

DOI: 10.16359/j.cnki.cn11-1963/q.2016.0035

石料力学性能分析在旧石器 考古学研究中的应用

周振宇^{1,2}, 郇勇³, 刘薇³, 董杰³

1. 中国社会科学院考古研究所, 北京 100071; 2. 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. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190

摘要: 石料是石器制作过程中的重要因素, 石料本身的力学性能不仅与古人类的原料利用方式密切相关, 还会影响到石器打制方法、器物组合、甚至石器工业面貌。长期以来, 旧石器考古学界对于石料力学性能的判断多基于简单的岩石矿物硬度和结构特征, 实际上岩石的力学性能涵盖的内容远远超过其硬度和结构的范畴。本文使用力学研究的方法, 通过对石料的单轴抗压强度测试, 了解不同原料的力学性能, 并将其与遗址出土石制品进行比较研究, 尝试探讨岩石本身力学性能与石制品面貌之间的关系。

关键词: 旧石器时代 岩石学 力学性能 原料利用

中图法分类号: K871.11; 文献标识码: A; 文章编号: 1000-3193(2016)03-0407-11

The application of lithic raw material mechanical analysis in Paleolithic archaeology

ZHOU Zhenyu^{1,2}, HUAN Yong³, LIU Wei³, DONG Jie³

1. Institute of Archaeology, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100710, China;

2. Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins of Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044; 3. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

Abstract: Raw material is commonly considered as a very important element in prehistoric stone tools production. Different raw material has been proved to cause variability in lithic assemblages by influencing the knapping technique and tool types. The knapping properties of raw material

收稿日期: 2015-01-20; 定稿日期: 2015-03-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41302015); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05130303); 国家自然科学基金青年项目(15CKG001)

作者简介: 周振宇(1983-), 男, 湖北省黄石市人, 中国社会科学院考古研究所副研究员, 主要从事史前考古学研究。

E-mail: zzy529@msn.com

Citation: Zhou ZY, Huang Y, Liu W, et al. The application of lithic raw material mechanical analysis in Paleolithic archaeology[J]. Acta Anthropologica Sinica, 2016, 35(3): 407-417

have a strong correlation with rock mechanical properties which are determined by factors such as mineral composition, crystal size, density, texture, and degree of weathering, moisture content, etc.

For a long time, hardness is taken as only criteria to evaluate the raw material mechanical properties based on a semi-quantitative lithic grade scale. In most cases, “easy”, “good”, are used to describe the high quality raw material by knappers’ subjective sensation. Lithology analysis and mechanical tests have been proved as quantitative approach for mechanical properties of stone raw material. In the past study, four mechanical properties, elastic response, compressive strength, tensile strength, and fracture toughness were selected for testing. Fracture toughness was supposed as the most objective measure of the knapping quality of raw materials.

In this paper, the results of lithology mechanical tests have shown that compressive strength is also an objective measure of the raw material quality. Besides that, rock damage processes in compression tests include the initiation, development and nucleation of cracks that can be reflected on strain vs. stress curves. To investigate the mechanical properties of raw material, compression tests were performed using a MTS 810 material testing machine. Specimen cubes were cut out of pebbles from Paleolithic site for the tests. Force is measured by the load cell, and the deformation of the specimen is measured by a COD displacement sensor fixed between two compression plates. This deformation vs. force relationship was then transformed to a strain vs. stress curve.

Six kinds of raw material, dolomite, chert, obsidian, quartz, quartzite, and granite, were involved in the compression test. In Shuidonggou site, dolomite shows higher ductility and brittleness than quartz and quartzite. This result implies that dolomite appears better flaking properties than quartz and quartzite in Shuidonggou. Archaeology remains The quartz from Beitashanmiao site, Hubei and Xujiacheng site, Gansu present the similar lithology mechanical properties, which might be taken as one explanation for that both two sites shows similar raw material utilization and lithic assemblage.

In the chert (Daerwo site, Guanyindong site, Guizhou) and obsidian (Japan) specimens we examined, since of the microfissure, both the dispersion of maximum stress and maximum strain is bigger than dolomite, quartz, sand quartzite, and granite. This suggests that, in some case, the macro-crystal rock maybe appears better flaking properties than microcrystal rock, such as chert, flint, and obsidian.

In this study, mechanical properties analysis has been proved quite objective method for raw material utilization analysis. We suggest that knapping experiment should be correlated with mechanical tests. Moreover, more mechanical tests with different raw materials from different sites are necessary for the comparative examination and also significant for building a raw material mechanical properties database.

