

旧石器时代石制品热处理研究： 回顾与展望

周振宇^{1,2,3}, 关莹^{1,2}, 高星¹

(1. 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;
2. 中国科学院大学, 北京 100039); 3. 中国社会科学院考古研究所, 北京 100710

摘 要: 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, 在已经开展的 40 余年工作中积累了丰硕的研究成果。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, 尚未在考古遗址中发现热处理行为及相关遗物, 目前我国热处理研究仍处于空白阶段。本文主要介绍旧石器时代热处理技术的原理与工艺及相关研究手段, 特别是针对热处理技术的实验研究。相信随着认识的加深, 石制品热处理研究会在我国旧石器考古学研究中发挥重要作用。

关键词: 旧石器时代; 热处理; 人类行为; 实验考古

中图分类号: K871.11; **文献标识码:** A; **文章编号:** 1000-3139(2013)01-019-12

1 引 言

人类使用并控制火的历史可以追溯到更新世早期, 在漫长的用火历程中, 火大多与加工食物、驱寒取暖、抵御野兽、制作加工工具相关。就制作加工工具而言, 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, 在该遗址距今 164ka BP 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有目的地对石料进行热处理。该遗址距今 72ka BP 的上部文化层中后来又出土了更为丰富的热处理石制品, 这表明此时人类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^[1]。旧石器时代中期莫斯特文化遗址中也发现数例对石制品进行热处理的证据: 黎巴嫩距今 110ka BP 的 Ras-el-Kelb 洞穴遗址发现表面呈现油脂状光泽的经过加热的燧石制品, 被认为是古人类通过热处理以达到提高石料剥片性能的目的^[2]; 法国距今 93ka BP 的 Les Forets 遗址和距今 63ka BP 的 Brugas 遗址都发现经过热处理的石制品, 其表面出现裂纹且呈现光泽, 颜色发生改变^[3]; 西班牙的 Mediona 遗址发现的莫斯特文化石制品中, 近 20% 的修理石片经过热处理, 表面呈现油脂状光泽^[4]。此外, 埃塞俄比亚距今 70ka BP 的 Epic Cave 遗址也发现了热处理行为, 石制品发生典型的茶壶盖状破

收稿日期: 2011-03-29; 定稿日期: 2012-01-13

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05130202); 科技基础性工作专项 (2007FY110200); 国家基础科学人才培养基金 (J0630965)

作者简介: 周振宇 (1983-), 男, 湖北省黄石市人, 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所博士研究生 (2011 年毕业), 现工作于中国社会科学院考古研究所, 主要从事史前考古学研究。E-mail: zzy529@msn.com

裂及颜色变红的现象。大量材料的发现表明,到旧石器时代晚期,热处理技术已经分布于世界大部分地区。除上述提及的区域,北美大陆,除东亚外的亚洲大部分地区,如南亚的印度、巴基斯坦,中亚的阿富汗,西亚等地区也都发现了热处理行为^[4]。热处理技术代表了古人类对石料的深度利用,是现代人行行为的重要因素之一。

尽管热处理研究自 20 世纪 60 年代已经引起国际学术界的关注,但由于概念的差别,我国少数几篇相关文章的内容多为利用火劈裂石料,只是热处理的一个方面,与本文介绍的内容有很大不同。陈虹等^[5]2009 年发表一篇有关热处理的综述文章,在我国首次系统而全面地介绍了热处理的概念、原理、研究方法、最新进展及意义,包括与加热石料有关的内容,但该文内容略显笼统,而且缺乏对旧石器时代材料的有针对性的案例和讨论。为将热处理研究系统引入我国的旧石器时代考古学领域,推动学科的拓宽和发展,进一步实现与国际学术界的接轨,本文对近几十年来西方学者开展的针对旧石器时代石制品的热处理模拟实验与研究成果略做梳理和总结,对相关的概念、机理、方法、案例作了介绍,对在我国应用的前景作了分析,以期引起国内学术界的关注。

2 热处理技术的概念及作用

广义上的热处理是针对各种材料(工业上尤指金属)进行加热、保温、冷却等一系列处理以改变材料表面及内部结构,控制其性能的综合工艺^[6]。在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。目前有关古人类对木质等材料进行热处理的案例很少,而且其材质超出了石料的范畴,因此本文暂不作讨论。

根据民族学研究及考古发现,热处理技术主要与获取石料、制作石器、改变石质以及宗教与贸易活动相关^[5]。在上述用途当中,获取原料、制作石器及改变石质特性是旧石器时代考古学研究的重点内容,为了解读史前人类生产生活状态提供着重要线索。

自 1963 年 Shippe 首次提出热处理研究是史前考古学研究的重要组成部分以来,相关工作使我们对手热处理技术在石器打制中所起的作用有了更清晰的认识。热处理对石料特性的改变主要体现在,使石料质地更加均一,降低石料的强度并提高其延展性,整体上提升石料的剥片性能。这种特性的改变在石器制作上表现为,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;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^[7-18]。Rick 在对 Lower Illinois River Valley 的 Burlington 燧石进行热处理实验研究后发现,用经过处理的石料制作的尖状器的刃角比用未经处理的石料产生的工具的刃角平均小 30°;经过热处理的石料打制出的石片较未经过热处理的长且薄,而且这种特性在使用软锤技术时体现得尤为明显。另外,模拟打制实验还发现,针对经过热处理的石料所进行的打制实验失误率低,对石料的掌控性更好,石片的剥离更为精确;使用热处理石料压制剥取石叶和细石叶最多能提高剥片效率 4 到 5 倍^[10,11,19-21]。

