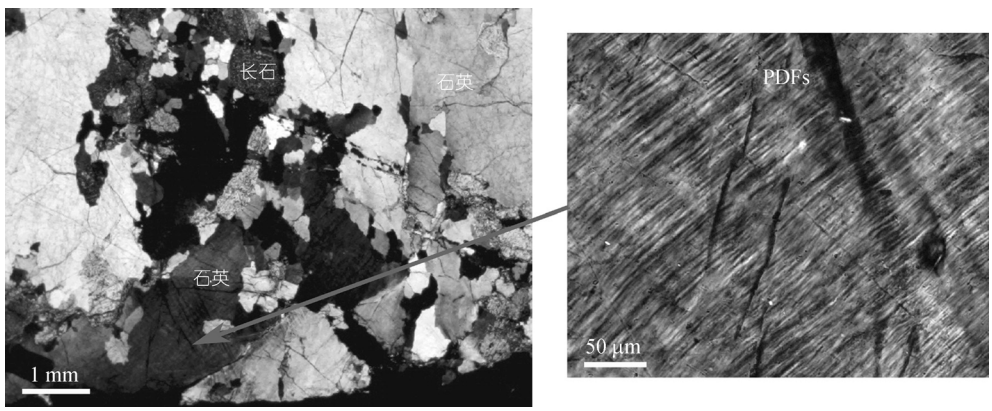


图 2 浅粒岩石英颗粒中存在的密集均匀的击变面状页理(PDFs)

石英颗粒中页理结构分布均匀，非均质(白色层)与均质(灰色层)的片晶状薄片相间平行排列. 正交偏光

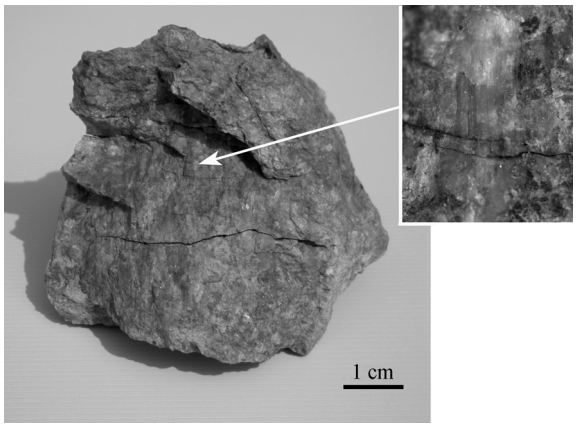


图 3 形成在浅粒岩中的震裂锥，锥面上布满了擦痕状的纵向沟槽
右上图表明在石英颗粒表面形成的沟槽

米不等，岩石碎屑杂乱无章，相对松散地堆积在一起. 部分熔融角砾岩的岩性较为致密，呈透镜体状产出在碎屑状角砾岩中，显示不规则的条带状或似流动状构造，岩石碎屑粒度一般小于 5 cm，角砾含量约占全岩的 40%，其余为部分熔融的基质物.

2.4 放射状沟谷

沿该环形构造北部和东部坑唇内侧坡地，形成了许多向坑中心方向延伸的放射状沟谷(图 1)，相间排列的放射状山梁和山谷形成了特殊的地貌特征. 许多沟谷延伸数百米从坑底部一直到坑唇顶部山脊，在剖面上形成为舒展向上的弧形曲线. 这种特殊的沟谷形态不同于一般的自然侵蚀风化形成的山梁和山谷、火山口或其他地质地貌特征.

3 讨论和结论

所谓矿物击变面状页理，是与冲击波作用有关，产生在石英和长石等岛状和架状硅酸盐矿物中的一种动高压变形微结构特征. 矿物击变面状页理通常沿着晶体特定方向(如石英的$\{10\bar{1}n\}$)(n=1~4)产生，片晶状薄片在矿物中均匀分布平行排列，单个薄片厚度<1 μm. 石英中的击变面状页理可由以下微结构组成：高密度的位错带、不规则的石英微粒薄层、非晶化玻璃薄层等 [18,19]. 除人工核爆炸和自然界大规模撞击作用以外，任何其他地质作用包括火山喷发、构造运动和地球深部高温高压等，都不可能在矿物中产生这种特殊的面状页理.

中国学者曾对太湖疑似陨石坑的石英颗粒变形特征作过研究，在其中发现了“变形纹”[4]或“微页理”[5]，并认为这些变形特征与冲击作用有关. 对比相关资料显示，太湖石英中存在的这类变形特征更类似于一种面状裂隙(planar fractures，PFs)，与面状页理(PDFs)有明显差别. 面状裂隙之间的宽度一般大于 5~10 μm，分布不均匀，平行于特定的晶体面，如(0001)或{1011}. PFs形成压力要远比PDFs低. 因此，PFs不能作为冲击变质的结论性依据 [20]. 在中国报道过的其他疑似陨石坑中，尚没有石英和长石类矿物冲击变形微结构特征的确切报道.

岫岩陨石撞击构造中发现的石英击变面状页理特征十分典型，其特征与世界上其他已知陨石撞击坑中揭示的石英击变面状页理相同 [11,20~25]. 因此，石英颗粒中击变面状页理的发现，为确定该坑陨石撞击成因提供了确切证据.

