

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

Nodular Graphite Cast Iron from Han Dynasty to Modern Age:
Inspiration for the Integration of Ideological and Political
Education in the Curriculum by Visiting Zhengzhou's
Guxing Han Dynasty Iron Smelting Ruins Museum

供稿|杨平 / YANG Ping

内
容
导
读

基于郑州古荥汉代冶铁遗址博物馆考察学习, 尝试将《材料科学基础》课程中的铁碳相图、凝固理论等知识点与汉代铸铁工艺进行关联性分析。通过考察出土铁器的组织特征, 探讨古代球墨铸铁与现代工艺产品在石墨形态及形成机制上的差异。结合北京科技大学冶金史研究团队的相关成果, 回顾柯俊院士等学者对汉代球墨铸铁的鉴定工作, 分析积铁块在冶铁工艺研究中的潜在价值。在此基础上, 探索将科技史资源融入课程思政的路径, 构建以“历史文物—科学原理—文化认知”为线索的教学案例, 为材料学科教育提供兼具专业深度与人文内涵的实践参考。

铸铁组织及其形成原理是材料科学基础(以下简称“材料基”)课程的基本内容之一, 主要涉及“相图”及“凝固”两章内容; 同时也是材料基实验课内容, 学生在实验课上对各类铸铁组织进行仔细观察, 并根据其凝固特征画下组织示意图。Fe-C合金是金属材料中最基本、最具代表性的合金体系。北京科技大学早期是北京钢铁学院, 铸造专业是一个特色专业。基于此, 课程前辈在建校初期就准备了各种类型的铸铁金相观察样品(镶嵌的样品背面曾

用俄文标注组织类型), 它们具有不同的基体组织, 这些样品一直使用到现在。

70年代中期北京科技大学成立了冶金史研究室, 成员主要来自金属材料系的金相教研室或理化系的金属物理教研室, 如柯俊先生、丘亮辉教授、韩汝玢教授、孙淑云教授。他们用金相法研究鉴定了我国出土的大量金属文物, 冶金史组不断发展壮大, 不断获得考古学的新成果, 在国内外产生了重要影响。特别值得一提的是1987年冶金史组获得了

作者单位: 北京科技大学材料学院, 北京 100083

国家自然科学三等奖，获奖内容就是中国古代钢铁技术的发展历程。我校的冶金史组已发展成今天的科技史及文化遗产保护研究院，对应的专业与材料科学与工程专业均是一流学科建设专业。虽然2个学科曾源于同一个单位，但讲授金属学及实验课的老师与冶金史组研究人员的相互联系还不是很密切，金属学理论课和实验课，很少将课上观察的铸铁组织与古代冶铁文物中的各种铸铁组织联系对比。在目前倡导的课程思政、文化自信、弘扬科学家精神、弘扬教育家精神的进程中，将课程中学到的铸铁组织形成原理与我国古代铸铁文物鉴定组织、生产技术相结合，并与研究鉴别这些组织及生产技术的科技人员建立联系，十分有必要；这样既可以提升学生的学习兴趣、热爱专业、热爱母校，还可以提升学生的综合能力。因此作为讲了一辈子材料基课程的退休教师，亲自去郑州古荥汉代冶铁

遗址博物馆参观（见图1），强化了亲身感受。以下基于图2的框架图及授课教师的经历，通过查阅一些文献，分析讨论课程中的铸铁知识、古荥博物馆展览和我校冶金史研究三者之间的关系，为学生、为教师讲好课程提供帮助和参考。