大量考古学实例表明,古人类认识到了热处理对石料特性的改变,并将这一技术有

效地运用到了石制品的打制、加工和使用中。旧石器时代末期，热处理技术更为广泛地应用于石叶及细石叶的生产中，且多配合压制法使用，法国南部、西班牙东南部和葡萄牙的梭鲁特文化遗址、德国、乌克兰、印度、巴基斯坦、阿富汗等国家和地区都发现了使用经过热处理的石料生产不同类型的石叶细石叶的现象^[17,22-28]；在中东地区，也发现旧石器时代晚期古人类对燧石进行热处理以提高石叶、细石叶和工具的生产效率的例证^[29-31]；北美大陆相当一部分 Clovis 尖状器以经过热处理的石料为原料，制作出了更加对称规范的器形及锋利的刃缘，这些工具在处理软性材料时效率更高^[32-34]；在美国德克萨斯州南部的 Shumla 遗址，90% 的投掷尖状器都是使用经过热处理的石料经软锤法制作而成^[35]；在广泛分布于西伯利亚 - 蒙古高原地区的旧石器时代晚期 Dyuktai 文化中，研究者发现古人类利用热处理技术提高石叶制作的效率，在 Ust'Mil 和 Kukhtui 遗址均发现石核剥片和制作两面器留下的保留有热处理光泽的碎屑^[19,36-38]；而在北美及欧亚大陆的高寒地区，古人类在夏季运用压制法使用热处理石料生产大量的石叶及细石叶，并将其储存，以应付冬季大雪覆盖地表无法获取石料的窘境^[19,39-41]。澳大利亚的多处史前遗址也发现了对石制品进行热处理的现象，并发现了距今 4300 年的包含原料和半成品的热处理火塘，在距今约 1090 年的 Berrambool 遗址还发现了更为成熟的热处理火塘，这些以绿色玉髓为主要处理原料的热处理火塘数量多且规格相近^[42,43]。

热处理作为一类重要的史前人类行为，在提高制作技术，提升制作效率，保存石料资源等方面发挥了重要作用。因此，辨认遗址中经过热处理的石制品并解读其加工流程，成为我们全面阐释远古人类行为模式的重要部分。

3 热处理产生的性状及其机理

为了准确有效地辨认出哪些考古标本经过了热处理，我们需要解答以下几个问题：热处理对于岩石的外部形态及内部结构有何改变？这些变化因何产生？不同类型岩石在不同温度下的变化有何异同？哪些变化对于石制品的打制存在实际意义？

岩石经过热处理后的外部形态特征主要指肉眼可鉴定的特征，包括油脂状光泽、石料破裂（破碎、裂纹）、颜色变化（大多数趋向于变红）、遗迹石制品的测量统计特征等。油脂状光泽目前大多通过肉眼判断，但是条件允许的情况下应尽量使用光泽度仪进行测量，以将光泽度量化的，降低误判的几率；颜色可以通过 Munsell 色标或其他国际通用的色标、色卡进行准确判定；石制品本身的破裂和测量特征也能帮助鉴别是否经过热处理，因为岩石经过高温可能导致完全破碎、茶壶盖状破裂、片状劈裂、横向断裂、表面裂纹等。这些特征可以被甄别出来，成为判断石料是否经过热处理的重要依据^[9,12]。

同时我们需要认识到，热处理导致的石制品外部形态改变的各向异性¹⁾较大：某些情况下，有的石料经过热处理却并未出现上述的外部特征；而有的肉眼可见特征易与风化磨蚀等后期自然作用形成的特征相混淆，比如风化造成的光泽与热处理产生的光泽比较接近

1) 各向异性指材料在各方向的力学和物理性能呈现差异的特性，本文引入用以描述岩石的力学、物理性能个体内及个体间呈现差异的特性。

同时光泽的产生与石料类型及加热温度也存在较大关系,比如通过光泽判断燧石等微晶硅质岩更加有效^[44-47]。单纯通过颜色判定标本是否经过热处理也存在局限性,仅就经过热处理容易出现颜色变化的燧石而言,有的燧石经过加工颜色并不改变;而某些特殊类型的燧石颜色就与传统认识中经过热处理呈现出的带光泽的粉红色类似,如以色列和约旦发现过一批前陶新石器时期的石制品,研究者通过石制品颜色推测石料经过热处理,但最后发现了该种特殊颜色石料的原产地,证明该种石料颜色与热处理无关。有研究者使用岩石磁学和电镜扫描分析实验及考古标本发现,虽然热处理会造成颜色变化,但是这种变化无规律性,应用到考古标本的研究中存在不确定性^[48-53]。

热处理实验同样证明经过热处理的石料会在内、外部形态特征上发生改变,但是这种改变规律并不适用于所有原料。有研究者针对产自西班牙和法国的三种燧石进行实验,同时设计了两种实验环境:一是室外环境,在露天火坑中埋入不同原料的石片,加热 2-3 小时;二是封闭烤箱环境。实验结果表明,颜色的改变无规律性——有的发生了改变,有的则没有,颜色变化的程度也并不一致^[54],这种现象主要是因为颜色的变化与石料的种类及其矿物组成密切相关,含铁的岩石易发生颜色变化;同时光泽的变化也各不相同^[43,56,57],特别是颗粒较粗的岩石,后期埋藏可能造成光泽的消失,而长期暴露、风化磨蚀也可能导致光泽的产生。

