

DOI: 10.16359/j.cnki.cn11-1963/q.2015.0034

热处理对水洞沟遗址石器原料力学性能的影响

邵亚琪¹, 郇勇¹, 代玉静¹, 周振宇^{2,3}, 高星², 杨海陞¹

1. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京 100044; 3. 中国社会科学院考古研究所, 北京 100071

摘要: 宁夏水洞沟遗址的发现首次证实了旧石器时代东亚古人类的热处理行为。本文通过压缩实验和 XRD(X 射线衍射)检测,对宁夏水洞沟遗址区采集的白云岩石料热处理前后的力学性能进行了定量研究。结果表明,经过 450 °C 热处理的白云岩石料材质更加均匀,硅质含量减小、钙质含量增加,抗压强度下降 31%,最大应变提高 27%,在应力-应变曲线上出现了明显的锯齿状波动现象。这些变化降低了打击石料所需的力度,使石料易于产生多次开裂,不容易发生一次性灾变破坏,为古人类调整打击点、打击方向和力度创造了机会,从而降低了打制难度,提高了石器的制作质量和效率。

关键词: 水洞沟; 旧石器时代; 热处理; 石器; 力学性能

中图分类号: K871.11 ; 文献标识码: A ; 文章编号: 1000-3193(2015)03-0330-08

Influence of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Raw Stones Collected from the Shuidonggou Site

SHAO Yaqi¹, HUAN Yong¹, DAI Yujing¹, ZHOU Zhenyu^{2,3},
GAO Xing², YANG Haisheng¹

1. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190;
2. Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins of Chinese Academy of Sciences, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100044; 3. Institute of Archaeology, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100710

Abstract: The Shuidonggou site in Ningxia Province shows for the first time confirmed existence of heat treatment in the East Asian Paleolithic. In this paper, quantitative study about the mechanical properties was conducted on dolomitic stones from the Shuidonggou site through compression tests and XRD (x-ray diffraction). The results showed that after the stones were heated at 450°C, raw materials became more homogeneous with a decrease of SiO₂

收稿日期: 2014-03-08; 定稿日期: 2015-02-10

基金项目: 国家自然科学基金 (11372323), 中国科学院仪器设备功能开发技术创新项目和中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05130202) 资助。

作者简介: 邵亚琪 (1990-), 女, 中国科学院力学研究所硕士生, 主要从事力学实验技术研究。

通讯作者: 郇勇 (1975-), 男, 高级工程师, 主要从事力学实验技术研究。E-mail: huany@lnm.imech.ac.cn

Citation: Shao YQ, Huan Y, Dai YJ, et al. Influence of heat treatment on the mechanical properties of raw stones collected from the Shuidonggou site [J]. Acta Anthropologica Sinica, 2015, 34(3): 330-337

and an increase of calcium content. Correspondingly, a 31% decrease of the average value of compression strength was observed, along with a 27% increase of the average value of maximum strain. Zigzag phenomena occurred in stress-strain curves through intermittent cracking of the stone. These transformations led to less knapping force and more opportunities to adjust knapping directions, and consequently reduced knapping difficulties. Through heat treatment, the quality and production efficiency of stone improves.

Key words: Shuidonggou site; Paleolithic; Heat treatment; Stone artifact; Mechanical properties

1 前言

制造并使用石器是人类演化史上具有里程碑意义的事件。石器的使用使古人类有可能获取更多种类食物，提高了生存几率。考古研究发现，古人类在打制石器过程中逐渐学会利用火对石料进行一定的热处理，从而改变石料的加工性能^[1]。热处理技术代表了古人类对石料的深度利用，是现代人重要的行为特征之一。