图1 郑州古荥汉代冶铁遗址博物馆大门

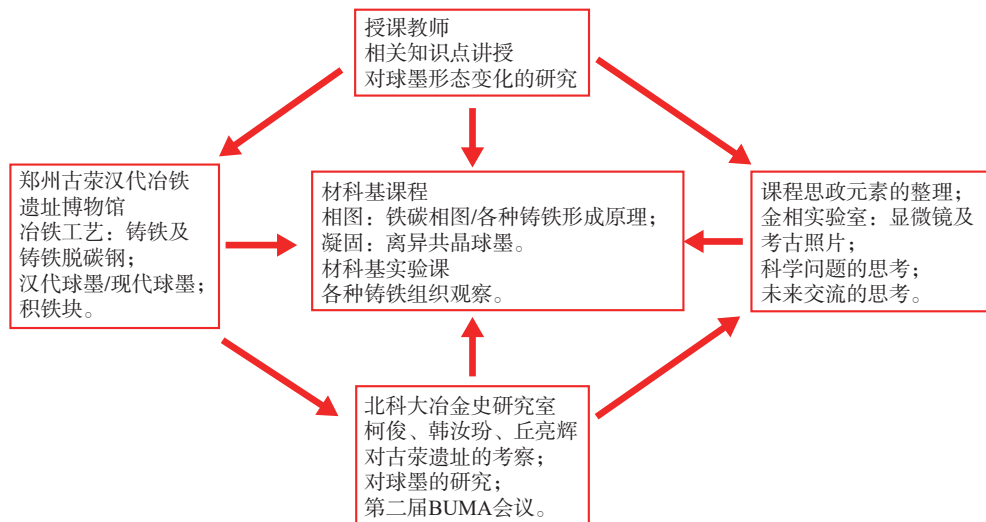


图2 课程教学、博物馆参观与北科大冶金史研究三者关系及研究意义框架图

参观古荥博物馆的感受与思考

参观的整体体会是这家博物馆“短小精干”“内容聚焦”。作为冶铁遗址，如何用矿石冶炼出铸铁？铸铁组织是怎样的？铸铁用于制作什么器件？铸铁与钢有何区别与联系？我国冶铁技术发明时间与西方相差多少年及有何不同？我校冶金史组如何参与到具体的出土古代铁器检测？这些是参观博物馆应该了解到的。以下主要对4个方面进行分析：一是各

类铸铁组织；二是球墨铸铁的形成原理；三是钢与铸铁的关系；四是积铁块。

各种铸铁组织及对应的器物

图3(a)为博物馆展出的汉代铁犁铧及其白口铁组织，左边为过共晶白口铁，存在粗大的先共晶板条状渗碳体组织；右边是共晶白口铁，即完全的共晶莱氏体组织。这与材料基实验课观察的白口铁组织相同。图3(b)为展出的浇口铁及汉代灰口铁组织；左边是未浸蚀的组织，只显示片状石墨；右侧

是浸蚀后的组织，应该是珠光体基体，也与实验课观察的组织相同。图 3(c) 为展示的铁铤及其麻口铁组织，由平衡相石墨和莱氏体（其中渗碳体是亚稳的）共同组成，马口铁中石墨呈球团状，而非片状，与现代麻口铁有一些差异。图 3(d) 为铁凿及其展性铸铁（也称可锻铸铁）组织；左图是浸蚀后的组织，呈团絮状石墨加上铁素体基体；右侧为未浸蚀样品，只能看到团絮状石墨。图 3(e) 为古荥出土的一字铤中的球墨铸铁组织，可以看到球墨形貌非

常圆整，中间的低倍照片显示工件表层区域的球墨组织。下侧为浸蚀后的组织，显示为珠光体加铁素体的基体组织。由此可见，课程中学到的铸铁组织都可与汉代铸铁器件及其组织联系起来。

汉代冶铁技术中的“由铁制钢”技术

在材科基课程介绍铁碳相图时，不涉及具体的冶炼技术，分析钢的组织时仅简单选取钢的成分，假设其高温为液相，缓冷时依次进入各相区，形成典型的组织，直至室温，最终组织由铁素体或渗碳

