

揭秘千年“灌钢”之谜——东汉永寿元年铭文钢剑的微观组织与教学启示

Deciphering the Millennial Enigma of “Guangang”: Microstructural Analysis and Teaching Implications of an Eastern Han Dynasty Inscribed Steel Sword

供稿|杨平 / YANG Ping

内容导读

一柄出自东汉永寿元年（公元 155 年）、表面刻有“五十灌二百五十辟”工艺铭文的环首断剑，为解开中国冶金史上著名的“灌钢”技术之谜提供了首次明确的实物证据。此前，尽管古代文献中早有“灌钢”记载，但从未有经铭文直接确认的灌钢器物得到科学检测。本文依托对这柄珍贵断剑的微观组织分析，系统揭示了汉代灌钢技术的典型材料特征：其组织为均匀细密的珠光体与粒状渗碳体，碳含量接近共析钢；晶粒尺寸极其细小，且存在加工硬化痕迹；夹杂物以硅酸盐为主，明显区别于同时期其他炼钢技术。这些发现不仅为考古界判定灌钢文物提供了关键的科学标尺，也为材料科学教学提供了生动而深刻的案例。本文将这一前沿考古发现与材料学基础课程知识——如相变、强化机制、硅酸盐结构等——紧密结合，阐述了其在促进学科交叉（材料、考古、历史）、激发学生兴趣、融入课程思政（展示古代科技成就、传承学者精神）以及推动教学方法创新等方面的多重价值。通过此案例，我们期待能引导学生感受材料科学的深邃魅力，并深入理解中国古代冶金技术的光辉成就。

研究背景与意义

我国古代器物上的铭文十分重要，为器物鉴别提供了明确的身份标识与制作工艺信息，是“物勒工名”制度的展现。铭文通常出现于高等级或具有重要

事件背景的器物上，我国很多博物馆中均收藏有这类带铭文的珍贵古代器物。20 世纪 70—80 年代，北京科技大学（以下简称北科大）的柯俊院士、韩汝玢教授等创建了北科大冶金考古专业；依托学校在钢铁材料领域的雄厚基础，该专业利用金相法完成

作者单位：北京科技大学材料学院，北京 100083

了很多冶金考古研究,通过对大量出土铁器的检测分析,总结提出了“中国古代钢铁技术的十大发明”的冶金考古成果,涵盖炒钢、铸铁脱碳钢、百炼钢和灌钢技术的发明时间^[1-2]。按时间顺序,灌钢法出现于几种冶铁技术中最晚的时期,也是相对最先进的技术。然而,学界对灌钢的研究很少,仅有约4例疑似灌钢出土铁器的检测案例^[3-6],尚未有明确为灌钢古代铁器的检测文献报道。灌钢法自东汉时期便已存在,一直发展演变至新中国成立前,曾被称为宿铁、团钢、苏钢^[7]。我国著名冶金学家周志宏^[8]于1938年在四川金刚碛模拟研究了灌钢技术,并于1955年发表相关研究报告,明确了其对应的组织特征。截至目前,虽然明确的古代灌钢检测研究极少,但古代文献中关于灌钢及其制备技术的描述较多^[7,9],东汉王粲、西晋张协、唐代刘禹锡、北宋沈括、明代宋应星等著作中均有相关记载。早期,李众^[1]、韩汝玢等^[2]认为灌钢技术最早出现于公元4世纪,而当前研究已将其出现时间至少提前300年,推至东汉时期。此外,乔尚孝等^[9]、苗长兴^[10]均开展过灌钢制备技术的模拟实验,并展示了相应的组织特征。

值得庆幸的是,近年来,文献报道了3件东汉时期带有灌钢铭文的铁制兵器,具体如下:(1)永寿二年(公元156年)汉桓帝刘志所用环首刀^[11](见图1),现收藏于中国国家博物馆;(2)熹平三年(公元174年)汉灵帝刘宏所用铁剑(为配服把玩用物)^[12](见图2),现收藏于美国伊利诺伊州芝加哥市麦克莱恩博物馆;(3)东汉永寿元年(公元155年)卫尉监制(掌管宫禁守卫的官职)、大将军

(古代军事官制)梁冀所用环首剑^[13](见图3),该剑即为本文开展检测研究的灌钢环首钢剑。此处简单介绍上述3把灌钢刀剑主人的历史时序关系:公元146年,权倾朝野且嚣张跋扈的大将军梁冀毒死汉质帝刘缢,并劝说其妹梁妠以皇太后名义立刘志为帝,即汉桓帝;公元159年,汉桓帝依靠宦官单超等诛杀梁冀;中平六年(189年,中平为汉灵帝刘宏的第4个年号),汉桓帝之子汉灵帝刘宏病逝,终年34岁,汉灵帝刘宏的次子汉献帝刘协(181—234年)继位,成为东汉末代皇帝。上述3把刀剑的“物勒工名”的铭文详细完备,反映出东汉晚期皇室



图2 汉灵帝刘宏的错金铭文铁剑(熹平三年)^[12]



图1 汉桓帝刘志的错金铭文环首刀(永寿二年)^[11]

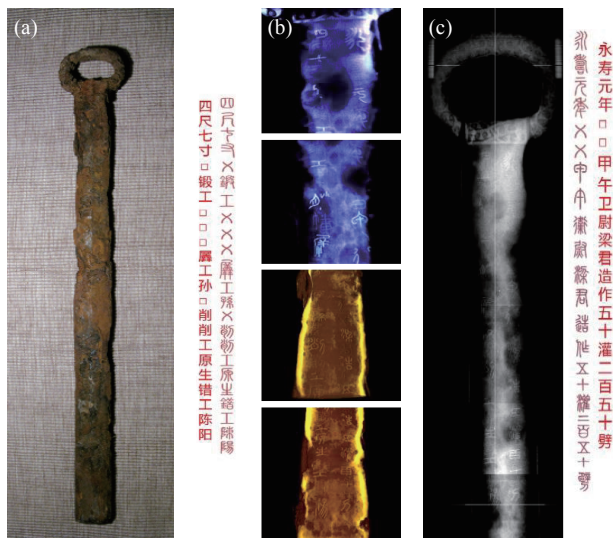


图3 永寿元年错金环首钢剑实物(a)及X射线计算机断层扫描识别铭文图片(b,c)^[13]

