

金相实验室中的冶金考古探索： 实验模块建设与文化传承

Where Microscopy Meets History: An Experimental Module for
Innovative Teaching and Cultural Heritage

供稿|杨平 / YANG Ping

内
容
导
读

在北京科技大学材料科学与工程学院的金相实验室内，悬挂着一组引人注目的金相照片——它们记录了古代铁器的微观组织，也默默见证着学校金相（现在的材料）专业与科技史学科之间深厚的历史渊源。这里不仅是《材料科学基础》等专业课程的重要实验基地，更曾孕育出一套系统的金属学实验体系。近年来，随着冶金考古研究的深入，我们萌生了一个新的构想：以金相实验室为平台，构建一个集实物展示、样品观察、组织分析与背景解读于一体的冶金考古实验模块。该模块将展出多组经检测的古代金属器物，并配套开发三个新实验，涵盖铁制兵器、铁制农工具及青铜铸币的微观组织研究。我们希望通过这一跨学科实践，不仅增强学生对材料科学的兴趣，更在观察与分析中感悟中华冶金文明的辉煌，实现专业知识与历史文化的有机关联，真正做到“以物证史、以材育人”。

考古学隶属文科，早期主要通过文献学、器型学研究出土文物。我国自 20 世纪 50—70 年代起，逐渐将自然科学法引入考古领域，例如利用金相法检测古代金属器物的微观组织，分析其冶金制造工艺和热处理工艺。随着金相法检测应用的普及，古代金属器物的微观组织特征及形成规律被不断揭示；随着检测数据的积累，人们愈发了解千年前的器物生产工艺，进而认识到其对当时社会政治、文化、经济及生活等的影响。但由于无人亲身经历古代的制造过程，难以证实现有工艺分析结论绝对准确。随着检测技术的进步，古代器物微观组织的细

节被持续揭示，逐步接近古代制作工艺的真相。

北京科技大学前身为北京钢铁工业学院，后更名为北京钢铁学院，其特色学科围绕钢铁材料原矿石的获取、生产、器件制作、使用和评价展开。20 世纪 70 年代，金属材料系金相教研室的宋琳等^[1]、孙淑云等^[2]、韩汝玢等^[3-4]成立冶金史组，开展冶金考古研究，最终发展为如今的北京科技大学科技考古与文化遗产保护研究院，不仅取得很多冶金考古成果，荣获得国家级科技成果奖，还设立了“柯俊考古研究奖”，其对应的学科与材料学科同为学校的国家级一流 A+ 学科。当年，冶金史组的研究人员主要

作者单位：北京科技大学材料科学与工程学院，北京 100083

在金相实验室获得古代金属器物的金相照片,并借助金属材料系电镜室的扫描电镜及能谱仪器开展研究。图1为当前金相实验室墙上仍在展示的早期冶金史研究室在此拍摄的古代金属组织照片,据说由金相实验室主任胡梦怡老师题写说明。这些照片极大地激发了授课师生的兴趣与遐想,也印证了金相教研室、金相实验室与冶金史研究所之间深厚的历时渊源。遗憾的是,除了上述照片,还缺少进一步的考古实物或信息展示。长期以来,材料科学与工程、科技史这2个国家级一流A+学科的研究者及学生相互交往很少。因此,推动这2个具有共同历史渊源的工科与文科实现跨学科有机结合十分必要。具体而言,可通过在金相实验室建设一个冶金考古

展示平台或模块,将《材料科学基础课程》(即原金属学课程)、《材料科学基础实验课》(原金属学实验)与古代金属器物的观察分析相联系,既能提升学生的专业兴趣及相关教师的教改热情,拓展了专业视野,也能唤醒当年2个学科的密切联系,提升师生的文化历史素质。基于此,作者近2年进行了相关教研探索^[5-7]。目前,金相实验室隶属于材料学院实验测试中心,该中心同时为材料国家级实验教学示范中心和国家级虚拟仿真实验教学中心,首届全国大学生、研究生金相大赛均在此举办,可见金相实验室仍发挥着突出作用。通过建设冶金考古模块,金相实验室可更好地展示实验室的特色和历史渊源。



图1 北京科技大学金相实验室目前展示的古代铁器金相照片:(a-b) 西汉中山靖王刘胜佩剑;(c) 战国铁铤;(d) 战国后期钢剑;(e) 西汉铁剑;(f) 战国铁范;(g) 东周铁条;(h) 汉代铁锄

图2为该模块建设中涉及的材料科学基础(实验)课程、金相实验室、科技史研究院、任课教师及新实验暨古铁器展示平台(新建冶金考古模块)间的相互关系。在金相实验室增设古代金属实物、对应的观察样品及分析检测数据,能提升教育活力,吸引更多学生关注;授课教师通过同时讲授材料科学基础理论课和实验课,并亲自参与古代金属器物检测,可积累更丰富的教学经验,更高效地搭建专业知识与冶金考古的联系,从而引导学生热爱专业,拓展新的专业领域;科技史研究院可为金相实验室提供更多冶金考古背景资料、实物样品观赏

资源和专业工作信息,帮助学生了解更多冶金考古领域的信息,进一步认识到我国古代冶金科技对政治、经济、历史、文化发展的影响。新平台的建设需要冶金考古研究院的支持,也可为师生提供更优质的学习、展示、检测、保管平台,最终使各参与方形成一个有机整体。

