

# 热处理石料的力学打制实验研究

周振宇

关键词：旧石器时代 热处理技术 石料力学性能 打制实验

KEYWORDS: Paleolithic Age Heat Treatment Technology Mechanical Properties of Stone Materials Percussion Experiments

ABSTRACT: Heat treatment technology is one of the important characteristics of the behaviors of the early modern humans, which reflected the advanced utilization of the stone materials by the prehistoric people. Through the percussion experiments, the researchers found that the heat treatment could improve percussion effect and reduce accidents, and raise the quality of the produced flakes. The suitable temperature of the heat treatment is about 400°C, and the mechanical properties of the stone materials treated by suitable temperature were obviously improved. The experiment results matched the conclusions of the composition analysis, electron microscopic analysis and rock mechanical analysis to the same set of stone samples. Through the analyses and explorations to the percussion experiment of the heat-treated stone materials, this paper elucidated the influences of the heat treatment to the lithic industry, and explained how this technique played its role in the utilization and development of the materials and the processing and making of the stone implements.

## 前 言

旧石器时代考古学研究范畴内，热处理特指针对石料进行加热、保温、冷却处理改变石料的表面及内部结构，以满足古人类对原料质地、颜色、可用性等特征的要求。热处理技术反映了古人类对石料的深度利用，是旧石器时代晚期人类行为中重要的因素之一。对热处理行为的判断与研究可以帮助我们了解古人类对石料的选择与认知能力、石器打制技术的发达程度、利用与开发资源的能力。目前发现人类最早对石料进行有目的性的热处理是在南非南部海岸的品纳科遗址（Pinnacle Point），在该遗址距今16万年的文化层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对石料进行有目的性的热处理。该遗址距今7.2万年的上部文化层中又出土了更为丰富的热处理石制品，这表明此时人类已熟练掌握了对硅质岩类进行系统化的热处理以改变石料性能的技术<sup>[1]</sup>。大量材料的发现表明，至旧石器时代晚期，热处理技术已经分布于欧洲大陆、北美大陆、亚洲等世界大部分地区，其中南亚的印度、巴基斯坦，中亚的阿富汗和西亚等地区都发现了热处理行为<sup>[2]</sup>。

热处理技术作为旧石器时代古人类提高石器制作工艺水平的代表性技能，一直以来倍受国际学术界的重视，在已经开展40余年的研究工作中积累了丰富的成果。但是，我国的史前热处理技术研究长期处于空白阶

作者：周振宇，北京市，100710，中国社会科学院考古研究所。

段，由于我国旧石器时代石料的特点及热处理研究的某些技术手段本身存在局限性，考古学家一直没有在考古遗存中辨别出热处理行为及相关遗物。直到2012年，有学者确定水洞沟遗址部分出土石制品经过热处理，首次确认了东亚地区存在石料热处理行为，这项发现为我们探索更新世晚期中国北方地区旧石器时代晚期人类行为的扩散、演化及模式提供了重要证据，既为相关人群在亚洲的扩散与演化研究开拓了新视角，也为相应的人类行为的传播研究提供了重要材料<sup>[3]</sup>。为深入开展水洞沟遗址出土热处理石制品的研究，我们开展了大量实验考古工作，并首次将X射线衍射技术、非线性力学研究手段引入到旧石器考古学研究中，填补了相关研究领域的空白。通过对热处理石制品扫描电镜观察以及X射线衍射分析（XRD）、X射线荧光分析（XRF）和岩石力学分析，研究发现，石料经过热处理后表现出利于打制的特点<sup>[4]</sup>。

石器打制是以一个坚硬的物体（多为岩石）为施力主体，对石料施以宏观尺度上瞬间的作用力，使受力岩石产生破裂的过程。人是打制过程的实施主体，具有一定的主观能动性。通过X射线衍射分析和岩石力学测试得到的一系列试样参数，我们发现热处理技术对石料力学性能的改变主要表现在降低强度、提高延伸性和脆性，并在一定程度上提高石料的质地均匀度。但是实验室数据中石料性能的提升如何反应到石器制作过程中，需要模拟打制实验加以证明。本文将通过对热处理石料打制实验结果的分析与探讨，阐释热处理对石器制作的影响。

## 一、实验设计

实验考古是考古学研究的基本方法之一，它根据研究的目的，尽可能排除外界影响，突出主要因素，并利用一些专门的仪器设备，人为地改变、控制或模拟考古研究对象，使研究的考古对象放大或再现，从而探

寻其中的规律，解释古人类行为。由于实验过程中可能会受到主观因素影响，偏差、谬误不可避免，存在一定局限性。鉴于此，透彻理解考古材料、明确实验目的、合理设计实验过程是提高实验研究准确性的有效途径。

本文打制实验的目的是了解经过热处理石料和未经热处理石料所打制石制品的特征及其异同，验证石料经热处理后力学性能的改变对石制品打制的影响，最终了解热处理技术对石器制作工艺的影响。