Key words: Paleolithic; Rock Mechanics; Mechanic properties; Raw material utilization

1 引言

石器打制的过程，实际上就是人类通过外力使之按照特定方式破裂的过程，除了人类在打制过程中的主观意识之外，岩石本身的力学特征决定了打制行为的成败，或者说掌握不同类型岩石的力学特征，施以不同的打制策略会大大提高石器制作效率。因此，掌握石料的力学特征可以帮助我们分析古人类在石器制作过程中的行为策略。了解石料的打制性能最直接、有效的手段就是检测石料的力学特征。本文通过对不同遗址中不同类型石料进行岩石力学试验，尝试探讨岩石本身力学性能与石制品面貌之间的关系。

2 研究背景

石器打制过程包含了大量力学因素，因此在旧石器研究的早期阶段，国内外学者对石制品打制的力学机制进行过深入研究，目前石制品术语有一部分就来自于力学因素，如石片角、台面角等；石制品的一些外观特征，如打击泡、半椎体、锥疤、放射线等的形成机理的解读也得益于力学分析^[1]。曾有学者将我国石片研究历史的第一阶段定义为石片破裂特征及打片方法的研究，第二阶段为石片背面特征的研究^[2]，这两方面的研究均与打制过程中的力学机制相关。王建先生与王益人先生所进行的石片形制研究主要探讨了打击力与石片的关系，提出背脊控制原理^[3]，成功地将力学机制引入石片分析中，在此基础上，将石片背脊研究与动态类型学相结合，王益人先生提出了一套新的石片分类描述体系^[4]。我国学者从力学角度进行石制品研究，除了探讨打制过程中的力学机制，也考虑到石料本身的力学特征。小长梁石制品研究中，研究者通过实验论证了石料裂隙对石器工业的影响，表明石料的力学性能与旧石器文化面貌存在一定关联，目前大部分研究者在讨论石制品特点时也都考虑到了石料的影响因素。但学界对石料力学特征的判别多为硬度、肉眼可见的裂隙、石料的原始体积大小等。实际上，石料是由矿物或岩屑在地质作用下按一定规律凝聚而成的天然地质体，不同矿物组成、成因类型的岩石其物理力学性质是不同的，大部分力学特征肉眼难以观察，因此有必要引入岩石力学（Rock Mechanics）研究手段，了解不同类型石料的力学特征。

岩石力学是研究岩石在外力作用下的应力状态、变形状态和破坏条件等力学性质的学科，属于固体力学的范畴^[5]。岩石（岩块）力学性质的含义主要包括两个方面：在外力作用下岩石的变形规律和岩石抵抗外部荷载使其破坏的能力。研究岩石力学变形性质的目的就是确定岩石的应力与应变之间的关系，即岩石的本构关系或物理方程，并确定相应的力学参数^[5]。大量实验表明，影响岩石的抗压强度和变形特性的因素很多，如矿物成分、结晶程度、颗粒大小、颗粒联结及胶结情况、密度、层理和裂隙的特点和方向、风化程度和含水量等。不同矿物组成的岩石，具有不同的抗压强度，即使相同矿物组成的岩石，受到颗粒大小、联结胶结情况、生成条件的影响，它们的抗压强度也可相差很大。一般来说，结晶岩石比非结晶岩石的强度高，细粒结晶的岩石比粗粒结晶的岩石强度高；硅质胶结的

岩石强度更高；埋藏在深部的岩石的强度比接近地表的岩石强度要高，风化作用会使强度降低；岩石的密度越大，其强度越大；吸水性强的岩石强度更低^[6-9]。

本文将通过岩石力学试验，获取几个旧石器遗址中石料的力学特征数据，并尝试探讨相关数据与石制品文化面貌之间的关系

3 石料力学试验

3.1 试验方法与原理

一直以来，考古学界关于岩石力学特征的描述或定义过于简单粗放，比如仅判断岩石的硬度。岩石的力学特征与多种因素相关，对其测试的方法、指标也有很多，比如岩石单轴抗压强度试验、压缩变形试验、抗拉强度试验、抗剪强度试验、三轴压缩及变形试验、刚性试验、点荷载指数测定等等。

Domanski 和 Webb^[10]就热处理石料的力学性能变化进行了对比研究，他们对实验石料进行了弹性模量、抗压强度、断裂韧度和抗拉强度的测试，根据实验结果，研究者将断裂韧度作为检测石料力学性能的最优指标，认为其在反映石料力学性能时具有客观规律性。但上述四项检测指标都是岩石的力学性能参数，理想状态下，同一样品的不同测试指标所反映的力学特征应具有极强的相关性。理论上，抗压强度越高，其抵抗裂纹扩展的能力增强，即断裂韧度越大。有学者针对大理岩、橄榄岩、矿石、混合岩等进行断裂韧度与抗压强度试验，发现二者存在良好的线性关系 ($K_{IC}=0.026 5\sigma_c+0.0014 R^2=0.94$)。同时抗拉强度与断裂韧度也存在良好的线性关系^[11-13]。岩石的不连续性在任何一个尺度上都是存在的，并非理想的线弹性材料，应力与应变关系曲线通常为非线性曲线。因此要精确定义弹性模量和泊桑比等指标是比较困难的，他们都是随着应力（或应变）而变化的。同时，断裂韧度是试样断裂时的受力极值，仅反映了岩石在受力过程中某一点的状态。

