

河南巩义大坡墓地出土汉代铁器制作工艺

樊伟, 杨浩淼, 赵志文

(河南省文物考古研究院, 河南郑州 450099)

摘要: 对大坡墓地出土的8件西汉铁器进行金相观察和SEM-EDS分析, 结果表明, 这批铁器的制作工艺可分为生铁铸造和生铁退火两大类。生活用具由白口铁和麻口铁直接铸造而成; 农具为石墨化退火的韧性铸铁; 手工工具采用经过脱碳退火处理的铸铁脱碳钢和脱碳铸铁。这一差异化的材质选择, 反映了西汉时期巩义地区工匠对不同钢铁材料力学性能的深刻理解, 以及其成熟的铸铁退火技术水平。研究进一步表明, 汉代河南地区的铁器生产已建立起一个以生铁技术为核心, 并辅以多样化退火处理的成熟技术体系。该格局既反映了工匠对材料性能的深刻认知, 也与“盐铁官营”政策下集中管控的生产网络密切相关。

关键词: 金相; 汉代; 冶金考古; 铁器; 铸造; 退火工艺

中图分类号: K876.42; TG115 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 05-0546-08

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0073

Manufacturing Techniques of Han Dynasty Iron Artifacts Unearthed from the Gongyi Dapo Cemetery of Henan

FAN Wei, YANG Hao-miao, ZHAO Zhi-wen

(Henan Provincial Institute of Cultural Relics and Archaeology, Zhengzhou 450099, Henan, China)

Abstract: The metallographic observation and SEM-EDS analyses have been carried out on eight Western Han iron artifacts unearthed from the Dapo Cemetery. The results demonstrate that these iron artifacts fall into two primary categories: pig iron casting and pig iron annealing. Domestic utensils were mainly produced by direct casting of white and mottled cast iron, while farm tools were made of malleable cast iron produced via graphitization annealing; hand tools, meanwhile, were fabricated using steel of decarburized cast iron and decarburized cast iron subjected to decarburization annealing treatments. This differentiated material selection reflects both the profound understanding of craftsmen in the Gongyi region on the mechanical properties of different ferrous materials during Western Han Dynasty and their proven cast iron annealing technology level. The study further demonstrates that the iron artifact production in the Henan region during the Han Dynasty had constructed a mature technological system centered on pig iron technology and supplemented by diversified annealing treatments. This technological framework not only reflects the craftsmen's profound comprehension on the material properties but is also closely associated with the centralized production network under the "Salt and Iron Monopoly" policy.

Key words: metallography; Han Dynasty; archaeometallurgy; iron artifact; casting; annealing technology

古代冶铁及钢铁技术可分为块炼铁及块炼铁渗碳钢技术, 和生铁及生铁制钢技术两种不同的技术体系。中国早期冶铁技术的发展呈现出多线并进的格局, 西汉初期仍延续战国时期块炼铁与生铁冶炼并行的技术路线^[1-2]。但到西汉中期, 中原核心区已建立起以生铁冶炼为基础的完整技术体系^[3], 这一技术体系的成熟使中国冶铁业在东汉时期实现全面转型。铁器生产规模的扩大和技术的普及, 最终推动铁器广泛应用于社会生活的各个领域, 为中国古代经济发展和社会

进步奠定了重要的物质基础。河南地区出土汉代铁器的制作技术研究已取得一些进展, 学者对河南古荥^[4]、铁生沟等冶铁遗址^[5], 王湾、东马史^[6-7]、浉池^[8-9]、镇平^[10-11]等汉代窖藏, 及永城梁孝王寝园、保安山二号^[12]、长葛^[13]及新郑地区汉代墓葬^[14]中出土的铁器开展了相关研究, 探讨了汉代制铁技术及其社会影响。

