



ZIBELINE INTERNATIONAL™

ISSN: XXXX-XXXX (Print)

E-ISSN: 2976-2421 (Online)

CODEN: XXXXXX

JOURNAL OF ROCK ART
(JRA)DOI: <http://doi.org/10.65098/jra.01.2022.59.64>

REVIEW ARTICLE

印度达拉奇-查丹洞穴中凹穴的科学研究

吉日拉吉·库马尔¹, 瑞·卡什¹, 罗伯特·G·贝德纳里克^{2,*}, 李泽伟³, 罗星洁³译¹印度岩画协会, 阿格拉 999008, 印度²河北师范大学国际岩画断代中心, 石家庄 050000, 中国³南京师范大学文博系, 南京 210097, 中国

*通讯作者邮箱: robertbednarik@hotmail.com

This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License CC BY 4.0, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ARTICLE DETAILS

Article History:

Received 2 August 2022

Accepted 19 October 2022

Available online 27 October 2022

ABSTRACT

达拉奇-查丹(Daraki-Chattan)洞穴是位于印度尚巴尔盆地的旧石器时代早期凹穴遗址, 是世界上已知最古老的岩画遗址之一。它包含超过500个凹穴, 自2000年开始, 早期印度岩画工程(EIP)就一直对其进行研究, 并对洞穴入口处的沉积物进行了挖掘。本文介绍了对洞穴中凹穴的分析, 以及对那些位于阐查拉玛塔(Chanchala Mata)山附近岩石凹穴的分析。本文解释了凹穴中抗腐蚀表面的形成以及这一机理是如何促进更好地保护凹穴。然而, 这些极具抵抗力的构造岩层的埋藏作用不仅保护了凹穴免受风化, 而且在这些特征的形成过程中也具有显著的阻碍作用。未来的工作需要着重于凹穴、动能变质(KEM)现象和风化过程量化之间的关系。

关键词

凹穴, 动能变质层, 埋藏学, 达拉奇-查丹洞穴, 印度中部

1. 简介

位于印度中部班普拉(Bhanpura)附近, 伊恩德拉加尔(Indragarh)山的达拉奇-查丹石英岩洞穴, 是世界上已知最古老的岩画遗址之一, 以其岩壁、岩基和从沉积物中修复的剥落岩石碎片中发现的530多个凹穴最具特征。(图1)这些凹穴特别重要, 因为它们是从遗址的大部分沉积物层中挖掘出来的, 一直向下直到基岩。这些沉积物自上而下包含:旧石器时代中期、阿舍利文化(Acheulian)和无手斧的旧石器时代早期石器。此外, 一些用于生产凹穴的、类似于奥尔德沃石器工业文化(Oldowan)的锤石也在最底层被发现。因此, 至少有一些凹穴是与旧石器时代早期制石工具同时制作的, 这证明它们正处于岩画艺术非常早的时期。此外, 在已知的遗迹中, 只有一个明显相似的岩画凹穴——位于比莫贝卡特(Bhimbetka)的会堂洞穴, 地处印度中部。它以接近人类领地所留下的沉积物文化序列为特征, 除此之外, 在比莫贝卡特遗址位于最底部的占领层与上覆的阿舍利层之间存在一个包含豆石的贫瘠层。后者表明环境发生了巨大的变化, 在达拉奇-查丹(Daraki-Chattan), 含有铁元素的沉积物在下层石器材料上留下了痕迹, 包括石器和天然碎屑。

需要解释的问题之一是达拉奇-查丹的岩石凹穴怎么可能在如此漫长的历史中幸存? 岩画的寿命取决于岩石对侵蚀和其它环境因素的抵抗力(McBride, 1989)。任何岩画对被自然方式(无论是风蚀、河流、海洋、溶液或任何其它介质)擦除或侵蚀的相对承受力与制造它所需的时间大致成正比。这个摩擦学公理对岩画具有根本的重要性。

制作岩画所需的时间是一个已知变量(从某种意义上说, 它可以通过复刻来确定); 因此, 岩画的相对寿命是可以预测的(Verberne et al., 2014)。以达拉奇-查丹的凹穴为例, 在洞穴附近的同一块岩石上进行



图1: 印度达拉奇-查丹(Daraki-Chattan)洞穴的位置

Quick Response Code



Access this article online

Website

<https://volksonpress.com/journal/jra/>

DOI:

10.65098/jra.01.2022.59.64

的复刻实验表明，一个9.0毫米深的凹穴的制作，需要在138分钟内进行17300次砸击，这需要两天；另一个是通过专注于坑中央来制作的，最终也有9.0毫米深，这需要在372分钟内完成28327次砸击。它还试图制造一个略呈三角形的凹穴，来匹配洞穴中发现的其中一个凹穴，这需要在812分钟内完成总共111261次的砸击 (Benn et al., 2010)。但包括间接冲击试验在内，结果证明实验完全没有效果。从本质上讲，要制作深度更深的古代岩石凹穴，每个凹穴都需要用锤子敲击50000到100000次，甚至更多次。这将在已风化但未变质的砂岩上制造类似的凹穴所需时间的1000倍以上。在此基础上，可以合理地假设，在相同环境中，石英岩凹穴比风化砂岩上的相同凹穴寿命长1000倍。而且，在洞穴内受到保护的位置会更加突出这种差异 (Siman-Tov et al., 2015; 2017)。

实际上，有三个因素促成了达拉奇-查丹岩画极长的保存时间。首先，岩石是已完全变质的石英岩，是曾经用于岩画装饰的石头中的两种最具抵抗力的岩石类型之一 (另一种是结晶白色石英)。其次，洞穴在大雨期间仅受到有限的径流冲击，并且洞穴的很大一部分没有受到太阳辐射。因此相对于露天场地而言，风化过程对该洞穴造成的降解是很有限的。值得注意的是，尽管存在以上因素，但许多石壁凹穴清楚地表明，自从它们被制作后，其周围的岩石表面已经明显塌缩 (Kumar, 1996.)。最后，还有一个因素促进了这种岩画得以于漫长时间内被保存，这也是本文的主要主题：通过对数百个石壁凹穴的调查表明，许多凹穴的内部似乎具有一种硬化的表面层，尽管其中某些表面层可能被堆积物或薄薄的黑色地衣所掩盖 (Iverson, 1991)。

2. 达拉奇-查丹凹穴的检验

这项工作于2016年11月8日至21日进行。野外显微镜使用了一种双目光学显微镜进行检查，这是一种配备了内部目镜标尺的定制改进型 Motic SMZ143 立体变焦显微镜 (图2) 此外还使用了两个数字显微镜。其他位置的相关样本用尼康SMZ1000双目光学显微镜进行实验室检查；通过扫描电子显微镜Jeol JSM-35；通过Zeiss Axiotron显微镜并配备MCU263轴控制器和10MP Moticam相机；通过扫描电子显微镜 (SEM) 与EDX—X射线检测器结合并使用WINEDS 软件。达拉奇-查丹的野外显微镜检查始于洞穴南壁的36号凹穴，其中包含两个在边缘可见的突出表面层，随后在许多其他样本中也有发现。在南壁的44号和45号凹穴中也检测到了明确且清晰的表面层。这些表面层很小并且被随后的剥落物所截断，这意味着只有那些更深且处于中央位置的原始凹穴才能得以幸存至今 (Kumar band Krishna, 2014)。南墙上的其他样本包括凹穴36、35、34、33、6、8、4、5和16A (图3-S) 许多其它硬化表层似乎被堆积沉积物或地衣所覆盖。在洞穴的北壁上，许多凹穴进一步显示出清晰无误的表面层：16A、31、30、15A、14A、2、3、4、5、22、24、27、47、48、50、140、135、121、115、113、110、159、158、162、164、174、173、171、172、181、144、201、208、205、206和219 (图3-N)。

对这48个凹穴的检验显示了一种趋势：在最大、尤其是最深的样本中发现最稳固的构造岩层，包括那些因石壁剥落而被截断的样本。另一个发现是33至36号的凹穴在南壁上形成一个小群组，在它们的底部位置表面都显示出微小的红色色素残留 (图4) 尽管这些残留物以非常孤立的、不连续的残留形式出现，且仅在微小的凹槽中被发现，但它们似乎曾经在凹穴内部形成了连续的覆盖层 (Kumar et al., 2016)。这种红色颜料以非常小的赤铁矿薄片形式出现在凹槽中，但在凹穴底部的其他地方，石英的微红色变色很明显，类似于通常在砂岩上发现的典型绘画颜料“阴影”。因此，可以假设这些凹穴曾经涂有红色颜料，并含有铁元素。这一点在该遗址的许多其它凹穴中均未检测到。