总体看来,上述肉眼可鉴别特征在有较好热处理实验基础的遗址中,可以帮助我们辨认热处理石制品,否则,研究者应谨慎作出判断^[7,9,10,55]。

在通过外观形态无法准确判断热处理行为时,高温作用下岩石内部特征的改变可以帮助我们甄别经过热处理的石制品。实验室可检测的高温作用下岩石内部特征主要包括以下几个方面:岩石物质成分的改变,晶体结构的变化,力学性能的改变,岩石本身热能光能及磁性的变化等。岩石物质成分的改变可以通过 X 射线荧光、X 射线衍射、红外线吸收光谱、显微镜和扫描电镜等手段加以识别。扫描电镜可以观察到热处理造成的岩石组织变化,特别是岩石的再结晶现象^[56];晶体结构的变化可以通过 X 射线衍射进行检测分析,目前已有较成熟的研究案例证明,经过热处理的石制品其晶体峰值较未经过热处理的石制品有较大改变^[8,9,47,57-59],虽然 X 射线衍射分析可以发现微晶硅质岩经过热处理后岩相学的微结构变化,但是对于粗晶岩石效果并不明显;热处理石制品力学性能的改变可以通过岩石力学方法加以检测。有研究显示,力学指标中断裂韧度能较好地反映岩石经过热处理后力学性能的改变,笔者对热处理实验样品进行岩石力学性能测试时发现,样品的应力-应变曲线同样能较好地反映岩石力学性能的变化^[58,60,61];岩石经过热处理后光能、热能及磁性的改变可以通过电子自旋共振、热释光、岩石磁学检测等手段加以确定,岩石磁学可以鉴定出标本是否经过高温事件,但难以判断加热事件发生于剥片前还是剥片后,同时也无法判断热处理是人工导致还是成岩过程中经历高温环境,因此需要对石料的成岩环境、埋藏环境的磁性进行测试,相互比对,才能准确判断石料是否经过热处理,且古地磁学方法要求受测标本体积很小,大大缩小了考古标本的选取范围^[62],电子自旋共振和热释光分析也存在相似的局限性,然而它们可以检测石料是否加热到一定温度。Dunnell 等人针对美国密苏里州发现的以两种燧石制成的石锄进行热处理实验,并成功通过热释光和电子自旋共振检测标本是否经过热处理,及热处理温度^[63],但这两种方法对于只经过较低温

度热处理的石制品效果并不明显^[22,64-68]。上述手段都具有自身的优势与局限性，研究人员可以根据所掌握考古材料的特点，合理选择检测手段。

根据目前的考古发现以及实验结果，大部分热处理行为与微晶硅质岩相关，粗晶硅质岩及其他岩类也发现有经过热处理的考古实例，但数量相对较少。这一方面是因为微晶硅质岩经热处理后性能提高较大，另一方面是因为粗晶硅质岩及其他岩类经过热处理后外观改变不明显，导致我们对遗址中标本的判断不够正确^[4]。值得注意的是，岩石本身是由一种或通常以两种以上矿物组成的矿物体，不同地区的同一种岩石，其矿物组成及形成过程都不一定完全相同，因此我们在进行热处理研究时，切忌先入为主，直接将已有的研究结果与手中的材料对比，通过实验数据对比得出的研究结果才更加可靠。

热处理导致岩石特性变化的原因较为复杂，目前学术界给出的解释主要有三种：微裂隙、硅质再结晶、硅质溶合。通过机械测试、X 射线衍射和电镜扫描等手段检测热处理实验标本，结论更倾向于用硅质再结晶来解释岩石经过热处理后特性的变化^[4]。

根据上文介绍的岩石经过热处理之后内外形态的改变特征，我们大致了解了鉴别考古遗址中经过热处理标本的一般规律。需要注意的是，目前还没有直接的方法判断经过火烧的标本是古人类有意为之，还是无意掉落在火塘里，或者被自然火加热，因此只有结合标本的文化面貌及其他指标综合推断，不可一概而论。比如疑似热处理标本的数量、类型是否具有特殊性以及文化意义，其出土位置是否发生过燃烧事件。因此，在条件允许的情况下应使用多种检测方法，以达到多方验证的目的。

4 热处理实验研究

鉴于热处理技术在旧石器时代考古学研究中的重要性及石料在热处理过程中复杂的变化过程，模拟实验被认为是开展此项研究的前提与基础，它不仅可以提高我们对石料内外形态结构变化的理性认识，可控的实验温度还可以使我们更精确地了解石料在热处理过程中的变化规律。

模拟实验一般分为室内密封和户外露天两种环境。加热速度分快速升温、冷却和慢速升温、冷却。样品的主要观察指标包括实验前后颜色、光泽和重量等外部特征变化，和再结晶、微结构、微裂隙等内部特征的变化。

温度是热处理实验过程中极为重要的一环，温度过低无法达到提高石料特性的目的，温度过高则容易破坏石料，如 573℃ 是 α 石英转化为 β 石英的临界温度，又称石英倒转，一旦超过此温度，含石英的岩石会发生破碎、脱水和粉末化^[44]。一般来说，颗粒细腻的燧石加热到 250℃ 时其剥片性能会提高，颜色随之发生改变，而相对粗糙的燧石，颜色改变需加热到 250-300℃，剥片性能的提高则需加热到 350℃ -400℃^[4]。同种岩石由于颗粒大小、加热温度不同等因素，已经存在上述不同的变化，可见不同岩石间，变异范围更大。同时升温 and 降温的速度对于热处理的效果也有很大影响，除了利用温度剧烈变化劈裂大块石料之外，大部分热处理行为多以慢速升温 and 降温来改变石料的特性，因为这种温度变化方式更容易导致再结晶，而快速的升温 and 降温容易使岩石产生微裂隙，造成茶壶盖状破裂

等现象。热处理改变石料性能是不可逆的过程,各种数据皆来自反复的实验。因此,实验的设计与过程控制决定了整个研究客观性。

美国学者 Purdy 和 Brooks 以 Florida 的燧石为实验原料,分别以每小时提升 50℃ 和每 24 小时提升 50℃ 两种方式对石料进行热处理。实验结果表明,350℃ 到 400℃ 是这种燧石热处理的温度,在这个温度范围内燧石表面光泽明显增加,同时颜色变红,剥片时破裂面更加平整;X 射线衍射检测结果则显示热处理和未经热处理原料峰值无明显变化^[8]。同样在 350℃ 到 400℃ 发生显著改变的还有产自美国 Missouri 东北部的燧石,实验者将原料置于铺有约 3cm 细沙的铁质托盘内,使用电烤箱加热。实验结果显示,温度达到 350℃ 时能够对原料的性能有一定提升,使剥落石片数量增加,且薄而长。但当温度达到 400℃ 时,这些性能较前者有大幅度提升^[12]。相似的实验结果也出现在 Domanski 和 Webb 在 2000 年针对波兰发现的燧石所进行的实验中^[69],燧石在烤箱内分别以 25℃、100℃ 和 200℃ 每小时的频率升温至 400℃ 并维持 2 小时。然后关闭烤箱让其在烤箱封闭环境中慢速降温,实验过程中石料以细沙覆盖以减低原料破碎的几率。整体上看,硅质岩石石料经过热处理后颜色加深,石片表面光泽增加,也出现了破损和微裂隙。