大坡墓地位于河南省巩义市北山口镇白河村西白河西岸的台地上。2010年至2011年, 河南省文物考古研究院对大坡墓地进行了考古发掘。此次发掘共计清

基金项目: 科技部基础资源调查专项项目“中国先秦两汉时期矿冶遗址综合调查”(2022FY101501)。

收稿日期: 2025-12-25 收到初稿, 2026-01-22 收到修订稿。

作者简介: 樊伟(1993-), 男, 助理馆员, 硕士, 研究方向为冶金考古。E-mail: fanwei113@foxmail.com

通信作者: 杨浩淼, 女, 文博馆员, 硕士。1659573165@qq.com

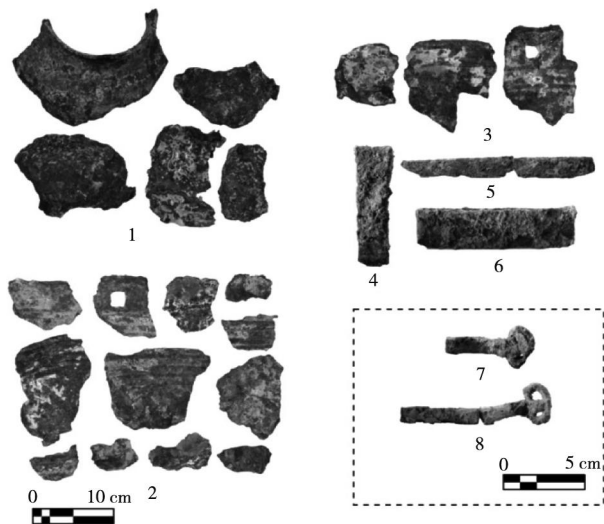
引用格式: 樊伟, 杨浩淼, 赵志文. 河南巩义大坡墓地出土汉代铁器制作工艺[J]. 铸造, 2026, 75(5): 546-553.

FAN Wei, YANG Haomiao, ZHAO Zhiwen. Manufacturing techniques of Han Dynasty iron artifacts unearthed from the Gongyi Dapo cemetery of Henan [J]. Foundry, 2026, 75(5): 546-553.

理汉代墓葬68座，出土石器、陶器、铜器和铁器等遗物500余件，其中出土铁器10件。根据墓葬的结构以及出土器物的类型与组合，这批墓葬的埋葬年代为西汉时期。本研究采用金相观察及SEM-EDS技术手段，对大坡墓地出土的汉代铁器进行科学分析，以期获取该墓葬出土铁器所蕴含的铁器制作技术信息，并结合文献资料及前人研究成果，探讨汉代河南地区铁器的制作工艺特点。

1 材料与方法

本研究共对巩义大坡墓地出土的8件铁器取样16件进行分析检测。选取的样品分别来自大坡墓地的8座墓葬，涵盖了西汉早、中、晚时期，器类包含铁釜、铁铍、铁削和铁削刀等。8件铁器按照器类可分为手工工具、农具和生活类用具三类。手工工具包括1件铁铍和3件铁削刀，农具包括1件铁铍，生活类用具包括3件铁釜。样品信息详见表1。



1-3. 铁釜 (2011GBD II M45: 5、2011GBD II M27: 2、2011GBD II M32: 4) 4. 铁铍 (2011GBD II M34: 7)
5、7、8. 铁削刀 (2011GBD II M2: 10、2011GBD II M12: 9、2011GBD II M20: 13) 6. 铁铍 (2011GBD II M39: 1)

图1 巩义大坡墓地出土铁器

Fig. 1 The iron artifacts unearthed from the Dapo cemetery

对所取16件铁器样品进行切割、清洗后，使用TROJAN慢性环氧树脂冷镶。对镶嵌好的样品进行打磨和抛光处理。磨抛好的铁器样品经浸蚀后，使用莱卡 (Leica) DM6000M金相显微镜观察金相组织并拍摄金相显微照片。铁器样品用现配的浓度为4wt.%的硝酸酒精溶液浸蚀。