冶金考古模块建设设想及操作

获取原始实物样品

获取原始实物样品是本模块的核心环节,只有亲眼见到真正的古代出土金属器物,甚至亲手触摸

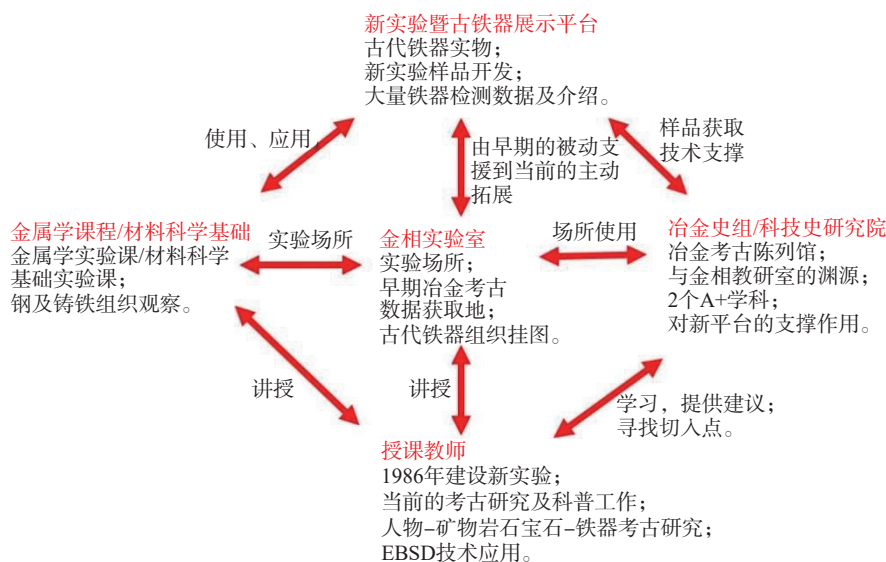


图2 金相实验室、材料科学基础（实验）课程、新实验暨古铁器展示平台（冶金考古模块）、任课教师及科技史研究院间的关系

实际器物，学生才能形成最直观的画面感，这就是所谓的零距离接触。目前准备了3组具有代表性的金属器物：第1组是以铸造为主的汉代铁制工具或

农具（见图3(a)），共6件实物（1件竖釜、5件空首斧），出土于河北保定；第2组是汉代至辽金时期铸造或锻打的铁制兵器（如图3(b)），共5件

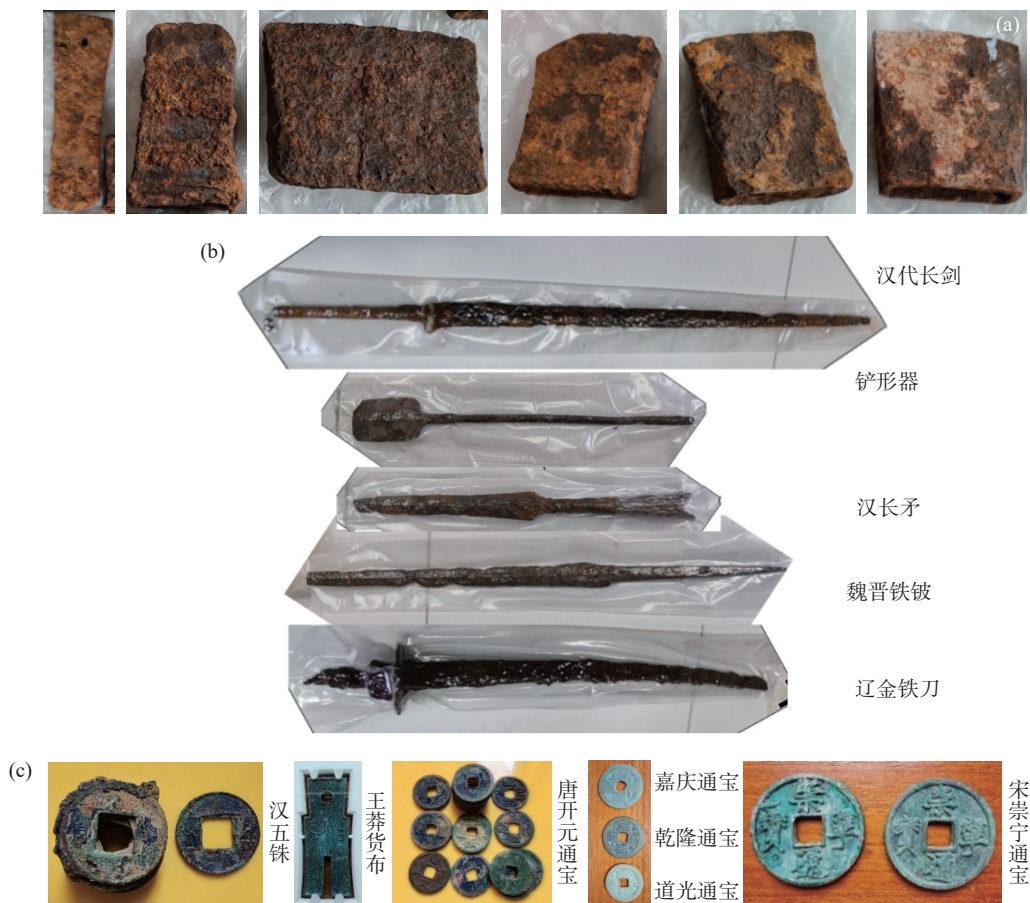


图3 收集的3组古代金属器物实物：(a) 汉代铁制工具或农具；(b) 不同朝代铸造或锻打的铁制兵器；(c) 古代青铜铸币

(分别为汉长剑、铲形器、汉长矛、魏晋铁铍、辽金铁刀), 源自河北沧州; 第3组为古代青铜(Cu-Sn-Pb合金)铸币(见图3(c)), 包括西汉五铢、王莽新朝货布、唐代开元通宝、宋代崇宁通宝、清代乾隆通宝、嘉庆通宝、道光通宝, 其中清代铸币为集邮市场购买。