也有学者使用均质石英岩进行过类似的实验,使用电烤箱作为加热环境,并铺垫细沙,以 50℃ 每小时的频率升温,分别至 200℃、450℃ 和 500℃ 加热 48 小时,然后自然冷却至室温。经过 200℃ 热处理的原料性能变化不大;经过 450℃ 及更高温度热处理的原料石片远端崩断的几率减小,剥片需要的力度也更小,石片更加大和长;通过显微观察发现,经 450℃ 以上的高温处理,石料光泽更加明显,但是其内部出现了颗粒状结构、微裂隙密集等不利于打制的特征^[70]。

外部特征的改变是石料经过热处理后的附属结果。在旧石器时代,古人类进行热处理最主要的目的应该是改善原料的力学性能。关于岩石力学性能测试主要针对以下几个指标:弹性常数 (elastic constant)、压缩强度 (compressive strength)、拉伸强度 (tensile strength) 和断裂韧度 (fracture toughness)。石器打制过程实际上是对石料施以外力使其破裂的过程,因此断裂韧度是检测原料性能最有效的指标。实验发现,经过热处理的燧石的断裂韧度大幅下降,比如,颗粒细腻的燧石断裂韧度较高,但经过热处理后其断裂韧度与颗粒粗糙的燧石相当;同时热处理过程中,经慢速升温(比如 25℃ 每小时)加热的石料其断裂韧度降低更多,原因可能是加热速度慢,受热更加彻底,再结晶过程更加充分;除此之外,质地细腻的原料经热处理后性能的改变更加迅速^[59,61,71-7273]。通过 X 射线衍射和电镜扫描分析发现,断裂韧度的降低是由燧石内部硅质颗粒再结晶引起的。实验表明,大部分原料通过慢速升温、降温的热处理方式能够达到改善石料性能的目的,但不同原料间,热处理的温度并不相同,热处理后外观特征的改变也存在较大差异。

除了加热温度之外,也有学者提出,原料的体积也可能影响热处理的效果。Mercieca 和 Hiscock 通过室内热处理实验,探究原料种类和体积大小与热处理效果的关系。实验原料产自澳大利亚,实验者将其切割成 1m³、4m³、8m³、32m³、64 m³ 体积不等的正方体,使用电炉加热,实验温度从 500℃ 至 1000℃ (1000℃ 被认为是以木质材料作为燃烧物所能产生的最高温度,同时也超过了一般认为的导致石料破碎的最高温度)。加热过程中不使用任何砂土之类的隔离物,一次加热一个标本,快速升温,温度达到 1000℃ 即迅速取出

标本，在室温下自然冷却。实验结果显示，样品体积越大，其破裂的临界温度越低。不同原料之间，硅质岩的临界温度要高于泥岩^[74]。

实验研究还发现，高温加热除了会造成石料破碎外，还有可能出现热析出（thermal extraction）现象，即经过加热的石料崩裂出少量的形状近球形或椭圆形的碎块，大多数出现这种情况的石片与土壤直接接触。另外，裂纹和光泽也能在显微镜下被观察到，一般加热到 300℃即可出现光泽。同时“石锈（patina）”也在有的实验中出现，比如在燧石在被加热至 400-500℃时，表面会产生一种半透明的覆盖物。对于经过使用且留下使用光泽的石器，加热到该温度时，则仅在无光泽处发现石锈，650℃时也出现同样情况，当温度达到 800℃时，石锈开始影响到存在使用光泽的部位，并同时出现裂纹等现象。放置在火坑中央部位的石料产生石锈的比例更高，可能与中心部位温度更高有关^[70]。

综上所述，虽然大部分实验结果存在一定共性，但其中的差异仍不可忽视，比如大部分硅质岩特别是燧石经热处理后颜色都会加深，趋于变红，但并不一致，当热处理温度提升速度较快时，颜色变化不明显，因此如果石料在热处理的过程中经历快速升温，就可能难以通过颜色加以辨别，如果原料产地不同，其变化的各向异性则更加明显。这种情况同样出现在对原料的力学性能的研究中。除了石料个体差异外，人为因素同样会影响对实验结果的判读，比如，针对热处理石料进行打制实验时，打制者的技术水平、疲劳程度、瞬间判断差异和对实验原料的预判都可能影响到最终结论。正因为热处理过程及其产品存在较大的变异范围，因此在研究古人类热处理行为之前，应该针对遗址的原料进行全面的模拟实验，了解石料热处理前后的异同，生搬硬套他人研究很可能得出错误的结论。

5 讨论与前景展望

5.1 讨论

古人类对石制品进行热处理是与现代人行为的出现密切相关的。一般认为，象征性、装饰性的人工制品的制作、石叶技术的普及、骨角制品广泛应用、规范多样的器物类型、复杂结构的火堆、季节性的迁徙策略、对大型动物的狩猎、交换行为的出现、能够在严酷环境中生存等特征是现代人行为出现的标志^[75-89]。热处理技术与上述现代人行为的多个方面息息相关，提供了重要技术支撑。首先，获取食物是古人类面临的最重要的问题，不断提高制造获取食物工具的技术也成为贯穿整个人类进化史的主线之一。不断提高工具的规范性多样性能帮助古人类在更复杂的环境下生存，经过热处理的石料为更加复杂的打制技术的实施提供了物质前提。其次，经过热处理的石料可以更加容易地打制出复杂且使用的工具，精致石器的出现促进了古人类交换行为的发生。再次，经过热处理的石料一般会在颜色质地上发生改变，这在一定程度上满足了古人类精神意识层面对颜色的需求，并且提升其交换的价值。上述表明，热处理技术的产生与发展与现代人行为的产生相辅相成。除此之外，复杂型火塘的产生为热处理提供了技术前提，也促进了软锤技术的普遍应用。实例表明对热处理技术的研究可以帮助我们更好地理解考古遗存中蕴含的人类行为信息，比如 Ricklis 和 Cox 通过对美国德克萨斯州南部沿海地区考古遗存的研究，发现该地区不

