

刃面结构对先秦生产工具的力学影响及功能分化的研究

张 凯✉ 廉海萍 谭德睿

(上海博物馆, 上海 200003)

摘要 通过对先秦时期不同刀具刃口的力学分析, 发现正刃和单面刃受力特点各有不同, 这是刀具得以分工作业的基础。刀具的劈砍模拟实验不仅验证了正刃的水平分力大, 还发现单面刃的水平分力受力不均, 进而加剧了单面刃的外旋—内切运动。同时实验还对摩擦力的阻碍效应做了评估, 并对刀具进入木材的破坏机理进行了探讨。结合力学分析与古今刀具的对比, 揭示了中国自古以来即有不同的刃口设计, 其设计理念沿用至今, 足见古人刃面设计的科学性和合理性。在整个工具史中, 人类从石器时代就掌握的刃面力学规律, 现代社会依然有较深的应用。

关键词 双面正刃; 单面刃; 受力分析; 力矩; 模拟实验

中图分类号 N092

文献标识码 A **文章编号** 1000-0224(2025)03-0277-16

先秦时期的生产工具已出现不同的刃口设计, 除刃缘曲、直有别外, 刃面的不同也是刃口分化的一大特点, 这其中可大致分为单面刃和双面刃。而刃面缘何分化, 具体分化的结果又有什么不同等问题, 尚未得到完全的科学解答。

从考古资料的时间和空间看, 长江流域新石器时代早期的江西万年仙人洞就已出土了单面刃和双面刃同时使用的石锛, 同流域新石器时代中期大溪文化和新石器时代晚期的屈家岭文化也均发现此种现象。^[1]在新石器时代晚期的其他地域, 如甘肃马家窑石岭下文化、四川郫县清江村的宝墩文化也出土了大量双面刃和单面刃石器与骨器。^[2-3]山西庙底沟至龙山文化的清徐都沟遗址还出现了单面刃的石斧与陶刀^[4], 在内蒙古中南部区域也发现了单面刃陶刀, 并且陶刀的刃面有打制和磨制两种加工方式。^[5]可见, 在石器时代, 不同地域的人类已经在同步并有意识地区别使用单面刃和双面刃

收稿日期: 2022-04-01; 修回日期: 2023-12-04。

作者简介: 张凯, 1986年生, 山西阳泉人, 馆员, 研究方向为古代金属工艺及技术史, Email: 418760598@qq.com。廉海萍, 1965年生, 安徽阜阳人, 研究馆员, 研究方向为中国古代金属制作技术。谭德睿, 1936年生, 浙江嘉兴人, 研究馆员, 研究方向为古代金属工艺和艺术铸造。

工具。到了青铜时代,这种现象得到继承和加强,只是工具材质由石质变成青铜,双面刃的青铜刀、斧和单面刃的青铜铤、凿等工具在商周时期各地遗址被大量发现,并且出现尺寸较大的单面刃铜刀和极具北方青铜器风格的单面刃鹤嘴斧^[6-8]。总体来说,先秦时期单面刃工具主要聚集在采掘工具上,出土地一般为采石、采矿遗址,双面刃工具的覆盖范围则要大的多。

就目前研究来看,刃面分化的现象已得到了学术界的关注。安志敏在 20 世纪 50 年代就对古代石刀进行了初步探讨,不仅对石刀进行了分类,还对单面刃的构造及出现原因是否具有特殊意义提出疑问。^[9] 20 世纪 80 年代,佟柱臣在研究仰韶、龙山文化的工具时,将刃型进一步细分,并提出偏刃会产生一个很大的分力,它的出现使劈开和切削有了任务分工。^[10] 到了 90 年代,刁家祥联合日本农林水产省筑波森林综合研究所做了组合劈刀对木材的劈开试验,得出同一劈刀角度下,双面刃劈刀比单面刃所需的劈裂载荷要小的结论。^[11] 进入 21 世纪后,罗二虎在石刀研究基础上,对绳系陶刀的刃口再次做了探讨,并将开刃方式分为正刃和偏刃。^[12]

由此,学术界已对刃面的分化达成了初步意见(切削和劈砍的任务分工),但目前的解释过于笼统,缺乏科学论证,更没有充足的量化数据来支持、证明此观点。鉴于此,本文以刀具为例,针对不同的刃面结构,从力学角度来分析单面刃和双面刃的受力特点,以期找出刃面分化导致工具职能分工的具体原因。以下将从单面刃、双面刃的两次力学分解,单刃面力矩对工具扭转的影响,以及理论分析后的实验验证三方面进行探讨。

1 现有研究资料及刃型的分类

笔者在资料整理时发现,不同的学者对刃型的分类各不相同,给后续的研究理解带来了一定的困扰,为了明确本文的研究内容和范围,特将刃型做了整理和划分,如图 1。

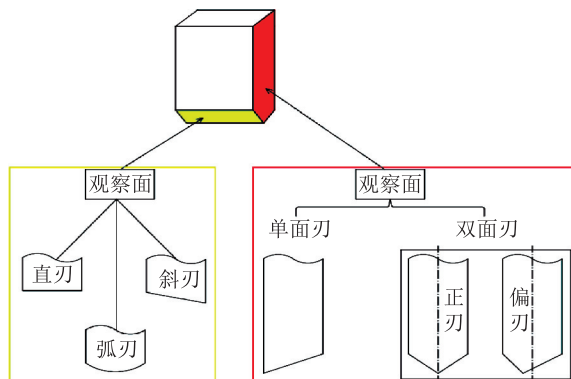


图 1 刃型分类

从纵截面上看(红色面),根据刃面的数量可分为双面刃和单面刃,而双面刃中又有正刃和偏刃之分;从横截面的视角方向来看(黄色面),根据刃缘的形状可分为直刃、斜刃和弧刃。可见,若按排列组合来算,上述刃型可分成9大类,如表1。

表1 九类刃型

纵截面视角(红色刃面)	双面刃						单面刃		
	双面正刃			双面偏刃					
横截面视角(黄色刃缘)	直刃	斜刃	弧刃	直刃	斜刃	弧刃	直刃	斜刃	弧刃