在这些研究过程中，北墙上的14A号凹穴成为了主要的考察对象，因为它不仅是其中最大的凹穴，而且是保存最完好且最深的凹穴之一。它是洞穴中许多比最初制造时要更浅的凹穴之一，因为它周围的岩石表面已经塌缩了。塌缩的幅度未知，但我们估计其大致在5毫米到20毫米之间。如今，该凹穴宽46毫米，高46毫米，深18毫米，因此它在制作时可能有23-38毫米深。洞穴中的其它所有凹穴，包括那些看起来完整保存下来的凹穴，如今的深度都在15毫米以下。大直径类别凹穴的常见深度在12毫米到14毫米之间。仔细地考虑凹穴14A周围的几个层状剥落疤痕，这些疤痕已经减小了其深度 (并且在较小程度上减小了其直径)，得出了其最接近现实的先前深度约为25毫米，基于复刻工作，可以安全地假设它涉及超过100000次锤击。毫不奇怪，它还具有在任何凹穴中看到的最明显的构造岩发育。沿着这个凹穴的左侧边缘，这个特征被很好地分割和可见 (图5)。

14A的厚表层由完全结晶的石英组成，这些石英已被破碎成网状图案，例如矩形的碎片。它的厚度从2.0毫米到2.4毫米不等，并被平行于凹穴内部的不规则裂缝及其紧挨的基底分开。裂缝仅在 40 微米宽的地方出



图2：达拉奇-查丹 (Daraki-Chattan) 洞穴北壁最西端的野外显微镜 (由 RGB 拍摄)



图3：最初于1996年确定的达拉奇-查丹 (Daraki-Chattan) 南壁 (S) 和北壁 (N) 上的凹穴分布。此后检测到更多凹穴。(由 RGB 拍摄)

现，似乎是由材料压力造成的。表层构造岩似乎已完全转化，在显微镜下，结构中没有可检测到的粒度；所有以前的石英颗粒的痕迹都已经消失了。颗粒和无定形硅质已经聚合成一个单一的物质，而不是熔融或熔化。那里也没有晶体结构的痕迹；因此，也可以排除任何再结



图4: 凹穴36到33(从左到右), 位于南壁, 有明显的动能变质 (KEM) 发展和被红色色素覆盖的证据。只有凹穴的最深部分在周围岩石基质的层流剥落中幸存下来(由RGB拍摄)



图5: 位于达拉奇-查丹北墙的凹穴14A, 具有迄今为止观察到的最广泛的动能变质 (KEM) 转换证据 (由RGB拍摄)

晶过程的出现。发育完全的构造岩包括板状(薄片状)碎片的瓦状排列区域和让人联想到Voronoi细胞的网状排列区域, 所有这些区域都表现出了“重新定向”或熔融。最重要的是, 在彻底的搜索后显示其并不存在偏六角形结构, 因此这种发生改变的过程不是某种形式的结晶。这些小版块从视觉上传达了一种印象, 即转换过程更类似于重新形成延展性强的薄片状云母板, 因为一些矩形碎片具有完全平坦的表面。网状结构似乎在 0.5-1.0毫米的深度占主导地位。

在这个表现为单一半透明石英岩的构造岩层之下, 是一个从约2.4毫米深开始逐渐变成原岩的基底。在这种部分转化的基底中, 石英岩颗粒很容易辨认。它们的直径通常在250 μm 左右, 但无定形硅质已被改变性质, 在某些情况下, 在晶粒周围形成同心“光晕”。在凹穴14A的左边缘, 距表面约10毫米处, 这种程度的变化似乎很明显, 这一现象远远超过在其它地方所能看到的。

