

古代武器中的物理学*

曹则贤[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2022-09-27收到

[†] email: zxcao@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20230608

欲将轻骑逐，大雪满弓刀。

——[唐]卢纶

武器因人类生存需要而产生，最初的武器来自自然的启发，用到的多是尖锐、锋利的物件。制陶、采矿和冶金带来了金属兵器的制作。基于对弹性、惯性、力矩、杠杆原理、抛体运动等概念的模糊认识，人类学会了制作弓弩、抛石机等弹射武器，极大地扩展了武器的攻击距离。抛石机是人类的第一种机械，由此产生了力学这第一门物理分支学科。

1 原始武器

人类在有意识地制作工具之前经历了漫长的演化过程，对自身从自然界获得的感受，特别是伤害，是有深刻记忆的。自然状态下人类所受到的伤害包括来自尖锐物的刺伤、来自坚硬物体薄边的划伤、来自运动物体的冲击，等等。参照这些伤害了自身的存在，人类学会了制作第一批原始武器，用于攻击野兽和同类。

尖锐物品除了鱼刺、兽角、兽牙等动物组织以外，也多见于植物。很多植物都会长出或大或小的尖刺儿来保护自己，比如麦芒、苍耳、蒺藜等。最夸张的要数皂角树，遍身长满成丛的、交错的硬刺，长度可达十厘米。这些给了人类的原始武器制作以最直观的启发

(图1)。定义压强为

$$p = \frac{F}{A}, \quad (1)$$

其中 F 为施加的力， A 为着力部分的面积。压强乍看之下其量纲为单位面积上的力，但理解为(形变)能量的体密度(单位： J/m^3)才更接近其本质。尖刺的面积小，因而能产生极大的压强，这让尖刺能扎破物体造成破坏。物体抗挤压的能力被描述为硬度。

大自然里还有一类坚硬且薄的存在，比如蚌壳的边缘、石块的边棱等。锋利的薄片有切割的功能。将锋利的薄片及其边缘之间的关系看成是一个面与其一条边界线的关系，姑且描述为刀平面及刀刃，则刀的功能取决于运动方向同刀平面、刀刃这三者的取向关系。如果运动方向垂直于刀平面，这大约对

应于常说的刮、刨(push cut)；如果运动方向在刀面内且同刀刃垂直(向外)，这大约对应切、砍、剃、斫、斩；而如果运动方向在刀面内且沿着刀刃，这大约对应搯、刺、割(slice cut)。各种带刃的器械，其功能不过是用来切割、分割，但具体使用行为却是个非常棘手的话题，与被切割对象的力学性质、刀刃的微结构和用力方式有关。进过厨房的人都会注意到，搯、刺一般比切、砍容易一些；而用过剃须刀的人会注意到，制作不合理的剃刀片容易出现刺伤(地球上能制造出合格剃须刀片的企业不多，因为很少有人意识到这里还需要力学和材料科学)。刀刃容易划伤，一个显然的理由是材料的剪切模量要比杨氏模量小得多。举例来说，铜的剪切模量约为44.7 GPa，而其杨氏模量约为110 GPa。另一方面，刀刃的显微照片表明它还是锯齿状的，当刀刃沿着刀刃的走向运动时，容易造成损伤。实际上，为了更有效地切割，锯齿刀(serrated knife)是更好的设计。刀切割、砍不动的物品可以用与刀同样材质的锯子轻松锯断。刺刀是刃和尖刺的综合。

没有尖刺、薄边的物体，哪怕



图1 皂角刺、蒺藜与人造铁蒺藜

* 本文原载于：曹则贤. 军事物理学. 上海：上海科技教育出版社，2022. pp.13—30. 转载时文字略有修改。

是圆钝如球，如果以足够大的速度撞击到其他物体上，也会造成损伤。在自然界中，外来的小行星、陨石，山上滚落的石块，甚至是天上落下的小冰雹，大风刮起的沙粒，都教人们见识了被快速运动物体砸上会有什么样的效果。这些物体的击伤效果同其动能有关，未来人们会制作出专门的动能武器。

基于以上关于自然的认识，人们用兽骨、蚌壳、石头、木材制作了骨针、石刀、石斧、石镰、石钺和石铲等多种原始武器(图2)，用来狩猎或者防身。随手捡起的石头、木棒也是天然的武器。