制备微观组织观察样品

在学生初步认识古代器物实物及背景的基础上建设3个新实验: 铸造为主的农工具样品观察与

现有各种铸铁组织观察实验结合, 锻打为主的铁制兵器样品观察与现有各类成分钢的组织观察实验结合, 青铜铸币组织观察与有色合金凝固组织观察实验结合。也可作为“未知样品的分析鉴定”新实验, 供学生实验课观察使用。图4为镶嵌完成的一组样品, 其中农工具样品从每件器物的刃部和开口处各取1个, 对比组织差异, 共12个样品; 铸币仅切取2个样品, 必要时可从图2实物中切取更多样品。

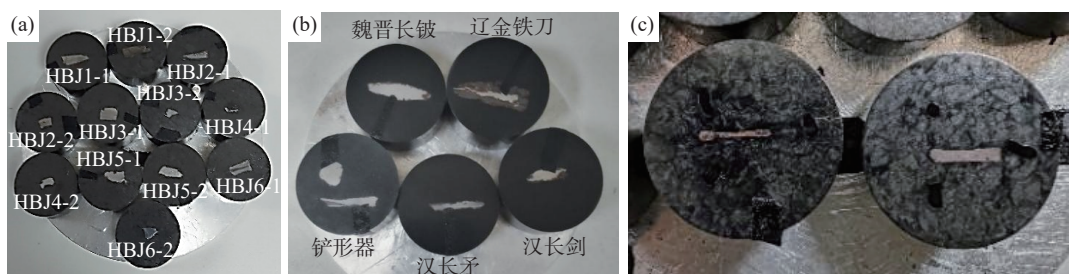


图4 从3组实物中切取及制备的样品: (a) 镶嵌的农工具样品; (b) 镶嵌的兵器样品; (c) 镶嵌的铜铸币(注: HBJ1取自于竖釜铍, HBJ2~HBJ6取自于空首斧, 编号 HBJX-1 为刃部, HBJX-2 为开口)

任课教师先期的微观组织检测

为了帮助学生更高效地将课程知识应用于古代金属器物的组织识别与分析, 授课教师先通过扫描电镜(高倍)及能谱仪检测进行系统研究, 充分解析组织特征后, 从全部数据中筛选出适合学生观察的组织照片作为参照。

图5为第1组农工具6个样品扫描电镜下的典型组织。HBJ1 竖釜铍(见图5(a))的组织为白口铁莱氏体, 灰色部分为渗碳体, 白色部分为高温奥氏体转变的珠光体, 表明仅经过铸造工艺。放大后的组织形貌见图5(b)。HBJ2 空首斧(见图5(c))为可锻铸铁, 白口铁退火后形成团絮状石墨, 基体组织为珠光体, 石墨团沿刃部方向略有拉长, 推测其受轻微锻打形变影响。HBJ3 空首斧组织(见图5(e))具有大量长条状氧化亚铁+铁橄榄石夹杂物, 基体以铁素体为主, 含少量珠光体。长条夹杂物为剧烈形变痕迹, 以铁素体为主的高韧性基体说明原材料并非铸铁, 而是炒钢^[8-9]。HBJ4 空首斧(见图5(g))为珠光体基体, 基体中存在少量不规则空洞状区域, 分析认为是铸造时轻度石墨化, 即形成星状石墨, 并非退火产物。在后续脱碳退火中, 白口铁转变为

珠光体, 石墨形成空洞, 属于铸铁脱碳钢。HBJ5 空首斧(见图5(i))为灰口铸铁, 组织中含较多片状石墨, 形貌不同于团絮状石墨, 石墨团混入高Si、P夹杂, 基体为珠光体。HBJ6 空首斧(见图5(k))组织与HBJ3类似, 刃部侧面呈现三明治结构, 即上下表层区含大量长条氧化亚铁+铁橄榄石夹杂物, 基体以铁素体为主, 中间层为非常细密的珠光体(需放大至10万倍才能看清片层特征, 见图5(l)), 夹杂物较多但尺寸较小, 推测为显著形变碎化所致。分析认为其同样采用炒钢工艺^[8-9], 表面层脱碳显著, 也可能由中间高碳钢板与表面低碳钢板叠焊制作。

综上所述, 5件空首斧经不同工艺制作而成, 3件为直接铸造或铸造+退火, 2件为低中碳炒钢锻打制作(此工艺较为少见); 竖釜铍为直接铸造的白口铁。

图6为第2组铁制兵器扫描电镜下的组织。汉长剑(见图6(a))组织中含大量长条和粒状的渗碳体, 其尺寸超过二次渗碳体及珠光体内渗碳体, 基体为铁素体; 平直长条渗碳体应为原始白口铁莱氏体中的渗碳体, 个别区域存在片状石墨团, 脱碳退火后形成空洞或被氧化。此类脱碳不充分的铸造白