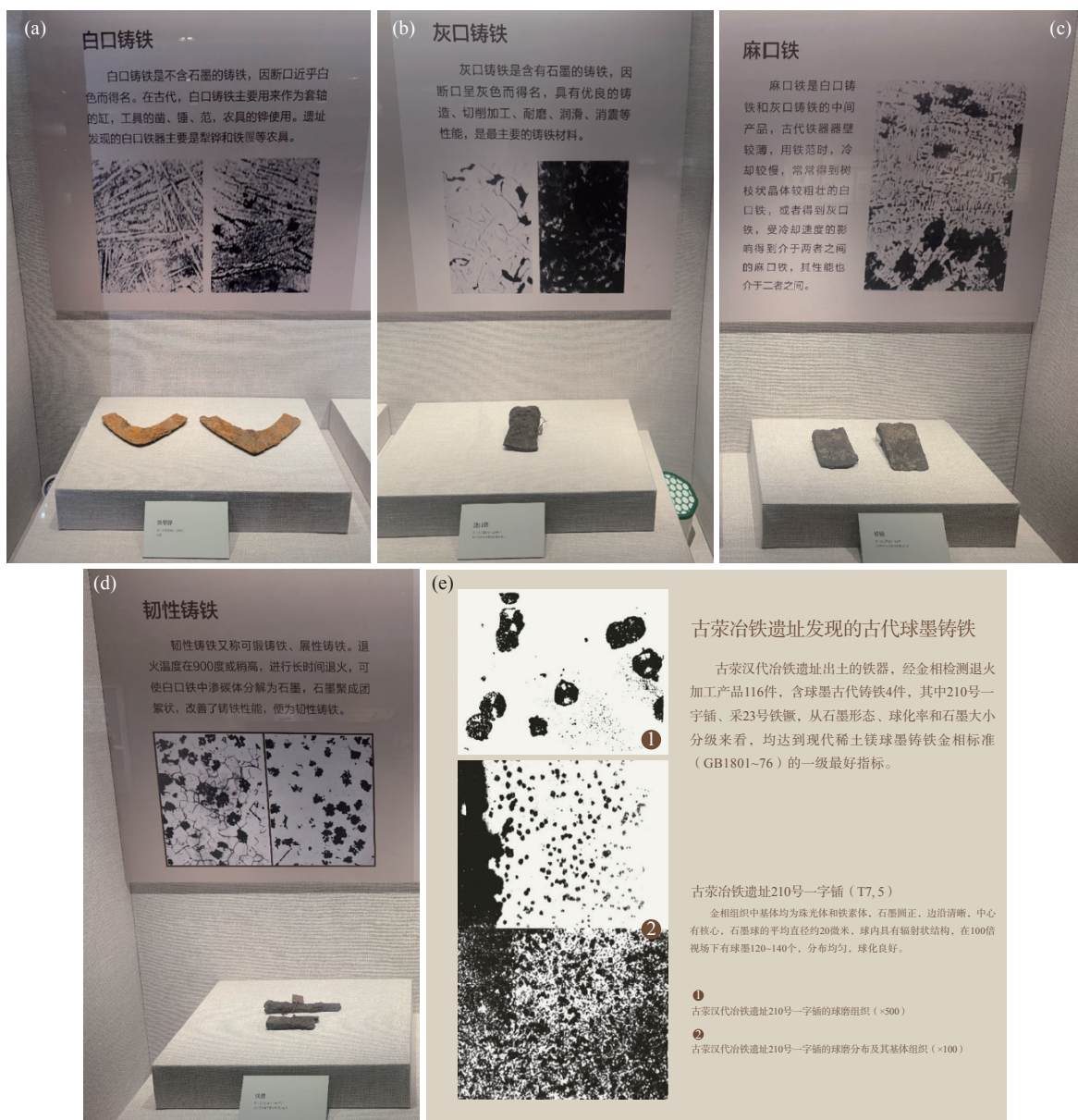


图 3 古荥博物馆的铸铁组织与对应器物：(a) 铁犁铧及其白口铁组织；(b) 浇口铁及其灰口铁组织；(c) 铁铤及其麻口铁组织；(d) 铁凿及其展性铸铁；(e) 一字铤中的球墨组织

体加珠光体组成。对铸铁组织分析时，也是选好成分，假设其从液相开始冷却，依次发生对应的相转变，最终形成珠光体或一次渗碳体加莱氏体组织。而在古代，温度难以提升到 1300 °C 以上，因此只能通过固态还原法（对应块炼钢技术）或铸铁脱碳钢工艺（先炼具有较低熔点、共晶温度为 1143 °C 的铸铁，再脱碳退火制成钢），或通过炒钢技术（将铸铁加热到半熔化状态，在大气中搅拌，通过

氧与碳的结合实现脱碳的目的）制钢（见图 4(a)）。铸铁脱碳钢和炒钢是我国古代炼钢技术的创新，早于西方至少 1800 多年。结合相图转变，将这些炼钢原理介绍给学生，有利于启发学生、教育学生。此外，脱碳退火所用原理也是“扩散”一章学到的反应扩散原理，笔者在调控电工钢{100}织构时也使用了反应扩散的相变控制原理，得到的组织及织构见图 4(b) 和 4(c)。