综合考量上述测试方法指标，单轴抗压强度试验不但可以获取试样的抗压强度，更重要的是能够得到石料的全应力 - 应变曲线，该曲线是反映材料在外力作用下力与位移之间关系的曲线图（图 1），是描述岩石力学性能的重要图形，记录了大量力学信息，这其中不仅包括岩石强度，还反映了试样弹性变形、塑性变形、脆性、延性等特征。曲线记录了岩石在单轴压力下破损的全过程，可帮助分析石料破损过程并总结其破损规律和特点。

岩石破损在人类的观察下是一个瞬时过程，但在单轴抗压试验中，伺服系统可以把这个瞬间放大成很多阶段，不同类型的岩石具有不同的曲线，也代表了不同的力学特性。Domanski 和 Webb^[10]测量断裂韧度仅仅是获取了一个峰值，忽视了岩石破损过程中其他阶段的信息。因此下文将着重介绍通过试验获取的相关遗址石料的应力 - 应变曲线。在此之前，我们有必要了解石料力学性能如何反映在石制品打制过程中。

3.2 石料力学作用下的破裂机理

岩石破裂的实质是岩石在受力过程中微裂纹的萌生、扩展直至裂纹贯通的结果，是岩石微细观结构变形破坏积累的宏观反映^[14]。根据赫兹断裂扩展模型，抗压强度试验中，

样品在垂直压力作用下产生微裂纹，压缩裂纹将在最大主拉应力处开裂，并沿主压应力迹线方向扩展。由于石器打制施加的是点接触应力，与试验机的压头的施力方式不同，因此我们首先需要了解石器打制过程中石料的破裂机理，以更好的理解岩石力学性能与石制品特征之间的关系。

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。破裂的过程可以分为发生、延伸、终止 3 个阶段（图 2）。

Odell 将岩石打制过程中的破裂分为三类：弯曲破裂、楔作用破裂和赫兹破裂（图 3）。弯曲破裂可由各种打击或压制造成。弯曲破裂不会产生类似赫兹破裂的打击泡，但通常会在打击点附近形成一个小唇边或突起。赫兹锥破裂是打制中最主要的破裂类型。当石锤接触易碎物体的表面时，它在施力区下方形成一个收缩区。这个区域的变形在接触点周围产生一个球形张力区。如果拉力能有效打破分子的表面结合，那破裂便形成一个环形裂缝，其直径略大于接触物的直径^[16]。

石片上的破裂特征指示了它们的破裂过程，石片的腹面和终端是原始破裂面，包含了关于破裂石材的力量的信息。

单个石片的终端反映了作用力如何离开石块。终端可能与施力方向、原料材质、力学性能、石核外部的不规则形态有关。在一个石片上，这些项目并不完全割裂。

大多数情况下，打制者设计的终端类型是羽状的 (feather termination)，破裂基本平行于石核外表面蔓延，然后逐渐和外表面相交。这种情况产生的石片拥有圆滑且相当薄的边缘。延性、均一性更好的石料，能够帮助作用力穿越杂质，沿稳定方向发展，以利于羽翼状远端的形成。

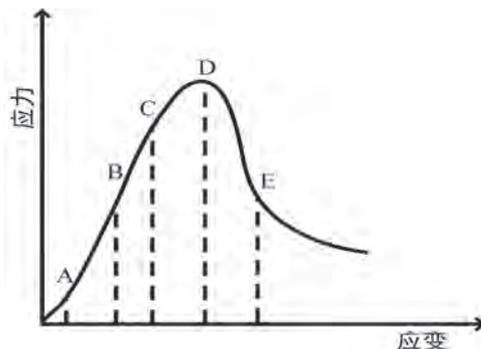


图 1 理想状态下岩石应力与应变关系曲线

Fig.1 Strain vs. stress curves under ideal conditions

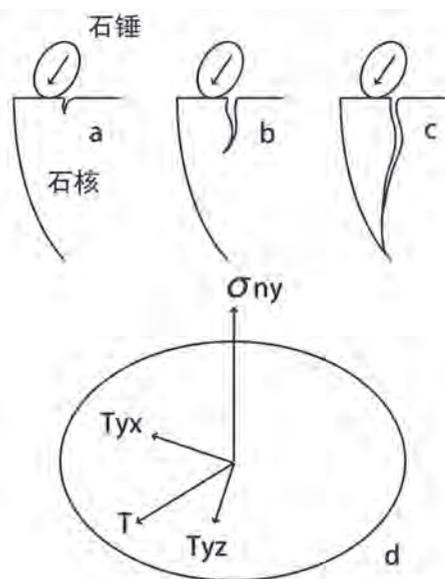


图 2 石片破裂的三个阶段 (据 Odell, 2004)^[15]