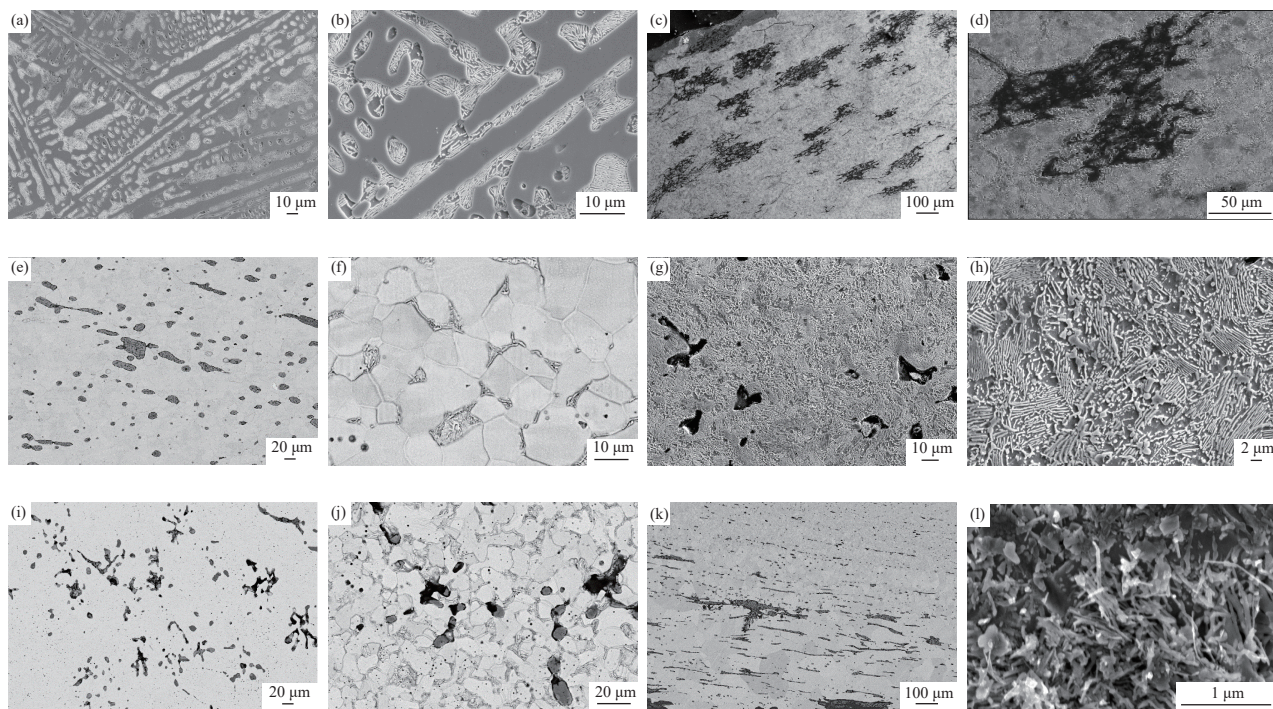


图5 汉代铁制农具扫描电镜下的组织及放大图: (a-b) HBJ1 竖釜铤; (c-d) HBJ2 空首斧; (e-f) HBJ3 空首斧; (g-h) HBJ4 空首斧; (i-j) HBJ5 空首斧; (k-l) HBJ6 空首斧

口铁在既往文献中较为少见,推测原始目标为铸铁脱碳钢,最终成为脱碳退火不充分的退火白口铁或过共析钢。铲形器刃部(见图6(b))组织中存在很多长条形夹杂(氧化亚铁+铁橄榄石+磷酸钙相复合夹杂),基体为铁素体+极少量珠光体,符合典型

的炒钢工艺^[8-9]。汉长矛刃部(见图6(c))为珠光体组织,夹杂物较少,判定为铸铁脱碳钢。魏晋铁铍(见图6(d))具有典型的折叠层状高低碳层结构,这是百炼钢的显著特征^[10],且表面未发生脱碳;高碳层以粒状珠光体为主,含少量铁素体;低碳层以