3. 定义动能变质 (KEM) 转换

在本文描述工作之前, 即观察到达拉奇-查丹的大量的凹穴表面明显硬化这一现象之前, 就早已在多个大陆的遗址中确认其存在。事实上, 此现象自1987年就被观察到, 首先在玻利维亚的印加华斯发现, 后来在沙特阿拉伯、撒哈拉沙漠和南非也发现了, 最后在中国发现。在大多数情况下, 它是在砂岩和变质砂岩石 (石英岩) 中被发现的。动能变质(以下称为KEM)假说解释了岩石上这些抗侵蚀表面层的形成是由于极高的动能对局部的作用。如上所述, 在非常坚硬的岩石表面上制造凹穴, 涉及将大量累积的能量应用在非常小的表面区域。需要明白的是, 施加的总力可能高达几十千牛顿, 且集中在一个非常小的区域。这改变了最接近表面的岩石层的物理性质。这些层虽然在化学结构上与用于支撑的原岩相似, 但由于晶体重新定向和/或物理过程, 其耐候性有显著提高。一些对凹穴施加的巨大的力, 会以热量、声音和破裂力的形式消散, 但其中很大一部分会产生摩擦效应, 使先前已经变质的原岩进一步变质, 并将其转化为最好定义为构造岩

的东西。

以下是已通过现场显微镜初步确定的动能变质 (KEM) 转换阶段, 由底层到表面(图6):

第0阶段:原岩没有改变, 深度总是 >10毫米。

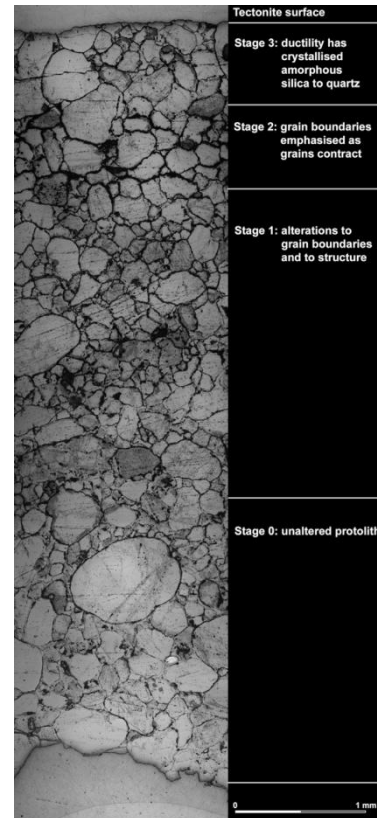


图6: 通过合成电子显微镜下的地质KEM样品改性区域的薄断面照片(由RGB拍摄)

第1阶段:颗粒仍然清晰可见, 没有明显的同心“光晕”或“熔融”外观, 在最极端的情况下, 距离表面 5-10毫米。

第2阶段 很少有颗粒可辨认, 并且它们可能具有的同心的“光晕”表明从无定形到结晶状硅质的摩擦学改性发展良好, 以凹穴14A为例, 距表面 2.4-5毫米。

第3阶段:完全变质的结晶石英体, 具有薄片结构, 表面深度小于2.4毫米。

通常, 转化层是薄片状的、颜色呈稍白或苍白, 并且在明显发生最大冲击的地方最厚, 即在凹穴的最深处。在构造岩中, 矿物质已经改变了它们的方向, 并且这种薄片涉及组分的各向异性再结晶。如果是砂岩或石英岩, 这是它的硅质胶结物。当它填充碎屑之间的空隙时, 它会粘合石英颗粒并降低孔隙率和渗透率。石英颗粒上共生石英过度生长的来源可以是生物成因 ($\delta^{30}\text{Si}-1-2\text{‰}$) 或碎屑二氧化硅 ($\delta^{30}\text{Si}-0\text{‰}$)。矿物涂层(例如粘土)和截留物(例如碳氢化合物、粘土矿物)延缓了共生沉积, 碎屑石英颗粒之间的空隙未被胶结物完全占据。这为石英岩原岩的再变质, 以及砂岩、片岩的变质提供了潜力。

自从这一现象在几个大陆上的凹穴中发现后, 动能变质 (KEM) 作为一个影响各种类型地质表面的过程已在更大规模的范围内被检测到。在地质时代的古河道中, 对于在河流中以巨大的能量推动碎屑对基岩的冲撞作用进行了最详细的研究(图7 Bednarik, 2003; 2004; 2008; 2012; 2017; 2019)。在风沙袭击(如沙尘暴)和冰川磨损作用下, 也观察到了相同的产物。传统上, 冰川抛光被认为是逐步去除多余材料直到表面变得非常光滑的结果。但这无法解释表面薄层的明显硬化。最近的解释提到了晶体的变形, 并推测其涉及糊状岩石粉和硅质胶体。这些作者自己也对为什么表面剥落层的厚度远大于他们所认为的改性层的厚度感到困惑 (Bednarik et al., 2005)。通过将这一现象视为动能变质的产物, 可以更令人信服地解释冰川抛光的种种方面: 在视觉上独特的薄层下面是不同程度的结晶层和/或延展性层(Bednarik, 2015a;