对手工业生产的质量管理和检验监督已形成制度化保障。其中,前两把刀剑整体保存完好,无法取样检测其内部组织;第3把为断剑,本文特取其样品检测灌钢的典型组织特征。需要注意,以往文献^[3-6]均为先检测器物组织,再参照古代文献中关于灌钢工艺特征的描述(需说明,古人不可能对微观组织进行记录,因为当时不具备相应的技术条件)推断器物是否为灌钢制品;而本文检测所用断剑,其灌钢等制作工艺已由制作者刻在剑上,只需检测其微观组织及夹杂情况,即可确定灌钢的基本组织特征。当然,不同时代、不同制作地域、不同种类铁制器物的灌钢组织不一定相同,这是因为随着朝代更迭、制作地点变化及普及性的提升,灌钢工艺被广泛应用于制作多种器物,不再局限于冷兵器领域;但无论如何变化,本文所检测样品的组织信息均十分宝贵。该剑是首件工艺明确的古代灌钢剑,且东汉为当前公认的灌钢技术最早发明朝代,因此对这件可靠灌钢器物的有效检测,不仅在考古学、历史学、材料科学具有重要科研价值,还具有很高的教学研究价值,亦为上述领域研究者的共同期待。

CCTV-7国防军事频道2020年播出的《兵器面对面——“铭文断剑”(上、下)》节目引人入胜,推理严谨扎实。冷兵器爱好者梁斌先生对一把表面锈蚀严重的古代残断钢剑展开了深入研究,成功揭开其历史谜团,确认该剑为东汉永寿元年(汉桓帝刘志在位期间)工匠为大将军梁冀打造的环首宝剑;最重要的是剑身上带有错金银铭文(共45个字,金银各半,部分文字因金银脱落无法识别),铭文明确记载此剑采用灌钢工艺制作,具体工艺为50灌(灌指灌钢法)250辟(辟指锻打),其工艺等级远超汉桓帝刘志本人的佩刀(20灌100辟),亦高于汉灵帝刘宏的灌钢剑(5灌25辟),是目前已知工艺等级最高的灌钢兵器。图3(b)及3(c)为该电视节目的两个片段截图,展示了永寿元年灌钢剑通过X射线计算机断层扫描(CT)识别铭文的过程,清晰呈现灌、辟及加工次数。该节目不仅完成了此剑制作工艺铭文的识别与主人身份的确定,更引出后续问题:这把身份明确的灌钢剑具有怎样的内部组织结构?换言之,汉代早期灌钢的典型组织及夹杂物特征是什么?与其他冶铁技术制作

的兵器组织结构有何区别?对永寿元年灌钢剑的检测研究,在宏观层面上是揭示灌钢法创建时期组织特征的必要工作,在微观层面上是该节目确定钢剑主人身份及工艺后的必要延续。因此,该兵器持有者与笔者等开展多方合作,对其进行了系统的检测研究,相关研究细节已在文献[14]中详细报道。永寿元年灌钢剑的研究不仅涉及考古学、材料科学、历史学,还与北科大两个一流学科的发展密切相关。尽管目前学界尚无明确的灌钢剑组织检测报道,但北科大数十年来对灌钢技术的研究从未中断^[1-2,9-10],因此该剑的组织检测与分析同样具有重要的材料科学教学意义。本文从教学研究的角度出发,综合分析该剑的微观组织与我国古代灌钢技术文献记载、前人实验研究成果总结^[9,12]、专业教学方法及任课教师对这类案例的应用等方面的关系,图4为本文涉及的若干方面相互关系简图。

灌钢的古籍记载及文献调研

文献[8-9]总结了古籍中有关灌钢的若干记载:东汉末期文学家、官员王粲(公元177—217年,见图5(a))在《刀铭》中写道“制兹利兵……灌褫已数”;西晋文学家张协(?—约307年,见图5(b))在《七命》中写道“楚之阳剑……销逾羊头,鏖越锻成,乃炼乃铄,万辟千灌”。上述汉晋时期的两篇文献,对刀剑工艺的描述均使用了“灌、辟”组合。唐代文学家、哲学家刘禹锡(公元772—842年,见图5(c))在《砥石赋》中写道“彼屠者之刃兮,猎者之铤;不灌不淬兮,糅锡銜铅”,表明灌钢主要用于制作刀剑刃器,且制作过程中采用了淬火工艺。自南北朝起,有关灌钢的记载和细节逐渐丰富:北宋科学家、政治家沈括(公元1031—1095年,见图5(d))在《梦溪笔谈》提及“柔铁盘屈之,乃以生铁陷其间,泥封炼之,锻令相入”的“团钢”(即灌钢)炼制方法;明代科学家宋应星(1587—约1661年,见图5(e))在《天工开物》中详细描述了灌钢操作流程:“用熟铁打成薄片……生铁安置其上……火力到时,生钢先化,渗淋熟铁之中……取出加锤,再炼再锤”。