虽然刃型共分成9大类,但限于本文所讨论的刃型范围是不同的刃面,即单面刃和双面刃,所以不同刃缘的受力情形不在本文中述及。由于单面刃可以看作极端条件下(一面趋于无限小)的双面偏刃,因此在构建力学模型时,双面刃(包括正刃和偏刃)和单面刃的研究就可选取双面正刃和单面刃这两类极端的情况进行简化,而双面偏刃的受力分析则介于双面正刃和单面刃之间。

2 双面正刃和单面刃的力学分析

为了解不同刃形的受力状态对工具的功能分化有何影响,先从经典力学的角度对其进行理论分析,受力模型参数的设定如下:(1)双面正刃和单面刃的刃面夹角为楔角 θ ,取值范围 $0-\frac{\pi}{2}$,即 $0-90^\circ$;(2)双面正刃和单面刃被施加的力为 F 和 F^1 , F 和 F^1 大小方向均相同,且与刃具同轴;(3)刃具的质心用 W 表示,扭矩用 T 表示,弯矩用 M 表示;(4)为便于表述,双面正刃可简称为正刃。

2.1 正刃和单面刃的一次受力分解

经典力学中力的分解,理论上可以沿任何方向,但应遵循其实际作用效果,因此本文中第一次受力分解的原则为刃具的受力工作面。图2为刃具的一次受力分解示意图,在图2a中,正刃双面受力均匀,将 F 沿着双刃面(工作面)进行力的分解,可得垂直于工作面的两个分力,即 F_1 和 F_2 ,两个分力大小相等,互成夹角 $\pi-\theta$,且 $|F_1| =$

$$|F_2| = \frac{|F|}{2 \times \sin \frac{\theta}{2}};$$

图2b为单面刃的一次受力分解示意图,由于工作面为直边面和斜刃面,所以 F^1 将沿着这两个工作面进行力的分解,得到 F_1^1 和 F_2^1 ,两个分力大小不同,互成夹角 $\pi-\theta$,

$$|F_1^1| = \frac{|F^1|}{\tan \theta}; |F_2^1| = \frac{|F^1|}{\sin \theta}。$$

图2的受力模型与仰韶、龙山文化中的工具受力图大同小异,原图的力学分解原理如图3([10], 618-619页),图中的偏刃即本文中的单面刃,所不同的是图3的偏刃

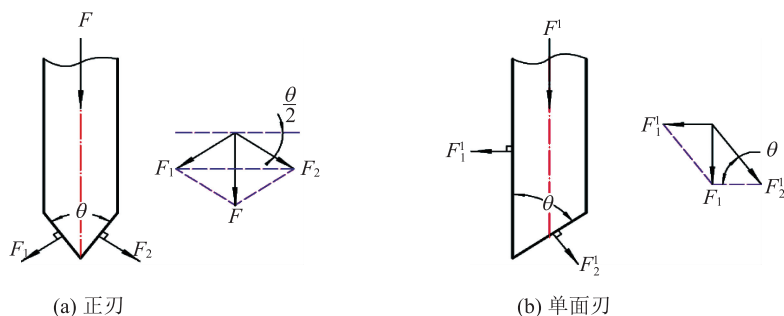


图2 沿工作面的一次受力分解

只标出了单面刃一侧的受力, 未对直边侧的受力进行标识, 同时也未对分力进行数据分析和量化。因此在缺乏正刃和偏刃具体数据的前提下, 仅靠示意图就得出单面刃有一个很大分力的结论是不充分的。

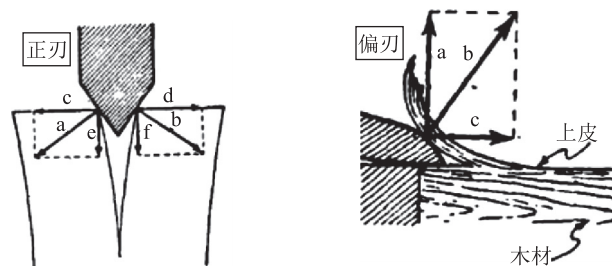


图3 仰韶、龙山文化中正刃和偏刃的受力分解

本文图2中的正刃和单面刃通过三角函数对分力进行了数据量化, 正刃与单面刃的分力 F_1 与 F_1' (或 F_2 与 F_2') 均是矢量, 既存在数值不同, 也存在作用力的方向不同, 两个变量的存在会导致刃口处的分力无法进行比较。要解决这个问题, 就需要统一变量, 即将受力的矢量转化为同方向, 这样只需进行标量对比即可, 这也是再次进行力学分解的原则和依据。于是将正刃和单面刃的分力继续二次分解, 统一转化为水平分力和竖直分力, 这样就解决了受力方向不一致的问题, 仅剩对同方向的受力大小进行比对。

2.2 正刃和单面刃的二次受力分解

图4a为正刃分力的二次分解示意图, 以一次分力 F_1 为例, 将 F_1 分解为水平左向分力 F_{11} 和竖直分力 F_{12} , 则

$$|F_{11}| = |F_1| \times \cos \frac{\theta}{2} = \frac{|F|}{2 \times \sin \frac{\theta}{2}} \times \cos \frac{\theta}{2} = \frac{|F|}{2 \tan \frac{\theta}{2}};$$

$$|F_{12}| = |F_1| \times \sin \frac{\theta}{2} = \frac{|F|}{2 \times \sin \frac{\theta}{2}} \times \sin \frac{\theta}{2} = \frac{|F|}{2};$$

同理，一次分力 F_2 经二次分解后，可分解为水平右向分力 F_{21} 和竖直分力 F_{22} ；

$$|F_{21}| = |F_2| \times \cos \frac{\theta}{2} = \frac{|F|}{2 \times \sin \frac{\theta}{2}} \times \cos \frac{\theta}{2} = \frac{|F|}{2 \tan \frac{\theta}{2}};$$

$$|F_{22}| = |F_2| \times \sin \frac{\theta}{2} = \frac{|F|}{2 \times \sin \frac{\theta}{2}} \times \sin \frac{\theta}{2} = \frac{|F|}{2}。$$