目前发现人类最早有目的地用火对石料进行热处理是在南非南部海岸的 Pinnacle Point 遗址，在该遗址中发现的经过热处理的石制品表明人类早在十几万年前就开始有目的地对石料进行热处理并已经熟练掌握了针对硅质岩类进行系统化的热处理以达到改变石料性能的技术^[2]。除上述区域外，美洲大陆、西伯利亚、印度、巴基斯坦、阿富汗等地区也都发现了热处理行为^[3,4]。2003 至 2010 年宁夏水洞沟遗址出土的石制品经考古研究证实经过热处理，还发现了数量较多的火塘遗迹及相关用火遗物，填补了此前东亚地区未发现存在热处理石制品的空白。此项发现为探索更新世晚期中国北方地区古人类行为模式，以及现代人行为在中国的出现及其表现形式提供了重要证据^[1]。

考古研究发现，经过热处理的石料一般会发生颜色改变^[1]。但在当时的物质条件下，古人类更关心石器切割加工食物的使用价值。热处理石制品的出现以及流传必然和其使用性能的改变有关。已有研究发现，经过热处理的石料剥取石叶和细石叶最多能提高剥片效率 4 到 5 倍^[5]。热处理后剥取的石片形态趋于规整，长度增加，窄薄型石片比例增加，同时石片延展更加平直，弯曲程度降低，羽翼状远端的比例也显著提高，更重要的是，石片远端崩断几率降低，石片边缘更加锋利，剥片过程中对石料破裂方向、应力延伸距离控制更加精准，打击石料所需的力度降低，更易在圆形石料上产生工作面等。

有关热处理对石料力学性能的影响机理，已有研究从岩相、矿物成份和结构分析的角度给出了解释^[4,6-8]，指出热处理引起石料打制性能改变的机理主要是改变内部材质的结晶情况。然而，目前对热处理引起石料力学性能改变的定量研究尚未见报道，主要原因有以下两点：其一，古人类选择的石料多为个头较小的砾石（容易获取，易于搬运），材质掺杂明显，成份不一，进行力学性能研究时样品制备困难；其二，目前对岩石工程领域涉及的热处理温度一般在 800 以上^[9,10]，而对旧石器时代的火塘加热技术来说，温度很难保持在 600 以上。

基于旧石器时代古人类当时的客观条件，热处理究竟使原始石料的力学性能发生了

怎样的改变？本文将以 2010 年宁夏回族自治区水洞沟遗址采集的砾石作为研究对象，通过岩石压缩实验对石料力学性能的改变给出定量解释。

2 样品制备

本文石料取自宁夏回族自治区的水洞沟遗址 12 号地点。遗址位于银川盆地东部边缘，毛乌素沙地西南缘，宁夏回族自治区首府银川市以东 28 km，行政区划属灵武市临河乡（图 1）。地理坐标东经 106°29'，北纬 38°21'，海拔 1200m。水洞沟遗址剖面自 1984 年以来，经过多次测年已确定 12 号地点主要文化层的时代为距今 1.1 万年左右^[11-13]。调查发现遗址区各级阶地中都发育有厚薄不等的砾石层，砾石层比较松散，砾石磨圆度高。调查采样还发现砾石层包含了水洞沟古人所使用的大部分石料种类，推测其为水洞沟遗址石器原料产地^[1]。

水洞沟遗址已经发现了极为丰富的石制品，出现了包括细石叶技术、石叶技术在内的 3 种不同类型的石器工业；石制品原料较为多样，包括燧石、硅质白云岩、石英砂岩、石英岩、硅质灰岩等；遗址区内还发现了数量较多的火塘遗迹及相关用火遗物。表明水洞沟古人类有足够的用火、控制火的能力^[14-17]，这使得热处理成为可能。

根据对遗址出土标本的整理，本文研究样品为 2010 年在 SDG12 号地点附近的 2, 3 级阶地出露较好的砾石层中采集的砾石（图 2），其主要成份为硅质白云岩，这也是水洞沟遗址石制品的主要原料类型^[1]。