2015b; 2015c; 2016a; 2016b; 2016c)。相似地，在风棱石上看到的光泽是由空气中的沙子和较小颗粒的轰击产生的，需要用摩擦学术语来解释。这些特征的大小范围从小型石制品到大型暴露基岩，在干旱环境中尤为常见；它们也是动能变质（KEM）的成果。

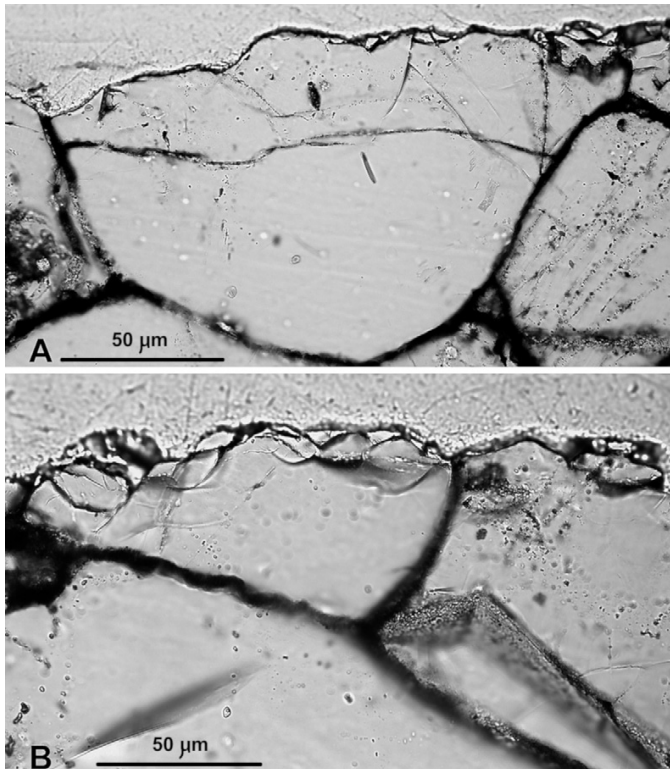


图7：扫描电子显微镜观察到的两个石英颗粒薄片，其表面被河流推进的碎屑所截断。看起来非常光滑的表面是严重受损的颗粒（由RGB拍摄）

然而，所有这些地质现象都没有得到很好的探索，因为到目前为止，地质学和摩擦学之间的关系一直被严重忽视。摩擦学在地质学中的其他应用还有待探索，而摩擦学在考古学和岩画科学中的应用至今仍是未知数。其他类似的动能变质（KEM）情况还有待于在发震断层摩擦和断层镜像形成等现象中继续探索。断层是岩体中由于岩石相对位移所形成的平面断裂或不连续。在非常大的范围内，这样的断层是沿板块之间边界的板块构造力作用的结果。即使是在毫米级，断层也发生在小得多的范围内。活动断层中的滑动会导致纳米颗粒改性岩石的薄层形成强反射或镜面滑动面。这种断层岩已经从许多不同的岩石学文章中得到报道并且有理由认为，它们释放的大量动能是形成这些特殊构造岩地层的原因。