同年代的考古遗址按功能可分为三组, 距离原料产地较远的遗址石器石片之比较低, 废弃的工具数量少, 且经过热处理的石制品比例较高^[90]。由此可见古人类将热处理技术灵活运用于石料的开发与利用。类似的情况出现在秘鲁的 Ondores 遗址, 研究者发现该遗址 80% 的投掷尖状器、两面器和刮削器, 即那些需要锋利刃缘的工具大多以经过热处理的石料制作而成, 而重型工具则很少以经过热处理的石料制作^[59,91], 该研究结果显示, 古人类掌握了热处理石制品刃缘相对较脆、易破损的特点, 并据此灵活合理地使用热处理石料。

虽然热处理研究已在国外开展 40 余年, 但是这项研究仍存在一定的局限性。研究的材料多以硅质岩石为主, 缺乏对其他类型原料的重视; 对热处理标本的鉴定仍以肉眼观察为主, 带有较强的主观色彩; 对标本进行鉴定测试的实验室方法较少且各存在局限性, 难以进行大范围的甄别; 由于科技水平限制, 石料经过热处理内外部形态特征改变的机制目前仍不十分明确; 不同类型原料, 及不同产地的同种原料经过热处理后内外部特征的变化存在一定差异, 这样导致不同研究材料间难以进行直接比对。

5.2 前景与展望

热处理技术的发明与使用开启了人类漫长用火历程中崭新的一章, 相比其他用火行为, 它更加复杂精妙, 对温度的控制、时间的掌握及对石料性能的理解与提升, 可以看作是 人类体质及智慧进化到一定程度的产物。对旧石器时代人类热处理行为的解读不仅可以帮助我们了解古人类从原料采集、改变提升其性能, 到打制、修理的石器制作工艺, 还能够帮助我们 从这些物质遗存中推测古人类的行为方式, 因此, 热处理作为与古人类生产生活密切相关的技术方法越来越多地为广大学者所重视。

我国现已发现千余处旧石器地点, 遗址类型多样, 年代跨度大, 旧石器考古研究的资源非常丰富。遗憾的是, 至今仍未见存在确凿热处理行为的遗址的报道。导致这种情况有多种原因: 首先, 热处理研究在我国较少被提及, 大多数学者并不了解该研究领域的进展和成果; 其次, 由于缺乏热处理石制品相关特征, 研究者在发掘、整理过程中可能就忽视了对热处理标本的主动辨识; 同时, 国外石制品热处理研究主要针对硅质类岩石, 尤其是燧石, 相关遗址的原料类型、颜色等比较单一, 容易发现热处理现象, 而我国旧石器时代石料种类多样, 而优质硅质岩类数量较少, 且大多遗址的石料颜色各异, 这也给热处理石制品的识别带来了障碍; 最后, 热处理研究的深入与相关科学手段的进步密不可分, 很长一段时期内, 我国相应技术手段的落后也在一定程度上阻滞了热处理研究的发展。

鉴于旧石器时代热处理技术研究的重要性, 以及我国的研究现状和该研究的局限性, 将来我国学术界对热处理技术的研究应该集中在以下几个方向。首先, 应当系统的了解相关的研究历史、进展、方法、意义与局限性; 其次, 应该提高对以硅质岩类为主要原料的旧石器时代晚期遗址, 特别是存在用火行为遗址的重视程度, 在研究过程中主动辨认是否存在热处理标本, 比如宁夏水洞沟、山西柿子滩等遗址就具备较好的研究条件; 此外, 由于我国热处理研究基础薄弱, 对于疑似存在热处理行为的遗址, 应该开展模拟实验研究, 了解遗址石料高温加热后内外部形态特征改变的一般规律; 最后, 在取得阶段性成果的基础上, 将各类型实验的数据汇总, 便于同行参考对比。随着以上基础工作成果的积累, 我们对热处理研究会有更深的认识, 相信随着我国热处理研究的深入, 能够帮助更全面的了解古人类行为方式, 更准确地复原史前人类石器制作的工艺流程。