为模拟古人类采用火塘加热石材的过程，先在水洞沟遗址区构筑了户外火塘（图 3），使用 TM902C 测温仪采集分析火塘在热处理过程中温度的分布和变化等参数，然后在实验室用高温炉按照采集的火塘加热参数对石料进行热处理^[18]。从热处理前、后的石料上

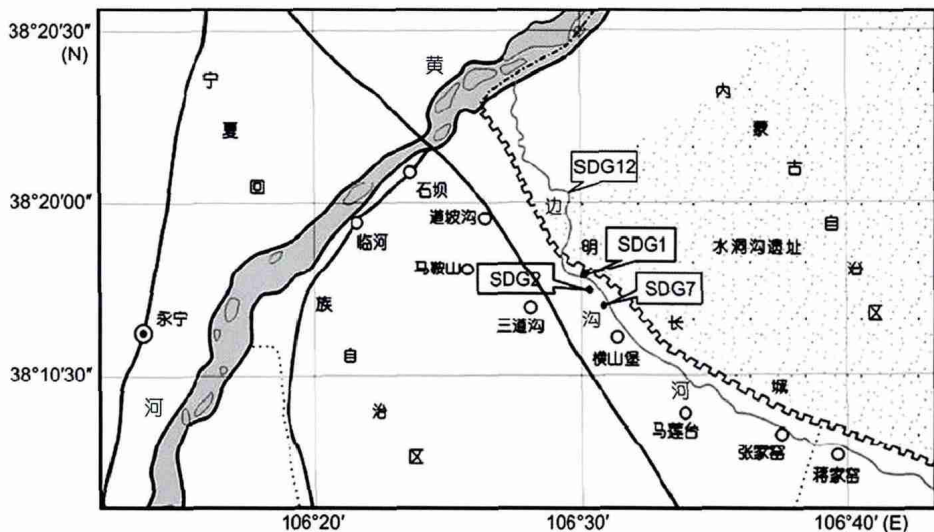


图 1 宁夏水洞沟遗址地理位置图^[1]
Fig.1 Geographic location of SDG site^[1]