为验证正刃的二次力学分解的合理性，水平方向的左右分力应大小相等，方向相反，合力为零，竖直方向的合力应等于初始力 F 。经核验，水平方向 $|F_{11}| = |F_{21}| = \frac{|F|}{2 \tan \frac{\theta}{2}}$ ，方向相反，合力为零；竖直方向 $|F_{12}| + |F_{22}| = |F|$ ；上述分力满足

条件，说明正刃受力模型的二次分解无误。

图 4b 为单面刃的二次分解示意图，因为一次分力 F_1^1 本身就是水平方向，无需进行分解，所以二次分解时，只需将 F_2^1 分解为水平右向分力 F_{21}^1 和竖直分力 F_{22}^1 ，则：

$$|F_1^1| = \frac{|F^1|}{\tan \theta}；$$

$$|F_{21}^1| = |F_2^1| \times \cos \theta = \frac{|F^1|}{\sin \theta} \times \cos \theta = \frac{|F^1|}{\tan \theta}；$$

$$|F_{22}^1| = |F_2^1| \times \sin \theta = \frac{|F^1|}{\sin \theta} \times \sin \theta = |F^1|。$$

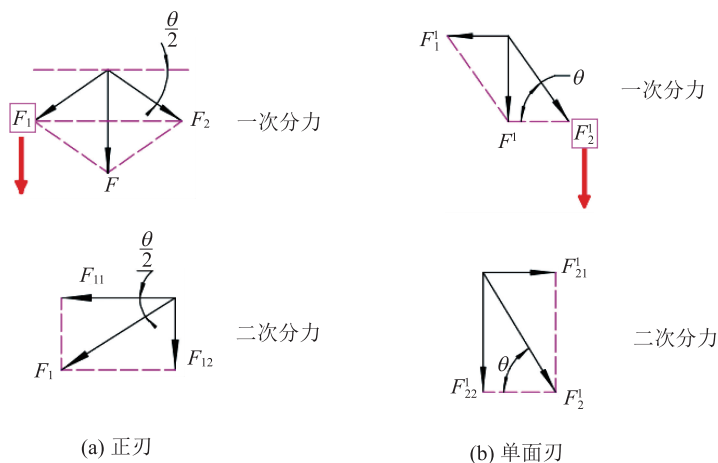


图 4 二次分解后的水平分力和竖直分力

为验证单面刃的二次力学分解的合理性，水平方向的左右分力应大小相等，方向相反，合力为零，竖直方向的合力应等于初始力 F^1 。经核验，水平方向 $|F_1^1| = |F_{21}^1| = \frac{|F^1|}{\tan \theta}$ ，方向相反，合力为零；竖直方向 $|F_{22}^1| = |F^1|$ ；上述分力满足条件，说明

单面刃受力模型的二次分解无误。

2.3 正刃和单面刃的力学特点和出现作业分工的原因

经过二次受力分解,变量得到了统一,结合 2.2 节的分析,对于正刃来说,任选一个刃面的水平分力为 $\frac{F}{2 \tan \frac{\theta}{2}}$, 竖直分力为 $\frac{F}{2}$; 单面刃由于只有一个刃面,其水平分力为 $\frac{F^1}{\tan \theta}$, 竖直分力则为初始力 F^1 ; 如图 5 所示。

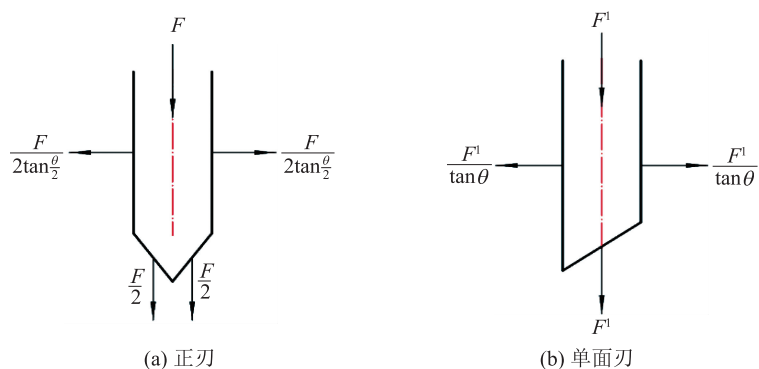


图 5 正刃和单面刃的竖直分力与水平分力

(1) 竖直分力分析

从竖直分力上看,正刃两侧受力均匀,一侧刃面的竖直分力虽为单面刃的一半,但接触面积和质量相同的情况下,微区受力等效,并无不同。因此无法从竖直分力的角度区分单面刃和正刃的差异。

(2) 水平分力分析

从水平受力上看,正刃的水平分力 $\frac{F}{2 \tan \frac{\theta}{2}}$ 与单面刃的水平分力 $\frac{F^1}{\tan \theta}$ 并不能一下

较出高低。由于上述两式存在角度倍数的关系,根据倍角公式 $\tan \theta = \frac{2 \tan \frac{\theta}{2}}{1 - (\tan \frac{\theta}{2})^2}$ 可

知,正刃和单面刃水平分力的分母正好是倍角公式等式两边的分子,由此上述难题便可由倍角公式巧妙解决,推导过程如下:

由于 $0^\circ < \theta \leq 90^\circ$, 则 $0^\circ < \frac{\theta}{2} \leq 45^\circ$;

依据图 6 的正切曲线,可得: $0 < y = \tan \frac{\theta}{2} \leq 1$, 则 $0 \leq 1 - (\tan \frac{\theta}{2})^2 < 1$;

由于 $1 - (\tan \frac{\theta}{2})^2$ 正好是倍角公式的分母, 所以数值不能为零, 因此数值范围只能取 $0 < 1 - (\tan \frac{\theta}{2})^2 < 1$;

将其代入倍角公式, 可得: $\tan \theta > 2 \tan \frac{\theta}{2}$;

考虑到 $F = F^1$, 经转化得出: $\frac{|F^1|}{\tan \theta} < \frac{|F|}{2 \tan \frac{\theta}{2}}$ 。