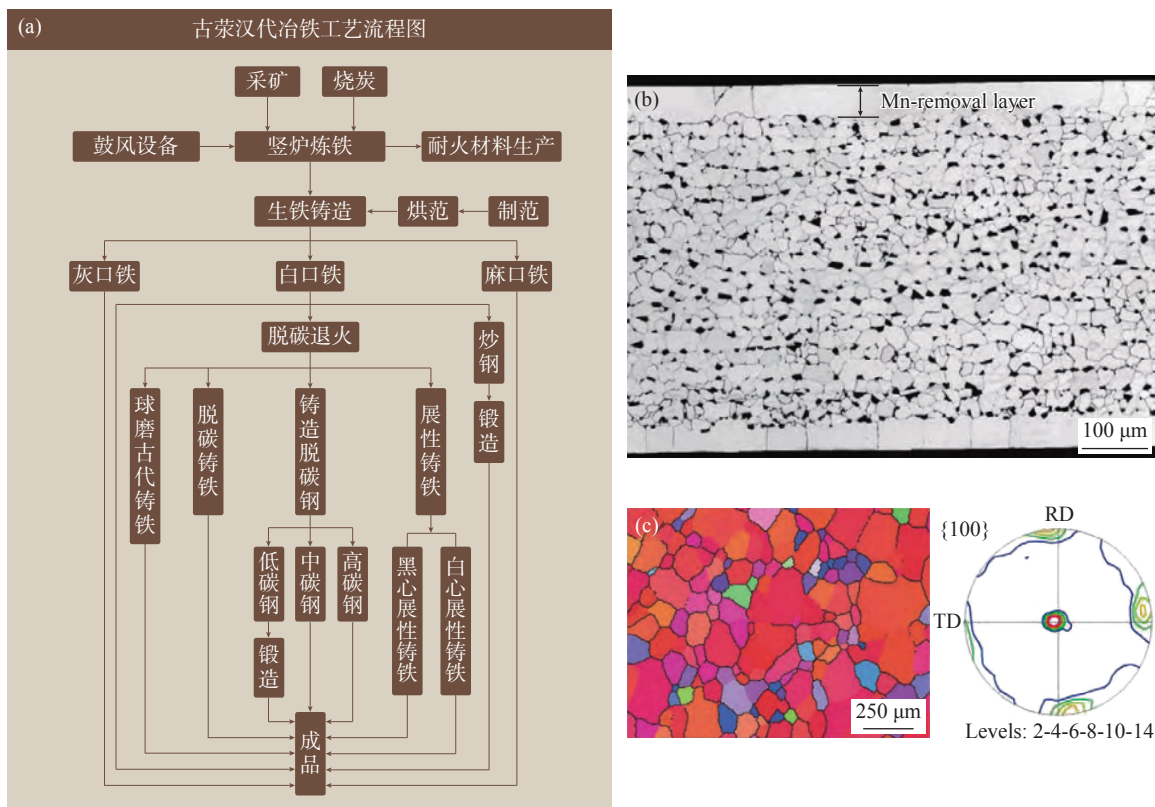


图 4 古荣炼铁技术及由铁炼钢的方法及反应扩散原理在电工钢中应用^[1]: (a) 古荣冶铁工艺流程图; (b) Fe-0.058%C-1.07%Mn-2.98%Si 合金, 1100 °C 真空退火脱锰 30 min 后表层组织; (c) 该组织的背散射电子衍射 (EBSD) 取向成像图及相应的{100}极图

中国古代球墨铸铁与现代球墨铸铁

与白口铁、灰口铁和展性铸铁不同，球墨铸铁具有高强度、高冲击韧性及低缺口敏感性，因为钢中的球状石墨就像一个孔洞，球状孔洞缺口效应不明显，而片状石墨就像一个大裂纹，在拉应力下很容易扩展变大。球墨铸铁的制备难度要高得多，国际上，1947 年英国人莫罗 (H. Morrogh) 才发明了球墨铸铁制备技术，即通过加入球化剂 (Ce 或 Mg)，使石墨在凝固时呈球状生长，这种技术生产

的球墨铸铁的抗拉强度及冲击性能得到了显著提高。我国汉代球墨铸铁生产技术是郑州古荣博物馆展览的一个亮点，为此博物馆专门开辟了一个专题：现代球墨铸铁与我国古代球墨铸铁（见图 5），展示了河南不同遗址出土铁器中的球墨组织，除古荣球墨外，还有滏池球墨，巩义球墨，见图 6。其中一块展板还专门提到北京钢铁学院检测的滏池出土的球墨铸铁（见图 6(c)）。柯俊先生（笔名李众）的文章^[2]中有这样一段话：当现代科学庆祝球墨铸铁诞生的时候，谁知具有球墨的铁器在地下已沉睡