Fig.2 Three stages of flake fracture

a. 发生 initiation; b. 延伸 propagation; c. 终止 termination;

d. 打击应力组成 components of stress

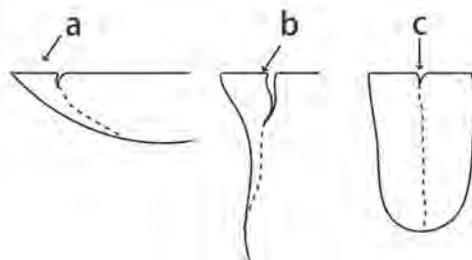


图 3 破裂类型: a 弯曲破裂; b 赫兹破裂; c 楔作用破裂 (据 Odell, 2004)^[15]

Fig.3 Types of fracture: a- bending; b- Herzian; c- wedging

通过对石制品打制过程的力学分析,结合石料破裂的力学应力-应变曲线分析,强度更低、延性和脆性更好的石料更易控制,打制效率更高,事故率更低,产出石片的质量更好。这些特点反映在石片上表现出: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。因此遗址中石片特征出现几率的变化,除了与打制技术,还与石料本身的力学特征相关。

3.3 试验过程

岩石的单轴抗压强度是指岩石在无侧限条件下,受轴向压应力作用破坏时单位面积上所承受的极限荷载。单轴抗压实验是为研究岩石在单向压应力作用下的变形和破坏规律所进行的试验,试验过程中试件内部的应力状态始终保持为均匀的单向压应力状态,显然这是最简单的应力状态,因而该试验是最基本的岩石力学性质试验,也是测量岩石材料强度和变形特征最常用的方法。

岩石试件通常是不包含有显著弱面的、较均质的岩石块体,可看作连续介质及均质体。岩石样品高径比必须保持 2:1-2.5:1。在岩石断裂力学实验中,常采用板状、块状样品,样品的尺寸和形状依研究内容而定。

由于岩石为非均质、连续的材料,因此本研究中同一原料制备 4 个试样。试样为正长方体,长轴误差不超过 0.3mm,短轴误差不超过 0.05mm。端面应垂直于试样轴线,最大偏差不超过 0.25 度。试验前需要测量试样尺寸及上、中、下横截面面积,并记录试样加工过程中的缺陷。

本次实验共制备 125 个长方体试样,分属 31 个岩石样本。本文使用 MTS810 材料试验机,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。125 件样品全部进行单轴抗压试验,123 件获取有效数据。其中 96 份实验数据来自宁夏水洞沟遗址石料,另外 27 份为甘肃徐家城遗址的脉石英、花岗岩,贵州打儿窝和观音洞遗址的燧石、周口店和湖北丹江口北泰山庙遗址的脉石英、及日本北海道的黑曜石。

4 结果与分析

4.1 应力-应变曲线 (stress-strain curve) 分析

通过对数据的整理、制图分析,我们发现所有样品的全应力-应变曲线均出现了较明显的非线性变形,这主要是在初期加载过程中岩石试样原有的张开性结构面或内部裂隙在压力作用下逐渐闭合,岩石被压密,形成非线性变形。随着荷载增加,样品被进一步压密,曲线近似直线,此时微裂隙破裂稳定发展,样品结构无明显变化。当荷载达到一定程度时,曲线开始从直线偏离,出现较小的非线性变形,由于破裂发展,此时的变形已不可逆。当曲线接近顶峰时,样品的可视破坏已经开始,外观上可见岩样表面裂隙逐步扩展,内部逐渐出现一些孤立的平行于最大主应力方向的微裂隙,随着应力的增大,微裂纹的数量逐渐增多,此时样品在压力作用下已进入非弹性变形阶段,此阶段在大部分样品上持续的时间

较短。随着荷载的进一步增大，压力达到样品所能承受的极限，即岩石的强度值，样品迅速破裂，部分样品在破裂时由于能量迅速释放，发出清晰的破碎声。由于试验机开启安全保护模式，样品破碎发生大尺度位移后，压头自动锁定，因此大部分样品破坏后曲线不完整，但根据快速破裂的现象我们可以假想此时曲线应呈快速直线下降的状态。具体到单个试样的曲线特征（图4）（图5）：