2 古代金属武器

随着人类对自然认识的深入，人们发现了铜矿、锡矿和煤矿，从而进入了青铜器时代。从石器时代到青铜器时代要经过陶器时代，考古学上似乎对陶器时代不是特别看重。笔者以为，从科学的角度看，陶器时代的重要性绝不逊于青铜器时代。陶器与人类用火有关，水加土得泥，泥加火方得陶。陶器时代带来了模范制作工艺、炉灶垒砌技术和高温技术，这些为青铜的冶炼奠定了技术基础。人类用陶罐打水，发现罐口垂直于水面朝下时无法把罐子装满，确立了空气是一种实在的存在，这在未来的化学和热力学发展史上是浓重的一笔。陶器至今依然在广泛使用中，却鲜有再制作青铜器的了。世界各地不同古文明进入青铜器时代的时间有所不同。我国的青铜器时代，按二里头文化推算，大约始于公元前两千年，目前没有定论。青铜器铸造技术在商朝就已经非常成熟，有大量出土的文物为证。

所谓青铜，就是铜与锡、铅、

锌等元素的合金。铜矿和比较稀少的锡矿很少出现在一起。古人是如何将铜矿石和含锡、铅、锌元素的矿石(比如锡石， SnO_2 ；白铅矿， PbCO_3)同炭放到一起烧，从而发现了青铜并大体固定下来化学成分的，目前没有确切的、有说服力的证据。按照目前的说法，青铜是含约12%—12.5%的锡，少量的锌、铝、铅、锰等金属元素，以及砷、磷、硅等非金属的铜基合金。青铜具有熔点低(一般低于 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ，可以低至 $800\text{ }^\circ\text{C}$ ，比铜的熔点 $1083\text{ }^\circ\text{C}$ 低得多。记住，在一个时代所具有的加热技术能达到的极限温度处，低 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 都是优点)、硬度大、耐腐蚀、适于铸造等特点，因而被用来制作各种器皿和武器。在青铜器时代，青铜是最硬的物质，故而会被用来制造戈、矛、剑、钺、戟、铍(即长矛)等用于劈刺的兵器，当然也会用于制造盔甲、面具等防御性装备。由于青铜具有耐腐蚀的特点，这使得我们能够目睹三千多年前先辈们精湛的铸造技艺(图3)。《史记·黄帝本纪》云：“帝采首山之铜铸剑，以天文古字铭之。”从出土的一些青铜剑实物来看，这些记录不是虚言。

约在公元前1300年，随着人类获得高温的能力不断提高，人类进入了铁器时代。虽然青铜的维氏硬度(Vickers hardness)约为60—260，高于铸铁的30—80，且青铜器耐腐蚀，但青铜时代最终还是让位于铁器时代，因为锡矿的缺少让青铜冶炼难以为继，而铁矿石则大量存在。尤其重要的一点是，后来的铁匠掌握了炼钢的技术，钢的力学强度优于青铜。西周虢国墓曾出土过短钢剑，系由块炼渗碳钢打制而成，可见那时候我国已掌握了炼铁和炼钢技术。不幸的是，铁和那时



图2 石斧



图3 1965年出土的青铜制越王勾践剑，距今约2500年

候的钢不耐腐蚀，出土文物所见的铁或钢制品常常都被腐蚀殆尽。不锈钢(含铬、镍、锰以及其他众多微量元素合金，各有组分不同)是19世纪才出现的。由于铁的供应量大，随之出现了大量的铁制冷兵器(图4)。由于(钢)铁既有硬度又有韧性，故而被大量用于刀具的打造。特别地，铁还被用于制造各种农具，如锄、犁、镐、铍、镰头等，极大地促进了农业的发展。

钢铁自铁器时代以来至今一直是制作武器的主要材料。

3 物理的眼光看冷兵器

到了近代，即以我国观之，人们以木材和(钢)铁为材料发明制作了大量的冷兵器。我国早有十八般兵器的说法，即刀、枪、剑、戟、斧、钺、钩、叉、鞭、铜、锤、挝、铍、棍、槊、棒、拐子、流星(锤)。十八般兵器，泛指，其内容在各个时期会有所不同。从物理的



图4 铁枪头。铁制兵器的特征是会生锈

角度对于各种兵器加以审视，会是很有趣的。比如，参照上一节关于兵器作用方式的描述，可以发现这些冷兵器从其作用方式来看，可分为带尖儿的、带刃儿的、带钩儿的和纯粹用于击打的钝器。