新中国成立以来,部分出土铁器经金相组织和夹杂物分析,疑似采用灌钢工艺制成,如辽宁北票喇嘛洞北燕时期铁矛^[3]、高句丽中期(约公元5世

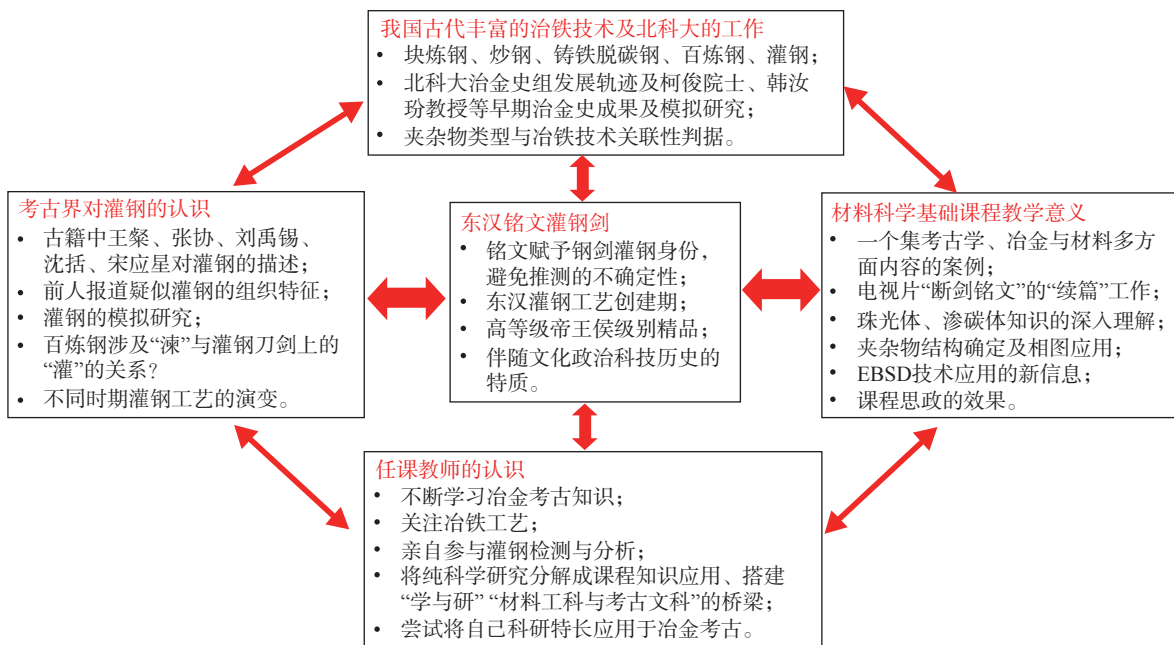


图4 灌钢检测、相关考古学背景、教师参与检测分析与北科大科技史的关系图



图5 对灌钢进行记载的古代著名学者图片（来自网络）：(a) 东汉王粲；(b) 西晋张协；(c) 唐代刘禹锡；(d) 宋代沈括；(e) 明代宋应星

纪）辽宁五女山山城铁器^[4]、河北徐水东黑山遗址西汉中后期铁凿^[5]及韩国汉江峨嵋山军事要塞遗址出土的铁块^[6]等。结合古代文献记载及疑似灌钢器物的检测数据，学界通常认为灌钢组织特征如下：含碳量较高，呈均匀的共析或过共析组织。若存在高低碳成分不均匀区域，则呈现外层高碳、内部低碳的特点；需要注意，常规锻打造成的脱碳现象表现为表层低碳、内部高碳，因此灌钢的成分不均匀性与脱碳造成的成分差异不同。在工艺层面，灌钢通过对炒钢或块炼铁低碳钢灌注铸铁高碳液体后进行锻打制成，灌注与折叠锻打的次数比例为灌注1次、锻打（辟）5次，这与百炼钢反复折叠锻打存在明显差异。灌钢工艺主要有2种：一种是用铸铁液灌注低碳钢的“高温方式”^[8-9]；另一种是将高碳铸铁板与低碳钢板按顺序叠在一起，固定住，再加热至接近共晶温度的高温，使铸铁板部分熔化或在固

态下通过碳扩散进入低碳板，最终实现均匀化的“低温方式”^[10]。由此可以推测，灌钢器物在加工初期仍存在成分不均匀性，但经后续处理会得到均匀的高碳组织。此处的“高碳”相对块炼铁、炒钢和铸铁脱碳钢的含碳量而言，即成分接近共析或过共析钢。

永寿元年环首剑的微观组织结构

近两年，研究人员对永寿元年断剑开展了大量检测工作，尤其是应用电子背散射衍射（EBSD）检测揭示了该器物内部组织区别于其他冶铁方法所得钢材的组织特征，其详细内容见文献[14]，本文仅概述其主要组织特征。

（1）较均匀的高碳组织，成分接近共析钢，珠光体片层极细，且存在球状渗碳体，见图6。图6(a)中可见少量类似铁素体的块状组织及颗粒状渗碳体；图6(b)则为珠光体与少量颗粒状渗碳体组成的组织。

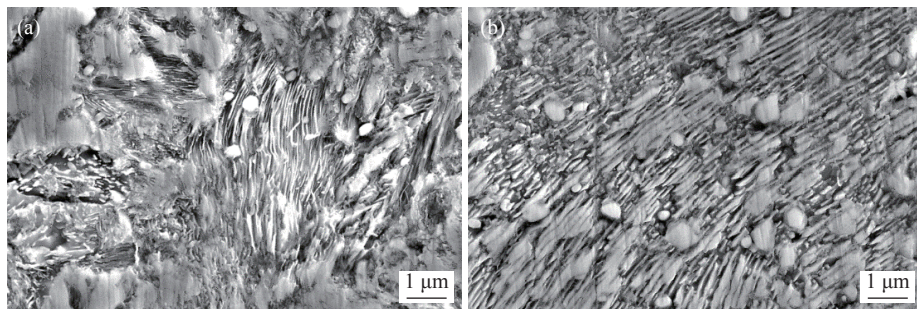


图6 永寿元年钢剑不同位置的组织照片^[14]: (a) 刃部组织; (b) 中心高倍组织

(2) 低倍观察下无明显流线型组织(见图7), 即未发现强形变加工的痕迹。流线组织的显示通常包括以下3种: 一是大量夹杂物成串分布; 二是大尺寸夹杂物变形后呈长条状成串分布; 三是基体组