图5 郑州古荥博物馆总结的我国古代球墨铸铁与现代球墨铸铁的差异

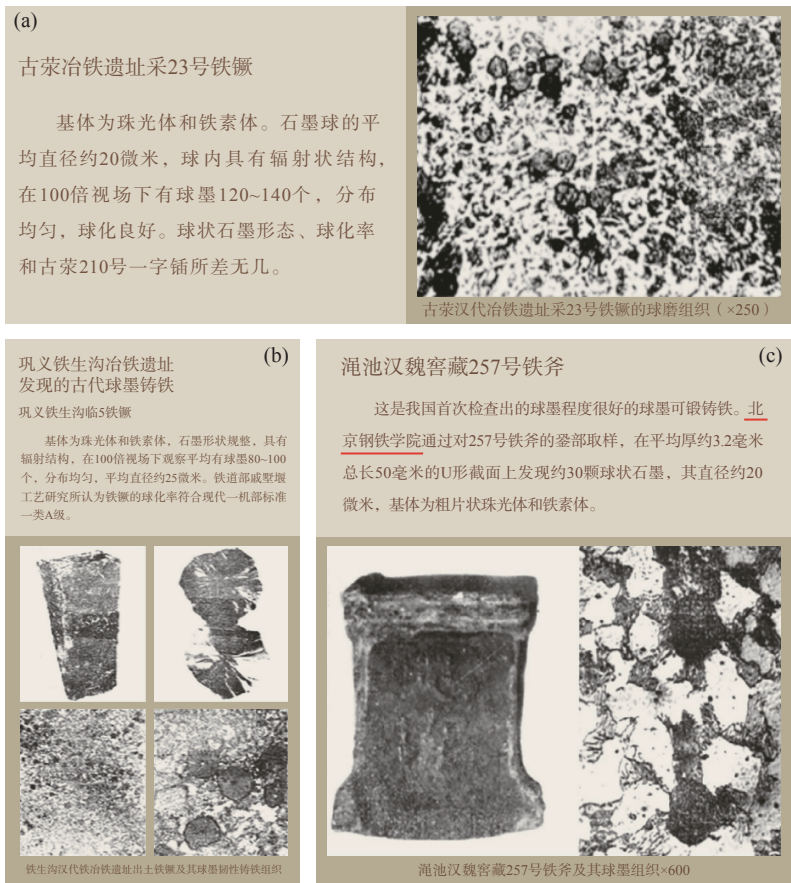


图6 河南各地冶铁遗址中出现的球墨形貌：(a) 古荥遗址铁铤中的球墨；(b) 巩义铁生沟铁铤中的球墨；(c) 滎池铁斧中的球墨

了上千年的岁月。这不禁令人感叹。

球墨铸铁课程介绍的另一个知识点：离异共晶，即凝固时应该共晶的两个相（奥氏体与石墨）并非相互协调促进生长，而是各自独立生长，形成类似“牛眼”状的球墨组织。然而，我国古代球墨的形成机制却不同于国外，它被认为是以展性铸铁方式形成的，即先白口化，之后退火时形成球墨，因此也可称为球墨可锻铸铁。博物馆对2种结构相同或相似的球状石墨的形成差异进行了总结，见图5(d)。汉代球墨组织的圆整度非常好，其内部也会出现放射状结构和偏光下的黑十字，这种球墨的形成原理是20世纪70—80年代的一个研究热点^[2-8]。

笔者恰好在本科结业及硕士研究阶段师从宋维锡先生研究过球墨形态的退化问题，即球墨、蠕墨和片墨之间形态转变的原因及机制。已知片墨是沿其晶体学六方结构的 a 轴方向生长，球墨是沿其 c 轴方向生长，且每个球墨由很多个锥形体组成，与聚合物中的球晶很相似。笔者的疑问是，为何绝大多数白口铁退火均形成团絮状石墨，而非致密的球化度很好的球墨？而单单出土的铁器中存在退火球状石墨？是什么特殊的条件导致白口铁分解形成圆整的球墨？图7所示为笔者硕士阶段研究球墨形态变化成因时的一组照片。实验数据表明，在球墨刚

形成时淬火，球磨表面是光滑的；而淬火后再退火，固态下渗碳体分解后碳原子沉积在原球墨表面，此时石墨凹凸不平。因此液态中形成的球墨与退火中形成的石墨形貌不同，内部结构也应该不同，如图7(a)和7(b)所示。展性铸铁中团絮状石墨是松散的，液态中形成的球墨比较致密，即使内部存在空洞，石墨区域结构还是致密的。早期用透射电镜检测出片状石墨的侧面为石墨的基面，而球墨的表面均为基面，现代EBSD技术也再次清晰地得出这个结论^[9]，见图8中六方石墨单胞所示的取向。遗憾的是笔者经尝试未能用EBSD大面积有效地检测出展性铸铁中团絮状石墨内部结构数据，因此无法确定古代铁器中的球墨组织是白口铁分解产生的还是液相中析出的。文献调研显示，用古代白口铁退火^[4]，用不加球化剂的现代白口铁退火^[4]以及用加球化剂的白口铁退火^[10-13]，都可得到球形石墨，但文献[4,10]均缺少关于白口铁中是否存在已形成的石墨小颗粒，作为随后退火石墨生长的种子的细致研究。文献[11-13]报道，为了制备球墨可锻铸铁，加球化剂的白口铁中常常出现小石墨颗粒，即很难得到真正的白口铁。因此，笔者个人认为，纯白口铁退火很难得到与加球化剂后在液相中形成球墨结构。