鉴于以上目的，本文打制实验的主要思路应该是在尽量弱化技术、工艺因素对打制过程影响的基础上，尽可能突出石料特性对打制过程的影响。据此，实验过程设置以下条件。

1.打制实验应尽可能突出热处理对石料的影响，降低工艺、技术等因素在打制过程中的作用，因此实验以剥取石片为单一目的。

2.实验所使用的原料与水洞沟遗址出土石制品原料一致，选择裂隙少、质地均匀的石料以减少客观条件对实验结果的影响，打制石料的体积及形状尽量一致。

3.由同一实验者完成全部打制实验，以保证实验结果不会因不同打制者的技术水平、动作习惯、技术理念、体质条件等差别而受到影响。

4.全部使用硬锤锤击法剥片，石核台面均为切割机加工的平整面，全部打制实验使用一套工具完成。

5.采集实验产生的所有石制品，包括石核、石片、断块、碎屑等。

## 二、实验过程

本次实验所用的原料全部为采集自水洞沟遗址区的砾石。我们将挑选出的体积相当的砾石切割为大小相近的两半，一半进行热处理实验后打制，一半直接打制，二者的结

果相互比较(图一)。

打制实验工具所用石锤为采集自水洞沟的石英岩、石英砂岩砾石(图二),质地坚硬,具有平滑、圆钝的打击面且易于手握。石锤共6件,平均长65、宽46、厚30毫米,重143克。

按王春雪将实验者石器技术水平划分的四个等级<sup>[5]</sup>,本文实验由Ⅲ级实验者完成,在石核剥片和工具生产中的产品均按照预先设计进行,剥片和工具修理成功率较高,生产事故偶见。实验选择相对优质的白云岩和石英砂岩进行打制。实验共分四组,有10次打制过程,其中白云岩三组8次打制过程,石英砂岩一组2次打制过程。



图一 打制实验原料



图二 打制实验工具

白云岩三组实验的原料分别编号为050、201、199,其中050号包括原始石料、350℃热处理和400℃热处理石料3次打制过程;201号包括原始石料、300℃热处理和350℃热处理石料3次打制过程;199号包括原始石料和400℃热处理石料2次打制过程。石英砂岩编号为146,包括原始石料和550℃热处理石料2次打制过程。

实验前我们记录了原料的形态、尺寸、大小、重量、台面周长等信息。实验由两人完成,一人进行打制,另一人负责记录打制者的打制设计和打制事故发生的原因,并用影像记录实验全过程。实验者打制设计主要包括台面的选择、修理意图、剥取石片的方向、打击是否成功等方面。修理意图主要指实验者修理台面的构思。打制事故包括人为造成无法继续剥片和石料本身缺陷导致石料废弃。剥片结束后,将获取的石制品进行初步分类,按石核、石片、微片、断块、断片、碎屑等分类装袋,1次打制过程即完成。实验标本按原料类型编号,如201号未热处理标本记为“201-ori”,201号原料经过400℃热处理标本则记为“201-400”,以此类推。

### 三、实验结果

本次实验共获取10次打制实验的石制品,包括石核6件、石片233件、断块98件、断片254件、微片168件,以及2~5毫米碎屑和2毫米以下碎屑各10袋(附表一)。

1.石核 6件,其中5件为白云岩、1件为石英砂岩(图三)。皆为素台面石核,3件为中型(≥50毫米, <100毫米),3件为小型(≥20毫米, <50毫米),其中1件重量中等(≥25克, <100克),5件重量偏重(≥100克, <500克)。台面角介于75~110度之



图三 打制实验所获石核  
1.199-ori 2.146-ori 3.146-550 4.201-300 5.050-400  
6.050-350 7.201-350 8.199-400

间，其中石英砂岩石核台面角介于95~110度之间，白云岩石核台面角介于75~85度之间，不同原料间有明显差异，而原始石料与热处理石料石核台面角没有明显区别。4件白云岩石核剥片程度为重度，剥片范围在90%以上，而石英砂岩石核剥片程度均为中度，剥片范围都为40%。总体上看，热处理对石料性能的提升在石核上反映并不明显，而不同类型石料之间差异较大。这主要是因为热处理对石料性能的提升一般反映在石片等产出品上，石核作为剥片后的废弃品，所保留的相关信息较少。

2. 断块、断片和碎屑 断块、断片和碎屑的数量在每次实验产出石制品中一般占60%以上，最少的为050-400，占53%，最多为199-400，占83%，平均比例为68%。其重量比例在产出石制品中变异较大，最少的201-ori仅占4.8%，最多的199-400占64%，平均为28.3%。所有实验中，碎屑数量所占比例最高，大多为40%以上，但其重量是所有石制品类型中比例最低的。