完成金相拍照的样品经再次抛光后，进行喷碳处理。喷碳后，使用FEI公司型号为“QUANTA-650”的

表1 大坡墓地出土铁器样品信息

Tab. 1 Sample information of the iron artifacts unearthed from the Dapo cemetery

取样编号	名称	取样位置	出土编号	年代
GD01	铁铍	刃部	2011GBD II M39:1	西汉早期
GD02	铁铍	釜部		
GD03	铁釜	腹部残片	2011GBD II M45:5	西汉早期
GD04	铁釜	口沿残片		
GD05	铁釜	腹部残片	2011GBD II M32:4	西汉中期
GD06	铁釜	腹部残片		
GD07	铁釜	口沿残片	2011GBD II M27:2	西汉早期
GD08	铁釜	底部残片		
GD09	铁釜	腹部残片	2011GBD II M34:7	西汉早期
GD10	铁釜	口沿处		
GD11	铁铍	釜部边缘	2011GBD II M12:9	西汉早期
GD12	铁铍	刃部		
GD13	铁削刀	芯部	2011GBD II M2:10	西汉晚期
GD14	铁削刀	柄部		
GD15	铁削刀	刃部	2011GBD II M20:13	西汉早期
GD16	铁削刀	柄部		

环境扫描电镜 (ESEM) 进行背散射图像观察，并使用配置的EDAX公司型号为“APOLLO-X”的能谱仪对7件样品的非金属夹杂物进行观察分析。能谱分析采用无标样定量成分测定方法，分析条件设定为：加速电压25 kV，工作距离10 mm左右，激发时间 ≥ 60 s。收集到的化学成分数据以质量分数 (wt.%) 计算，并归一化为100%。

2 分析结果

经检测的16件铁器样品，其材质整体上可分为生铁铸造制品及生铁退火制品两大类。生铁铸造制品包括白口铁和麻口铁两种材质，皆来自3件铁釜。生铁退火制品包括脱碳铸铁、铸铁脱碳钢及韧性铸铁三种材质。金相组织观察结果见表2。

2.1 生铁制品

金相组织观察显示，经检测的16件铁器样品中有8件样品呈现出典型的生铁铸造组织，如表2所示。这些样品包括白口铁、麻口铁两种材质，器型皆为生活用品铁釜。其中，白口铁材质的样品包括铁釜样品GD03、GD06-10，共计6件。由于碳含量不同，大坡墓地白口铁材质样品呈现出亚共晶白口铁、共晶白口铁和过共晶白口铁三类组织形态。铁釜样品GD03，如图2 (a) 所示，由亚共晶白口铁铸造而成，基体组织为珠光体和莱氏体。取自铁釜腹部和口沿处的样品

表2 铁器样品金相组织观察结果
Tab. 2 Metallographic structure observation results of the iron artifact samples

实验编号	器物名称	金相组织描述	材质	制作工艺
GD01	铁钺	芯部为铁素体、边缘为铁素体+珠光体，分布有团絮状石墨	韧性铸铁	铸后石墨化退火
GD02	铁钺	铁素体基体，分布有团絮状石墨，存在大量锈蚀孔洞	韧性铸铁	铸后石墨化退火
GD03	铁釜	珠光体，莱氏体	亚共晶白口铁	铸造
GD04	铁釜	珠光体+石墨分布在莱氏体基体上	麻口铁	铸造
GD05	铁釜	珠光体+石墨分布在莱氏体基体上	麻口铁	铸造
GD06	铁釜	莱氏体	共晶白口铁	铸造
GD07	铁釜	莱氏体	共晶白口铁	铸造
GD08	铁釜	莱氏体+一次渗碳体	过共晶白口铁	铸造
GD09	铁釜	莱氏体+一次渗碳体	过共晶白口铁	铸造
GD10	铁釜	莱氏体+一次渗碳体	过共晶白口铁	铸造
GD11	铁铤	芯部为莱氏体，主要呈板条状，少量为蜂窝状，中间为铁素体+珠光体，边缘为铁素体	脱碳铸铁	铸后脱碳退火
GD12	铁铤	芯部为莱氏体，边缘为铁素体+珠光体	脱碳铸铁	铸后脱碳退火
GD13	铁削刀	铁素体，晶界处有少量片状珠光体，锈蚀严重	亚共析钢	铸后脱碳退火
GD14	铁削刀	铁素体，晶界处有少量珠光体	亚共析钢	铸后脱碳退火
GD15	铁削刀	铁素体，晶界处有少量珠光体	亚共析钢	铸后脱碳退火
GD16	铁削刀	珠光体+铁素体，魏氏组织	亚共析钢	铸后脱碳退火