水洞沟白云岩（079），曲线破坏前区域呈现塑弹性，压缩性较强，屈服段不明显，延性较差，内部裂隙较为发育，同一砾石个体内力学性质存在变异。

水洞沟石英岩（160），曲线破坏前区域呈现塑弹性，微裂隙较少，压缩性差，屈服段不明显，延性较差，脆性一般，内部裂隙较为发育，加载过程中不断发生微破裂，个体变异范围较大。

水洞沟石英砂岩（173），曲线破坏前区域呈现塑弹塑性，压缩性好，屈服段不明显，延性较差，脆性一般，内部裂隙较为发育，加载过程中不断发生微破裂，个体变异范围较大。

水洞沟白云岩（200），曲线破坏前区域呈现塑弹性，压缩性较差，屈服段不明显，延性较差，脆性较好，内部裂隙较为发育，加载过程中不断发生微破裂，个体变异范围较大。

水洞沟白云岩（202），曲线破坏前区域呈现塑弹性，压缩性一般，屈服段不明显，延性较差，脆性较好，加载过程中偶尔发生微破裂，个体变异范围较小。

打儿窝燧石（DEW），曲线破坏前区域呈现塑弹性，强度较小，压缩性一般，屈服段不明显，延性一般，脆性较好，加载过程中偶尔发生微破裂，个体变异范围较小。

观音洞燧石（GYD），曲线破坏前区域呈现塑弹性，强度较小，压缩性一般，屈服段不明显，延性、脆性较好，加载过程中偶尔发生微破裂，个体变异范围较大。

黑曜石（RB），曲线破坏前区域呈现塑弹塑性，强度较大，压缩性一般，屈服段不明显，延性和脆性好，加载过程中偶尔发生微破裂，个体变异范围较大。

周口店脉石英（ZKD），曲线破坏前区域呈现塑弹性，强度很小，压缩性、延性和脆性都较差，加载过程中不断发生微破裂和宏观破裂，个体变异范围较小。

北泰山庙脉石英（DJK），曲线破坏前区域呈现塑弹塑性，强度较小，压缩性一般，屈服段不明显，延性一般，脆性较好，加载过程中发生微破裂及宏观破裂，个体变异范围较大。

徐家城脉石英（GSa），曲线破坏前区域呈现塑弹性，强度较小，压缩性一般，屈服段不明显，延性一般，脆性较好，加载过程中偶尔发生微破裂，个体变异范围较大。

徐家城花岗岩（GSb），曲线破坏前区域呈现塑弹性，强度较小，压缩性较差，屈服段不明显，延性、脆性一般，加载过程中偶尔发生微破裂，个体变异范围较小，强度极值附近区域曲线不稳定。

应力 - 应变曲线所反映的强度、延性、脆性在石器打制中有其特殊含义。强度指打击力使原料破碎的最大应力。延性是一种反映材料因受力而产生破坏之前的塑性变形能力的物理特性，延性越好的石料，破坏前塑性变形能力越强，即在破坏前，内部不会因小于强度的应力导致微结构破坏或微裂隙、裂纹出现。这种特性在石器打制中则反映了原料的可控性，延性越好的石料，可控性越强，能更好的按制作者的施力大小与方向破裂。脆性是材料在外力作用下产生破裂的特性，脆性越好的石料在受到大于强度的外力作用时，更加容易破裂。