整体看，断块、断片和碎屑在数量、重

量上主要表现出石料类型的差异，例如199号白云岩产出上述三种类型石制品，无论是热处理前还是热处理后，其数量和重量的比例都高于其他原料。

3. 石片 实验共获取石片233件，约占所有石制品的18%（图四）。本次打制实验的最终目的是获取有效石片，通过对石片的各项数据定性、定量分析可以直观反映出热处理对石料打制性能的影响。以下详细介绍050号及201号石料打制实验产出的石片（附表二；附表三）。

#### （1）050号白云岩

050-ori 共获取石片25件<sup>[6]</sup>，约占所有石制品的16%，其中1-3型石片2件、2-1型石片4件、2-2型石片16件、2-3型石片3件。微片27件，约占所有石制品的17%。其中5件石片可观察到唇，占20%；7件有半锥体，占28%；10件有锥疤，占40%；4件有波纹，占16%；仅1件有放射线。石片延展平直者19件，占76%；内卷3件，外翻1件，不平直者2件。石片远端形态以羽翼状为主，有12件，占48%。

25件石片中有9件纵轴截面呈弯曲状态，弯曲度最大值164.5度，最小值138.7度，平均值150.6度，标准差8.5度。仅有1件石片横轴截面呈弯曲状态，弯曲度为147.6度。

050-350 共获取石片41件，约占所有石制品的21%。其中2-2型石片14件、2-3型石片27件。微片23件，约占所有石制品的12%。28件石片可观察到唇，约占68%；仅4件可观察到半锥体，约占10%；18件有锥疤，约占44%；5件有波纹，约占12%；5件有放射线。石片延展平直者39件，约占95%，其余2件内卷。石片远端形态以羽翼状为主，有24件，约占59%。

41件石片中有4件纵轴截面呈弯曲状态，弯曲度最大值167度，最小值154度，平



图四 打制实验所获石片、微片、碎屑  
1.050-ori 2.050-350 3.146-550 4.201-300

均值163度，标准差6度。

050-400 共获取石片20件，占有石制品的20%。其中2-2型石片6件、2-3型石片14件。微片26件，占有石制品的26%。4件石片可观察到唇，占20%；所有石片均无半锥体；8件有锥疤，占40%；1件有波纹，占5%；1件有放射线。石片延展平直者18件，占90%，其余2件内卷。石片远端形态以羽翼状为主，有15件，占75%。

20件石片中有2件纵轴截面呈弯曲状态，弯曲度分别为155度和149度。

(2) 201号白云岩

201-ori 共获取石片12件，占有石制品的24%。其中2-2型石片11件、2-1型石片1件。微片8件，占有石制品的16%。3件石片可观察到唇，占25%；3件石片可观察到半锥体；5件有锥疤，约占42%；3件有波纹，占25%；所有石片都未观察到放射线。石片延展平直者10件，约占83%，其余2件内卷。石片远端形态以羽翼状为主，有5件，约占42%。

12件石片中有2件纵轴截面呈弯曲状态，弯曲度分别为147度和172度。

201-300 共获取石片40件，占有石制品的23%。其中2-2型石片15件，2-3型石片24件，1-1型石片1件。微片27件，占有石制品的15%。12件石片可观察到唇，占30%；8件可观察到半锥体，占20%；13件有锥疤，约占33%；6件有波纹，占15%；2件有放射线。石片延展平直者39件，约占98%。石片远端形态以羽翼状为主，有20件，占50%。

40件石片中有5件纵轴截面呈弯曲状态，弯曲度最大值166度，最小值138度，平均值155度，标准差12度。

201-350 共获取石片28件，占有石制品的24%。其中2-2型石片8件、2-3型石片20件。微片7件，占有石制品的6%。6件石片可观察到唇，约占21%；仅4件可观察到半锥体，约占14%；11件有锥疤，约占39%；4件有波纹，约占14%；3件有放射线，约占

11%。全部石片延展平直。石片远端形态以羽翼状为主，有11件，约占39%。

28件石片中仅有1件纵轴截面呈弯曲状态，弯曲度162度。

#### 四、分析与讨论

本次实验共获取各类石制品1325件，石片数量约占总数的18%，重量约占44%。如前文所述，本次打制实验的设计目的是获取石片，其他类型的石制品是打制过程中的副产物，因此石片最能反映热处理后石料剥片性能的变化，同时石核、断块、断片、微片和碎屑的形态特征不如石片明显，断块、断片等属于打制事故的产物。因此，本研究主要对石片进行讨论分析。

从石制品类型组合看，石料热处理前后区别不大，都以碎屑为主，石片、断片次之，断块和微片较少。不同石料之间石制品比例变化较大，050号和201号白云岩虽也以碎屑为主，但是石片比例较高。

从石片的尺寸看，热处理前后的石片变化不明显，但是，热处理后产出石片的长、宽、厚形态趋于规整，厚度更小。如050号白云岩经过350℃热处理后长度规整指数趋近于1，宽度、厚度规整指数降低明显，指数数值越低表明越规整。同样，201号白云岩经过300℃和350℃热处理后长度规整指数趋近于1，宽度、厚度规整指数降低，其中经过350℃热处理的石片更加规整（见附表二、三）<sup>[7]</sup>。同时，我们发现热处理石料产出的石片长宽比提高（表一），即石片趋向于变窄，此现象在050号白云岩350℃和400℃热处理石料上表现尤为明显，这是由于石料热处理后延伸性提高，石片剥离石核的顺应力延伸距离更远而导致。