致谢：感谢审稿人提供宝贵意见并帮助完善文章。

参考文献

- [1] Brown KS, Marean CW et al. Fire as an engineering tool of early modern humans[J]. *Science*, 2009, 325: 859-862
- [2] Copeland L. The Middle Paleolithic flint industry of Ras el-Kelb[A]. In: Copeland L, Moloney N, eds. *The Mousterian Site of Ras el-Kelb*[C]. Oxford: BAR, 1998, 73-101
- [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]. *Radiation Measurements*, 2005, 39:375-385
- [4] Domanski M, Webb JA. A review of heat treatment research[J]. *Lithic Technology*, 2007, 32(2): 153-194
- [5] 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
- [6] 《中国大百科全书》总编委会. *中国大百科全书(第二版)第18册(M)*. 北京: 中国大百科全书出版社, 2009. 322
- [7] Crabtree DE, Butler BR. Notes on experiments in flint knapping: Heat treatment of silica minerals[J]. *Tebiwā*, 1964, (7): 1-6
- [8] Purdy BA, Brooks HK. Thermal alteration of silica minerals: An archaeological approach[J]. *Science*, 1971, 173:322-325
- [9] Collins MB, Fenwick JM. Heat treating of chert: Methods of interpretation and their application[J]. *Plains Anthropologist*, 1974, 19:134-145
- [10] Rick JW. Heat altered cherts of the Lower Illinois Valley: An experimental study in prehistoric technology[D]. Evanston, Illinois. 1978
- [11] Mandeville MD, Flenniken JD. A comparison of the flaking qualities of Nehawka Chert before and after thermal pretreatment[J]. *Plains Anthropologist*, 1974 (19): 146-148
- [12] Bleed P, Maier M. An objective test of the effects of heat treatment of flakeable stone[J]. *American Antiquity*, 1980, 45:502-507
- [13] Patterson LW. Quantitative characteristics of debitage from heat treated chert[J]. *Plains Anthropologist*, 1979, (24):255-259
- [14] Patterson LW. Fracture force changes from heat treating and edge grinding[J]. *Flintknapper's Exchange*, 1981, 4:6-9
- [15] Gould RA. A case of heat treatment of lithic materials in aboriginal Northwestern California[J]. *Journal of California Anthropology*, 1976, 3:142-144
- [16] Webb JA, McKay DA, Sagona A. Analysis of the finds[A]. In: Sagona A ed. *Bruising the Red Earth: Ochre Mining and Ritual in Aboriginal Tasmania*[C]. Melbourne: Melbourne University Press. 1994, 79-132
- [17] Bradley B, Anikovich M, Giria E. Early Upper Palaeolithic in the Russian Plain: Streletskayan flaked stone artefacts and technology[J]. *Antiquity*, 1995, 69: 989-998
- [18] Nassaney MS. The role of chipped stone in the political economy of social ranking[A]. In: Odell GH ed. *Stone Tools: Theoretical Insights into Human Prehistory*[C]. New York: Plenum Press, 1996, 181-223
- [19] Flenniken JJ. The Paleolithic Dyuktai pressure blade technique of Siberia[J]. *Arctic Anthropology*, 1987 24:117-132
- [20] 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[A]. In: Vandiver PB et al eds. *Materials Issues in Art and Archaeology* [C]. Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol.267. Pittsburgh, Pennsylvania. 1992, 661-681
- [21] Crabtree DE. A stoneworker's approach to analyzing and replicating the Lindenmeier Folsom[J]. *Tebiwā*, 1966, 9:3-39
- [22] Goerke B. Preliminary report on the manufacturing sequence of blades in the Baghor tradition[A]. In: Sharma GR, Clark JD, eds. *Paleoenvironments and Prehistory in the Middle Son Valley(Madhya Pradesh, North-Central-India)* [C]. *Archaeology of the Vindhya and the Ganga Valley No. 7*, University of Allahabad, Allahabad, India, 1983, 241-246
- [23] Kenoyer JM. Preliminary report on excavations at the late Paleolithic occupation site at Baghor I Locality[A]. In: Sharma GR, Clark JD, eds. *Paleoenvironments and Prehistory in the Middle Son Valley(Madhya Pradesh, North-Central-India)* [C]. *Archaeology of the Vindhya and the Ganga Valley No. 7*, University of Allahabad, Allahabad, India, 1983,117-142
- [24] Clark JD, Williams MA. Paleoenvironments and prehistory in North Central India: A preliminary report[A]. In: Jacobson J, ed. *Studies in Archaeology of India and Pakistan*[C]. New Delhi: American Institute of Indian Studies,1986, 19-41
- [25] Clark JD, Khanna GS. The site of Kunjhun II, Middle Son Valley and its relevance for the Neolithic of Central India[A]. In: Kenoyer JM, ed. *Old Problems and New Perspectives in the Archaeology of Southeast Asia*[C]. Madison: Wisconsin Archaeological Reports, No. 2, 1989, 29-46
- [26] Davis RS. The Palaeolithic[A]. In: Allchin FR, Hammond N, eds. *The Archaeology of Afghanistan from Earliest Times to the Timurid Period*[C]. London: Academic Press, 1978, 37-70
- [27] Collins MB. Observation on the thermal treatment of chert in the Solutrean de LAUGERIE Haute, France[J]. *Proceedings of the Prehistory Society*, 1973, 39:461-466
- [28] Aubry T, M Almeida, J Neves, et al. Solutrean Laurel Leaf Point production and raw material procurement during the Last Glacial Maximum in Southern Europe: Two examples from central France and Portugal[A]. In: Soressi M, Dibble HL, eds. *Multiple Approaches to the Study of Bifacial Technologies*[C]. Philadelphia: Museum of Archaeology and Anthropology, University of Pennsylvania, 2003, 165-182