织形变后呈长条状分布。图7中展示了整个横截面上11万余个夹杂物的分布, 不同颜色代表不同形状比(长轴、短轴比值), 可见绝大多数夹杂呈球形(蓝绿色)。

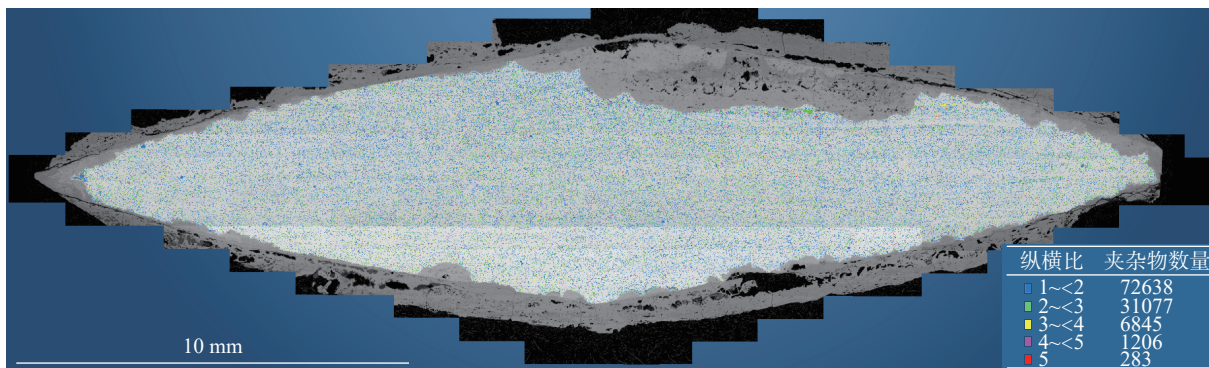


图7 永寿剑整个横截面上的夹杂物分布及形状比^[14]

(3) 夹杂物主要为各类硅酸盐(辉石、长石等), 未检测到氧化亚铁(FeO)和铁橄榄石(Fe_2SiO_4)。这一特征明显区别于富含大量氧化亚铁和铁橄榄石的块炼铁、炒钢, 也不同于夹杂物很少的铸铁脱碳钢; 该样品的夹杂物数量介于两类钢材之间, 且存在较多不同尺寸的硅酸盐夹杂物。利用电子背散射衍射可准确检测出夹杂物类型(见图8), 主要包括假硅灰石(CaSiO_3 , 黄褐色, 单斜结构)、铁蔷薇辉石($\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$, 天蓝色, 三斜结构)、透辉石($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, 绿色, 单斜结构)或钙铁辉石($\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$)、镁黄长石($\text{CaMgSi}_2\text{O}_7$, 深蓝色, 四方结构)及非晶态富含Ca、Al、K、Mg等的硅酸盐(黑色区域)。由图8可见, 夹杂物均为复相, 且相互间可相变转换。

图9(a)~9(c)展示了环首剑中最大的2个夹杂物及其能谱峰数据: 2个夹杂长度约140 μm, 成分基

本相同, 均为富含Al、Ca、Mg、K、Na的硅酸盐, 其本质为大尺寸夹杂物经锻打后沿横向展开(需要注意, 垂直纸面方向为剑的长轴方向)。图9(d)和9(e)为图9(a)样品再次磨抛后1号大夹杂物的形貌及电子背散射衍射结果, 确认该夹杂物为非晶态(黑色区域表示无晶体衍射带)。大尺寸夹杂物的存在表明其为50灌工艺后几次灌注过程带入, 形变较小, 碎化程度不高; 相比之下, 其他区域分布有不同尺寸的较小夹杂物, 表明碎化程度较高。因此, 250次锻打(“辟”的过程)并未将所有夹杂均匀碎化, 样品中仍存在不同尺寸的夹杂物, 表明每次灌注过程均可能重新带入新的大尺寸夹杂。此外, 由图9(e)可知, 基体(铁素体)经历了明显形变, 虽然晶粒呈圆形, 但内部存在大量亚晶界和取向变化。