所谓的十八般兵器都属于格斗兵器。使用兵器格斗，当然希望伤敌而不被敌伤，故古代征战中兵器以长枪大戟为首选，有“一寸长、一寸强”的说法。然而，长枪、大戟的长度相比刀、剑也只是略有增加，因为它受人体自身尺度的限制——四十米长的大砍刀不是那么好驾驭的。此时，我们自然会关注兵器的攻击距离问题，英语为range (Radar中的第二个r字母即来自这个词)。对于热兵器，汉语常用说法则是射程。为了增强兵器的攻击距离，人们发展了软兵器，包括鞭、流星锤、三节棍、绳镖等，这些兵器的特点是携带时是短的(一般不足一米)，但在攻击的关键时刻可以到达比较远的范围，比如绳镖的攻击距离约为使用者身高的两倍，达三米半左右。

对于不能脱手的兵器，基本上两倍身高的攻击范围就是极限了。

1) 小范围静止水面给我们提供了“平”的概念，故有“水平”的说法。

为了进一步提高攻击距离，就必须发展可脱手的兵器。在中国兵器的语境中，有所谓暗器的说法，比如手发的袖箭、飞刀、铁蒺藜、铁胆等，需要器械发射的抛石机(古文中称“砲”)、弓箭等等。物理学告诉我们，在地球表面让一个物体达到远处必须赋予其足够的初速度，因此如何对物体加速就成了增强武器攻击距离(射程)的关键。古人肯定无法想象，有一天地表上武器的射程能达到两万公里(全球到达)，而为了攻击太空目标，对武器射程还会有更高的要求。

3.1 加速与加速距离

由牛顿第二定律

$$F = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2}, \quad (2)$$

可知 $Fdx = mvdv$ 。假设将物体从位置 $x = 0$ 加速到位置 $x = l$ ，其速度从 0 变为 V ，即一般意义上炮弹或枪弹的膛速(出膛速度)，

$$\int_0^l F(x) dx = m \int_0^V v dv. \quad (3)$$

假设此过程中力不变，是一个匀加速过程，可得

$$V = \sqrt{2Fl/m}, \quad (4)$$

可见采用长的加速距离是提高炮弹、子弹膛速的要素。反过来，如果是阻力，则 Fdx 为负值，

$$\int_0^l F dx = m \int_V^0 v dv, \quad (5)$$

则

$$l = \frac{1}{2} m V^2 / |F|. \quad (6)$$

此即所谓的(匀减速时的)刹车距离。加速距离的概念在武器设计中很重要。冷兵器里的抛射物被安放在长臂的一侧，热兵器里炮管、狙击枪管的加长设计，都是为了获得足够长的加速距离，从而获得大的初始速度。当然有效规范初始速度的方向也是重要考量——炮管越

短，炮弹离膛速度的横向分量的不确定度会大一些。在使用物体弹性能的一类冷兵器中，如弓箭、使用绞盘的抛石机等，因为材料自然的弹性范围太小，如何获得足够大的加速距离一直是个难题。当前用于制作气球、听诊器管子、自行车内胎等的高弹材料，要到20世纪50年代才出现。

3.2 杠杆原理

杠杆原理是物理学发展初期的一个重要发现。阿基米德曾有言：“给我一个支点，我能撬动地球(δῶς μοι πᾶ στῶ καὶ τὰν γᾶν κινάσω)。”利用杠杆不仅能撬动重物，而且还能把重物抛射出去，故而可作为许多武器的物理基础。

假设有一个支点，一根直杆在支点两侧的长度分别为 l_1, l_2 ，两侧相应地悬挂重物的重量为 G_1, G_2 ，则平衡(此处平衡的意思是杆是水平的¹⁾，同重力的方向垂直)条件为