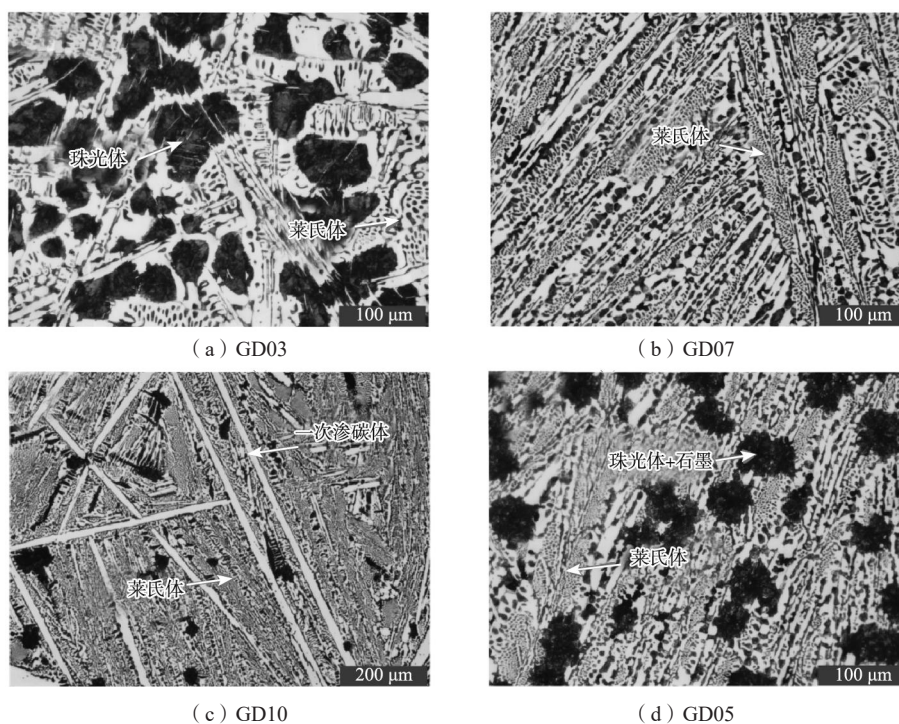


图2 铸态金相组织照片

Fig. 2 As-cast metallographic micrographs

GD06、GD07为共晶白口铁铸造组织，如图2（b）所示，基体组织为莱氏体。样品GD08-10由过共晶白口铁铸造而成，基体组织为莱氏体和一次渗碳体，如图2（c）所示。经鉴定，麻口铁材质样品共计2件，分别取自同一件铁釜的口沿和腹部。铁釜样品GD04和样品GD05的金相组织皆为珠光体和菊花状石墨分布在莱氏

体基体上，呈现出具有混合的白口组织和灰口组织，即麻口铁组织形态，如图2（d）所示。

2.2 退火制品

前文16件铁器样品金相组织观察结果显示，其中8件样品为生铁直接铸造而成，其余8件样品的金相组

织特征尚不足以明确其冶炼及成形工艺（图3）。根据已有研究，通过分析钢铁制品中夹杂物的形貌特征和化学成分信息，可为工艺判定提供重要依据。8件非生铁铸造制品SEM-EDS分析检测结果显示，铁器样品基体组织纯净，不见铁橄榄石和浮氏体等夹杂物。