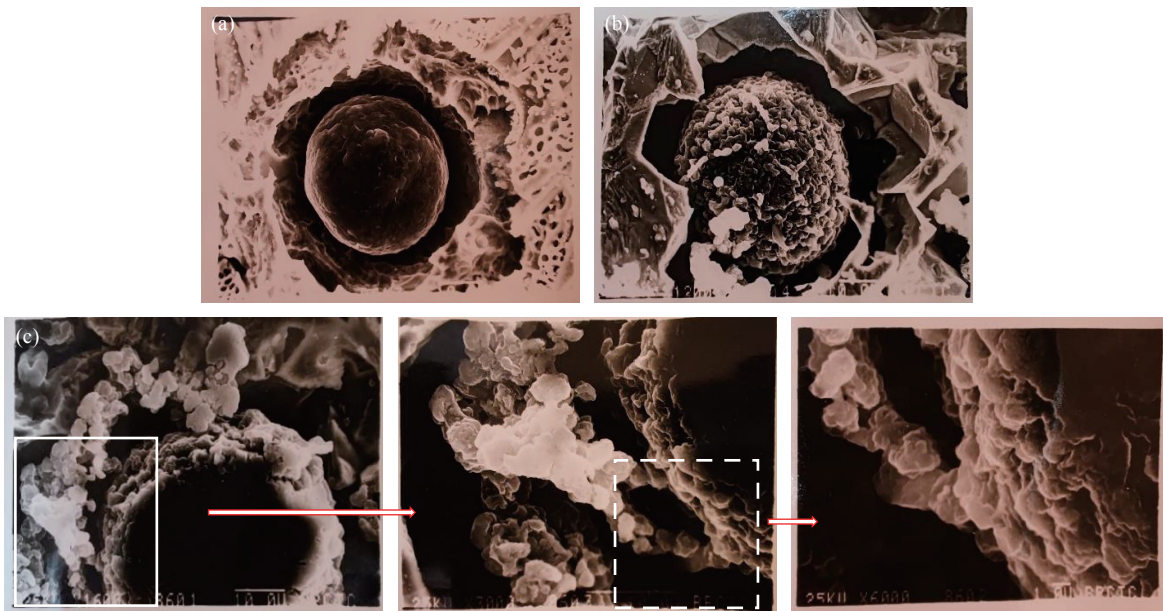


图7 淬火球墨与退火球墨的形貌差异：(a) 球墨生长时淬火，深浸蚀；(b) 球墨生长时淬火，再退火；(c) 球墨生长时淬火，退火，截面及局部放大图

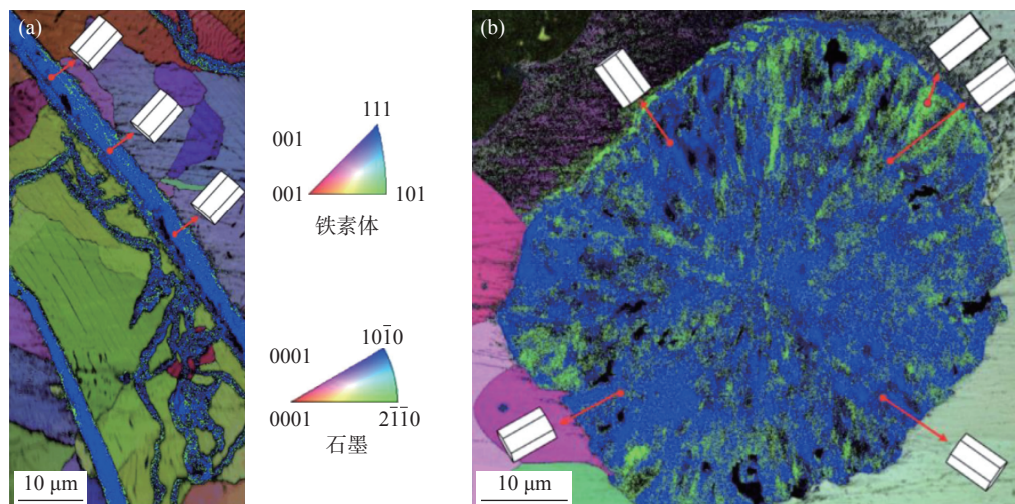


图8 背散射电子衍射技术检测片墨 (a) 和球墨 (b) 的结构与取向^[9]

积铁块与冶金工艺的联系

古荥博物馆最亮眼的就是 10 多块特别大的积铁（见图 9），其中最大的达 23 t，还有部分可达 20 t。积铁块是冶铁过程中产生的残次品或副产物^[14]。按形成原因，积铁块可分为停炉后炉底积铁、炉内结瘤、未全熔的块料、炉温过冷产生的结块和停炉后炉内结块等。按主要成分，积铁块可分为铁渣和未全熔的块料等。可以设想，积铁块的组织一定种类繁多，可惜博物馆没有展示积铁块的组织。由于冶铁过程操作步骤较多，不同步骤下对应的组织不同，至于在哪个阶段出现组织的改变，是没有相关信息的；不同尺寸积铁块的组织也应不同，尺寸越大，其组织应越接近成品铸铁组织。如果能检测不同尺寸积铁块的组织，应该能帮助加深对冶炼技术的认识和识别。文献 [14] 报道的湖南张家界官田出土的东汉时期积铁组织，主要为钢的组织（铁素体加珠光体），某些区域有很多夹杂物存