热处理石料打制的石片台面尺寸较未经过热处理石料打制的石片明显增大（表二），白云岩和石英砂岩石料均表现出这种特点，但是经过550℃热处理的石英砂岩

表一 打制实验所获石片的长宽比

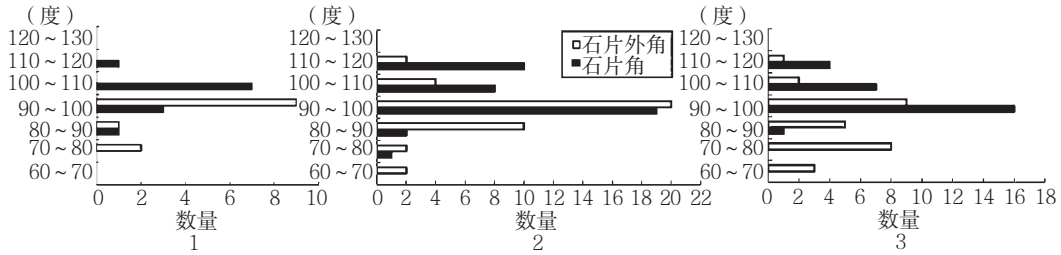
|         | 数量（件） | 极小值  | 极大值  | 均值   | 标准差  |
|---------|-------|------|------|------|------|
| 050-ori | 25    | 0.5  | 2.57 | 1.27 | 0.64 |
| 050-350 | 41    | 0.4  | 3.71 | 1.36 | 0.7  |
| 050-400 | 20    | 0.56 | 3.1  | 1.39 | 0.81 |
| 201-ori | 12    | 1.06 | 3.04 | 1.86 | 0.64 |
| 201-300 | 40    | 0.54 | 4.31 | 1.65 | 0.85 |
| 201-350 | 28    | 0.51 | 3.22 | 1.83 | 0.65 |
| 146-ori | 15    | 0.79 | 3.46 | 1.48 | 0.68 |
| 146-550 | 12    | 0.95 | 2.97 | 1.51 | 0.69 |

表二 打制实验所获石片的台面尺寸

|         | 数量（件） | 极小值（平方毫米） | 极大值（平方毫米） | 均值（平方毫米） | 标准差    |
|---------|-------|-----------|-----------|----------|--------|
| 050-ori | 25    | 1.54      | 132.82    | 24.6     | 31.62  |
| 050-350 | 41    | 0.77      | 302.84    | 37.63    | 58.79  |
| 050-400 | 20    | 3.6       | 160.55    | 32.75    | 43.91  |
| 201-ori | 12    | 0.6       | 57.63     | 15.06    | 15.56  |
| 201-300 | 40    | 1.8       | 164.28    | 21.24    | 31.28  |
| 201-350 | 28    | 0.29      | 109.35    | 21.45    | 29.64  |
| 146-ori | 15    | 4.8       | 505.75    | 154.09   | 134.27 |
| 146-550 | 12    | 31.5      | 419.42    | 159.06   | 146.37 |

和经过400℃热处理的白云岩增幅较小，经350℃热处理的白云岩增幅较大，这种现象可能与岩石经过热处理后抗压强度降低有关，强度降低、脆性增强导致同一打制者的同等力度会使得受力区域的破裂面积增大。热处理还可能导致石片台面角的变化，热处理前，白云岩石片台面角以100~110度为主且变异范围较大，热处理后台面角以90~100度为主，同时变异范围减小（图五）。我们知道，石片台面角反映了石核下一次剥片的角度，硬锤法剥片时，石核台面角过小与过大都会导致石核下一次的剥片难以进行。石核台面角过小，没有剥片角度，导致该边缘无法继续剥片；石核台面角过大，会提高剥取长石片的难度，难以进行连续剥片。只有当石核台面角稳定在一个合适的角度，才能保证石核的高利用率。因此石片角的变化反映了热处理能够提高石料的利用率。

热处理石料打制的石片纵轴截面弯曲的出现几率明显降低，050号白云岩经350℃和400℃热处理后，石片纵轴弯曲的比例从36%分别降至9%和10%，弯曲角度从平均150度增为160度。201号白云岩经过300℃和350℃



图五 201号白云岩标本石片角分布情况  
1.201-ori 2.201-300 3.201-350

热处理后，石片纵轴弯曲的比例从17%分别降至12.5%和3%，弯曲程度从平均160度降为155度。石英砂岩经热处理后截面弯曲度变化不大。纵截面弯曲度的降低一方面可以提高石片的质量，另一方面也能为下一次剥片提供更好的工作面，从而提高石核的利用率。热处理能够有效降低白云岩石片的弯曲度，而且经350℃热处理的石片降幅最大。