其中样品GD13由于锈蚀影响，无法测量夹杂物信息；其余7件样品皆观察到玻璃态硅酸盐非金属夹杂物，夹杂物形态主要为圆滴状，夹杂物数量少，且平均尺寸小于10 μm，如图4（a）所示。硅酸盐类夹杂物是生铁制品中一类典型的非金属夹杂物。结合金相分析

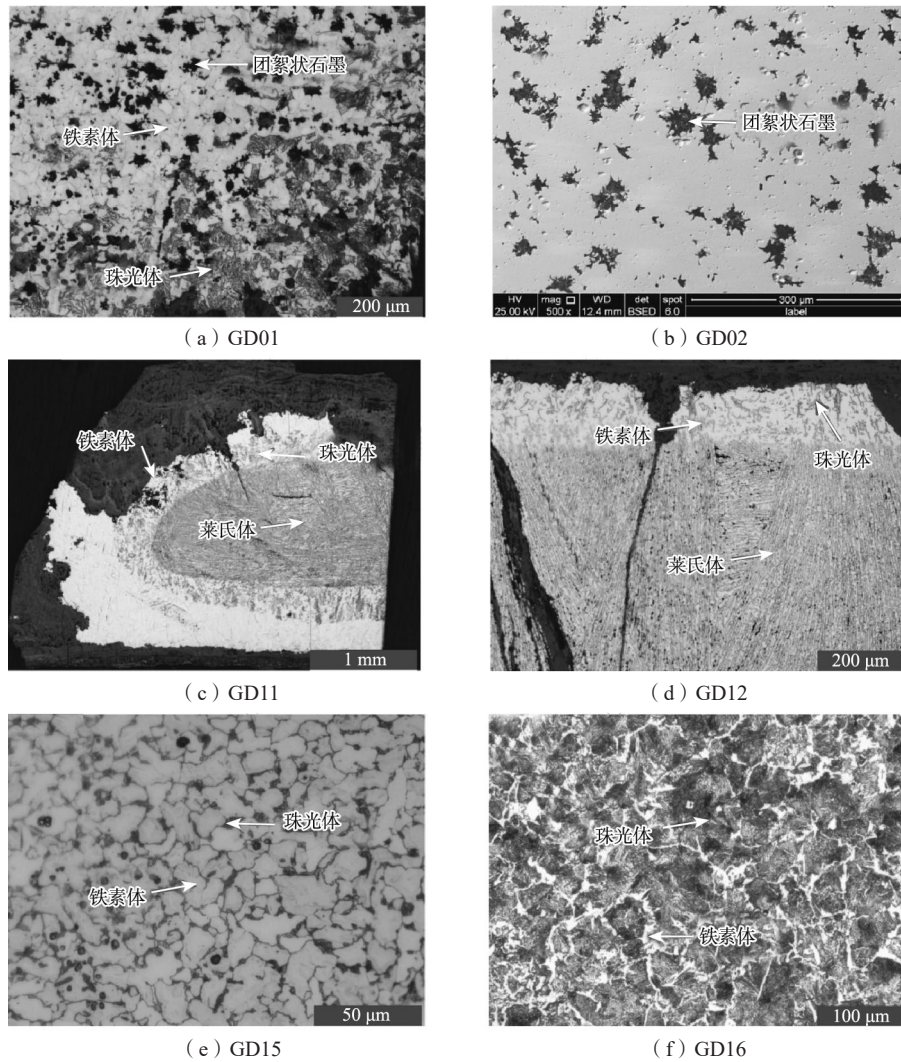


图3 退火态金相组织照片
Fig. 3 Annealed metallographic micrographs

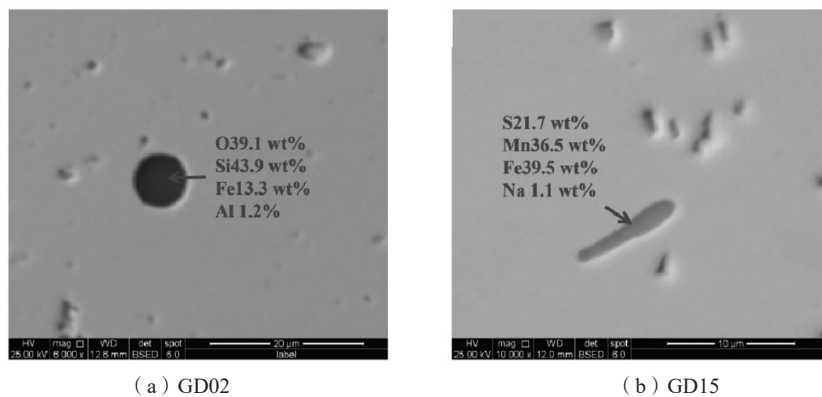


图4 铁器非金属夹杂物背散射电子图像

Fig. 4 Backscattered electron images of non-metallic inclusions in the iron artifacts

结果,除8件生铁铸造制品外,其余皆为生铁退火制品。夹杂物化学成分分析结果见表3。此外,在铁削刀样品GD14-16这三件样品的夹杂物中检测到硫化物夹杂如图4(b)所示。此类夹杂物主要组成元素为硫、锰和铁,3种元素之和不低于96%。这三件样品的硫含量分布在9.4%~22.7%,平均值为15.3%;锰含量分布在16.8%~37.7%,平均含量为25.3%;铁含量分布在

36.9%~69.2%,平均含量为56.8%。此类夹杂物尺寸极小,平均尺寸小于5 μm。古代铸铁内的Mn、S来源有矿石、重熔铁料、炉壁、燃料和助熔剂等入炉物质。在高温还原条件下,Mn和S易溶于铁液形成MnS,其溶解度随温度降低而下降^[9],凝固时析出为细小夹杂物;若S含量过高,会生成FeS或MnS-FeS共晶,生铁退火铁器的硫化物夹杂数量略多于铸铁器^[15]。

表3 铁器样品非金属夹杂物SEM-EDS分析结果
Tab. 3 The SEM-EDS analysis results of non-metallic inclusions in the iron artifact samples $w_B/\%$

样品编号	区域	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe
GD01	1	30.6	0.9	0.2	1.3	34.2	0.2	0.3	0.6	0.9	0.9	1.6	28.4
	2	25.1	0.5	0.2	1.3	28.0	0.1	0.3	0.5	2.4	0.8	1.7	39.1