$$l_1 G_1 = l_2 G_2. \quad (7)$$

如果一端是重物，一端是用力往下压，则平衡条件为

$$l_1 F = l_2 G_2, \quad (8)$$

显然当 $l_1 > l_2$ 时，有 $F = \frac{l_2 G_2}{l_1} < G_2$ 。

也就是说在长的一端用力，能够以较小的力撬动短的一端较重的物体。

上述内容是一般情形的特例。它涉及的一个重要概念是力矩。设关于某参照点，力(矢量) F 之着力点的位置矢量为 r ，可定义物理量力矩，为

$$\mathbf{M} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}, \quad (9)$$

这里的乘号代表矢量的叉乘，数值上的关系为

$$|\mathbf{M}| = |\mathbf{r}| |\mathbf{F}| \sin \theta, \quad (10)$$

其中 θ 为从矢量 r 转到矢量 F 的角度。力矩 M 和转动(绕过参照点的、

与 $r \times F$ 所张的平面相垂直的转轴(加速度有关。一般物理书里说力矩是矢量,这是错误的,力矩是二矢量(bivector),只是碰巧在三维空间里你可以把它当矢量处理而已。回到杠杆的情形,若两端加力为 F_1, F_2 , 则当

$$r_1 \times F_1 + r_2 \times F_2 = 0 \quad (11)$$

时体系关于支点的转动(角速度)不变。若原来角速度为零,即不转动时,那就保持不转动。

现在设想有一个杠杆,在离支点距离短的一侧加载了大块的重物 G_2 ,而在长的一端加载一个较小的重物 G_1 和用其他方式加载的、向下的力 G ,为简单计,假设杆水平时系统处于平衡状态,有方程:

$$l_1(G_1 + G) = l_2G_2 \quad (12)$$

现在,突然去掉力 G ,系统失去平衡转动起来,较长的一端会朝向斜上方运动,且被加速。如果较小的重物 G_1 本来就在杠杆的上方且不是固定的,则当它被带到一定位置上,即杆开始被减速时,会依惯性被抛出。这就是一类抛石机的原理。抛石机设计上可以有很多变种。抛石机原理可以理解为先实现力矩平衡条件,即方程(11),然后突然打破平衡,使得长臂端装在筐(篮,兜,窝, bucket)里的抛射体被发射出去。由方程(11)可见,力 F_1, F_2 可以在支点的两侧,也可以在同一侧,方向正确就行。作为短臂一侧的力,可以来自配重(counterweight),也可以来自弹性物体形变提供的弹力;作为长臂一侧的用来控制发射时机的力要对应恰当的释放抛射物方式,可以是来自配重(突然剪断绳索释放),也可以靠许多人往下拉(人突然松手释放),或者通过弹性物体形变提供弹力(靠绞盘机关突然松开释放)。实际使用中,平衡时的构型以及相应施加的力是可

变的,从而可以调节抛射物的重量和射程。总结一下,突然撒手,去掉约束或者其他妨碍抛射物飞出的限制,则长端加速运动起来,在弹兜(bucket, armature)不再能加速抛射物时抛射物会依惯性飞出,其后按照空气中、重力场下的抛体运动规律飞向目标,这就是抛石机一类机械的工作原理。

物体在造成拉伸或者挤压的外力撤去后恢复原状的性质即为弹性。弹性的结构在大自然中比比皆是。葫芦科植物卷成螺旋状的触须(图5(a)),就表现出很好的弹性,这启发人们制作出了弹簧,也启发人们认识弹簧的用途(对植物来说,提供灵活的弱连接,同时还能减振。这个性质将来会用到扫描隧道显微镜上,实现了给原子照相)。弹簧在武器设计中时常会用到,比如用于枪机、地雷的触发,用于载具的减震,它也是初级物理里的第一个物理模型(图5(b), (c))。设有一根弹簧,从自由状态被拉伸或者压缩了的长度为 l ,若所需的力可表达为

$$F = -kl, \quad (13)$$

我们认为材料还在弹性范围,这里的系数 k 称为弹簧的弹性系数,取决于弹簧的几何以及制作弹簧材料的力学性质。实际的弹簧,拉伸和压缩对应的弹性系数是不同的,为简单计,此处不论。将一根弹簧在一端固定,从另一端被压缩的长度达 l ,则在这根弹簧中就储存了能量