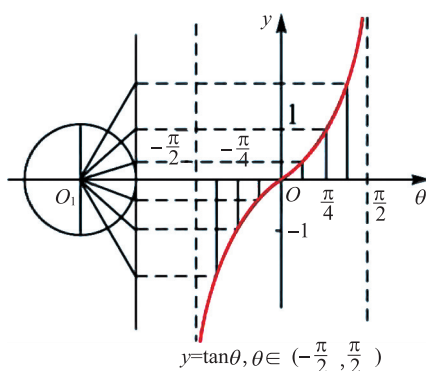


图6 正切曲线

而 $\frac{F^1}{\tan \theta}$ 是单面刃的水平分力, $\frac{F}{2 \tan \frac{\theta}{2}}$ 为正刃的水平分力, 也就是说, 在楔角小于

90°的情况下, 正刃的水平分力要大于单面刃。

水平分力对材料断裂的影响需要结合裂纹扩展的形式来讨论, 在讨论之前不得不探讨一下刃具对材料的破坏机理。以木材为例, 无论单面刃还是正刃, 其进入木材的过程并非一蹴而就, 木材断裂应分为两个阶段。第一阶段是刃缘与木材表面接触的瞬间, 此时的破坏机理为传统的强度理论, 即接触应力大于木材的抗拉强度(或抗劈裂强度)便可进入基体, 此时的接触应力需同时满足低于刃具的屈服强度, 否则会造成刃具卷边或崩裂; 第二阶段为进入木材后, 沿着已有裂纹而进行的裂纹扩展, 此时裂纹尖端有应力集中现象, 破坏机理就不适用传统的强度理论, 而须用断裂力学的准则来解释, 即存在法向和切向的应力条件下, 裂纹尖端的应力强度因子 K 大于木材的断裂韧性 K_{IC} 而形成的裂纹扩展性破坏, 由于木材的断裂韧性 K_{IC} 很低, 此时只需很小的应力便可使裂纹迅速扩展。也正因此, 在日常劳作中会发现, 人们劈开木材的接触瞬间需要很大的力, 而在沿着裂纹复劈的过程中就会省力很多, 原因就在于两个阶段的破坏机理不一样。回到本文, 无论破坏类型是劈砍还是切削, 其水平分力均与裂纹的扩展方向垂直, 充当了法向应力的角色, 此时水平分力越大, 裂纹就越容易扩展。结合正

刃的水平分力大于单面刃这一结论,推证正刃更有利于裂纹的扩展,即有利于劈砍或切削。从水平分力的特点来看,正刃的通用性强一些,对劈砍和切削中的裂纹扩展都有利。但考虑到在切削时,正刃的一面与材料基体的接触角为 $\frac{\theta}{2}$,作用力线会有一些的倾斜,存在部分水平分力的损失,而劈砍时不存在这个问题,可以充分利用水平分力对裂纹的扩展产生影响。

从上述分析看,正刃可借助水平分力大的特点,在裂纹扩展的加工方式中获得优势。而单面刃在竖直分力和水平分力中并不占优,因此尚无法得出刃面进行分化的原因,具体细节还需进一步查找。

3 力矩对正刃和单面刃的影响

正刃和单面刃的受力分析已经在第2节中详细阐述,但尚无学者关注到单面刃还涉及到力矩的问题。如图7所示,正刃在竖直劈砍时,外力 F 会通过中轴线作用于刃部,此时中轴线与质心 W 同轴。但对于单面刃来说,由于刃面的不对称,质心偏向于刃缘一侧,偏离了中心轴,而外力 F^1 依然是沿着轴线向下,此时就会产生力矩扭转的问题,针对质心而言,会产生一个顺时针的扭矩 T ,而对于刃缘来说则会相应产生一个逆时针的弯矩 M 。由此,不得不考虑单面刃的力矩(扭矩和弯矩)在使用过程中的影响。

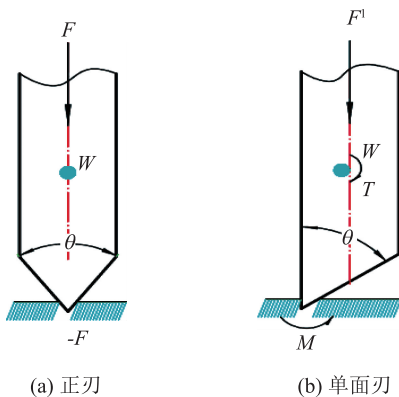


图7 力矩对正刃和单面刃的影响示意图

力矩对工具的最直接影响就是偏转,当单面刃在作业时,由于扭矩 T 的存在,运动会不自主地偏转(刃面外旋,刃缘内切),这导致单面刃的运动轨迹是非线性的。日常生活中的剪刀即是利用了这一原理,仔细观察剪刀刃面处会打磨成较小的单面刃,双剪在进行剪切时,刃面整体外旋而刃缘会相互向内挤压,致使刃面紧密贴合,这样裁剪时不至于双刃分离。辽宁喀左北岭辽墓出土的剪刀,唐代时期日本的羊毛剪等均为单面刃^[13],可见古人已经有意识地在利用单面刃的外旋—内切运动。也正是这种特点,使得单面刃的运动轨迹具备了方向性,十分利于切削剥离,这是正刃所不具备的。

直到此步,才真正解释清楚刃面产生功能分化的根本原因在于,正刃的水平分力大,导致了顺应裂纹扩展的劈砍作业;而单面刃独有的外旋—内切效应,催生了加工目标带有方向性的切削。

但同时也应注意到,伴随着扭矩的旋转,在刃尖处会产生相应的弯矩 M ,弯矩会对刀具旋转产生一定的阻碍。当刃部出现卷翘或崩裂的时候即可认为工具损坏。对正刃来讲,只需考虑刃部的接触应力与屈服极限(σ_s)的大小即可,但对于单面刃来说,除了考虑刃部的屈服强度外,还要考虑刃部的抗弯性能和刚度,即多了受损因素。直观来看,单面刃弯矩大而抗弯矩的力臂短,因此在实际工作过程中,单面刃比正刃更容易发生损坏,这或许是单面刃无法像正刃一样广泛使用的另一个原因。