热处理同样会对石片的腹面特征产生影响，腹面出现唇面（Lip）的比例由热处理前的10%左右升至30%，最高者为350℃热处理的050号白云岩，达到68%。一般认为唇面是软锤法的特征，水洞沟8号地点废片实验研究中，使用与本文同样原料进行硬锤法剥片产生的废片中，唇面出现率为4.8%，石英砂岩石片中，热处理前后均不见唇面。热处理前，石片延展平直者约为70%，热处理后这一比例增加到90%以上。热处理后，白云岩石片羽翼状远端的比例从40%左右提升到60%以上。由于原料关系，热处理前后石片出现放射线、同心波的比例都较低。

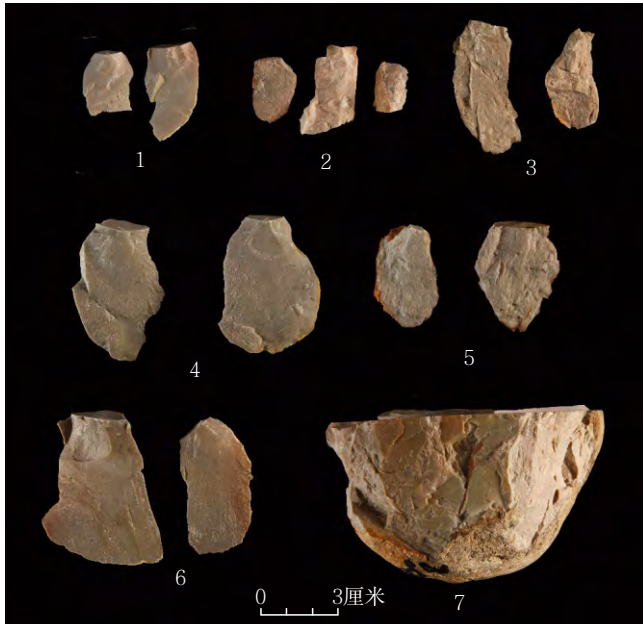
热处理对石片两边形态影响较小，热处理前后石片两边均以平行为主，占80%左右，扩散、汇聚较少；侧缘正面观察形态以薄锐为主，侧面观察形态以平直为主。

古人类获取石片最重要的目的是使用其刃缘满足生活中的各种需求，因此有效刃缘长度是考察剥片成功与否的重要指标。我们发现，使用热处理石料剥片获取有效刃缘的长度远高于未经过热处理的石料，050号白云岩的石片有效刃缘指数从热处理前的13.7

毫米/克提升到56.4毫米/克和51.8毫米/克，201号白云岩的石片有效刃缘指数从热处理前的29.1毫米/克提升到176.6毫米/克和194毫米/克；146号石英砂岩的石片有效刃缘指数在热处理前后变化很小，分别为6.45毫米/克和6.19毫米/克（见附表二、三）。

整体看，热处理对于白云岩这类硅质岩类效果明显，而石英砂岩热处理前后变化不大，本文实验中146号石英砂岩打制获取的石制品，热处理前后对比没有发现规律性变化。350℃左右为水洞沟白云岩的热处理适宜温度，温度过低，效果不明显；温度过高会破坏原料的打制性能。由于热处理对石料力学性能的改变，热处理石片的形态趋于规整，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，石片有效边缘的产出率明显提高。以上特征与我们依据力学性能变化推测的石片特征完全吻合，这也表明，正确的热处理可以有效提高石料的利用率。

但是我们同时注意到，热处理石片的长度和厚度变化很小，这可能与实验过程中的打制策略相关。打制过程中，为获取更薄的石片，打击点只是尽量靠近适合边缘。由于石锤比较坚硬，如果打击点过于靠近适合边缘容易导致台面破碎，剥片失败。因此，本次实验中大部分石片的打击点相对远离台面边缘，从而导致打击应力的垂直应力大于切线应力，而切线应力是控制石片长短的重要因素，这是导致热处理石片并没有明显增长、变薄的主要原因。当垂直应力主导时，



图六 550°C热处理石料破裂面

1.023-ori 2.196-ori 3、7.198-450 4.146-550 5.196-550 6.198-ori

热处理前后石片长度变化不明显；切线应力主导时则会对热处理前后石片长度、厚度的变化起到放大作用。石片台面面积增加也是由此造成。这种现象也从侧面证明，只有当切线应力大于垂直应力时，热处理导致石片变长、变薄的特性才会更加突出，因此使用软锤法对热处理石料进行剥片，石料性能提升的效果会更加明显。

最后需要说明的是，除上述介绍外，我们还对经450°C和550°C热处理的10余件原料进行了同样的实验。实验结果表明，经过450°C以上热处理的白云岩和燧石会出现颗粒状结构，与未经过热处理石料相比，破裂面明显粗糙，大量肉眼可见的粗颗粒导致打击力无法有效传导（图六），甚至很难剥取石片，更无法提升石料的打制性能。由于可以观察到石料剥片能力的丧失，数据采集也就失去其意义。