简而言之，动能变质（KEM）现象在地质中非常普遍，但直到现在还没有被正确理解。它们可以被定义为近地表岩层对强烈动能作用的反应，以及岩石结构的摩擦学改性，使其更能抵抗变形、压缩和侵蚀。为了理解其形成过程的自然机理，我们可以将其理解为包括三个阶段，反映了能量作用的强度和持续时间。材料的最大变化发生在接触面上，其效果随着深度的增加趋于减小。在达拉奇-查丹的凹穴14A中，在其第3阶段的左右边缘均发现了变形，而上下边缘的变形相对较少，这意味着施加在那里的能量较少。尽管如此，这款凹穴仍是迄今为止在世界任何地域中，发现的最密集的动能变质（KEM）薄层。这是非常重要的一点，因为当表面受到冲击时，它的抵抗力增强，变得越来越难以进一步变形或延展化。这意味着凹穴制作者锤击它的表面次数越多，通过增加其深度而产生变形的效果就越弱。似乎有一个点，凹穴底部不会进一步变形，能量会消散到更深的岩石中。凹穴14A可能非常接近于平衡的那个点：它需要被定义为世界上已知的动能变质（KEM）薄层发展最极端的一个点——它是一个科学的参考点，就像绝对零度或巴黎的标准米一样。仅出于这个原因，达拉奇-查丹需要得到最有效的保护：它拥有一个普遍的科学参考点。

实际上，如果不是由动能变质（KEM）引起的构造岩层，达拉奇-查丹中可能很少有凹穴幸存下来。如果这些凹穴的内部会以与周围岩石表面相同的速度被侵蚀，那么大多数凹穴会变得无法区分。换言之，它们得以生存的主要原因，或许不是隐蔽的位置，而是保护它们的构造岩层，再加上它们较深的深度。值得注意的是，两个凹穴以南的复制

凹穴，被显微镜检验到了初始变化的阶段：平坦的表面斑块具有延展性的初期迹象。

4. 锤石的检查

为了寻找动能变质（KEM）发展的证据，我们还扫描了来自达拉奇-查丹挖掘的17块锤石。其中并没有表现为充分发展的构造岩。相反，磨损锤石刻面以其破碎的表面为特征，这是冲击和断裂疤痕，包括阶层剥落造成颗粒损失的证据。样本No. 541，是一块在地表以下47厘米深的厚重鹅卵石，在其几个自然表面上显示出微弱的动能变质（KEM）发展过程，且在其低半径的表面方向保存得最好。由于最初鹅卵石河道运输产生的<1阶段的层状结构已被受冲击的面层所截断，唯一在其冲击面上显示出动能变质（KEM）转换痕迹的检验锤石是530号锤石。在这个样本中可以观察到一种早期形式的动能转化（KEM）薄层，阶段<0.5。由冲击引起的颗粒剥落的效果最好用以下锤石编号来表示：207、220、448、449和514。

从达拉奇-查丹分层锤石的纵向分布可以明显看出，洞穴中凹穴的年代范围很广，因为在许多不同深度都发现了用于生产的工具。同样明显的是，将凹穴与影响它们中的大多数的大量剥落疤痕联系起来。不仅制造凹穴的时间很长，还需要提问的是，有多少早期制作的凹穴有可能保存到了现在，或者至少部分的保存下来？这是一个埋藏学的逻辑问题：作为一种现象类别，随着时间的推移，凹穴的数量不断增加，因为不断有人观察到早期的凹穴并采用/延续了制作凹穴的行为。同时，岩石表面因三种过程而塌缩：颗粒剥落、层流剥落和罕见的、导致大量石板被移除的滑坡事件（后者由于洞穴入口附近的日晒导致）。因此，可以合理地假设，由于这些侵蚀过程导致许多最早的证据丢失了，并且完全有可能只有一小部分从最早的制造中幸存下来。问题很简单，就是这些极具抵抗力的现象的埋藏临界时间点仍然未知，但可以假设它确实很早。未来的工作很可能会解决这个问题，最有可能通过参考岩石凹穴、动能变质（KEM）现象和风化过程之间的关系来解决。然而，这项工作仍处于起步阶段，就像所有岩画研究一样。

5. 阐查拉玛塔（CHANCHALA MATA）1号的岩石凹穴

作为这项研究的一部分，我们对紧邻伊恩德拉加尔山（Indragarh）的阐查拉玛塔山（Chanchala Mata）的一个地点的动能变质（KEM）凹穴进行了更仔细的检查。虽然不是达拉奇-查丹的一部分，而且比那个洞穴中的凹穴年轻得多，但它们与凹穴的研究有关，并且距离达拉奇-查丹的洞穴只有300m。凹穴遗址距分隔两座山丘的古河道约120m，并且它出现在一个其它带有凹穴的群组之中——其中没有一个显示含有动能变质（KEM）薄层。