此外,在讨论刃部损伤时,刃部也并非理想刚体,当面对刚度较小,强度、硬度较低的被加工物时,刃部的损伤不大,尚处于弹性变形阶段,但面对刚度、强度、硬度与之相当的被加工物时,刃部就容易进入塑性变形阶段,损伤几率就会变大。以图 7 的单面刃为例,在切削物体时,弯矩 M 会造成刀具的上表面为拉应力,下表面为压应力,而拉应力才是更容易导致工具损坏的因素,所以需要关注弯矩引发的拉应力($\sigma_{\text{拉}}$)与工具屈服极限(σ_s)的大小。当 $\sigma_{\text{拉}} < \sigma_s$ 时,刀具不会受损;但当 $\sigma_{\text{拉}} > \sigma_s$ 时,刀具就会发生塑性变形,产生了不可逆的形变;如果 $\sigma_{\text{拉}}$ 继续增大到大于抗拉强度(σ_b)时,刀具就会发生断裂,无法使用。而弯矩与表面拉应力的关系可由公式 $\sigma_{\text{拉}} = M \times y / I$ 进行联系,其中 M 为弯矩, I/y 为截面抵抗矩,如果 $\sigma_{\text{拉}}$ 有使刀具受损的风险,此时就需要加大楔角 θ ,改变刃口的结构设计,以增强抗弯截面,加大截面抵抗矩,从而达到减小 $\sigma_{\text{拉}}$ 的目的。

4 单面刃和正刃受力的模拟实验

虽然对单面刃和正刃做了详细的力学分析,并找到了刀具功能分化的原因,但上述受力模型并不能真实地反映实际情况,因为力学模型中并未将摩擦力等因素引入,因此模型分析的数据定会存在一定的偏差,而偏差的影响范围有多大,是否会影响到模型分析的准确性,则需要通过模拟实验予以评估。特此设计单面刃和正刃的模拟实验,其目的有三:其一,验证理论受力分析是否正确或合理;其二,验证不同刃面的力学特点是使刀具功能分化的观点,并提供量化数据进行直观说明;其三,对不方便计算的摩擦力,通过模拟实验进行测定,以评估其对工具使用的影响。

实验中除将刃面作为参数外,还在单独的刃型中选取两种不同的楔角进行比较,以确定楔角的大小对工具受力的影响。因为受力分析中虽提到楔角 θ ,但仅是用作受力分解,并没有关于楔角大小的直接对比,而楔角也是工具设计中一个很重要的参数,并贯穿于整个刀具的技术史,比如旧石器时代的石斧、石刀类楔角较大,新石器时代的楔角较为缩小,至金属器则更为狭小,除了考虑到与材料本身的强度有关外,受力

特点也是不能忽视的一个因素。因此,模拟实验将楔角引入有助于单面刃和正刃更全面的测定。具体实验设计如下。

4.1 模拟实验

模拟实验以测定二次分解的水平分力为主(竖直分力较为简单,无需测定),实验内容为用 30° 和 60° 楔角的青铜单面刃和正刃(共4把刀具)劈砍松木,松木选取樟子松,樟子松木纹的特点是纹理清晰、略宽较直,纹理间距也各有不同,部分位置存有结疤。青铜刀具的材质牌号为QSn4-0.3,刃口表面粗糙度 $Ra3.2$,传感器型号:BRW800-10;相关设计方案如图8所示。

图8a为设计图,1号传感器位于刀具上部的夹具之下,所测数值为刀具运动时所受的阻力。2号传感器和3号传感器位于松木的两侧,可测松木被劈开过程中的水平分力。图8b为刀具图,图8c为装置图,1号传感器测值为 $F_{阻}$,2号和3号传感器的数据分别计为水平分力 F_{x1} 和 F_{x2} ,原始的施加力 F 是通过压臂的配重 $F_{配}$ 传导至夹具上,由于配重和力臂固定,所以原始施加力 F 也就保持不变。图8d为现场测量图,表2为实验中所需的设备和材料。

表2 实验设备与材料清单

试验设备				实验材料	
1	夹持受力装置	6	直流恒压电源	10	松木块若干
2	传感器(3个)	7	数据采集板卡	11	30° 单面刃青铜刀具
3	传感器固定座(2个)	8	配重(3124g)	12	30° 正刃青铜刀具
4	虎钳	9	计算机与导线若干	13	60° 单面刃青铜刀具
5	刀具安装座			14	60° 正刃青铜刀具

需要说明的是,此实验青铜刀具的Sn含量虽然不高,但对松木来讲硬度和强度是足够的。松木的水平两侧安装有传感器,为了保持固定,需要设置一定的预紧力,而实验过程中的预紧力会在系统中予以编程去除,不影响水平分力的数据采集。编程基于LABVIEW数据库采集程序,采样率为100,采样模式为连续采集。采集图以正刃为例,刀具三个传感器调试采集的数据曲线如图9所示。

从图9中可以看到,2号和3号传感器测定的水平分力接近,前40秒为夹具的预紧力阶段,较为平稳。第40秒为刀具进入松木的瞬间,此时采集得到的水平分力最大。从第40秒往后,便进入裂纹扩展阶段,此时的水平分力陡降,出现两个台阶,说明在裂纹扩展阶段所需的水平分力很小,且出现了两次劈裂。采集图也验证了刀具进入材料基体的两个阶段,实验数据与理论分析相吻合,第一阶段为进入材料基体的瞬间,适用传统强度理论,所需破坏力最大;第二阶段为裂纹扩展阶段,适用断裂力学理论,实测所需的法向应力较小。对于图9还需要说明一点,数据采集的虽然是传感