(4) 电子背散射衍射技术测出均匀且细小的晶

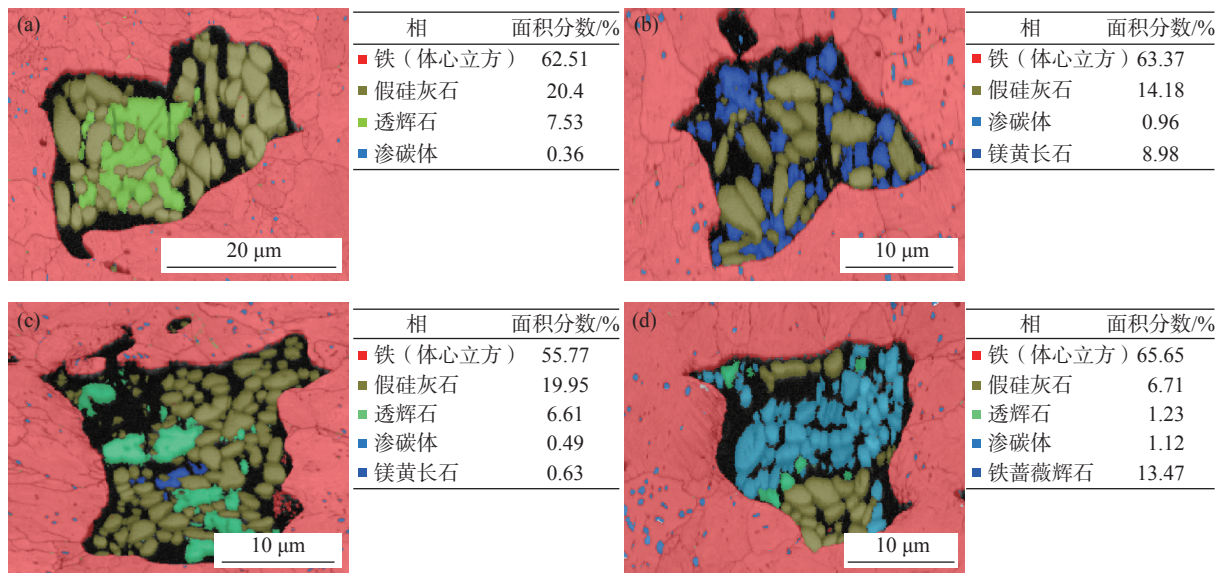


图8 中等尺寸夹杂电子背散射衍射相鉴定图^[14]: (a) 假硅灰石与透辉石的复合夹杂; (b) 假硅灰石与镁黄长石 (或霞石) 的复合夹杂; (c) 假硅灰石、透辉石与镁黄长石的复合夹杂; (d) 假硅灰石、透辉石与铁蔷薇辉石的复合夹杂

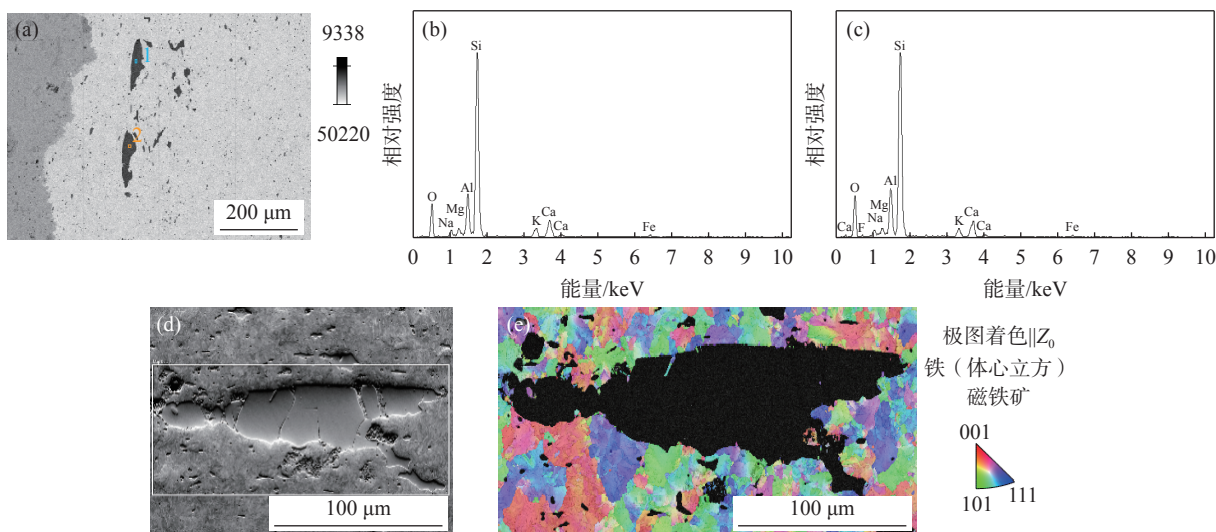


图9 永寿剑中大尺寸夹杂物及其能谱峰数据: (a) 大尺寸夹杂物形貌 (背散射电子像); (b) 图9(a)中1号夹杂物元素分布; (c) 图9(a)中2号夹杂物元素分布; (d) 1号大尺寸夹杂物重新磨抛后形貌; (e) 基体电子背散射衍射图像^[14]

粒尺寸及无明显织构信息。图10(a)及10(b)展示了钢剑刃部区域的电子背散射衍射取向成像及平均取向差KAM分布图,图10(c)、10(d)展示了钢剑脊部电子背散射衍射取向成像及KAM平均取向差分布图;结果显示,尽管该钢剑经过250次锻打,但结果仍呈近乎完全随机取向分布。刃部平均晶粒尺寸 (或珠光体团尺寸) 仅为3.1 μm , 脊部平均晶粒尺寸也只有7.1 μm , 这表明50灌250辟的反复加工处理有效实现了晶粒细化和组织均匀性,但未形成强织构,可能是因为每次灌制加热导致再结晶或奥氏

体相变,消除了形变累积产生织构的可能性,这也是未出现流线的原因。此外,刃部组织中的取向差值远高于脊部,表明刃部组织处于明显的加工硬化状态,而脊部及中心区加工硬化程度弱,这与刃部显微硬度值高达HV400,脊部显微硬度仅为HV260的结果吻合。由此可见,刃部的高硬度主要源于形变硬化和晶粒细化,而非淬火马氏体的作用。