GD02	1	32.9	0.4	-	0.9	32.2	0.2	0.5	0.2	4.6	1.4	2.3	24.7
	2	39.1	0.1	-	1.2	43.9	0.2	0.2	1.1	0.2	0.4	0.4	13.3
GD11	1	19.1	0.4	-	0.9	20.4	1.4	0.4	-	1.1	0.1	1.1	55.2
	2	31.8	0.4	-	0.8	32.4	0.2	0.4	0.3	2.9	0.9	1.4	28.5
GD12	1	42.9	0.2	0.2	3.0	41.2	0.4	0.3	0.7	4.5	0.5	0.5	5.8
	2	23.0	1.0	0.5	2.4	24.7	0.2	0.3	0.3	3.4	0.8	1.2	42.2
GD14	3	21.4	0.9	0.3	2.2	23.7	0.1	0.2	0.2	3.9	0.9	1.4	44.7
	1	0.3	0.6	-	-	-	0.1	11.2	0.1	0.2	0.3	19.2	67.9
	2	0.5	0.5	-	-	-	0.1	9.4	0.2	0.2	0.9	18.8	69.2
	3	0.8	1.2	-	-	-	0.1	15.5	-	0.1	0.3	26.4	55.6
GD15	4	0.5	1.0	-	-	-	0.1	11.7	0.1	0.2	1.9	16.8	67.7
	1	0.5	0.9	-	-	-	0.2	16.6	0.2	0.2	0.8	24.9	55.6
	2	0.8	1.1	-	-	-	0.1	21.7	0.0	0.1	0.2	36.5	39.5
	3	0.7	1.0	-	-	-	0.1	22.7	0.1	0.1	0.6	37.7	36.9
GD16	4	0.6	1.2	-	-	-	0.1	17.3	0.1	0.1	0.1	27.7	52.9
	1	28.6	1.0	0.2	3.6	30.8	0.2	1.1	1.8	0.8	0.8	3.0	28.1
	2	31.9	0.6	0.3	2.1	35.1	0.1	0.6	0.5	1.8	0.6	3.2	23.1
	3	29.3	1.0	0.1	1.6	32.2	0.1	0.7	0.5	0.9	0.6	0.3	32.9
	4	-	-	-	-	-	-	12.4	-	-	-	21.7	65.9
	5	37.9	0.2	-	1.6	41.7	0.3	1.5	4.1	0.4	0.6	1.8	10.0