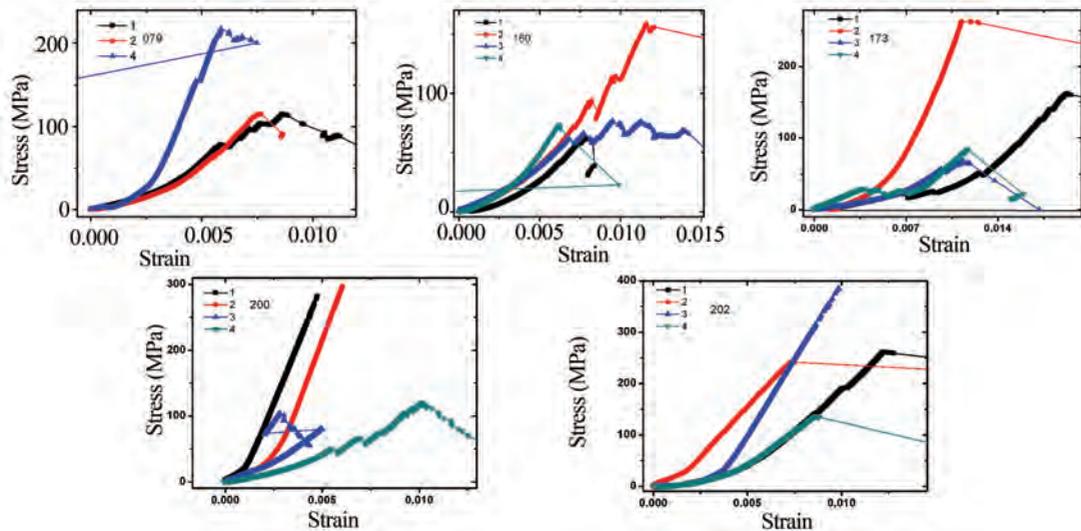


图 4 水洞沟遗址石料应力 - 应变曲线

Fig.4 Raw material Strain vs. stress curves from Shuidonggou sites

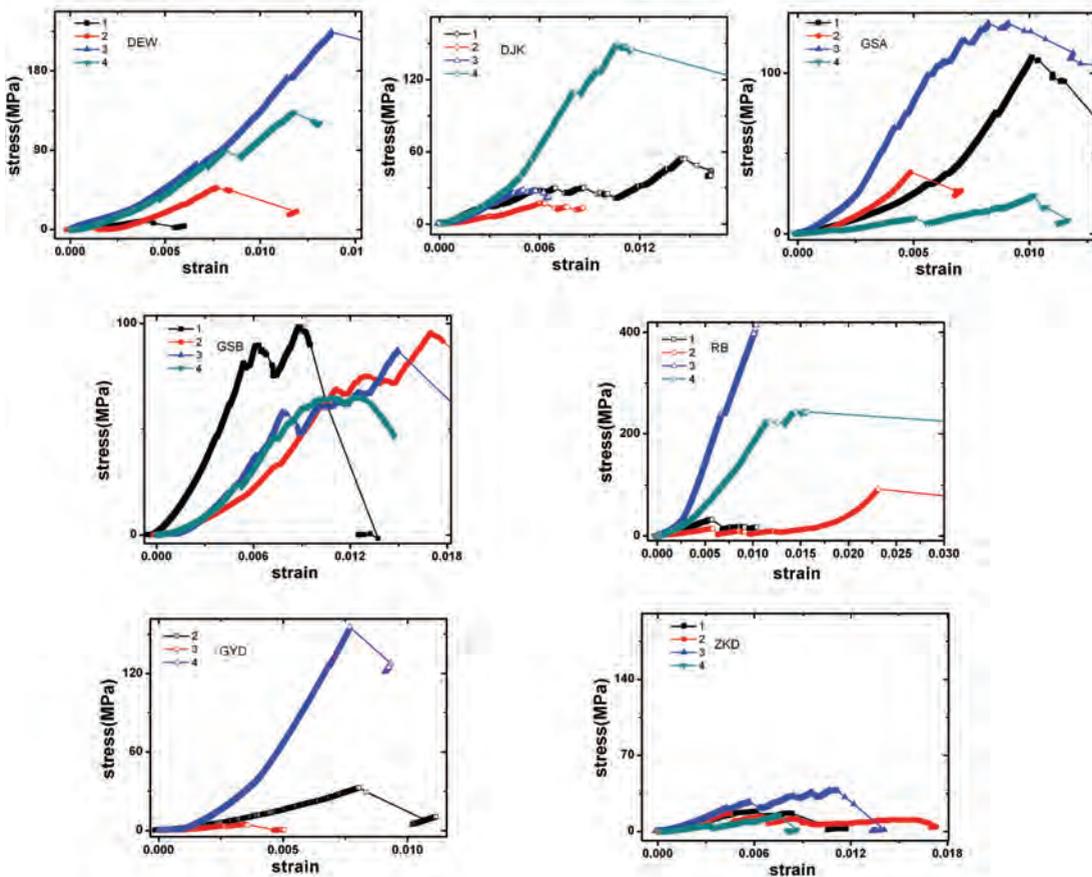


图 5 不同石料应力 - 应变曲线

Fig.5 Raw material Strain vs. stress curves from different sites

水洞沟原料整体延性一般，但白云岩的延性明显优于石英岩和石英砂岩，石英岩的延性相比最差；白云岩的脆性较石英岩稍好，石英砂岩的脆性最差，相比来说，经测试的水洞沟原料，白云岩为最优选择。实验所选用的燧石、黑曜石都表现出利于打制的力学特征，但是所有受试石料均存在肉眼可见的微裂隙，因此导致个体差异较大。徐家城、北泰山庙的脉石英延性一般但脆性好，比较适合打制石器，周口店的脉石英延性、脆性都很差，不利于打制，但此原料与遗址中出土的脉石英差别较大，并不具有代表性。