图11给出更小尺寸夹杂物及渗碳体颗粒的电子背散射衍射数据 (能谱数据略,具体见文献[14])。结果表明,夹杂物为晶态的假硅灰石 CaSiO_3 和硅酸

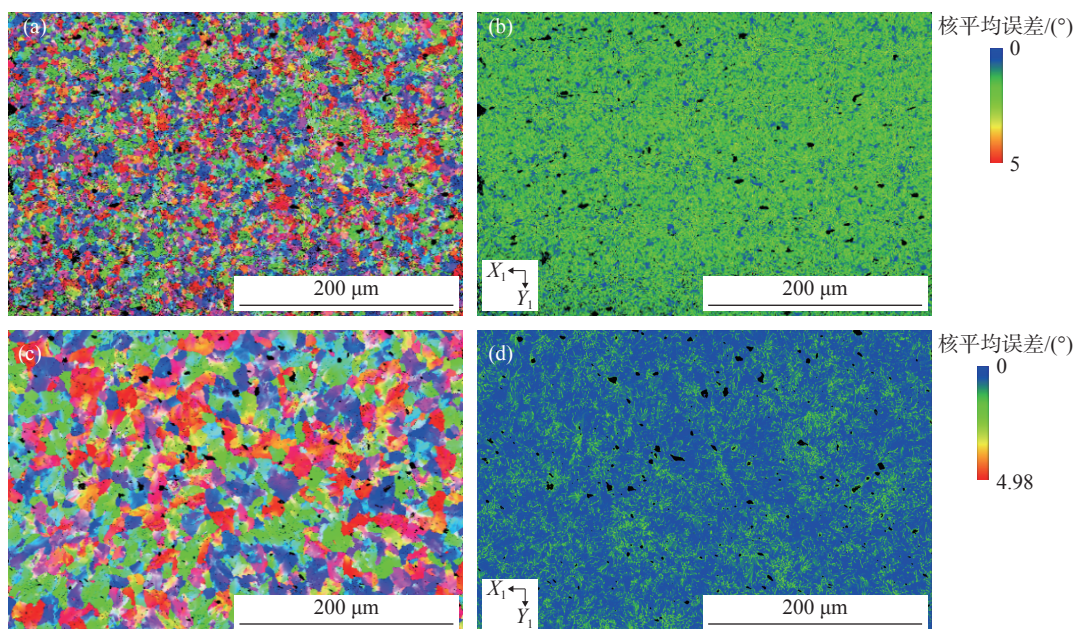


图10 钢剑不同部位电子背散射衍射技术测出晶粒尺寸及结构信息^[14]: 刃部区域的晶粒取向分布 (a) 与 KAM 平均取向差分布图 (b); 背部区域的晶粒取向分布 (c) 与 KAM 平均误差值取向差分布图 (d)

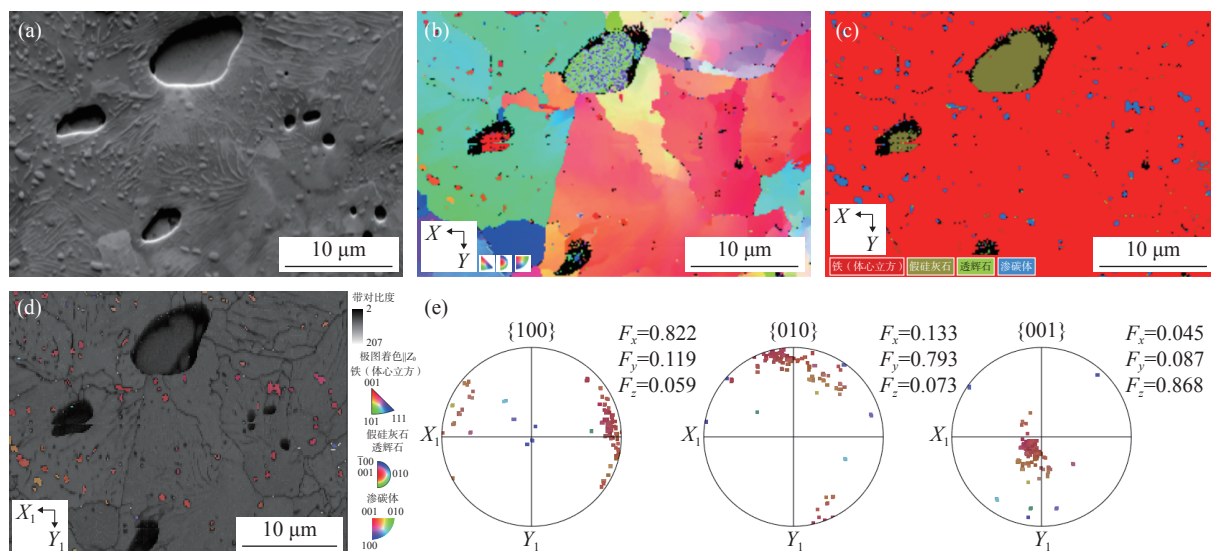


图11 永寿元年剑渗碳体粒子的取向分布^[14]: (a)前置背散射电子图像; (b)取向成像图; (c)相分布图, 存在 CaSiO_3 、 $\alpha\text{-Fe}$ 、 Fe_3C ; (d)颗粒渗碳体取向分布图; (e)渗碳体的 $\{100\}$ 、 $\{010\}$ 、 $\{001\}$ 极图

盐非晶态区域, 无论尺寸大小均为复相夹杂物。尺寸较大的颗粒状渗碳体 (约 $1\ \mu\text{m}$) 的取向呈现择优特征, 且存在绕 z 轴转动的倾向; 不同取向珠光体 (实际指铁素体) 中的渗碳体取向相近, 说明其应在原奥氏体晶粒内析出, 原奥氏体冷却相变时转变为若干取向不同的珠光体团, 而渗碳体并未转变, 因此取向不变。但这些渗碳体取向并非完全一致, 存在一定程度的转动, 这是因为钢剑经过锻打, 取

向发生改变。在高倍 EBSD 图像下, 可清晰观察到晶粒内部取向的不断变化, 表明其处于形变状态或回复状态。

永寿元年灌钢剑检测的教学意义

东汉永寿元年灌钢剑的组织检测不仅具有重要的考古学科价值, 也具有材料学工科课程学习的教学研究意义。作为教学案例, 本文初步总结以下

几点教学价值:

(1) 具有跨学科交流及专业拓展的意义。本案例涉及考古学、材料学、历史学, 聚焦最新的冶金考古研究内容, 对此前未见文献报道铭文确认为灌钢工艺的古兵器开展系统检测。通过材料学知识与技术对器物组织进行系统检测和定量分析, 结合考古学、历史学学者收集的大量古文献中关于灌钢的描述进行对比, 并与前人检测的疑似灌钢组织夹杂数据及模拟灌钢工艺制备的铁器组织展开对照研究。同时, 本案例还涉及冶金学、矿物学知识, 而非单纯的材料学问题。本案例涉及的 3 把东汉灌钢刀剑均与东汉时期多位皇帝(汉桓帝、汉灵帝、汉献帝等)相关联, 可为历史学研究提供素材。将案例引入教学, 可有效提升学生学习专业课的兴趣, 开阔眼界, 帮助学生初步了解材料学专业的新兴应用领域。

(2) 灌钢组织与课程知识点的对应关系清晰, 可为专业课程教学服务; 具体对应以下教学内容: 一是珠光体、铁素体、各类夹杂物相的识别; 形变、再结晶对晶粒细化、亚晶界形成的影响; 铁素体基体内取向逐渐变化的原因; 形变强化、细晶强化的具体表现。二是对 5 种夹杂物(玻璃态硅酸盐、单斜结构 CaSiO_3 、三斜结构 $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ 、单斜结构 $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ 、四方结构 $\text{CaMgSi}_2\text{O}_7$ 等低对称性硅酸盐)进行分析, 明确其点阵常数数据。三是结合 SiO_2 - CaO - MgO 、 SiO_2 - CaO - Al_2O_3 、 SiO_2 - FeO - CaO 三元相图, 分析各类夹杂物结晶的最低温度, 探究该温度与单相夹杂自身的熔点差值, 以及各类夹杂之间可能存在的相互转变关系。四是推测该钢的大致含碳量; 根据理论课和实验课所学知识, 通过组织相对量推测合金的含碳量(可结合相图与杠杆定量分析、金相法判断球墨铸铁含碳量、未知凝固组织合金的成分确定及组织分析两个实验, 以及相图章节的组织相对量计算习题), 并探讨该推测方法的可靠性与影响因素。此外, 该案例还可进行更具课程挑战度的分析讨论, 例如: 对于片状珠光体与粒状渗碳体共存的组织, 分析粒状渗碳体出现的原因、珠光体中片状渗碳体极薄的成因, 以及形变对组织的影响; 分析渗碳体粒子呈现取向择优分布的现象及成因。

(3) 本案例具有独特的课程思政作用, 主要体现在 3 个层面: 第一层面, 展现近 2000 年前汉代先进的冶铁技术, 如炒钢、铸铁脱碳钢、百炼钢和灌钢等, 同时让学生了解冶金学家周志宏院士在灌钢研究领域的开创性工作。第二层面, 介绍北科大校史中柯俊院士、韩汝玢教授等老一辈冶金史专家在该领域的不懈努力和突出贡献, 引导学生传承老一辈冶金考古人的工作态度, 感悟其中蕴含的钢筋铁骨、千锤百炼的精神和品德。例如, 研究百炼钢时提及的经“三十涑”“五十涑”处理的山东苍山刀、徐州剑^[2], 以及经 50 灌和高达 250 辟(锻打)的永寿剑, 均体现了最高等级的锤炼。同时, 介绍了北大冶金考古学者在灌钢相关领域的研究成果^[1-2,9-10]。第三层面, 引导学生认识到本次检测工作及相关数据的学习掌握, 是对前辈工作的不断完善和延续; 通过检测分析器物组织挖掘出新的信息, 是对老一辈冶金考古学者钢铁精神和品德的传承。

(4) 采用更先进的检测方法可揭示更多早期工作未能发现的现象, 并提升冶金工艺鉴定过程的可靠性。例如, 电子背散射衍射技术的应用定量确定了各类晶态及非晶态夹杂物结构, 明确夹杂物结构后, 可进一步确定其纯化合物的结晶温度以及与其他相混合时最低的结晶温度, 这为推测当时冶炼最高加热温度提供了重要参考。此外, 通过 EBSD 技术可确定不同相的取向分布、内部取向差及亚晶界的存在与变化等, 并分析形变对上述现象的影响; 这些实践均能让学生认识到新技术应用的重要性。

任课教师在知识点应用研究中的作用分析

在专业课程教学中, 若要有效传授大量知识点, 仅靠直接引用网络获取的应用案例远远不够, 任课教师应主动融入相关案例研究, 以获取更鲜活的知识应用效果, 本文总结以下几点教学建议。

(1) 寻找最合适、具有特色的案例, 搭建冶金考古案例和课程知识点应用之间的桥梁。教师需从众多检测数据中筛选最合适的素材, 了解相关背景知识、历史人物等信息, 尽量参与数据检测过程, 选择与案例对应的课程知识点, 将各要素整合为一个有机整体, 编成有趣的教学故事; 同时, 精准把握学生课程学习中存在的问题, 将复杂问题简单

化。中华民族拥有着 5000 年的文明史及 2000 多年冶铁史，尤其是汉代冶铁技术十分发达、成果丰富，在现代人无法亲身体验现场操作的现状下，依据已有文献资料及前人检测数据，结合自身检测结果合理推测古代冶金工艺及材料特点，有效调动学生的专业兴趣，帮助学生更好地吸收消化课程知识，并主动运用专业知识分析现实问题。

(2) 搭建冶金考古案例和课程知识点应用之间的桥梁，从课程知识点出发，直接关联铁器检测获得的主要成果，让学生感受到所学知识可直接应用于兼具科研价值和历史意义的古代器物鉴别中；同时，避免向学生展示过于复杂的数据，杜绝难以被接受的“填鸭式”灌输过程。