岫岩陨石撞击构造呈现为典型的碗状坑，坑唇发育，整个形态保存较好，属于简单坑. 坑内浅粒岩中震裂锥的发现，提供了岩石历经强烈冲击波作用的另一证据 [26]. 坑唇内坡地发育的放射状沟谷，表明



图 4 产出在陨石坑内的冲击角砾岩
(a) 碎屑状角砾岩，显示相对松散的堆积; (b) 部分熔融角砾岩，显示致密和不规则的似流动状构造，岩石角砾分布在部分熔融的基质中

了陨石超高速撞击导致坑内岩石向外抛射产生的特殊地貌. 坑唇和底部广泛发育的冲击角砾岩及其产状表明了撞击作用导致靶区岩石发生破碎、变形、局部熔融、飞溅和回落的撞击和成坑过程. 撞击成坑后, 该坑曾一度发育成为封闭的湖沼小盆地, 后因东北方向坑唇形成缺口, 湖水流失.

岫岩坑是中国第一个被证实撞击起源的陨石撞击坑, 我们正对该坑进行系统的矿物冲击效应、坑体结构、撞击年代、湖沼相沉积与古环境等研究, 以全面揭示撞击坑的形成过程、特征和历史.

致谢 岫岩满族自治县人民政府对该项研究工作给予了支持和配合, 付大鹏、齐经彦、李晓光、曹裕波协助了部分野外工作, 特此一并致谢.

参 考 文 献

1 Wu S. The Shanghewan impact crater, China. Lunar Planet Sci Conf, 1988, 19: 1296
2 Wu S. Geologic Feature of the Duolun Impact Crater, China. Lunar Planet Sci Conf, 1989, 20: 1219
3 傅成义. 太湖三山岛击变岩的发现及其意义. 地理学报, 1990, (2): 253—256
4 何永年, 徐道一, 陆德复, 等. 太湖地区石英晶粒的冲击变形特征——太湖成因初探. 科学通报, 1990, 35: 1163—1166
5 王尔康, 万玉秋, 施央申, 等. 太湖泽山岛冲击变质石英的发现和意义. 科学通报, 1990, 38: 1875—1878
6 吴思本. 多伦陨石坑的研究进展. 中国地质, 1996, (8): 14—16
7 吴思本. 香港陨石坑的发现始末. 中国地质, 1997, (6): 48—49
8 王道经. 海南白沙陨石坑. 海口: 海南出版社, 1997
9 覃功炯, 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(2): 333—338
10 赵树明. 在辽东半岛中部岫岩满族自治区内发现一撞击构造——陨石坑. 国土资源遥感, 2004, (3): 27
11 Chao E C T. Shock effects in certain rock-forming minerals. Science, 1967, 156: 192—202
12 French B M, Short N M. Shock Metamorphism of Natural Materials. Baltimore: Mono Book Corp, 1968
13 Stöffler D. Deformation and transformation of rock-forming minerals by natural and experimental shock processes: 1. Behaviour of minerals under shock compression. Fortschr Miner, 1972, 49: 50—113
14 Stöffler D. Deformation and transformation of rock-forming minerals by natural and experimental processes: 2. Physical properties of shocked minerals. Fortschr Miner, 1974, 51: 256—289
15 Alexopoulos J S, Grieve R A F, Robertson P B. Microscopic lamellar deformation features in quartz: Discriminative characteristics of shock-generated varieties. Geology, 1988, 16: 796—799[DOI]
16 Sharpton V L, Grieve R A F. Meteorite impact, cryptoexplosion, and shock metamorphism: A perspective on the evidence at the K/T boundary. In: Sharpton V L, Ward P D, eds. Global Catastrophes in Earth History, GSA Special Paper 247. Boulder: Geological Society of America, 1990. 301—318
17 Stöffler D, Langenhorst F. Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: I. Basic observations and theory. Meteoritics, 1994, 29: 155—181
18 Xie X, Chao E C T. Studies on the lattice distortion and substructures of shock lamellae in naturally shocked quartz. Geochemistry, 1987, 6: 19—32
19 Goltrant O, Leroux H, Doukhan J C, et al. Formation mechanisms of planar deformation features in naturally shocked quartz. Phys Earth Planet Int, 1992, 74: 219—240[DOI]
20 Engelhardt W V, Bertsch W. Shock induced planar deformation structures in quartz from the Ries Crater, Germany. Contrib Miner Petrol, 1969, 20: 203—234
21 Therriault A M, Lindström M. Planar deformation features in quartz grains from the resurge deposit of the Lockne structure, Sweden. Meteoritics, 1995, 30: 700—703
22 Koeberl C, Reimold W U, Brandt D. Red Wing Creek structure, North Dakota: Petrographical and geochemical studies, and confirmation of impact origin. Meteorit Planet Sci, 1996, 31: 335—342
23 Buchanan P C, Reimold W U. Planar deformation features and impact glass in inclusions from the Vredefort Granophyre, South Africa. Meteorit Planet Sci, 2002, 37: 807—822
24 Hough R M, Lee M R, Bevan A W R. Characterization and significance of shocked quartz from the Woodleigh impact structure, Western Australia. Meteorit Planet Sci, 2003, 38: 1341—1350
25 Reimold W U, Koeberl C, Hough R M, et al. Woodleigh impact structure, Australia: Shock petrography and geochemical studies. Meteorit Planet Sci, 2003, 38: 1109—1130
26 Dietz R S, McHone J F. Shatter cones: Definitive criteria for meteorite impact. Meteoritics, 1984, 19: 221