(弹性势能):

$$E = \int_0^l kx dx = \frac{1}{2} kl^2 \quad (14)$$

如果在自由端悬挂一个质量为 m 的物体,则在理想状况下,弹簧再恢复自由状态时释放出全部能量,而物体被加速到速度 V ,由关系式

$$\frac{1}{2} kl^2 = \frac{1}{2} mV^2 \quad (15)$$

给出。如果物体同弹簧没有连接,它就会被发射出去,成为一粒弹丸;如果物体同弹簧相连接,它就会拉着弹簧继续前行,到达拉伸长度为 l 时停下,然后被拉回,经过自由状态位置直到把弹簧压缩到最大压缩状态,如此往复。这后一种情形,即弹簧挂一个质量为 m 的物体的理想体系,就是谐振子体系(图5(c))。设想在弹簧形变为 x 时的速度为 v ,则谐振子体系的物理由哈密顿量

$$H = \frac{1}{2} kx^2 + \frac{1}{2} mv^2 \quad (16)$$

描述。请千万不要小瞧这个弹簧构成的谐振子模型,它是物理学最基本的模型,如果你觉得它简单,那是因为你还没学到稍有难度的内容。比如等你学到了如何将 $H = \frac{1}{2} kx^2 + \frac{1}{2} mv^2$ 所表示的能量量子化,这说明你可能开始学量子力学了。有一种说法,如果你理解了谐振子,你就理解了75%的物理学!

3.3 惯性原理

物体在所受外力为零的情况下会保持速度不变,作匀速直线运

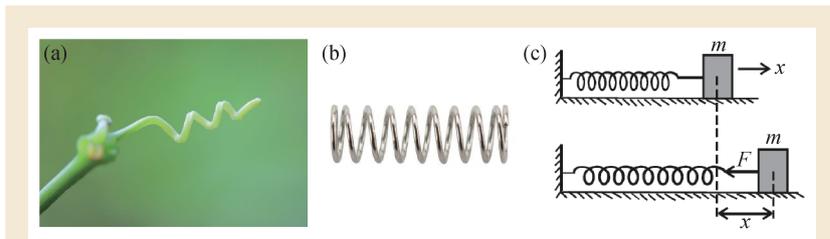


图5 植物触须(a)、弹簧(b)与谐振子模型(c)

动,这就是所谓的惯性原理(广义相对论修订了惯性的定义,在除引力以外的外力为零时,物体的运动为惯性运动,轨迹为测地线。此处不论)。将外力加于一个物体上,物体的速度根据公式(2)改变;一旦撤去外力,物体即以此时刻的速度保持匀速直线运动。当然了,在地球表面,重力始终存在,在继续运动时还会有空气的阻力,这是后话。一些简单的武器就是利用的惯性运动,比如我国的绳镖、中亚直到西藏一带使用的抛石器(sling,图6)。这类武器利用的是如下的事实:在绕轴匀速转动中,物体的线速度为

$$v = \omega r, \quad (17)$$

方向沿着所转圆圈的切线方向,其中 r 为离转轴(人体的中轴线)的距离,而 ω 为转动的角速度。由于离转轴的距离 r 可以超越人的臂长,因此在角速度足够大时将抛射物释放,可以获得人类直接抛掷所达不到的线速度。图6中是一种简易的抛石器,绳子中间有个皮窝,用来



图6 一种简易的用绳子制作的抛石器



图7 弓、弩与弹(dàn)弓

兜住石子。握住绳子一端,用食指扣住另一端的环,转动;在合适的时机,放平食指松开绳子一端,石子依惯性飞出。

4 弹射武器

人类还生活在树上的时候就认识到弹性的威力了,被自身压弯的树枝反弹回来抽在身上是很疼的。实际上,猿猴都知道利用树枝的弹性登高跃远。将一截柔软的树枝弯曲后用绳子绷紧,就做成了一件最原始的冷兵器——弓,可以把一根细杆儿——箭,发射出去。箭字,从竹,箭从前是用竹子、树枝做的(笔者小时候玩的弓,射出去的箭是高粱秆的梢。箭要直),后来前端有了金属制的箭镞。相比于人直接投出去的投枪或者石块,弓箭首要追求的是增加射程。此外,弓携带、使用方便,一只弓可以配备多只箭,必要时箭还可以放弃不理。

弓是抛射兵器中最古老的一种弹射武器。弓由富有弹性的弓臂和柔韧的弓弦构成,拉弦张弓过程中积聚的力量可在瞬间释放。实际上,在古代的弓结构中,因为缺乏高弹性的材料做弓弦,弹力主要由弓臂(弓把和弓片)提供。最原始的制弓材料是木材,紫杉木、白蜡木、榆木、山榆、桑木、红槭等都是较好的选择,万不得已也有用竹子的。后来,为了提高弓臂的弹力,又出