## 结 论

X射线衍射和X射线荧光分析结果表明，热处理通过提高石料中SiO<sub>2</sub>的比例改善

其打制性能。扫描电镜观察下，大部分石料经过热处理后石英结晶度显著提高，颗粒分布均匀，以等粒结构为主。岩石力学试验则反映出，热处理石料质地均匀、硅质含量增高，其延伸性提高、脆性增强、强度降低，这些变化有效改善了岩石的打制性能，提高了石器制作效率。

通过打制实验，我们发现，使用经过热处理的原料打制获取的石片，表现出以下特点：长度增加，纵轴趋于平直，打击泡浅平，放射线、同心波发生比例降低，羽翼状远端比例提高。以上特点表明，热处理可以提高石器打制效率，降低事故率，提升产出石片的质量。热处理温度以350~400°C左右为宜，石料以此温

度处理后力学性能明显改善。热处理温度高于450°C时，各种特征改善不明显或改变的程度不利于打制，比如脆性降低，微裂隙增多。打制实验的结果与使用同一批石料进行的成分分析、显微电镜分析、岩石力学分析结果相吻合，之间可以互相印证。

热处理技术反映了古人类对石料的深度利用，是旧石器时代晚期人类行为中重要的因素之一。通过打制实验，我们初步了解这项技术如何在原料的利用与开发、石器的加工与制作中发挥作用，对热处理行为的判断与研究可以帮助我们了解古人类对石料的选择与认知能力、石器打制技术的发达程度、利用与开发资源的能力，据此阐释远古人类行为模式，乃至推测早期社会组织行为。

附记：本文由中国社会科学院哲学社会科学创新工程项目、国家社科基金青年项目（15CKG001）资助完成。本文模拟打制实验由李锋、马宁完成，王春雪、李罡协助采集石料，中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室为石料切割、热处理提供帮助，在此并致谢忱。



注 释

[1] Brown K.S. et al., Fire as an Engineering Tool of Early Modern Humans, *Science*, 325, 2009.

[2] a.Domanski M. et al., A Review of Heat Treatment Research, *Lithic Technology*, 32, 2007.  
b.周振宇等:《旧石器时代石制品热处理研究:回顾与展望》,《人类学学报》2013年第1期。

[3] a.周振宇等:《水洞沟遗址的石料热处理现象及其反映的早期现代人行行为》,《科学通报》2013年第9期。  
b.Zhou, Z.Y. et al., Heat Treatment and Associated Early Modern Human Behaviors in the Late Paleolithic at the Shuidonggou Site, *Chinese Science Bulletin*, 58, 2013.

[4] a.Zhou, Z.Y. et al., Heat Treated Stone Artifacts at Shuidonggou, Northwest China and Their Archaeological Implications, *Quaternary International*, 347, 2014.  
b.Guan, Y. et al., The Experimental Study of Palaeolithic Heat-Treatment Technology: A Case from the Shuidonggou Rock Resources, North-West China, *Archaeometry*, 57, 2015.  
c.邵雅琪等:《热处理对水洞沟遗址石器原料力学性能的影响》,《人类学学报》2015年第3期。  
d.Lakshmikantha et al., Relation between Tensile Strength and Fracture Toughness for Soils and Rocks, *3rd International Workshop of Young Doctors in Geomechanics*, France, 2008.  
e.Domanski, M. et al., Mechanical Properties of Stone Artifact Materials and the Effect of Heat

Treatment, *Archeometry*, 36, 1994.

[5] 根据石器打制实验者的理论水平和操作工艺,可将实验者分为四级,其中Ⅲ级实验者指的是“有相当一段时间的模拟实验经历,积累了一定的实验经验,对于实验所用石料的质地、破裂力学机制都有一定程度的把握,在石核剥片和工具生产中的产品均按照预先设计进行,剥片和工具修理成功率较高,生产事故偶见,但尚未掌握工具制作中毛坯去薄等一些特殊技术”。

[6] 本文依据国内旧石器学界流行的分类方法,将石片分为若干类型。1-1型石片,自然台面,自然背面;1-2型石片,自然台面,部分人工背面和部分自然面;1-3型石片,自然台面,人工背面;2-1型石片,人工台面,自然背面;2-2型石片,人工台面,部分人工背面和部分自然面;2-3型石片,人工台面,人工背面。

[7] 石片长规整指数为石片腹面长与最大长的比值,值越趋近于1表明越规整。石片宽规整指数为石片近端宽、四分之一处宽、中间宽、四分之三处宽、远端宽的变异系数,值越小表明越规整。石片厚规整指数为石片近端厚、四分之一处厚、中间厚、四分之三处厚、远端厚的变异系数,值越小表明越规整。石片相对厚度指数一为(石片长+宽)/厚,用于量化石片的厚薄程度。石片相对厚度指数二为石片长/厚,用于量化石片的厚薄程度。打击泡指数为石片二分之一处厚与打击泡厚的比值,用以量化打击泡的凸出程度。有效刃缘指石片边缘可用来修理加工或直接使用的部分。有效刃缘指数为有效刃缘与石片重量的比值,即每克石片产出有效刃缘的长度。