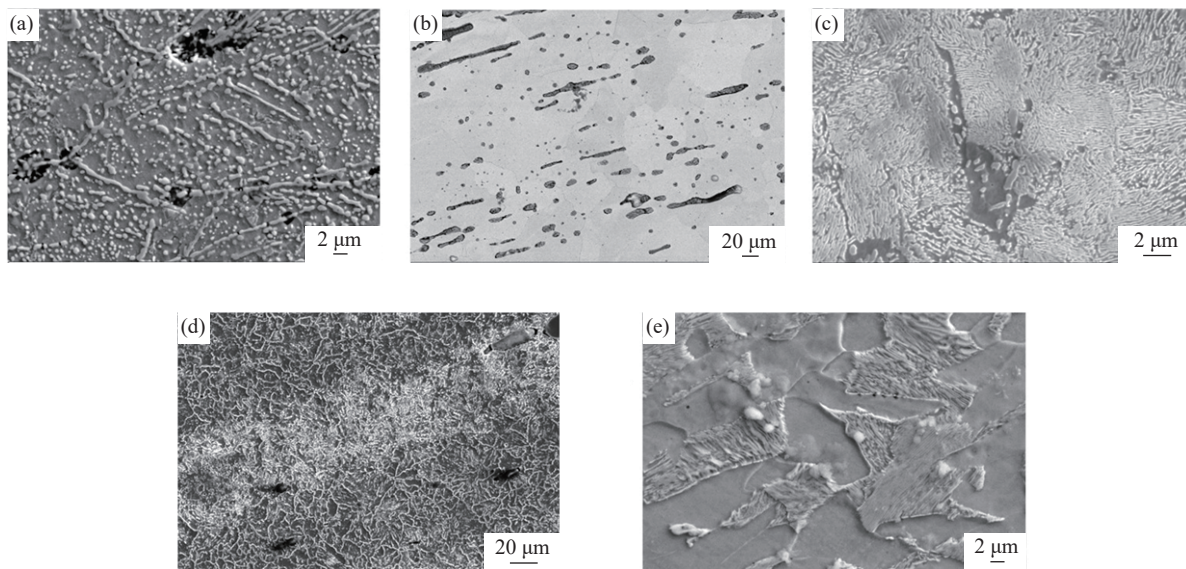


图6 战汉铁制兵器扫描电镜下的组织: (a) 汉长剑; (b) 铲形器; (c) 汉长矛; (d) 魏晋铁铍; (e) 辽金铁刀

铁素体为主，含少量粒状或片状珠光体；2种层带组织中均出现粒状渗碳体，说明经历了显著形变，其加工工艺为高低碳板交替叠层+折叠锻打。辽金铁刀（见图6(e)）为铁素体+珠光体组织，因夹杂物中含氧化亚铁树枝晶+铁橄榄石，判定为炒钢工艺。

综上所述，不同兵器的制造工艺不同，汉长剑、汉长矛为铸铁脱碳钢制造工艺；铲形器、辽金铁刀为炒钢工艺；魏晋铁铍为百炼钢工艺，以炒钢为原料。

图7为汉五铢及唐开元通宝的组织照片。能谱检测结果如表1所示显示，汉五铢和唐开元通宝的平均成分均与文献[11]总结数据高度吻合。汉五铢的成分接近纯铜，组织为铜固溶体，仅在最后凝固

区分布少量铅相，见图7(a)。汉五铢中含大量球状硫化铜夹杂（见图7(b)），主要分布于铜凝固枝晶主干，推测夹杂形成早于铜固溶体。钱币横截面上下侧存在明显的成分偏析，下侧白色区对应的铜固溶体中含较多Sn，且从下层向上可见枝晶生长的痕迹，见图7(c)。唐开元通宝成分接近Cu-Pb二元合金，组织由黑色铜固溶体、大量不同尺寸的白色团块状铅相及球状夹杂或空洞组成，见图7(d)。大团块状铅中包裹着不规则的硫化铜夹杂，可见其树枝晶特征（见图7(e)），这不同于汉五铢中的球状硫化铜。大块铅中的大球状物主要为夹杂脱落形成的孔洞或氧化铅，并非硫化铜（见图7(f)），表明夹杂