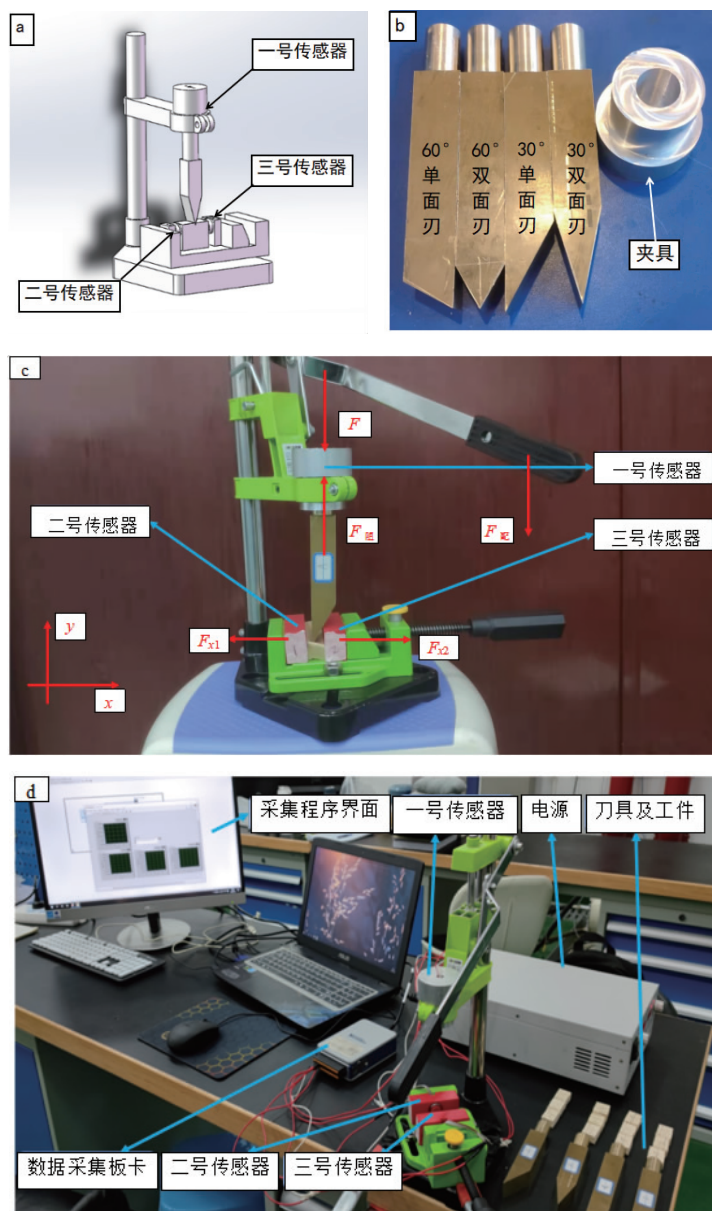


图 8 实验设计图

器输出电压与时间的关系，但系统会将电压与力的特征对应，计算出相应的力。实验结果如表 3 和图 10 所示，每种刀具进行三组重复性实验。

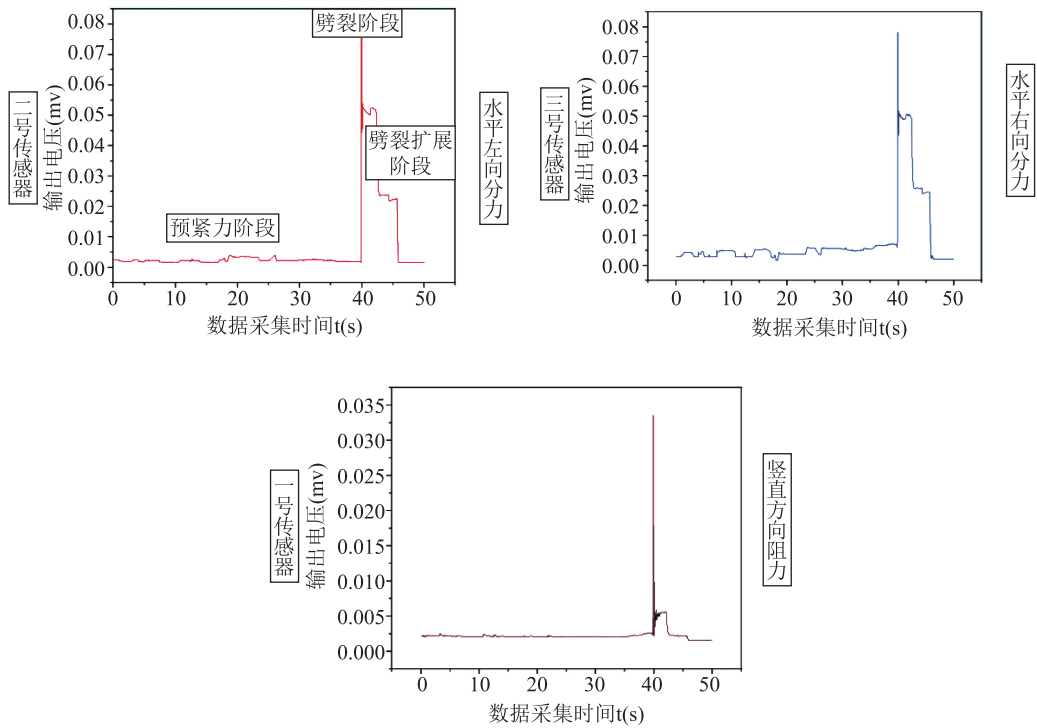


图 9 水平分力的调试采集曲线

表 3 四种刀具的力学数据

刀具型号及 实验次数	水平左侧分力/N F_{x1}		水平右侧分力/N F_{x2}		$F_{阻}/N$	
	2 号 传感器	均值	3 号 传感器	均值	1 号 传感器	均值
30°-单面刃-1	371.82	409.02	296.11	359.88	457.95	454.71
30°-单面刃-2	431.61		400.56		455.15	
30°-单面刃-3	423.62		382.98		451.03	
30°-正刃-1	445.47	436.42	447.62	431.01	371.85	368.89
30°-正刃-2	425.58		409.71		365.35	
30°-正刃-3	438.21		435.69		369.47	
60°-单面刃-1	171.65	184.67	74.26	78.07	437.11	460.99
60°-单面刃-2	190.01		79.43		466.92	
60°-单面刃-3	192.36		80.51		478.96	
60°-正刃-1	206.35	204.91	223.38	203.97	390.44	414.96
60°-正刃-2	197.82		173.22		432.47	
60°-正刃-3	210.57		215.31		421.98	