附表一 打制实验所获石制品统计表

| 类型<br>编号 | 石核        |           | 石片        |           | 断块        |           | 断片        |           | 微片        |           | 碎屑        |           |           | 合计        |           |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|          | 数量<br>(件) | 重量<br>(克) | 数量<br>(件) | 重量<br>(克) | 数量<br>(件) | 重量<br>(克) | 数量<br>(件) | 重量<br>(克) | 数量<br>(件) | 重量<br>(克) | 2~5毫米     |           | 重量<br>(克) | 数量<br>(件) | 重量<br>(克) |
|          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           | 数量<br>(件) | 重量<br>(克) |           |           |           |
| 050-ori  |           |           | 25        | 93.4      | 8         | 10.7      | 29        | 2.39      | 27        | 1.24      | 67        | 2.1       | 2.6       | 156       | 112.43    |
| 050-350  | 1         | 155.6     | 41        | 152.5     | 15        | 29.1      | 29        | 16.05     | 23        | 3.35      | 84        | 4.2       | 5.6       | 193       | 366.4     |
| 050-400  | 1         | 110.4     | 20        | 70.4      |           |           | 7         | 3.12      | 26        | 1.41      | 46        | 1.6       | 2.6       | 100       | 189.53    |
| 201-ori  |           |           | 12        | 41.4      |           |           | 7         | 0.78      | 8         | 0.26      | 23        | 0.2       | 1.1       | 50        | 43.74     |
| 201-300  | 1         | 105.5     | 40        | 146.77    | 8         | 38.93     | 38        | 15.55     | 27        | 1.11      | 63        | 2.6       | 5         | 177       | 315.46    |

续附表一

| 类型<br>编号 | 石核        |           | 石片        |           | 断块        |           | 断片        |           | 微片        |           | 碎屑        |           |           | 合计        |           |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|          | 数量<br>(件) | 重量<br>(克) | 数量<br>(件) | 重量<br>(克) | 数量<br>(件) | 重量<br>(克) | 数量<br>(件) | 重量<br>(克) | 数量<br>(件) | 重量<br>(克) | 2~5毫米     |           | 小于2<br>毫米 | 数量<br>(件) | 重量<br>(克) |
|          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           | 数量<br>(件) | 重量<br>(克) | 重量<br>(克) |           |           |
| 201-350  | 1         | 35.2      | 28        | 72.82     | 15        | 23.87     | 15        | 2.47      | 7         | 0.22      | 53        | 2.9       | 3.6       | 119       | 141.08    |
| 199-ori  |           |           | 34        | 335.3     | 30        | 46.3      | 61        | 131.32    | 9         | 0.65      | 105       | 9.8       |           | 239       | 523.37    |
| 199-400  |           |           | 6         | 72.3      | 9         | 81.9      | 26        | 47.6      | 7         | 0.5       | 30        | 2.1       |           | 78        | 204.4     |
| 146-ori  | 1         | 383.9     | 15        | 237.5     | 5         | 4.5       | 21        | 58.6      | 12        | 7.8       | 50        | 10.3      | 7.6       | 104       | 710.2     |
| 146-550  | 1         | 252.5     | 12        | 144.2     | 8         | 9         | 21        | 89.2      | 22        | 10.16     | 45        | 5.5       | 6.6       | 109       | 517.16    |
| 合计       | 6         | 1043.1    | 233       | 1366.59   | 98        | 244.3     | 254       | 367.08    | 168       | 26.7      | 566       | 41.3      | 34.7      | 1325      | 3123.77   |