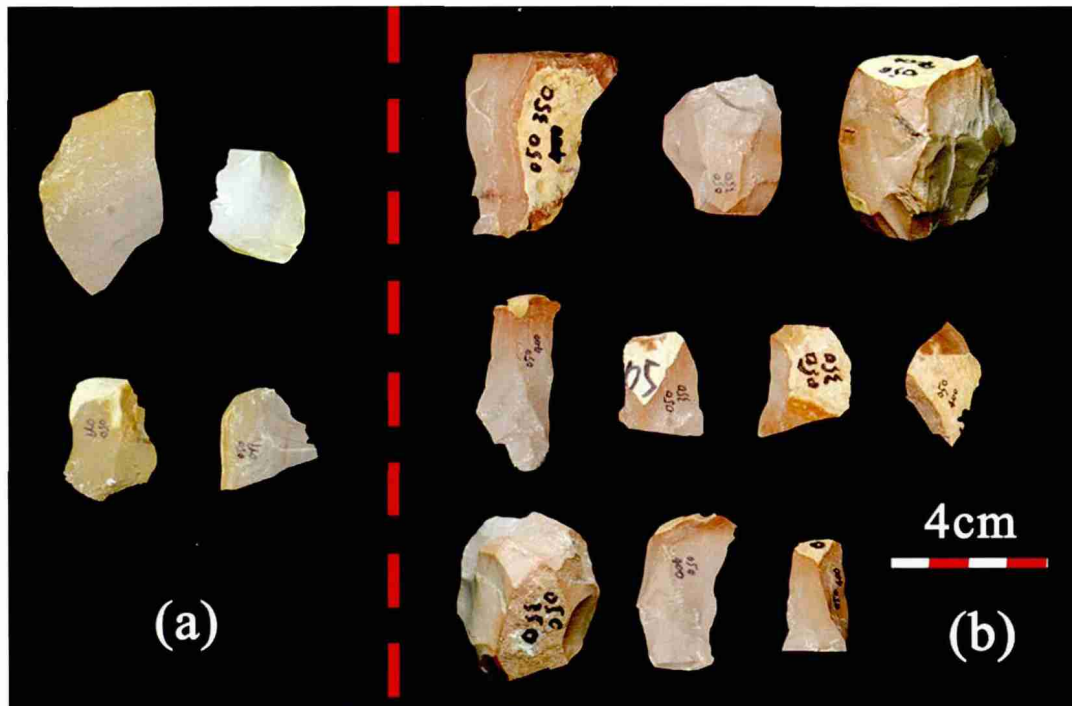


图 2 水洞沟遗址采集的砾石 : (a) 热处理前, (b) 热处理后
Fig.2 Pebbles collected at SDG site (a) before and (b) after heat treatment



图 3 在水洞沟遗址人工模拟户外火塘
Fig.3 Outdoor hearths constructed at SDG site

切取出近似立方体样品 (横截面尺寸 15mm×15mm , 高约 25mm) , 进行压缩实验。样品分为未热处理、450 和 550 热处理共 3 组 , 每组包含 4 个样品。

3 力学性能测试与材质检测

岩石的破坏要经历微裂纹的萌生、发育、成核等一系列演化过程^[19] , 这一过程可以通过压缩应力 - 应变曲线表现出来。本文使用 MTS810 材料试验机对热处理前后的石料样品的力学性能进行了测试。如图 4 所示 , 该试验机采用液压驱动 , 通过应变式力传感器测量力 , 采用应变式位移传感器 COD 测量上下压盘之间的位移作为岩石变形量。由力和变形关系按照式 (1) 得出应力 σ 和应变 ε 关系。

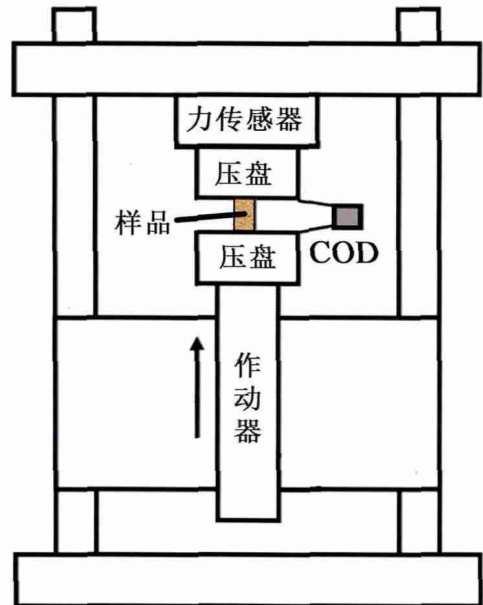
$$\begin{cases} \sigma = \frac{F}{A} \\ \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中 , F 为样品受到的压缩力 , A 为样品横截面积 , l_0 为样品原始高度 , l 为样品变形。

此外 , 本文对热处理前后的白云岩样品进行了 XRD (X 射线衍射) 检测 , 考察材质变化和力学性能变化之间的内在联系。



(a)



(b)

图 4 岩石压缩实验装置 : (a)MTS810 材料试验机 , (b) 实验示意图

Fig.4 Setup of stone compression tests. (a) MTS 810 material testing machine, (b) schematic diagram

4 实验结果与分析

4.1 应力 - 应变曲线

图 5 为白云岩石料样品压缩测试结果。未经过热处理的白云岩石料样品，力学性能离散性较大，这和水洞沟遗址石料材质不够细腻、不够均匀有关。而经过 450 和 550 热处理后，力学性能离散性明显缩小。

此外还发现，经过热处理后的样品，应力 - 应变曲线呈现锯齿状波动上升现象。这说明压缩过程中，样品内部出现了局部化的损伤破坏，呈现多次开裂现象（裂纹扩展中受颗粒阻碍停止，新的裂纹继续萌生和扩展，再受阻碍而停止。周而复始，直到某些新萌生的裂纹未受阻碍而扩展至整个样品，导致最终灾变破坏），延缓了最终灾变破坏的发生。在打制石器过程中，这种多次开裂特性为古人类调整打击点、打击方向和打击力度创造了机会。