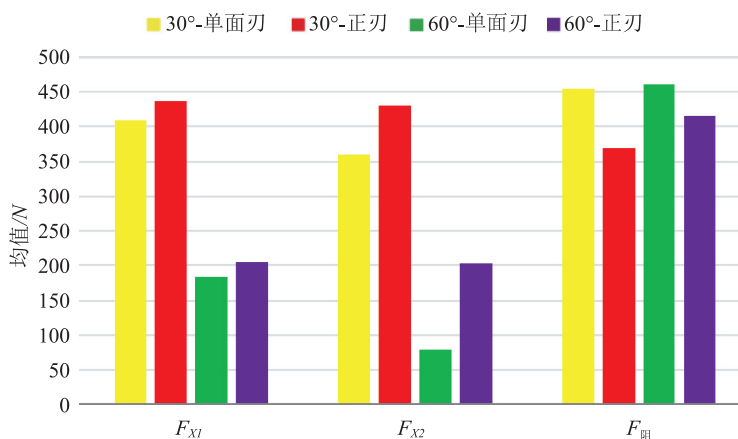


图 10 四种刀具水平分力及竖直阻力的均值

表 3 中的数据反映了四种刀具的真实受力情况，由于松木的材质不均匀，纹理疏密有别，结疤位置不定，导致同种状态下的三组采集数据有一定的偏差，但均在合理范围内。从柱状图中可以明显地反映出以下三点结论：(1) 同角度下，正刃的水平分力大于单面刃，且楔角越小，水平分力越大；(2) 正刃两侧的水平分力基本相等，但单面刃两侧的水平分力并不均等，竖直面的水平分力(F_{X1})大于斜边面(F_{X2})，且楔角越大，两侧的水平分力差值越大；(3) 两组楔角下，正刃的阻力要小于单面刃的阻力，即同等条件下，正刃比单面刃具有优先劈裂材料的优势。

从上述结论中可以看到，模拟实验的第一点结论与力学理论模型分析一致，即使在有摩擦力等因素的干扰下，正刃的水平分力依然大于单面刃。在第二点结论中实测正刃的水平分力两侧基本相等，这与力学模型分析的一致，但实测的单面刃两侧受力大幅不等却与力学理论模型出现了偏差，说明摩擦力和力矩等因素对单面刃的受力造成了较大影响。且从表 3 单面刃的数据看，直边面水平分力大于斜边面的水平分力，这是在没有做实验之前无法预测到的，结果就会导致刀具向直边面一侧进行有方向的平移，这也是单面刃在竖直力的叠加下具备外旋—内切的根本原因，这种外旋—内切运动使得单面刃具备了加工作业的方向性，即切削。第三点结论与力学理论模型分析一致，说明日常生活中正刃的通用性更强。

4.2 摩擦力对刃具水平分力的影响评估

摩擦力是接触表面阻碍物体相对运动的力，其大小等于接触面的正压力与动摩擦系数的乘积，此处的正压力即是沿工作面分解的一次分力。对于正刃来说，两刃面的摩擦力 $f = \mu \times F_N = \mu \times \frac{|F|}{2 \times \sin \frac{\theta}{2}}$ ，方向与接触面刀具的运动方向相反。理论上，此摩擦

力 f 可继续在竖直和水平方向上分解，来影响和阻碍竖直分力和水平分力的大小，但实际上被加工材料具备一定的韧性，接触面并不能完美的贴合在刃面上，从而导致两接

触面的夹角 θ_1 与刀具的楔角 θ 并不相等, 即 $f_{\text{垂直分力}} = f \times \cos \frac{\theta_1}{2} = \mu \times \frac{|F|}{2 \times \sin \frac{\theta}{2}} \times \cos \frac{\theta_1}{2}$;

$f_{\text{水平分力}} = f \times \sin \frac{\theta_1}{2} = \mu \times \frac{|F|}{2 \times \sin \frac{\theta}{2}} \times \sin \frac{\theta_1}{2}$; 上式即使在 θ 固定的情况下, 依然出现了两

个变量 θ_1 和 μ , θ_1 与被加工材料的性能有关, μ 与被加工材料的粗糙度有关, 在两个变量的影响下, 摩擦力对水平分力的影响已经很难进行比较, 同样的情况也出现在单面刃的模型中, 因此, 只能通过模拟实验的实测数据进行评估。结合力学模型的理论分析和模拟实验, 以正刃为例, 摩擦力对刀具的影响评估过程如下。

从图 8 可以明确, 模拟实验中的 $F_{\text{重}} + \text{刀具自重} = \text{力学模型中的施加力 } F$; 经称重, 30° -正刃的自重为 5.07N, 60° -正刃的自重为 5.30N, 那么, 结合表 3, 针对 30° -正刃, 力学模型中的施加力 $F = 368.89 + 5.07 = 373.96\text{N}$; 不考虑摩擦力的理论水平分力 = $\frac{F}{2 \tan \frac{\theta}{2}} = 697.82\text{N}$; 考虑摩擦力的实测水平分力 (两侧均值) = $(436.42 + 431.01) / 2 =$

433.72N; 因此, 由摩擦力导致的水平分力的损失 = $\frac{697.82 - 433.72}{697.82} = 37.85\%$, 也就

是说摩擦力造成了水平分力 37.85% 的损耗, 可见摩擦力对运动阻碍的影响非常明显; 同理, 针对 60° -正刃的摩擦力导致的水平分力损耗为 43.83%, 就是说随着楔角的增大, 摩擦力的阻碍作用也在加大。这点比较好理解, 随着楔角的增加, 正压力也在增大, 在摩擦系数一致的前提下, 摩擦力就会变大。

综上, 经过上述受力模型的理论分析和模拟实验的量化验证可知, 正刃适合劈砍的原因在于, 水平分力不仅两向均等, 且分力较大, 在接触材料的瞬间还充当了法向应力的角色, 十分利于裂纹扩展, 即劈砍作业; 单面刃适合切削的原因在于, 受力分析 (未考虑摩擦力等影响) 验算出两向分力相等, 但模拟实验却验证了水平分力并不相等, 且直角边的水平分力较大, 合力向内, 在竖直分力的叠加下, 直接导致了单面刃的外旋—内切运动, 这也正好可以解释单面刃的扭转, 使得加工的作业具备了方向性, 即切削加工。