4.2 抗压强度分析

12组实验石料中1组强度等级为A级，4组为B级，4组为C级，3组为D级（表1）。

通过变异系数的对比（图6），我们发现水洞沟遗址石料单轴抗压强度值的变异系数较大，指示石料内部颗粒组成不均匀；水洞沟白云岩整体强度较高，日本的黑曜岩、贵州观音洞和打儿窝的燧石单轴抗压强度值变异系数大，这与上述原料存在较为明显的宏观裂纹有关，强度相应也较低；甘肃徐家城的花岗岩颗粒粗但组成均匀，因此变异系数小。

综上所述，单一的强度指标，无法真实反映原料的打制性能，如周口店脉石英的强度低是由本身结构疏松造成。因此强度不可作为判断原料优劣的单一标准，需与应力-应变曲线结合，综合考量原料的延性、脆性等打制性能。

4.3 考古学意义

因未采集到适合进行力学测试的燧石原料，水洞沟遗址石料的力学测试主要针对白云岩、石英岩、石英砂岩。相比于石英岩与石英砂岩，白云岩的脆性更好，内部节理相对少，且原料个体差异度较小。石制品面貌则表现为，白云岩与石英岩的完整石片比例远高于石英砂岩，同时白云岩在石叶与工具中的所占比例更高^[18]。

采自周口店遗址周边岩体中出露的脉石英强度较低，原料本身存在较多微裂隙且结构疏松，稍施力即沿裂隙崩裂，试样显示的力学性能表明该种原料不适合进行打制。周口店遗址周边有较多脉石英出露，河滩砾石中也存在少量脉石英^[19]，调查及力学性能测试结果显示岩脉脉石英质地参差不齐，优质脉石英岩脉数量少，体现出周口店遗址周边石料资源分布的复杂性。周口店第一地点石制品采用的优质脉石英来自于河滩砾石和露头岩脉，含量较低，获取原料的时间成本和距离成本高，这就需要古人类充分了解原料的分布区域和特点，由此也反映了“北京人”对原料较强的认知能力。

北泰山庙与徐家城的脉石英在力学性能上高度相似，无论是应力-应变曲线还是强度、应变统计，均较为一致。因此，尽管北泰山庙遗址与徐家城遗址在年代上差别较大，但在原料利用方略上较为相似，北泰山庙遗址的石英主要用于小型工具如刮削器、尖状器的制作；

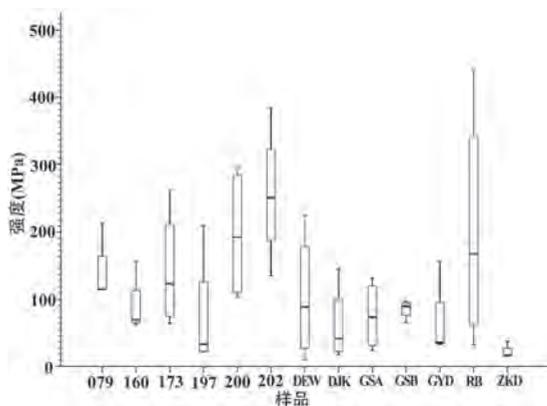


图6 不同产地石料的抗压强度
Fig.6 Raw material compressive strength from different sites

表 1 完整岩石和节理岩石的强度等级^[17]

Tab.1 Rock compressive strength grade

等级	强度描述	单轴抗压强度 (MPa)
A	极高强度 (Very high strength)	>250
B	高强度 (High strength)	100~250
C	中等强度 (Moderate strength)	50~100
D	一般强度 (Medium strength)	25~50
E	低强度 (Low strength)	5~25
F	极低强度 (Very low strength)	<5

徐家城遗址的边刮器、尖状器、石锥、凹缺器等小型石器主要以脉石英为原料制作^[20-21]。

因花岗岩颗粒粗大，一般认为不适宜用于石器制作。徐家城花岗岩颗粒较粗，延性、脆性均较差，打制过程中难以剥离小型石片，进行细致的加工修整，但此种花岗岩颗粒大小均匀，结构规整，离散性小，破坏性裂隙少，因此在遗址中主要用于石砧、石锤、或制作如砍砸器等厚重型工具^[21]。

观音洞、打儿窝及产自日本的黑曜石均显示出较好的力学性能，但因原料本身微裂隙极为发育，个体间离散性较大，同一原料的不同部位可能也存在较大区别，由此可能导致石制品中工具和断块比例均较高的情况。

5 讨论与展望

旧石器考古学研究中经常讨论的古人对原料的认知能力，在一定程度上，就是古人对原料力学性能的认知能力。岩石的力学性能受到诸多因素的影响，即使同种原料，因产地、成因、产状、形成环境的不同也会导致力学性能存在较大差异。这些差异很大程度上影响了人类获取石料资源的方式以及石制品加工策略、石制品文化面貌。除此之外，不同的岩石力学性能与人类石器使用行为存在诸多关系，如原料的强度、脆性与石器耐用度之间的关系。因此通过科学手段检测石料的力学性能，从而改变简单的通过石料种类判断打制性能的现状就显得尤为重要和迫切。本文针对我国旧石器遗址中常见的石英岩、脉石英、白云岩、燧石、花岗岩等进行力学试验，获取了相应数据，在一定程度上为石制品面貌解读提供了新的视角，特别是为阐释古人的原料利用策略提供了依据。