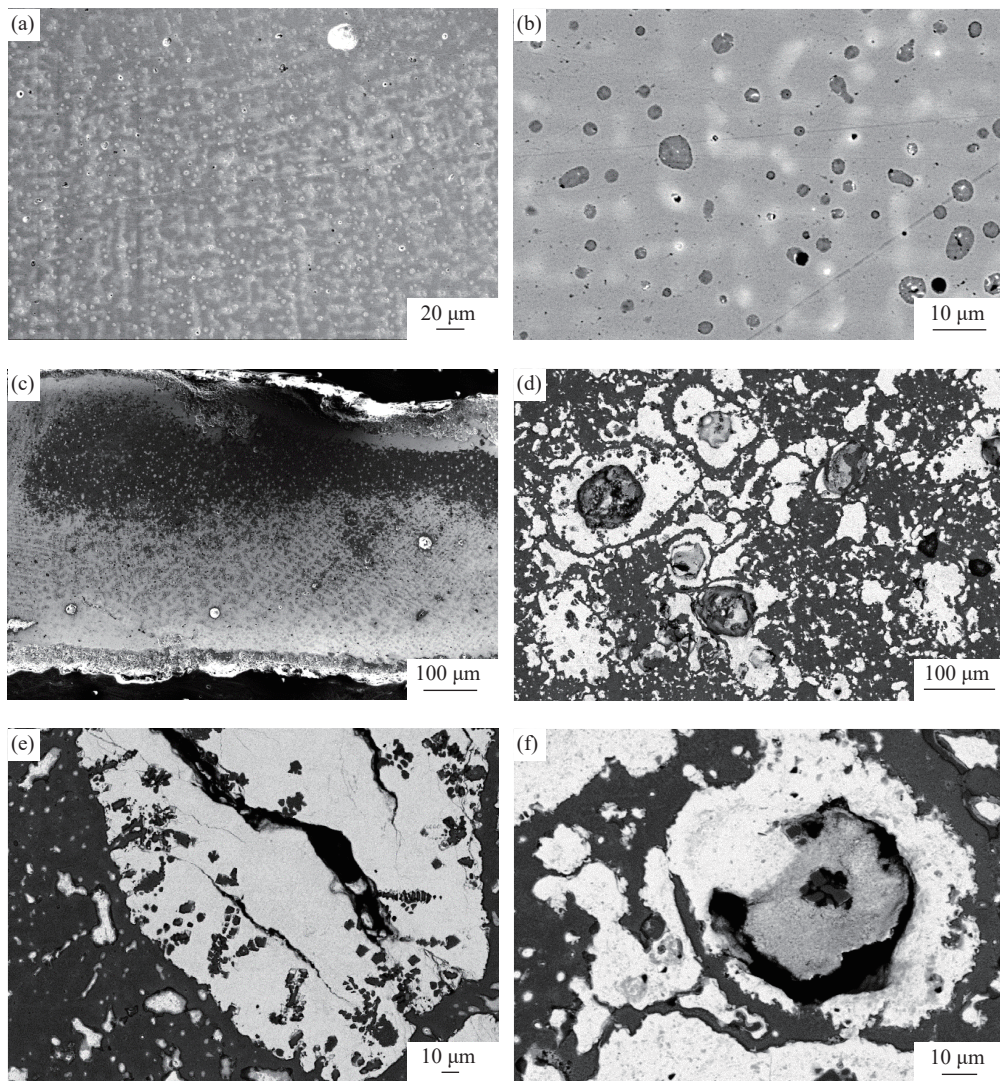


图7 汉五铢及唐开元通宝的组织照片：(a) 汉五铢低倍组织形貌；(b) 汉五铢高倍组织形貌；(c) 汉五铢铸币侧面组织形貌；(d) 唐开元通宝低倍组织形貌；(e) 唐开元通宝高倍组织形貌；(f) 唐开元通宝大铅团内的灰色氧化铅+硫化铜颗粒

始终分布于液相。此外，宋崇宁通宝铸币表面成分（富集大量氧，定量分析未考虑氧含量）的检测结果（表1）与文献[11]数据存在差异。清代3种通宝（乾隆通宝、道光通宝、嘉庆通宝）均为黄铜（Cu-Zn合金），仅检测铸币表面成分（由于富集大量氧，定量分析未考虑氧含量），各元素质量分

数如表2所示，可见清代铸币成分与前期青铜合金不同，这与文献[11]数据一致。

图8为作者在中国国家博物馆中古钱币特展中拍摄的汉五铢和王莽货布铸造铜范，可引导学生参照铸造时液体进入铸模后可能的凝固顺序及偏析方式，讨论观察到的最终组织。

表1 青铜合金铸币的组织成分（质量分数）

铸币	Cu	Pb	Sn	S	As	Si
汉五铢	92.5	3.4	2.8	1.3		
唐开元通宝	55.4	41.1	3	0.5		
宋崇宁通宝	58.9	9.3	25.2	0.4	5.0	1.1

表2 清代通宝的组织成分（质量分数）

铸币	Cu	Zn	Pb	Fe	Si	Al	Sb	S	As
乾隆通宝	53.4	37.7	4.8	2.3	1.2	0.5			
道光通宝	65.3	27.8	1.4	1.9	1.0		1.7	1.0	
嘉庆通宝	61.7	25.3		2.0	1.8	0.7	3.8		4.7

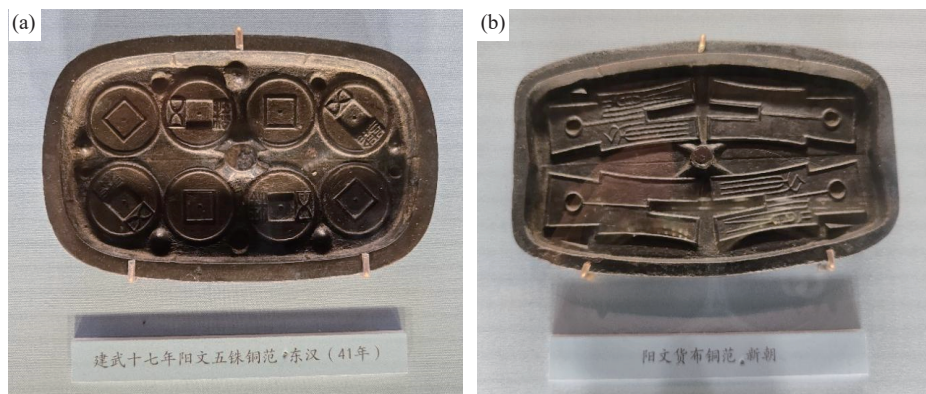


图8 汉五铢(a)和王莽货布(b)的铸造铜范（拍摄于中国国家博物馆中古钱币特展）

冶金考古模块作用的进一步提升

综合上述3组实物，建议搭建一个展台，陈列实物并搭配典型照片和简要介绍，凸显其1000~2000 a的历史价值。同时，将3组观察样品安排在3个新实验，或与现有钢铁、铸铁、有色合金实验结合使用，并编制相应的实验指导书。需要注意，对这些样品的真正理解仍需更多检测数据及相关历史背景与研究现状介绍。目前，研究中仍存在部分未明确问题，可引导学生参与讨论分析。

这些工作还远达不到有效提升学生更深入了解其文化、历史政治、经济等方面的作用。教师及实验室人员应关注以下内容，为学生搭建更完整的认

知框架。

(1) 出土金属器物的断代方法。考古人员主要通过C14放射性同位素检测和器物制式对比2种方式确定金属器物的朝代或大致出土年代，不同朝代的器物具有不同的制式，考古人员已通过长期研究积累了丰富的数据与文献资料^[12]。