此外, 模拟实验还初步验证了楔角对工具的受力状态有一定影响, 但具体设计的原则还需要结合材料自身的强度、刚度等特性进行联合考虑, 因为楔角并非本文的研究重点, 所以并未展开详论。

5 总结与思考

可见, 刀刃的发展变化与古人对其功能的认知有关。尤其刃面的变动, 源于古人

对力学认识的革新,进而在刀具的发展过程中促进了功能的分化。同时,模拟实验不仅验证了上述结论,还发现了理论分析的不足,起到了科学验证、补漏纠偏的作用,对刃面的结构分析具有积极的反馈意义。具体内容可总结归纳如下。(1)经过对单面刃和正刃的力学分析,尤其是二次受力分解后得出,竖直分力上两者等效,但在水平分力上,正刃恒大于单面刃。从断裂力学来讲,水平分力在劈砍时,正好与裂纹扩展方向垂直,法向应力最大,因此水平分力越大,越利于劈砍开裂。这是正刃得以分化出劈砍功能的原因。(2)单面刃由于受力中心偏移,产生的扭矩使得刃面在运动过程中发生内旋、内切,使得加工具备了方向性。这是单面刃得以分化出切削功能的原因。(3)刀具的模拟实验验证了正刃的水平分力大于单面刃,同时还发现单面刃两侧受力不均,且直边面受力较大,这直接导致了刃面合力不为零,具备了运动、剥离的方向性,与单面刃的力矩效果正好对应。(4)刀具的模拟实验不仅验证了正刃和单面刃确实具备功能分化的基础,还对无法忽视的摩擦力进行了受阻评估,且受阻程度与楔角存在一定关系。

通过理论分析与实验验证可以看到,刃面的改变不是随意的,其背后蕴藏着丰富的力学知识。人类在通过生产工具改变自然环境的同时,长期的实践经验也反馈于生产者,并使之意识到了不同刃面的力学性能和加工效率存在差别。也可以说,正刃正是由于其水平分力的优势和均匀性,是适配度和使用范围最广的一种刃型,甚至最开始的劈砍和切削等加工都是由正刃完成的,此时并未完成刀具功能的分化。但随着单面刃的发现和使用,其独有的外旋—内切效应和受力不均等特性,就使得单面刃在加工作业中具备了运动的方向性,从而使刀具具有了剥离效果,进而使得切削从加工之中脱颖而出,独立出来。当人们意识到这一科学变化之后,就开始有针对性地制作正刃和单面刃来对应不同的加工目的。至此,刀具的功能得以分化,加工方式初步演变为切削和劈砍(非切削可统称为劈砍)。通用性更广的正刃适合绝大部分的加工目标,而针对需要剥离的加工条件就使用切削效果好的单面刃。可见,刃面的改变是引发刀具功能分化的基础,但单面刃的外旋—内切效应才是刀具功能分化的根本原因。

参 考 文 献

- [1] 文士丹. 长江中游的先秦农具[J]. 农业考古, 1987(1): 156-172.
- [2] 赵信. 甘肃武山傅家门史前文化遗址发掘简报[J]. 考古, 1995(4): 289-296.
- [3] 江章华, 颜劲松, 党国松, 等. 四川省郫县清江村遗址调查发掘收获[J]. 成都考古发现, 1999: 146-163.
- [4] 王俊, 畅红霞, 王继平, 等. 清徐都沟遗址发掘简报[J]. 三晋考古, 2006: 15-59.
- [5] 白燕陪. 内蒙古中南部地区出土新石器时代陶刀研究[J]. 华夏考古, 2019(5): 63-69.
- [6] 凡国栋, 童志军, 苏文, 等. 湖北黄梅刘岳墓地 M1 发掘简报[J]. 江汉考古, 2021(4): 41-63.
- [7] 尹天钰. 红河流域的青铜文化[C]//中国古代铜鼓研究会. 铜鼓和青铜文化研究——中国南方及东南亚地区古代铜鼓和青铜文化第四次国际学术讨论会论文集. 贵阳: 贵州人民出版社, 1998: 164-168.

- [8] 王延丹, 肖婷. 浅析固原地区出土的春秋战国时期生产生活工具[J]. 文物天地, 2018(7): 41-47.
- [9] 安志敏. 中国古代的石刀[J]. 考古学报, 1955(2): 27-51.
- [10] 佟柱臣. 仰韶、龙山文化的工具使用痕迹和力学上的研究[J]. 考古, 1982(6): 614-621.
- [11] 刁家祥, 木下叙幸. 关于劈刀劈开木材的研究[J]. 木材工业, 1993(2): 29-32.
- [12] 罗二虎. 论中国古代的系绳陶刀[J]. 考古, 2007(12): 69-77.
- [13] 陈巍. 11—13 世纪中国剪刀形态的转变及可能的外来影响[J]. 自然科学史研究, 2013, 32(2): 239-253.

A Study of the Influence of Blade Surface Structure on the Mechanics and Functional Differentiation of Pre-Qin Production Tools

ZHANG Kai LIAN Haiping TAN Derui

(Shanghai Museum, Shanghai 200003, China)

Abstract Through the mechanical analysis of the different cutting edges of blades from the pre-Qin period, it was found that the force characteristics of the double-sided center blade and the single-sided blade were different, providing the basis for the division of tools. Cutting simulation experiments of tools not only verified that the horizontal component of the double-sided center blade was larger, but also found that the horizontal component of the single-sided blade was uneven, intensifying the internal cutting movement of the single-sided blade. In addition, the blocking effect of friction is evaluated, and the destruction mechanism of the tool cutting into wood is discussed. Combined with the mechanical analysis and the comparison of ancient and modern cutting tools, it is revealed that China has had different blade designs since ancient times, and that these design concepts are still in use to this day, demonstrating the scientificity and rationality of the blade designs of the ancients. Throughout the history of tools, the laws of blade mechanics that people have used since the stone age are still widely used in modern society.

Keywords double-sided center blade; single side blade; force analysis; moment; simulation experiment