(3) 教师应以身作则，亲自参与案例研究，若能引导部分学生参与则更佳。虽然部分教师未涉足考古学领域，需从头学习相关知识，但应辩证看待问题，古代器物本质为材料制作成果，其制备工艺为材料学问题。教师亲身参与冶金史研究，相较于简单收集文献中的冶金考古数据，更能发挥言传身教的作用。

(4) 教师需提前学习，做好前期准备工作。在将案例数据应用于教学各个环节（课堂教学、课后实验、实践活动、知识图谱、课程网站）前，教师应先储备相关知识，从块炼钢、炒钢、铸铁脱碳钢、百炼钢、灌钢的概念入手，逐步学习考古学、科技考古、历史学的基本常识和定义；同时，全面收集器物或样品的来源、背景信息及涉及的著名历史人物等，梳理成有趣的教学故事，分解为教学模块，逐步应用于教学过程。即通过整理复杂的背景及各类检测数据，构建循序渐进的教学案例，分不同场合逐渐展示给初次接触专业课程的学生；该教学方法类似于笔者此前多篇涉及冶金考古研究论文^[15-18]。

(5) 提升教师认知水平，做好跨学科交流与学习的准备，即将材料科学与科技考古学有机结合，将冶金考古科研与课程教学有机结合，将工科材料制备技术与文化、历史及社会发展过程有机结合，将课程学习与知识应用及职业发展有机结合。

结束语

(1) 永寿元年铭文灌钢环首剑的检测是首次明

确灌钢“身份”的铁制兵器组织检测，且是目前灌钢中工艺级别最高的灌钢剑（50 灌 250 辟），其组织结构信息为疑似灌钢铁器的检测判定和模拟灌钢工艺铁器的组织演变提供了重要参考。东汉灌钢刀剑展示了灌钢工艺创建时期的特征组织，但需要注意，不同时期、不同制作地点、不同类型的灌钢铁器组织可能存在差异。

(2) 该灌钢的组织为细片层珠光体+粒状渗碳体+少量铁素体，成分接近共析钢；晶粒极为细小，刃部平均晶粒直径为 3.1 μm ，脊部平均晶粒直径为 7.1 μm ；晶粒处于形变状态，内部存在取向梯度。其强化方式主要为晶粒细化与加工硬化：晶粒经显著形变后，渗碳体在铁素体中的溶解度增加，导致珠光体中渗碳体片层变细，数量变少。

(3) 电子背散射衍射对粒状渗碳体的取向检测显示，局部不同珠光体团内渗碳体颗粒取向相近，表明其为二次渗碳体，源于奥氏体析出；奥氏体转变成若干珠光体团，但保留了二次渗碳体的取向；锻打使二次渗碳体取向发生轻微变化，但并非完全随机。

(4) 夹杂物主要为高碳钢中常出现的硅酸盐复相夹杂物，通过 EBSD 技术检测出晶态 CaSiO_3 、 $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ 、 $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ 、 $\text{CaMgSi}_2\text{O}_7$ ，及非晶态含 Al、Mg、Ca、Na、K 的硅酸盐，未检测到低碳钢中常见的 FeO 、 Fe_2SiO_4 、磷酸钙夹杂物。夹杂数量介于炒钢和铸铁脱碳钢之间，且尺寸范围较广。此外，低倍观察未发现流线组织。

致谢：感谢北京科技大学在职博士生梁斌先生提供检测样品与相关文献资料，牛津仪器杨小鹏博士协助获取 EBSD 数据，同时感谢两位针对本文研究内容提出的宝贵意见与建议。

参考文献

- [1] 李众. 中国封建社会前期钢铁冶炼技术发展的探讨. 考古学报, 1975(2): 1
- [2] 韩汝珩, 柯俊. 中国古代的百炼钢. 自然科学史研究, 1984(4): 316
- [3] 陈建立, 韩汝珩, 万欣, 等. 北票喇嘛洞墓地出土铁器的金相实验研究. 文物, 2001(12): 71
- [4] 贾莹, 李新全, 梁志龙. 五女山城高句丽铁器金相学初步探讨. 文物保护与考古科学, 2007(3): 16

- [5] 刘海峰, 陈建立, 梅建军, 等. 河北徐水东黑山遗址出土铁器的实验研究. 南方文物, 2013(1): 133
- [6] Park J S. Steel making in the ancient Korean Kingdom of Koguryo. *Mater Charact*, 2005, 54(4/5): 409
- [7] 杨宽. 中国古代冶铁技术发展史. 上海: 上海人民出版社, 2014
- [8] 周志宏. 中国早期钢铁冶炼技术上创造性的成就. 科学通报, 1955(2): 25
- [9] 乔尚孝, 潜伟. 灌钢工艺新探. 自然科学史研究, 2021, 40(2): 161
- [10] 苗长兴. 从河南铁器鉴定论封建社会后期钢铁技术的发展及灌钢技术的初步研究 [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 1991
- [11] 田率. 对东汉永寿二年错金钢刀的初步认识. 中国国家博物馆馆刊, 2013(2): 65
- [12] 孙闻博. 东汉熹平三年中尚方铁剑考: 兼论中国古代的灌钢工艺. 出土文献, 2022(3): 143
- [13] 梁斌. 两汉时期铭文钢铁刀剑的发现与研究 [学位论文]. 北京: 中国社会科学院, 2014
- [14] Liang B, Yang X P, Li Y, et al. Preliminary inspection and research on the Guangang sword of the Yongshou First Year (155 AD) // *The 11th International Conference on the Beginnings of the Use of Metals and Alloys (BUMA XI)*. Quanzhou, 2025
- [15] 杨平. 课程知识应用、古代钢制兵器检测与北京科技大学科学技术史学科建设. 金属世界, 2023(5): 21
- [16] 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
- [17] 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
- [18] 杨平. 金相实验室中的冶金考古探索: 实验模块建设与文化传承. 金属世界, 2025(6): 50

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, 发表科学学术论文 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》