4.2 抗压强度和最大应变

由于古人类采集的砾石材质离散性较大，因此力学测试结果存在较大离散性。图 6(a) 为白云岩石料热处理前后抗压强度误差棒图。可以看出，未经热处理的白云岩石料抗压强度高，但离散性大，说明石料内部成份和颗粒不均匀；经 450 热处理后离散性明显降低，说明热处理可以提高石料材质的均匀性。抗压强度下降 31%（由热处理前的 147MPa 分别下降至 101MPa），仍保持在可以切碎食物的较高水平。而 550 热处理后抗压强度下降 67%（由热处理前的 147MPa 下降至 49MPa），将导致石器切碎食物能力下降。同时，离散性较 450 热处理后有所增大。因此推断，450 是水洞沟白云岩石料更适合的热处理温度。

岩石样品在压力作用下发生的最大应变在一定程度上可以反映样品的延性。图 6(b) 为白云岩石料热处理前后最大应变误差棒图。可以看出，经过经 450 热处理后，最大应变提高 27%（由热处理前的 0.89% 上升至 1.13%），延性有所改善，离散性缩小。经过经 550 热处理后，最大应变提高 38%（由热处理前的 0.89% 上升至 1.23%），但离散性却明显增大。由于古人类打制石器是经多次打击完成，因此延性好的石料可以为古人类调整打击点、打击力度和方向创造更多机会，更易于剥取长石片。

4.3 石料材质分析

XRD 检测结果如图 7 所示。经过 450°C 和 550°C 热处理后的白云岩样品的 SiO_2 衍射峰明显减弱， $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 衍射峰明显增强，表明石料硅质含量减小、钙质含量增加。由于 SiO_2 强度较大，其含量的减小使得石料强度降低，同时钙质含量的增加会使石料变脆，容易出现裂纹。这种材质上的变化和压缩实验中发现的抗压强度下降、延性提高、应力 - 应变曲线出现锯齿状波动现象吻合，从而影响石料的打制性能。

4.4 人工模仿石器打制

通过考古专业人员模仿打制过程发现，用 450 热处理的白云岩石料打制的石器，形态趋于规整，剥取的石片长度增加，石片远端崩断几率降低，石片边缘更加锋利。打制过程中对裂纹开裂方向、延伸距离更易于控制，打击力度降低。而 550 热处理的石料，会

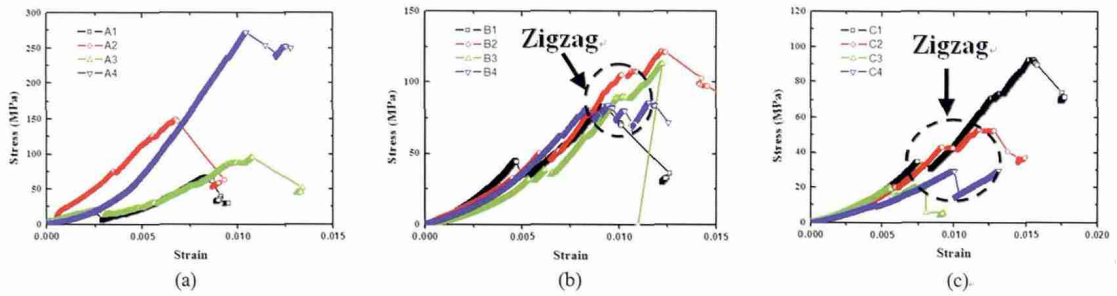


图 5 白云岩样品经热处理后应力 - 应变曲线出现明显的锯齿状波动上升现象

Fig.5 Stress-strain curves of dolomite specimens before and after heat treatment

(a) 未经热处理 (unheated) ; (b)450 热处理 (heated at 450°C) ; (c)550 热处理 (heated at 550°C)