该遗址由一个板上有16个呈双排排列凹穴的水平面板组成（图8）将他们由西向东进行编号，最后两个不含构造岩（表1）。凹穴编号3的西北象限有一个大的清楚的石英颗粒，长720μm，最宽处宽530μm。它带有一个扁平、受冲击的刻面，与周围动能变质（KEM）层的平坦表面相齐平，但被离开的物质（硅质胶体）所分隔开。刻面的圆形边缘可能会被误认为是指向中全新世的微衰变，但是这样的年龄似乎与这些源于凹穴底部上动能变质（KEM）而产生的剥落物的观察结果相矛盾，即过程是由外向内的。通常，晶粒以150 μm和300μm之间的部分为主。所有14个带有构造岩的凹穴都被一个明显侵蚀的表面所包围，该表面已经塌缩了几毫米。凹穴1号也具有大颗粒，但这超出了明确的动能变质（KEM）区域，并且它是否包含在凹穴区域内是值得怀疑的。令人感兴趣的还有12号凹穴，与所有其他动能变质（KEM）凹穴相比，它具有受损的构造岩层中心区域。这可能是由于KEM影响的参与，也可



图8：阐查拉玛塔1号遗址（Chanchala Mata 1）的16个双排排列的凹穴，大部分带有浅色的动能变质（KEM）薄层，它们被从右到左编号（由RGB拍摄）

表1: 阐查拉玛塔 (Chanchala Mata) 1号遗址的16个动能变质 (KEM) 凹穴

Cu-pule No.	Diameter N-S, in mm	Diameter E-W, in mm	Depth in mm	KEM cover %
1	53	49	6.1	90
2	51	49	6.5	80
3	48	47	5.8	75
4	48	52	6.0	70
5	50	47	5.1	70
6	42	51	4.9	65
7	47	50	6.2	65
8	48	48	5.4	65
9	44	44	6.1	90
10	42	43	4.9	65
11	46	46	7.0	85
12	40	42	5.1	50
13	43	41	2.5	80
14	54	46	4.8	70
15	46	42	2.8	0
16	44	40	5.0	0

能是由于底层基岩结构的脆弱性。后者更有可能, 除非影响发生在更接近制造凹穴的时间。

阐查拉玛塔 (Chanchala Mata) 1号遗址的动能变质 (KEM) 改造阶段确定如下: 大多数转化的无定形硅质胶结物一直保持在石英颗粒稳定期的完整高度, 并且这些胶结体很少丢失。这为相对较近的古迹提供支持。在3号凹穴中, 颗粒和转化的胶结体之间没有可见的间隙, 仅发生了有限的侵蚀。在这些凹穴上可见的改变被定义为1.8至2.0阶段, 在位置和单个凹穴之间具有可变性。

从表1可以明显看出, 该遗址的凹穴尺寸非常均匀: 直径都在40到54毫米之间, 除了一个无动能变质 (KEM) 的凹穴, 它们的深度仅在4.8到6.2毫米之间变化。每一个都保留了一半或更多的动能变质 (KEM) 层。目前尚不清楚为什么16号缺乏构造岩。

6. 结论

对达拉奇-查丹洞穴中的凹穴的微观研究表明了形成抗侵蚀的动能变质 (KEM) 表层(构造岩层)对于保护这些凹穴的重要性。KEM (动能变质) 是一种首先在凹穴中观察到摩擦学现象。达拉奇-查丹包含目前已知的世界上动能变质 (KEM) 特征最极端的发展, 表现为北墙上的14A号凹穴。其表层的特点是石英岩全部转化为完全结晶的石英。

本研究还提出达拉奇-查丹的凹穴能够长久生存的主要原因是保护它们的构造岩层, 以及它们的深度。虽然凹穴底部仍然保存完好, 但周围的岩石板块经历了广泛的颗粒和层状剥落, 随着时间的推移, 许多(如果不是大多数的话)凹穴的深度已经减少。因此, 如果它们变得更浅, 它们可能会由于剥落而被擦除, 同时它们的构造岩层的厚度是它们深度的函数。因此, 凹穴深度、构造岩厚度和风化过程之间的相互作用是理解这些现象以及潜在古迹的关键。