现了复合弓,以混合的木材或骨头构成的细长片制造。这种层压物可以制造出极具威力的弓。现代的弓多是用轻质金属合金、

碳纤维混合制造的,也是复合弓。

最简单的弓用手直接拉开,因此考验的是射箭者的力气,强健者能开七十多公斤的强弓。为了克服手的力量不足的问题,有人将弓改为平射,用腰部开弓(belly-bow)。人类在使用弓的过程中不断对其改进,因此出现了很多弓的变种,比如弩。弩有很多优点,加了扳机的弩其待发射状态可以长时间保持,可以用双手开弓。弩身是横置的,可以将箭矢装于“臂”上的箭槽内,因此弩的射程远,更有准头。弩可以连发。1986年出土于湖北荆州的战国连发弩,矢匣中装有二十根左右短箭,每次发射两根。弩如今还是反恐斗争中的利器。

弓的一个变种是弹(tán)弓,其弓弦中间改为一个皮兜儿,即弹弓兜(armature, bucket),发射出去的是石子或者泥丸而非箭矢。此时的弹弓,其弹性还是主要来自弓臂。元代画作《挟弹游骑图》,画中人手里拿的就是弹弓。及至后来有了高弹性材料,其弹性系数和弹性形变都够大从而能保证将弹丸加速到足够高的初速度,这样就可以免除弓臂提供弹性的功能。弓臂不再要求有弹性,退化为单纯的支架,这样就可以用金属材料或者木头充任,所谓的木头支架常常是天然的树杈,如小榆树、柳树的树杈。对弹丸加速所要求的弹性来自高弹性橡胶制品,其弹性范围甚至超过自然长度。这样,弹弓的设计既可以照顾到人体工程学的要求(与使用者手臂有关),又可以充分提供加速距离。以笔者用弹弓为例,皮筋自然长度为40—45 cm、拉伸状态长度为112 cm时感觉最舒适。这种形式的弹弓,由固定支架、弹性的筋和弹兜儿(皮窝儿)构成,一般称为弹(dàn)

弓，或许是因为这时关注点在弹(dàn)丸身上吧。弹(tán)弓和弹(dàn)弓都是很好的冷兵器。当代的电磁轨道炮也不过是一种弹(tán)弓而已，不过那里的弓弦可能是一道电弧。

弓、弩、弹弓(图7)，说到底都是单兵武器，取决于个人的体力，因此其射程、杀伤力都不大。为了获得更大质量的抛射物(projectile, missile)和更远的射程，古人开始研制用来抛射的大型机械。机械，相关的词汇有 mechanic, mechanism, 给人类带来了最为基础的一门物理学：mechanics (力学)。用来抛射重物的大型机械名称繁多(抛石机、投石机、投石车或弩炮等，西文词有



图8 放羊铲，最简易的抛石机

Catapult, Mangonel, Onager, Trebuchet, Ballista等)，发射物可以是石块、箭矢、投枪或者燃烧罐等，为简单计，此处笼统地用抛石机一词指代。抛石机在中国最早出现于战国时期，在西方约出现于公元前5世纪。抛石机是人类制作的第一个称为机械的东西(我总觉得在此之前的弓应该算是机械)。关于抛石机的机理，上节已有简单介绍。其实，放羊人用的铲子就是一种特殊的抛石机(图8)。放羊人两手的握铲处可以交替地作为支点和用力点，而其铲子对应弹弓或者抛石机的皮窝，其形状是两侧往上半卷，方便从地上自动装填石子，聪明至极也自然至极。抛石机在中外历史上都有各种不同的设计(图9)，感兴趣的读者请参阅专门著作。抛石机的攻击距离，最远也不过200 m，这是冷兵器攻击距离的极限了。更大的攻击距离依赖于热兵器的出现，并随着科学技术的进步不断刷新纪录。