(2) 古代金属器物的主要冶金工艺。考古人员尤为关注金属器物采用的冶金工艺，中国古代铁器涉及块炼钢、炒钢、铸铁脱碳钢及灌钢4种冶金工艺制品，需了解夹杂物的类型、尺寸、数目、形状等信息（具体可参考文献[8-9]，此处不再展开）。需要注意，这些参照标准并非绝对，例如炒钢和块

炼钢均含有 FeO 和 Fe_2SiO_4 ，需进一步通过是否添加助溶剂石灰石以及脱磷过程中是否形成磷酸钙夹杂物等特征进行区分。

(3) 考古学、冶金考古与科技考古的概念、内涵及相关领域知名人物。考古学作为研究古代人类活动的人文科学，在中国属于历史学分支，在美国和加拿大属于人类学分支，在欧洲则为独立学科或历史学的组成部分，通过科学调查发掘地下遗迹和遗物等实物资料，重建并研究古代社会历史。自新中国成立至 1970 年代，历史、考古、冶金等领域学者共同关注古代冶金技术与社会生产力、生产关系的关联，河北承德寿王坟战国至东汉时期铜矿遗址、山西运城东汉铜矿遗址、侯马铸铜遗址，以及河南、山西、河北等地的冶铁遗址得到考古调查与发掘，冶金考古成为新中国科技考古的核心研究方向之一。科技考古是利用现代科技手段分析古代遗存以获取丰富的“潜”信息，再结合考古学方法探索人类历史的科学。科技考古学作为考古学与自然科学交叉产生的新兴学科，提高了对考古资料的认知程度，丰富了考古学的研究内容。北京科技大学冶金考古学者柯俊院士、韩汝玢教授等检测过多个博物馆铁器案例，包括国家博物馆展出的东汉山东苍山三十湫环首刀（炒钢）、河南省博物馆展出的出土于三门峡虢国国君虢季墓的“中华第一剑”玉柄铁剑（块炼铁）、河南郑州古荥汉代冶铁遗址博物馆展出的汉代球墨铸铁等。

(4) 国内主要的考古学术机构，如北京科技大学科技史与文化遗产研究院、北大考古与文博学院等。

(5) 古代文献中关于炒钢、灌钢的记载。多位古代学者曾描述灌钢工艺，其中东汉王粲（文学家、官员）、西晋张协（文学家、官员）、唐代刘禹锡（文学家、哲学家、官员）、宋代沈括（科学家、政治家、官员）、明代宋应星（科学家）^[13] 最为知名，且沈括和宋应星对灌钢工艺的描述最细致。

(6) 古代金属器物所反映的文化、历史、经济、政治信息。西汉时期，东海郡武库作为中央管辖的东南沿海国家武库，可武装 50 万人（包括 6 万铁铠重装战士和 14 万皮甲中型战士），并能保证每人配备远程和肉搏 2 套兵器^[14]，由此可见 2000 年前汉代强盛的军事实力。河南郑州古荥冶铁遗址发现

的单个大积铁重达 25 t，单炉日产生铁至少 1 t。盐铁官营制度的实施，体现了国家对盐和铁这 2 种重要物资的统一管理，涵盖其生产和使用的全过程。剑的演变过程展现其如何被刀替代，逐渐成为权利的象征和礼仪用品；此外，还有刻着精美铭文的书刀等。

(7) 学生对古代金属器物组织的识别与知识应用。首先，需掌握组织识别与对应制造工艺的关联，包括凝固组织、固态相变组织、形变组织及再结晶组织；其次，了解典型夹杂物（如 FeO 、 Fe_2SiO_4 ）的形成规律，涉及 Fe-O 、 FeO-SiO_2 相图；最后，分析青铜铸币时需运用 Cu-Sn 、 Cu-Pb 、 Pb-Sn 二元相图，这些均为教材中的内容。

(8) 教师或考古人员对金属样品的检测方法。检测流程涵盖低倍观察、高倍观察、夹杂物类型分析、腐蚀产物鉴定；所用设备除了金相显微镜、扫描电镜、能谱仪，还包括 X 射线衍射（XRD）、电子背散射衍射（EBSD，笔者已撰文探讨其在冶金考古中的应用^[7]）、拉曼光谱仪等。科研人员不仅需识别组织，还需分析制作工艺：除了简单的铸造白口铁可马上被鉴别出外，还需判断经历不同脱碳程度的退火样品（并非简单的石墨化过程）；同时涉及非铸造工艺的分析，例如采用炒钢制备的同类器物为何工艺不同。学生实验中仅使用金相显微镜，难以观察细节，尤其是夹杂物类型无法确定，需引导其通过展台补充数据，或从电子平台数据库获取更多数据，从而全面了解古代铁器的制造过程。

(9) 地下埋藏铁器的腐蚀行为与信息留存。地下环境可分为潮湿和干燥 2 种，其腐蚀产物有所不同。被地下水长期浸泡时，腐蚀速度减缓，由于水中含氧量低，可能形成碳酸铁、含氢氧根的氧化铁和四氧化三铁；而在富氧环境下，易形成疏松的三氧化二铁。如果这些产物为晶态，利用 EBSD 技术可轻松鉴别。钢中不同相腐蚀速度存在差异，铁素体易腐蚀，而渗碳体耐腐蚀。轻度腐蚀后，珠光体或莱氏体等双相组织形貌可能仍被保留，可通过铁锈组织推测原始组织；而夹杂物多为稳定的氧化物或硅酸盐，通常能完整留存，因此即使是腐蚀铁器也具有一定的研究价值。