附表二 050号白云岩打制实验所获石片形态统计表

|                   | 原始石料 (25件) |       |       |       | 经350℃热处理 (41件) |       |       |       | 经400℃热处理 (20件) |      |       |       |
|-------------------|------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|----------------|------|-------|-------|
|                   | 极小值        | 极大值   | 均值    | 标准差   | 极小值            | 极大值   | 均值    | 标准差   | 极小值            | 极大值  | 均值    | 标准差   |
| 长 (毫米)            | 11.4       | 55.4  | 24.57 | 10.24 | 8.5            | 50.7  | 21.37 | 10.85 | 10.5           | 47.6 | 24.23 | 12.68 |
| 宽 (毫米)            | 9.9        | 58.3  | 22.33 | 12.27 | 5.4            | 40    | 17.44 | 8.29  | 6              | 33.5 | 19.52 | 7.91  |
| 厚 (毫米)            | 2.3        | 17.6  | 5.1   | 2.89  | 1.2            | 23.2  | 5.77  | 4.86  | 1.5            | 13.3 | 6.06  | 3.5   |
| 重 (克)             | 0.3        | 35.5  | 3.74  | 6.94  | 0.1            | 36.1  | 3.72  | 7.1   | 0.1            | 13.7 | 3.52  | 3.67  |
| 平均长规整指数           | 0.89       | 1     | 0.97  | 0.03  | 0.81           | 1     | 0.97  | 0.04  | 0.86           | 1    | 0.98  | 0.03  |
| 平均宽规整指数           | 0.09       | 0.71  | 0.35  | 0.15  | 0.03           | 1.61  | 0.28  | 0.24  | 0.11           | 1    | 0.33  | 0.11  |
| 平均厚规整指数           | 0.06       | 0.73  | 0.4   | 0.16  | 0.05           | 1.55  | 0.34  | 0.24  | 0.08           | 2    | 0.41  | 0.34  |
| 平均相对厚度指数一         | 6.34       | 15.07 | 9.69  | 2.3   | 1.28           | 19.61 | 8.68  | 3.51  | 3.59           | 16   | 8.38  | 3.05  |
| 平均相对厚度指数二         | 2.84       | 9.72  | 5.16  | 1.84  | 1.01           | 9.05  | 4.64  | 1.84  | 1.29           | 12   | 4.7   | 2.58  |
| 打击泡指数             | 0.21       | 1.7   | 0.73  | 0.37  | 0.22           | 1.61  | 0.76  | 0.29  | 0.2            | 2    | 0.78  | 0.32  |
| 有效刃缘 (毫米)         | 0          | 136.1 | 34.44 | 30.46 | 14.5           | 129.8 | 47.8  | 26.82 | 10             | 108  | 51.86 | 28.65 |
| 有效刃缘<br>指数 (毫米/克) | 0          | 38.57 | 13.72 | 9.96  | 3.55           | 380   | 56.44 | 73.77 | 3.88           | 410  | 51.83 | 95.02 |

附表三 201号白云岩打制实验所获石片形态统计表

|                   | 原始石料 (12件) |       |       |       | 经300℃热处理 (40件) |       |        |        | 经350℃热处理 (28件) |       |        |        |
|-------------------|------------|-------|-------|-------|----------------|-------|--------|--------|----------------|-------|--------|--------|
|                   | 极小值        | 极大值   | 均值    | 标准差   | 极小值            | 极大值   | 均值     | 标准差    | 极小值            | 极大值   | 均值     | 标准差    |
| 长 (毫米)            | 9.5        | 49.4  | 28.65 | 13.87 | 6.7            | 63    | 24.6   | 16.96  | 7.9            | 46.5  | 21.62  | 11.94  |
| 宽 (毫米)            | 5.2        | 29.9  | 16.32 | 8.04  | 4.7            | 52.4  | 15.74  | 10.16  | 6              | 40.9  | 12.41  | 7.34   |
| 厚 (毫米)            | 1.7        | 18.2  | 6     | 4.4   | 0.5            | 14.6  | 4.22   | 3.43   | 0.3            | 16.4  | 3.9    | 3.49   |
| 重 (克)             | 0.1        | 8.7   | 3.45  | 3.03  | 0.02           | 33.8  | 3.67   | 7.67   | 0.02           | 30.9  | 2.6    | 6.23   |
| 平均长规整指数           | 0.93       | 1     | 0.99  | 0.02  | 0.87           | 1     | 0.99   | 0.03   | 0.91           | 1.36  | 0.99   | 0.08   |
| 平均宽规整指数           | 0.09       | 0.56  | 0.3   | 0.14  | 0.05           | 0.73  | 0.24   | 0.15   | 0.06           | 0.51  | 0.27   | 0.12   |
| 平均厚规整指数           | 0.13       | 0.48  | 0.35  | 0.1   | 0.09           | 0.72  | 0.33   | 0.16   | 0.04           | 0.52  | 0.28   | 0.13   |
| 平均相对厚度指数一         | 0.98       | 12.59 | 9.33  | 3.44  | 5.62           | 38.8  | 12.2   | 6.38   | 4.85           | 63.33 | 13.64  | 12.66  |
| 平均相对厚度指数二         | 0.65       | 8.91  | 5.97  | 2.46  | 2.9            | 26.8  | 7.25   | 4.25   | 2.63           | 43    | 8.66   | 8.74   |
| 打击泡指数             | 0.27       | 0.9   | 0.53  | 0.18  | 0.28           | 2     | 0.81   | 0.36   | 0.26           | 1.7   | 0.79   | 0.32   |
| 有效刃缘 (毫米)         | 0          | 93.1  | 47.13 | 33.21 | 10             | 139.2 | 46.69  | 35.38  | 0              | 115   | 36.96  | 27.16  |
| 有效刃缘<br>指数 (毫米/克) | 0          | 144   | 29.08 | 38.68 | 2.58           | 1500  | 176.64 | 283.43 | 0              | 1190  | 193.95 | 293.18 |

(责任编辑 李学来)