这项研究证实了洞穴中的凹穴是在漫长时间内产生的, 证实了用于生产岩石凹穴的锤石来自许多不同的沉积层这一考古发现。因此, 具有最完整动能变质 (KEM) 层的凹穴很可能是在该地点保存最完好的、最古老的凹穴之一。

最后, 本研究还考虑了一些回收的锤石的情况, 并考察了附近的一个距离洞穴几百米的露天凹穴遗址。

致谢

我们感谢新德里的印度历史研究委员会和堪培拉的澳大利亚-印度委员会对这个项目的支持。

参考文献

- Bednarik, R.G., 1993. Palaeolithic art in India. *Man and Environment*, 18(2), Pp. 33-40.
- Bednarik, R.G., 1994. A taphonomy of palaeoart. *Antiquity*, 68(258), Pp. 68-74.
- Bednarik, R.G., 1998. The technology of petroglyphs. *Rock Art Research*, 15(1), Pp. 23-35.
- Bednarik, R.G., 2000. Age estimates for the petroglyph sequence of Inca Huasi, Mizque, Bolivia. *Andean Past*, 6, Pp. 277-287.
- Bednarik, R.G., 2012. The use of weathering indices in rock art science and archaeology. *Rock Art Research*, 29(1), Pp. 59-84.
- Bednarik, R.G., 2015a. The tribology of cupules. *Geological Magazine*, 152(4), Pp. 758-765.
- Bednarik, R.G., 2015b. Kinetic energy metamorphosis of rocks. In B. Veress and J. Szigethy (eds), *Horizons in Earth Science Research*, 13, Pp. 119-134. Nova Science Publishers, New York.
- Bednarik, R.G., 2015c. The kinetic energy metamorphosis of petroglyphs. *Purakala*, 25, Pp. 5-16.
- Bednarik, R.G., 2016a. The tribology of petroglyphs. In R. G. Bednarik, D. Fiore, M. Basile, G. Kumar and Tang H. (eds), *Paleoart and materiality: the scientific study of rock art*, Pp. 171-185. Archaeopress Publishing Ltd, Oxford.
- Bednarik, R.G., 2016b. The science of cupules. *Archaeometry*, 58(6), Pp. 899-911.
- Bednarik, R.G., 2016c. Forensic science of cupules. *Rock Art Research*, 33(1), Pp. 49-64.
- Bednarik, R.G., 2017. Scientific investigations into Saudi Arabian rock art: a review. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 17(4), Pp. 43-59.
- Bednarik, R.G., 2019. *Tribology in geology and archaeology*. Nova Science Publishers, New York.
- Bednarik, R.G., Kumar, G., Watchman A. and R. G. Roberts 2005. Preliminary results of the EIP Project. *Rock Art Research*, 22(2), Pp. 147-197.

- Benn, D.I. and Evans, D.J.A., 2010. *Glaciers and glaciation*. Hodder Education, London.
- Iverson, N.R., 1991. Morphology of glacial striae: implications for abrasion of glacier beds and fault surfaces. *Geological Society of America Bulletin*, 103, Pp. 1308-1316.
- Kumar, G., 1996. Daraki-Chattan: a Palaeolithic cupule site in India. *Rock Art Research*, 13(1), Pp. 38-46.
- Kumar, G., Bednarik, R.G., Pradhan A., and Krishna R., 2016. The stone tools from Daraki-Chattan Cave — part 1. *Purakala*, 26, Pp. 25-64.
- Kumar, G. and Krishna, R., 2014. Understanding the technology of the Daraki-Chattan cupules: the cupule replication project. *Rock Art Research*, 31(2), Pp. 177-186.
- McBride, E.F., 1989. Quartz cement in sandstones: a review. *Earth-Science Review*, 26(1-3), Pp. 69-112.
- Siman-Tov, S., Aharonov, E. Boneh Y. and Reches Z., 2015. Fault mirrors along carbonate faults: formation and de-struction during shear experiments. *Earth and Planetary Science Letters*, 430, Pp. 367-376.
- Siman-Tov, S., Stock, G.M., Brodsky E.E., and White J.C., 2017. The coating layer of glacial polish. *Geology*, 45 (11), Pp. 987-990.
- Verberne, B.A., Plümer, O., e Winter D.A.M., d and Spiers C.J., 2014. Superplastic nanofibrous slip zones control seismogenic fault friction. *Science*, 346, Pp. 1342-1344.