(10) 提供其它 10 余种铁器（主要是兵器）的检测分析数据案例。其中 2 个特别有意义的是：东汉

永寿元年环首剑（铭文标注是灌钢[5]）、山东石鼓墓出土的汉代长刀剑与短刀剑。这里不再拓展介绍。

（11）所有铁器已真空包装，防止继续氧化腐蚀过程。可以提供给其它有兴趣的学校短期使用，后者与其它学校交换样品，增大学生学习的获益率。

结束语

在北京科技大学材料学院金相实验室建设一个冶金考古平台和实验模块，主要由古代金属器物、对应微观组织观测样品、放大的典型组织照片、系统检测组织结构数据及分析报告组成，可起到以下几方面的作用。

（1）使北京科技大学这一早期冶金考古数据的发源地成为古代金属器物实物展示的场所，平台从仅存一组前辈学者获取的经典古代金属器物组织照片，拓展为实物、组织观察样品、典型照片及相关背景数据等齐全的体系，可吸引学生更细致、更全面地了解金属器物从生产到使用的全周期过程。

（2）相关检测样品至少可强化3个方向的现有实验课：首先，以古代铁制农具组织观察，补充强化原铸铁组织观察分析实验；其次，以古代铁制兵器组织观察，补充强化原钢铁组织观察实验；最后，以古代青铜铸币组织观察，补充强化原有合金凝固组织观察实验。必要时可单独设立3个新实验，并推动学生围绕古代金属器物的多层面作用展开讨论。

（3）作为材料科学与工程、科技史2个国家级A+一流学科的“交通枢纽”，该平台可引导并加强两学科的紧密联系；有兴趣的学生可进一步前往校内科技史研究院的古代金属器物陈列室接触更多实物，了解国内其他院校考古学科的发展历程。这些活动将学校“钢铁精神”“钢筋铁骨”的内涵具体化。

（4）通过具体器物帮助学生认知古代材料对政治、历史、社会和经济等的影响，使其深刻体会“材料与人类文明”的主题，强化工科与文科的跨学科交流意识，增强文化自信和科技自信，实现良好的课程思政效果。同时，更多授课教师将古代器物检测数据及实践经历融入教学，可助力学生更好、更扎实地掌握材料科学基本知识体系，为未来服务各行业奠定学业基础。

致谢：感谢梁斌先生热情、慷慨地提供3类古代金属器物，使建设金相实验室冶金考古模块的设想成为可能，也感谢他在考古学知识方面给予的诸多咨询支持；同时，感谢北京科技大学材料学院检测中心的崔凤娥老师协助完成全部检测工作。

参考文献

- [1] 宋琳, 丘亮辉. 中国冶金史研究的前行者(三): 1974—2004年北京科技大学冶金与材料史研究所的创建与发展. 北京科技大学学报(社会科学版), 2012, 28(2): 1
- [2] 孙淑云, 宋琳. 中国冶金史研究的前行者(一): 1974—2004年北京科技大学冶金与材料史研究所的创建与发展. 北京科技大学学报(社会科学版), 2011, 27(2): 1
- [3] 韩汝玢, 宋琳. 中国冶金史研究的前行者(二): 1974—2004年北京科技大学冶金与材料史研究所的创建与发展. 北京科技大学学报(社会科学版), 2012, 27(4): 1
- [4] 韩汝玢, 石新明, 柯俊传. 北京: 科学出版社, 2012
- [5] 杨平. 课程知识应用、古代钢制兵器检测与北京科技大学技术史学科建设. 金属世界, 2023(5): 21
- [6] 杨平. 现代科技解读古代钢铁秘密——EBSD技术在冶金考古与材料教学中的新视野. 金属世界, 2025(5): 1
- [7] 杨平. 从汉代球墨铸铁到现代材料科学: 郑州古荥遗址考察对课程思政融合的启发. 金属世界, 2025(3): 16
- [8] 陈建立, 韩汝玢. 汉晋中原及北方地区钢铁技术研究. 北京: 北京大学出版社, 2007
- [9] 张周瑜, 陈建立, 潜伟. 浅析中国古代生铁冶炼中的磷. 南方文物, 2018(3): 196
- [10] 韩汝玢, 柯俊. 中国古代的百炼钢. 自然科学史研究, 1984(4): 316
- [11] 刘洋, 李延祥, 连吉林. 霍洛柴登古城出土的新莽“货泉”合金成分及金相组织分析. 中国钱币, 2015(4): 4
- [12] 白云翔. 先秦两汉铁器的考古学研究. 北京: 科学出版社, 2005
- [13] 乔尚孝, 潜伟. 灌钢工艺新探. 自然科学史研究, 2021, 40(2): 161
- [14] 冷兵器研究所. 匪夷所思! 西汉的武器库竟如此土豪? 知乎. (2017-08-21) [2025-07-28]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/28661673>

作者简介：杨平（1959—），北京科技大学退休教授，博士。曾获北京市教学名师、国家级一流课程《材料科学基础》负责人。编著《材料科学名人典故与经典文献》《材料科学人物历史的挖掘、探索与应用》《工程材料结构原理》，参编教材4部。发表教学研究论文50余篇，发表科学研究论文400余篇，编著《电子背散射衍射技术及其应用》，参编《材料织构分析原理与检测技术》《电工钢的材料学原理》。