- [29] Griffiths DR, Bergman CA, Clayton CJ, et al. Experimental investigation of the heat treatment of flint[A]. In: Sieveking G, Newcomer MH eds. *The Human Uses of Flint and Chert*[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1987, 263-267
- [30] Edwards PC, Edwards WI. Heat treatment of chert in the Natufian period[J]. *Mediterranean Archaeology*, 1990, 3:1-5
- [31] Edwards PC, Head MJ, Macumber PG. An Epipalaeolithic sequence from Wadi Hisban in the East Jordan Valley[J]. *Annual of the Department of Antiquities of Jordan*, 1999, 43:27-48
- [32] Kay M. Microwear analysis of some Clovis and experimental chipped stone tools[A]. In: Odell GH ed. *Stone Tools: Theoretical Insights into Human Prehistory*[C]. New York: Plenum Press, 1996, 315-344
- [33] Nami HG, Norton MR, Stauf DJ, et al. Comments on Eastern Clovis lithic technology at the Carson Conn Short site(40bn190), Tennessee River Valley[J]. *Current Research in the Pleistocene*, 1996, 13:62-64
- [34] Wilke PJ, Flenniken JJ, Ozbun TL. Clovis Technology at the Anzick site, Montana[J]. *Journal of California and Great Basin Anthropology*, 1991,13:242-272
- [35] Hester TR, Collins MB. Evidence for heat treating of Southern Texas projectile points[J]. *Bulletin of the Texas Archaeological Society*, 1974 45:219-224
- [36] Yi S, Clarke G. The “Dyuktai Culture” and New World origins[J]. *Current Anthropology*, 1985, 26:1-20
- [37] Chen C, Wang XQ. Upper Paleolithic microblade industries in North China and their relationships with North-East Asia and North America[J]. *Arctic Anthropology*, 1989, 26:127-156
- [38] Dolukhanov P, Shukurov A. Colonisation of northern Eurasia by early modern humans as viewed through the evidence of radiocarbon dating[A]. In: Highham T et al, eds. *Radiocarbon and Archaeology*[X]. Oxford: School of Archaeology, Oxford University, 2004, 9-14
- [39] Rolland N. The interpretation of Middle Palaeolithic variability[J]. *Man(N.S.)*, 1981, 16:15-42
- [40] Rolland N, Dibble HL. A new synthesis of middle Palaeolithic variability[J]. *American Antiquity*, 1990, 55:480-499
- [41] Owen LR. Blade and microblade technology: Selected assemblages from the North American Arctic and the Upper Palaeolithic of Southwest Germany[D]. Oxford: BAR International Series 441, 1988
- [42] Davidson I, Sutton SA, Gale SJ. The human occupation of Cuckadoo 1 Rockshelter, northwest central Queensland[A]. In: Smith MA, et al, eds. *Sahul in Review: Pleistocene Archaeology in Australia, New Guinea and Island Melanesia*[C]. Department of Prehistory, Research School of Pacific Studies, the Australian National University, Canberra. 1993, 164-172
- [43] Countts PJ, Witter DC. New radiocarbon dates for Victorian archaeological sites [J]. *Records of the Victorian Archaeological Survey*, 1977,4:59-73
- [44] Price TD, Chappell C, Ives DJ. Thermal alteration in Mesolithic assemblages[J]. *Proceedings of the Prehistoric Society*, 1982, 48: 467-485
- [45] Purdy BA, Clark DE. Weathering of inorganic materials: Dating and other applications[J]. *Advances in Archaeological Method and Theory*, 1987, 11:211-253
- [46] Luedtke BE. *An Archaeologist’s Guide to Chert and Flint*[M]. Archaeological research tools, No.7. Los Angeles: Institute of archaeology, University of California, 1992
- [47] Gryba EM. The case of the use of heat treated lithics in the production of fluted points by Folsom knappers[A]. In: Clark E, Collins MB eds. *Folsom Technology and Lifeways*[C]. Oklahoma: University of Tulsa, 2002, 309-314.
- [48] Lavin L. Heat treatment and its effects on chert colour: The results of thermal experimentation on some Hudson and Delaware river valley chert types[J]. *Bulletin of the New York State Archaeological Association*, 1983, 87:1-12.
- [49] Crowfoot-Payne J. The flint industries of Jericho[A]. In: Kenyon KM, Holland TA, eds. *Excavation at Jericho, Vol.V: The Pottery Phases of the Tell and Other Finds*[C]. London: British School of Archaeology in Jerusalem, 1983, 622-759.
- [50] Gopher A. Arrowheads of the Neolithic Levant: A seriation analysis[D]. Indiana: Eisenbrauns, Winona Laek. 1994.
- [51] Quintero LA. Flint mining in the Pre-Pottery Neolithic: Preliminary report on the exploitation of flint at Neolithic Ain Ghazal in Highland Jordan[A]. In: Kozłowski SK, Gebel HG, eds. *Neolithic Chipped Stone Industries of the Fertile Crescent and Their Contemporaries in Adjacent Regions*[C]. Berlin: Ex Oriente, 1996, 233-242.
- [52] Rollefson GO. The Neolithic Period[A]. In: MacDonald B, Adams R, Bienkowski P, eds. *The Archaeology of Jordan*[C]. Sheffield: Sheffield Academic Press, England. 2001, 67-105.
- [53] Delage C, Sunseri J. Lithic heat treatment in the late Epipalaeolithic of the southern Levant: Critical review of evidence[J]. *Lithic Technology*, 2004, 29; 161-173.
- [54] Clemente-Conte I. Thermal alterations of flint implements and the conservation of microwear polish: Preliminary experimental observations[A]. In: Ramos MA, Bustillo MA, eds. *Siliceous Rocks and Culture*[C]. Granada: Universidad de Granada, 1997: 525-535
- [55] Olausson DS, Larsson L. Testing for the presence of thermal pretreatment of flint in the Mesolithic and Neolithic of Sweden[J]. *Journal of Archaeological Science*, 1982, 9:275-285.
- [56] Purdy BA. Investigations concerning the thermal alternation of silica minerals: An archaeological approach[J]. *Tebiva*, 1974, 17: 37-66.
- [57] Domanski M, Webb JA. Effect of heat treatment on siliceous rocks used in prehistoric lithic technology[J]. *Journal of Archaeological Science*, 1992, 19: 601-614