在。文献 [15] 研究了郑州古荥博物馆 1# 和 5# 积铁的成分，其主体是铸铁成分，但结瘤处却是钢的成分。文献 [16] 研究了河南舞钢、西平地区的 3 块积铁为灰口铁，1 块为熟铁块炼钢。笔者认为研究积铁块组织有如下意义：（1）大尺寸积铁块的成分可能更接近冶炼成品的成分，积铁块是后续脱碳法制钢或炒钢操作的原料，其中的夹杂物信息有助于区分后续钢制品（如钢剑、钢戟、环首刀等）是使用铸铁脱碳钢工艺还是炒钢法制作的：因为后续形变锻打、氧化等步骤引入了新的夹杂物并碎化了原有的夹杂物，且彻底改变了原始组织，作为中间产品的大尺寸积铁的组织检测具有重要价值。（2）由于积铁块组织夹杂等变化多样，研究其组织更有助于确定该积铁块组织出现组织变化的冶铁阶段；并进一步归纳出经不同操作的积铁块与对应组织成分的关系；（3）探索积铁块尺寸与组织夹杂的关系，以及同一积铁块不同位置的组织夹杂关系。



图9 冶铁遗址中各种尺寸的积铁块

北京科技大学早期冶金史组对古荥等冶铁遗址铁器检测鉴定活动的意义

北京科技大学早期名称是北京钢铁学院，无疑是专门研究钢铁的，我校科研人员与冶铁类考古活动及相关器物研究有着密切的联系。以柯俊院士、丘亮辉教授（毕业于金相热处理专业 57 届）、韩汝玢教授（毕业于金相热处理专业 56 届）等为代表的我校冶金史组成员 20 世纪 70 年代亲自参加了对郑州古荥遗址的考察研究^[17]，留影照片见图 10(a) 和 10(b)；图 10(c) 为 1975 年河南考古学家李京华先

生在北京钢铁学院金属材料系金相实验室与金属材料系吴承建教师（金相热处理专业 57 届）讨论渑池出土的球墨铸铁形成原理时的情景^[18]，3 人的背后就是 1951 年章守华先生赴东德采购的当时很先进的卧式显微镜，墙上挂着特殊的金相图片（因老照片模糊，看不清具体内容）。图 10(d)~10(f) 是近期笔者拍摄的见证着学校发展的显微镜和部分墙上考古照片及刚劲有力的描写显微组织的毛笔字。早期的金相实验室已演变成现在的材料学实验室，并属于材料科学与工程学院国家级实验教学示范中心。冶金史所的第一任主任丘亮辉教授在文献 [19] 中



图 10 古荥博物馆内展示的我校参与球墨考古展板：(a) 1978 年柯俊院士去古荥调研^[17]；(b) 1978 年柯俊院士与韩汝玢教授在古荥合影^[17]；(c) 1975 年李京华先生（中）与北京钢铁学院金属相教研究室吴承建老师（左）讨论渑池球墨可锻铸铁的成因^[18]；(d) 保存到现在的东德卧式显微镜；(e) 保存至现在的汉代铁铤中的球墨照片；(f) 保存至现在的战国铁铤中的韧性铸铁照片

指出一些球墨的照片是在金属材料系检测中心（秦文秀老师帮助下）拍摄的。柯俊院士等获得的丰富考古成果是冶金史组 1987 年获得国家自然科学基金三等奖（中国古代钢铁技术的发展历程）的重要组成部分。

此外，1986 年由我校冶金史研究室组织的第二届国际冶金史大会（Beginning of the Use of Metals and Alloys, BUMA）在郑州召开，古荥博物馆是参会者的主要参观地点，图 11 所示为古荥博物馆提供的第二届国际冶金史大会期间，柯先生、韩汝玢教授参观该博物馆时的照片。笔者也在柯先生等检测出的球墨组织的展板前与博物馆工作人员合影留念。往事历历在目，从北京科技大学科技史及文化遗产保护研究院网站上的照片可以看到，我校新一代的考古研究人员仍聚焦古荥的冶铁遗址。作为授课教师，我们应注意到，材料基课程及实验课上展示的各种铸铁组织都是我校老一辈教师自己制作出

来的，已经有近 70 年的历史；出土金属文物中的各种铸铁（特别是球墨）的原始数据产生在我们现在上实验课的实验中心（图 10(c)），并且当年用于研究的显微镜就曾存放于此。通过向学生展示汉代出土的各种铸铁，不仅能够提升学习兴趣，促进学生关注历史，还能够引导学生了解我校金相专业和冶金史专业的历史。看到这些不同铸铁组织对应的汉代农具、工具实物，将汉代和现代的球墨组织进行对比，结合笔者自己研究生时代的相关组织照片、文献数据，既探讨球墨的内部结构差异等科学问题，又讨论了我国先进的铸铁文化，进一步增强文化自信。特别应提到的是，告知学生前人的聪明智慧——当冶炼温度达不到完全熔化钢的温度时，前人如何通过铸铁脱碳法和炒钢法，由铸铁生产钢。重达 23 t 的特大积铁反映了汉代冶铁生产规模——每天约生产 1 t 钢，且仅河南就有好几处汉代冶铁遗址，可见我国汉代冶铁规模的巨大。