5 结束语

武器是人类因生存需要而自然产生的。最初的武器来自大自然。

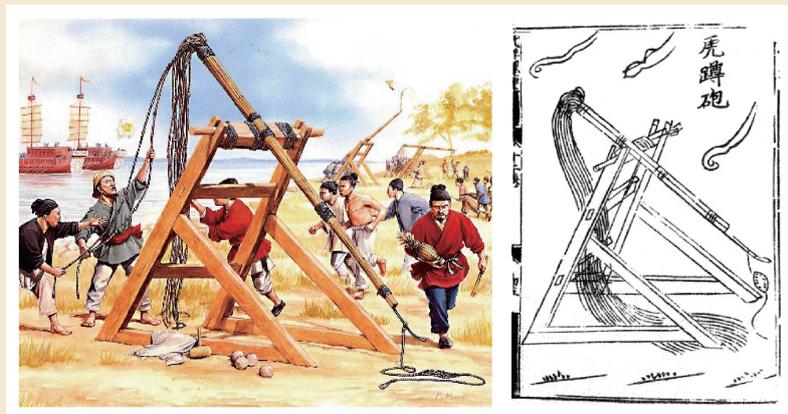


图9 《武经总要》里的虎蹲砲

古代人在生产活动中逐渐学会了制陶、采矿和冶炼，有了金属制兵器。基于对弹性、惯性、力矩、杠杆原理、抛体运动等概念的模糊认识，人类制作了弓弩和抛石机，极大地扩展了武器的攻击距离。抛石机是人类制作的第一批机械，基于此产生了机械这门技术行当和力学这门科学。军事与物理学之间的相互促进，在抛石机被应用的那一刻开始了。从对最原始武器的科学思考的最直接的产物(outgrowth)，是经典力学和弹道学。力学，作为对武器思考的学术产物，还只是一个开始。其后的人类社会发展过程中，战争与物理之间一直有一种也许是我们感到非常痛心的互相促进的关系。这个世界上最重要物理学奖来自诺贝尔奖，诺贝尔奖还有个个别名叫“炸药奖”，这或许不只是巧合吧！

参考文献

- [1] 杨泓. 古代兵器通论. 北京: 紫禁城出版社, 2005
- [2] Sidebottom H. Ancient Warfare: A Very Short Introduction. Oxford University Press, 2004
- [3] O'Bryan J. A History of Weapons: Crossbows, Caltrops, Catapults & Lots of Other Things that Can Seriously Mess You Up. Chronicle Books, 2013
- [4] Loades M. The Longbow. Osprey Publishing, 2013
- [5] Tylecote R F. A History of Metallurgy. Maney Publishing, 2002
- [6] Atkins T. The Science and Engineering of Cutting. Elsevier, 2009
- [7] Chevedden P E *et al.* Scientific American, 1995, 272(7):66
- [8] Michael S. Fulton M S. Artillery in the Era of the Crusades: Siege Warfare and the Development of Trebuchet Technology. Brill, 2018

Scryo® 连续流型低温恒温器

- ▶ 新型高效热交换器结合超绝热轻质柔性液氮传输管线，超低液氮消耗率，最低温度<1.8K
- ▶ Scryo-S-200/300和500采用特殊温度漂移补偿设计和优化的超绝热支撑设计
- ▶ 与Qcryo®结合可升级为无液氮闭环系统，无需消耗液氮即可获得<1.8K，并保持低震动和漂移特性



Scryo-S-100通用型



Scryo-S-200超高真空恒温器



Scryo-S-300紧凑微型



Scryo-S-400超高真空低温插件



Scryo-S-500显微型

Scryo® 系列低温恒温器典型特性 *

类型	Scryo-S-100 通用型	Scryo-S-200 超高真空恒温器	Scryo-S-300 紧凑微型	Scryo-S-400 超高真空低温插件	Scryo-S-500 显微型
典型特性	真空	超高真空	真空	超高真空	真空
样品环境	真空	超高真空	真空	超高真空	真空
温度范围	<1.8K-500K	<1.8K-420K	<1.8K-420K	<1.8K-500K	<1.8K-420K
震动水平	-	<5nm	<10nm	-	<5nm
漂移水平	-	<2nm/min	<3nm/min	-	<2nm/min
温度稳定性	<25mK	<10mK	<10mK	<25mK	<10mK
制冷剂消耗率	<0.5L/hr@5K	<0.55L/hr@5K	<0.55L/hr@5K	<0.5L/hr@5K	<0.55L/hr@5K
典型应用	紫外 / 可见光 / 红外 / THz、傅里叶光谱、基质隔离、穆斯堡尔谱、高压 / 高能物理等	STM、AFM、离子阱、显微光学、近场光学、低温材料和高能物理等	(倒置) 显微镜、红外显微镜、显微磁光、Raman光谱、傅里叶光谱、显微PL和EL、X-ray等	ARPES、MBE、STM、AFM、离子阱、ESR、高能物理、X-ray等	显微(磁光)、低维材料、拉曼/傅里叶/布里渊散射、高压/高能物理等