- [58] Joyce DJ. Heat treatment of Alibates Chalcedony[J]. *Lithic Technology*, 1985, 14: 36-40
- [59] Rick JW, Chappell D. Thermal alteration of silica materials in technological and functional perspective[J]. *Lithic Technology*, 1983, 12: 69-80
- [60] Weymouth JW, Mandeville M. An X-ray diffraction study of heat-treated chert and its archaeological implications[J]. *Archaeometry*, 1975, 17: 61-67
- [61] Domanski M, Webb JA, Boland J. Mechanical properties of stone artifact materials and the effect of heat treatment[J]. *Archeometry*, 1994, 36: 177-208
- [62] Borradaile GJ, Kissin SA, Stemart JD, et al. Magnetic and optical methods for detecting the heat treatment of chert[J]. *Journal of Archaeological Science*, 1993, 19: 601-614
- [63] Dunnell RC, McCutcheon PT. Heat treatment of Mill Creek and Dover cherts on the Malden Plain, Southeast Missouri[J]. *Journal of Archaeological Science*, 1994, 21: 79-89
- [64] Rowlett RM, Mandeville DM, Zeller JE. The interpretation and dating of humanly worked siliceous materials by thermoluminescence analysis[J]. *Proceedings of the Prehistoric Society*, 1974, 40: 37-44
- [65] Melcher CL, Zimmerman DW. Thermoluminescent determination of prehistoric heat treatment of chert artifacts[J]. *Science*, 1977, 17: 1359-1362
- [66] Robins GV, Seeley NJ, McNeil DA, et al. Identification of ancient heat treatment in flint artefacts by ESR spectroscopy[J]. *Nature*, 1978, 279: 703-704
- [67] Wilhelmsen KP. Building the framework for an evolutionary explanation of projectile point variation: An example from the central Mississippi river valley[A]. In: Hunt TL, Lipo CP, Sterling S, eds. *Posing Questions for a Scientific Archaeology*[C]. Bergin and Gravey, Westport, Connecticut. 2001, 101-144
- [68] Rowney M, White JP. Detecting heat treatment on silcrete: experiments with methods[J]. *Journal of Archaeological Science*, 1997, 24: 649-657
- [69] Domanski M, Webb JA. Flaking properties, petrology and use of Polish flint[J]. *Antiquity*, 2000, 74: 822-832
- [70] Flenniken JJ, Garrison EG. Thermally altered novaculite and stone tool manufacturing techniques[J]. *Journal of Field Archaeology*. 1975, 2: 125-131
- [71] Mandeville MD. A consideration of the thermal pretreatment of chert[J]. *Plains Anthropologist*. 1973, 18: 177-202
- [72] Eriksen BV. Implications of thermal pre-treatment of stone[A]. In: Schild R, Sulgostowska Z, eds. *Man and Flint*[V]. Warsaw, Poland, 1997, 325-329
- [73] Ahler SA. Heat treatment of Knife River flint[J]. *Lithic Technology*, 1983, 11: 1-8
- [74] Mercieca A, Hiscock P. Experimental insights into alternative strategies of lithic heat treatment[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2008, 35(9): 2634-2639
- [75] Christopher HS. 2003 The Origin of Modern Human Behavior-Critique of the Models and Their Test Implications[J]. *Current Anthropology*, 2003, 44(5): 627-651
- [76] Bar-Yosef O. The Upper Paleolithic evolution[J]. *Annual Review of Anthropology*, 2002, 31: 363-393
- [77] Mellars PA. Major issues in the origin of modern humans[J]. *Current Anthropology*, 1989, 30: 349-85
- [78] Mellars PA. Technological changes across the Middle-Upper Paleolithic transition: Economic, social, and cognitive perspectives[A]. In: Mellars PA, Stringer C eds. *The Human Revolution: Behavioral and Biological Perspectives on the Origins of Modern Humans*[C]. Edinburgh and Princeton: University Presses, 1989, 338-365
- [79] Mellars PA. Symbolism, language, and the Neanderthal mind[A]. In: Mellars PA, Gibson KR eds. *Modelling the Early Human Mind*[C]. Cambridge: McDonald Institute Monographs, 1996, 15-32
- [80] Chase PG, Dibble HL. On the emergence of modern humans[J]. *Current Anthropology*, 1990, 38: 58-59
- [81] Chase PG, Dibble HL. Middle Paleolithic symbolism: A review of current evidence and interpretations[J]. *Journal of Archaeological Science*, 1987, 6(3): 263-296
- [82] Gargett RH. Middle Palaeolithic burial is not a dead issue: The view from Qafzeh, Saint-Ce 'saire, Kebara, Amud, and Dederiyeh[J]. *Journal of Human Evolution*, 1999, 37: 27-90
- [83] Klein RG. Anatomy, behavior, and modern human origins[J]. *Journal of World Prehistory*, 1995, 9: 167-98.
- [84] Ambrose SH. Chronology of the Later Stone Age and food production in East Africa[J]. *Journal of Archaeological Science*, 1998, 25:377-92
- [85] Deacon. Modern human emergence: An African archaeological perspective[A]. In: Tobias PV, Raath MA, Maggi-Cecchi J, et al, eds. *Humanity from African Naissance to Coming Millennia: Colloquia in Human Biology and Palaeoanthropology*[C]. Florence: University of Florence Press, 2001, 217-226
- [86] Richard M. Evidence for hominid predation at Klasies River Mouth, South Africa, and its implications for the behavior of early modern humans[J]. *Journal of Archaeological Science*, 1998, 25: 99-133
- [87] Renfrew C. The sapient behaviour paradox[A]. In: Mellars PA, Gibson KR, eds. *Modelling the Early Human Mmind*[C]. Cambridge: McDonald Institute Monographs, 1996, 11-14

- [88] Thackeray A. The Middle Stone Age south of the Limpopo River[J]. *Journal of World Prehistory* 1992, 6: 385-440
- [89] Bar-Yosef O. The Archaeological Framework of the Upper Paleolithic Revolution[J]. *Diogenes*, 2007, 54(2): 3-18
- [90] Ricklis RA, Cox KA. Examining lithic technological organization as a dynamic cultural subsystem: The advantages of an explicitly spatial approach[J]. *American Antiquity*, 1993, 58(3): 444-461
- [91] Rick JW. *Prehistoric Hunters of the High Andes*[M]. New York: Academic Press, 1980

Fire and Stone: An Overview of Paleolithic Heat Treatment of Stone Artifacts

ZHOU Zhen-yu^{1,2,3}, GUAN Ying^{1,2}, GAO Xing¹

(1. 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; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039; 3. Institute of Archaeology, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100710)

Abstract: The earliest evidence for heat treatment of stone materials has been found in South Africa having appeared as early as 164ka and predominates among silcrete tools dated to 72ka years ago from Still Bay, South Africa. Use and control of fire are important behaviors for human evolution as deliberately heating materials improve the rock's physical properties. Archaeologists have conducted experiments to investigate heat treatment since Shippe (1963) regarded this activity as an important research aspect in prehistoric archaeology. What and how physical properties of material changed by heat treatment are the two issues of this research. The following observations are noted. 1) Some changes are visible by the naked eye such as changes in color, a greasy lustre on heated siliceous rocks; heat damage; and a slowness or acceleration of development of a patina. 2) Macrostructural changes accompanying heat treatment include: fracture toughness is reduced with increased temperature; elasticity increases with increasing temperature; loss of light energy by thermoluminescence; obliteration of fission tracks; and loss of water of hydration. 3) Microstructural changes accompanying heat treatment can be detected by X-ray diffraction, infrared absorption spectroscopy and with scanning electron microscopy. The following characteristics of heat-treated rock are: disintegration, pot-lid fractures, flake splitting, transverse fractures, and surface crazing. In addition, heated raw material could yield more flakes with less force, and with the flakes being longer than the ones from unheated materials. It is important to recognize that these characteristics are not consistently apparent in heat-treated materials.

Due to the raw materials constraints, no heat-treatment stone artifacts have been identified so far in China. Since heat treatment is considered as an important part of modern human behavior, we suggest that Chinese archaeologists should pay close attention to the identification of heated artifacts and more efforts should be emphasized in experimental work.

Keywords: Paleolithic; Heat Treatment; Human Behavior; Experiment