图 11 第二届国际冶金史大会期间柯俊院士 (a) 和韩汝玢教授 (b) 参观古荥博物馆时的照片（古荥博物馆提供）；(c) 笔者与古荥博物馆工作人员张晓瑜女士在展示的柯俊院士等检测出的球墨图片前的合影

结束语

(1) 材料基课程及实验课中讲授和观察各种铸铁组织时，建议将郑州古荥汉代冶铁遗址博物馆展出的各类铸铁组织与对应的器物 and 课程中的铸铁组织进行对比，进而彰显 2000 年前我国汉代灿烂的历史文化与先进的冶铁技术。教师应细心收集整理相关素材，多与考古学者及博物馆技术人员交流，将教学、科研与相关历史融合，提升教学效果。

(2) 我国古代球墨与现代球墨形成的本质差异是中国古代先进冶铁技术的独特之处。2000 年前先

人制造出来的规则球形石墨，令人耳目一新。结合文献调研及自身相关研究经历，笔者认为古代球墨的形成原理还需结合现代先进检测手段进一步检测分析。

(3) 通过回忆及收集我校老一代冶金史研究者参与古荥冶铁遗址的调研鉴定工作，以及调研金相实验室作为产生相应数据或成果的源点，亲自研究了课程知识点在考古学中的应用，帮助学生关注新的材料应用领域，提高专业兴趣。为推测或判断古代冶铁工艺过程，提供了扎实的理论基础。用身边

的故事诠释铸铁各类组织的形成过程，防止学习碎片化，培养学生综合能力。

致谢：感谢郑州古荥汉代冶铁遗址博物馆的张晓瑜女士在笔者参观时给予的多方面的讲解、帮助并提供珍贵的照片。

参考文献

- [1] 杨平, 王金华, 马丹丹, 等. 成分对真空脱锰法相变控制高硅电工钢{100}织构的影响. 金属学报, 2022, 58(10): 1261
- [2] 李众. 从渑池铁器看我国古代冶金技术的成就. 文物, 1976(8): 51
- [3] 华觉明, 李京华, 关洪野, 等. 两千年前有球状石墨的铸铁. 广东机械, 1980(2): 34
- [4] 李蜀庆, 钱翰城, 李京华. 关于汉代铁器中球状石墨和基体组织成因的研究. 重庆大学学报(自然科学版), 1983(1): 84
- [5] 北京钢铁学院金属材料系中心化验室. 河南渑池窖藏铁器检验报告. 文物, 1976(8): 52
- [6] 关洪野, 华觉明. 汉魏铸铁中球状石墨形貌及结构的研究. 自然辩证法通讯, 1981(1): 66
- [7] 邱亮辉. 古代铸铁中球墨的奥秘. 机械工人, 1983(5): 2
- [8] 赵青云, 李京华, 韩汝玢, 等. 巩县铁生沟汉代冶铸遗址再探讨. 考古学报, 1985(2): 157
- [9] Tewary U, Paul D, Mehtani H K, et al. The origin of graphite morphology in cast iron. *Acta Mater*, 2022, 226: Art No. 117660
- [10] 代晓玲, 李仲达, 孙玉福. 球墨可锻铸铁的试验研究. 郑州工学院学报, 1983(2): 63
- [11] 马永杰, 任军. 铸态石墨对稀土镁球墨可锻铸铁件力学性能的影响. 热加工工艺, 2009, 38(17): 160
- [12] 古可成, 周瑞, 李永红, 等. 耐热球墨可锻铸铁的初晶石墨与其缩孔倾向的研究. 沈阳工业大学学报, 2001(6): 452
- [13] 周瑞. 耐热球墨可锻铸铁的结晶及石墨化 [学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2002
- [14] 莫林恒, 林永昌, 陈建立. 湖南桑植官田冶炼遗址发掘简报及冶金分析研究. 南方文物, 2019(3): 69
- [15] 阎书广. 古荥汉代冶铁遗址积铁块保护研究初探. 华夏文明, 2017(12): 35
- [16] 秦臻, 陈建立, 张海. 河南舞钢、西平地区战国秦汉冶铁遗址群的钢铁生产体系研究. 中原文物, 2016(1): 109
- [17] 北京科技大学. 柯俊画传. 北京: 冶金工业出版社, 2016
- [18] 李京华. 中原古代冶金技术研究(第二集). 郑州: 中州古籍出版社, 2003
- [19] 邱亮辉. 河南汉代铁器的金相普查. 北京钢铁学院学报, 1980(4): 132

作者简介：杨平（1959—），博士，北京科技大学材料科学与工程学院退休教授。