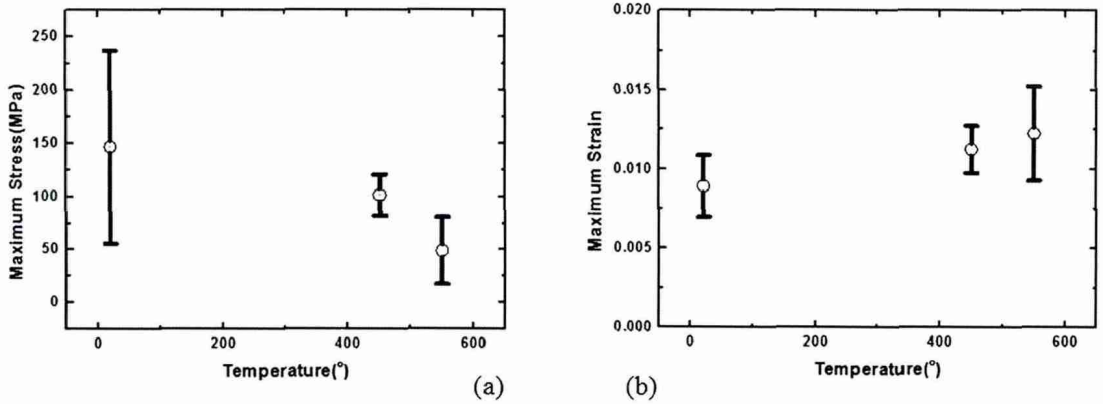


图 6 白云岩样品热处理前后抗压强度和最大应变的变化情况。经 450 和 550 热处理后，(a) 抗压强度分别下降 31% 和 67%，(b) 最大应变分别提高 27% 和 38%。

Fig.6 Change of (a) maximum stress and (b) maximum strain with heat treatment temperatures. After heated at 450°C and 550 °C, maximum stress decreased by 31% and 67% , and moreover, maximum strain increased by 27% and 38% respectively.

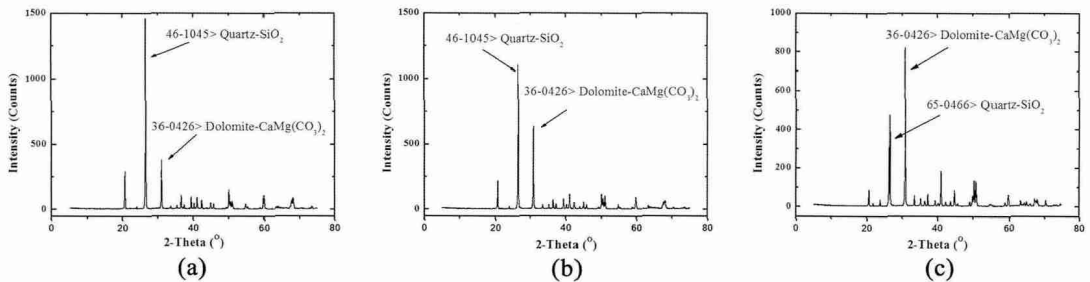


图 7 白云岩样品 XRD 检测结果

Fig.7 XRD results of dolomite specimens at different heat treatment temperatures

(a) 未经热处理 unheated; (b)450°C 热处理 heated at 450°C; (c)550°C 热处理 heated at 550°C

产生大量肉眼可见的粗颗粒，导致破裂面明显粗糙，甚至很难剥取石片，损害石料的打制性能^[18]。这和压缩试验中石料力学性能的变化吻合。

5 总 结

本文通过石料压缩实验和 XRD 材料分析手段，对宁夏水洞沟遗址出土的白云岩石料热处理前后的力学性能和材质进行了研究。发现经 450 °C 热处理的白云岩石料材质更加均匀，硅质含量减小、钙质含量增加，抗压强度下降 31%，最大应变提高 27%，并且在应力-应变曲线上出现了明显的锯齿状波动现象。这些变化降低了打击石料所需的力度，使石料产生多次开裂，不容易发生一次性灾变破坏，为古人类调整打击点、打击方向和力度创造了机会，从而降低了打制难度，提高了石器的制作质量和效率。而经 550 °C 热处理后，石料会产生大量肉眼可见的粗颗粒，打制性能下降；同时，抗压强度下降 67%，石器切碎食物能力下降。因此热处理温度不宜过高。