本文通过科学手段检测原料的力学属性在国内尚属首次，但因检测原料范围有限，无法涵盖所有旧石器时代的石料种类，存在一定局限性。影响遗址石器工业面貌及打制技术的因素很多，对于石料本身自然属性的探索研究，能够在一定程度上为石制品研究，特别是为石料利用策略研究提供更多技术层面的支撑证据。石料力学性能研究需要大量的研究积累，才能够提供更加科学、客观的结论。希望本研究能够起到抛砖引玉的作用，引起学界同仁的重视，也为旧石器考古学研究提供新的方向与内容。石料力学试验数据如何有效地反应在石制品面貌上是本研究最重要的应用意义，但考古标本存在一定局限性，如

在生产、使用、废弃、埋藏过程中大量信息的丢失, 以及考古发掘无法穷尽遗址所有石制品等等。因此, 为配合力学性能测试, 笔者同时进行了打制实验, 其结果可与力学试验数据相印证, 因篇幅所限, 相关成果将后续发表。

致谢: 张乐、李锋、马宁提供部分实验石料。李锋、关莹提供了大量宝贵建议, 使得实验顺利完成。张文定先生为实验制样提供帮助。笔者在此并致谢忱。

参考文献

- [1] 赖恩·科特雷尔, 约翰·坎明加著(陈淳, 王益人译). 石片之形成[J]. 文物季刊, 1993(3): 80-98
- [2] 王益人. 旧石器考古学中的结构与信息[J]. 文物世界, 2001(2): 31-40
- [3] 王建, 王益人. 石片形制探究——旧石器研究的一种新的理论和方法[J]. 考古与文物, 1988(4): 12-30
- [4] 王益人. 石片形制再研究——石片研究的一种新的分类分析方法[A]. 见: 王幼平, 何嘉宁, 黄蕴平编. 考古学研究(七): 庆祝吕遵谔先生八十寿辰暨从事考古教学与研究五十五年论文集[C]. 科学出版社, 2008: 44-68
- [5] 陶振宇, 潘别桐. 岩石力学原理与方法[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1990
- [6] 张永兴. 岩石力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004
- [7] 叶金汉主编. 岩石力学参数手册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991
- [8] 王宝学, 杨同, 张磊编. 岩石力学实验指导书[M]. 北京科技大学土木与环境工程学院, 2008
- [9] 岩石力学课程组编. 岩石力学实验指导[M]. 长江大学城市建设学院, 2007
- [10] Domanski M, Webb JA, Boland J. Mechanical properties of stone artifact materials and the effect of heat treatment[J]. *Archeometry*, 1994, 36: 177-208.
- [11] Lakshmikantha et al. Relation between tensile strength and fracture toughness for soils and rocks[C]. In: Pereira and Delage, eds. 3rd international workshop of young doctors in Geomechanics. 2008, 75-78
- [12] 李江腾, 古德生, 曹平, 等. 岩石断裂韧度与抗压强度的相关规律[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40(6): 1695-1699
- [13] Zhang ZX. An empirical relation between mode I fracture toughness and the tensile strength of rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(3): 401-406
- [14] 陈四利, 冯夏庭, 李绍军. 岩石单轴抗压强度与破裂特征的化学腐蚀效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 547-551
- [15] Odell G. Stone tools analysis[M]. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2004
- [16] Faulkner. Mechanical principles of flintworking[M]. PhD dissertation. Department of anthropology. Washington State University. Pullman. University Microfilms, Ann Arbor, 1972
- [17] 张学民. 岩石材料各项异性特征及其对隧道围岩稳定性影响研究[M]. 博士学位论文. 中南大学, 2007
- [18] 高星, 王惠民, 裴树文, 等. 水洞沟——2003~2007年度考古发掘与研究报告[M]. 北京: 科学出版社, 2013
- [19] 李锋, 王春雪, 刘德成, 等. 周口店第一地点第4~5层脉石英原料产地分析[J]. 第四纪研究, 2011, 31(5): 900-908
- [20] 周振宇, 王春雪, 高星. 丹江口北泰山庙旧石器遗址发掘简报[J]. 人类学学报, 2009, 28(3): 246-261
- [21] 李锋. 陇中盆地徐家城旧石器时代遗址初步研究[M]. 硕士学位论文. 中国科学院大学, 2010