参考文献

- [1] 周振宇, 关莹, 高星, 等. 水洞沟遗址的石料热处理现象及其反映的早期现代人行为 [J]. 科学通报, 2013, 58: 815-824
- [2] Brown KS, Marean CW, Herriés A, et al. Fire as an engineering tool of early modern humans[J]. Science, 2009, 325: 859-862
- [3] Duttine MP. Effects of thermal treatment on TL and EPR of flints and their importance in TL-dating: Application to French Mousterian sites of Les Forets (Dordogne) and Jiboui (Drome)[J]. Radiat Meas, 2005, 39(4): 375-385
- [4] Domanski M, Webb J. A review of heat treatment research[J]. Lithic Tech, 2007, 32: 153-194
- [5] Inizan MI, Lechevallier M, Plumet P. A technological marker of the penetration into North America: Pressure microblade debitage, its origin in the Paleolithic of North Asia and its diffusion[J]. Materials Research Society Symposium Proceedings, 1992, 267: 661-681
- [6] Patrick S, Guillaume P, Aneta S, et al. Heat treatment in the South African Middle Stone Age: Temperature induced transformations of silcrete and their technological implications[J]. Journal of Archaeological Science, 2013, 40:3519-3531
- [7] Schmidt P, Masse S, Laurent G, et al. Crystallographic and structural transformations of sedimentary chalcedony in flint upon heat treatment[J]. Journal of Archaeological Science, 2012, 39(1): 135-144
- [8] 陈虹, 沈辰. 史前石制品的热处理研究 [J]. 江汉考古, 2009(2): 93-103, 107
- [9] 谢卫红, 高峰, 谢和平. 微观尺度下岩石热变形破坏的实验研究 [J]. 实验力学, 2005, 20(4): 628-634
- [10] 张连英, 茅献彪, 卢爱红. 高温作用下岩石力学 性能的实验研究 [J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(2): 157-162
- [11] 高星, 李进增, Madsen DB, 等. 水洞沟的新年代测定及相关问题讨论 [J]. 人类学学报, 2002, 21: 211-218
- [12] 刘德成, 王旭龙, 高星, 等. 水洞沟遗址地层划分和年代测定新进展 [J]. 科学通报, 2009, 54(19): 2879-2885
- [13] 高星, 袁宝印, 裴树文, 等. 水洞沟遗址沉积 - 地貌演化与古人类生存环境 [J]. 科学通报, 2008, 53(10): 1200-1206
- [14] Madsen DB, Li J, Brantingham PJ, et al. Dating Shuidonggou and the Upper Paleolithic blade industry in North China[J]. Antiquity, 2001, 75:706-716
- [15] 高星, 王惠民, 刘德成, 等. 水洞沟第 12 地点古人类用火研究 [J]. 人类学学报, 2009, 28(4): 329-336
- [16] 高星, 裴树文. 中国古人类石器技术与生存模式的考古学阐释 [J]. 第四纪研究, 2006, 26: 504-513
- [17] 高星, 张晓凌, 杨东亚, 等. 现代中国人起源与人类演化的区域性多样化模式 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 40: 1287-1300
- [18] 周振宇. 水洞沟遗址石制品热处理实验研究 [D]. 北京: 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 2011, 1-226
- [19] 郝圣旺, 孙菊. 岩石变形演化诱发灾变破坏过程的同步实验观测 [J]. 实验力学, 2008, 23(1): 89-95