巩义大坡墓地生铁退火制品包括韧性铸铁、脱碳铸铁及铸铁脱碳钢三种材质,共计8件。2件韧性铸铁样品分别取自同一件铁舌的刃部和背部。刃部样品GD01(图3(a))金相观察结果显示,芯部为铁素体,铁素体晶界明显,呈等轴晶状;边缘为铁素体与珠光体,整体基体上分布有团絮状石墨。铁舌背部样品GD02金相组织为铁素体基体,二次电子图像显示团絮状石墨分布于纯净铁基体上(图3(b))。

2件脱碳铸铁材质样品GD11、GD12分别取自同一件铁铤的銎部和刃部。样品GD11(图3(c))芯部组织为莱氏体,中间过渡区域为铁素体+片状珠光体,边缘为铁素体大晶粒。样品GD12(图3(d))金相组织

为芯部莱氏体,边缘为铁素体与珠光体。

4件铁削刀样品皆为铸铁脱碳钢制品。样品GD13-15金相组织为铁素体基体,晶界处有少量珠光体,为亚共析钢材质,碳含量为0.1%~0.2%(图3(e))。样品GD16(图3(f))金相组织为珠光体和铁素体,铁素体沿奥氏体晶界析出,形成魏氏组织,为亚共析钢材质,碳含量约为0.7%。

3 讨论

3.1 大坡墓地铁器材质选择

白口铁是中国古代使用最早、最广泛的铸铁材

质。在铸造过程中，白口铁一般是在较高的冷却速度下，由于碳来不及石墨化，而以渗碳体的形式析出从而形成的。白口铁硬度高，但脆性也大，整体力学性能较差。至战国时期，工匠就认识到白口铁的特性^[16-17]，它主要被用于制作炼钢生铁和可锻铸铁的原材料。麻口铁是在生产过程中，冷却速度等条件介于白口铁和灰口铁之间，导致碳既有石墨化的部分，又有以渗碳体形式存在的部分。由图5可知，大坡墓地出土的铁器在生活用品中选用白口铁和麻口铁制作。其中，铁釜2011GBD II M32: 4、2011GBD II M27: 2皆由白口铁制作而成。本文中的两件麻口铁样品GD04和GD05与白口铁样品GD03皆取自同一件铁釜2011GBD II M45: 5的不同部位。造成这种组织不均匀的原因，可能是该件铁釜在生产过程中不同部位冷却速度不均匀所致，该现象也见于多个遗址的铁器铸件中^[18-20]。尽管白口铁和麻口铁的综合力学性能较差，但由于其制作成本较低，因此广泛应用于对力学性能没有过高要求的生活用具中^[21]。

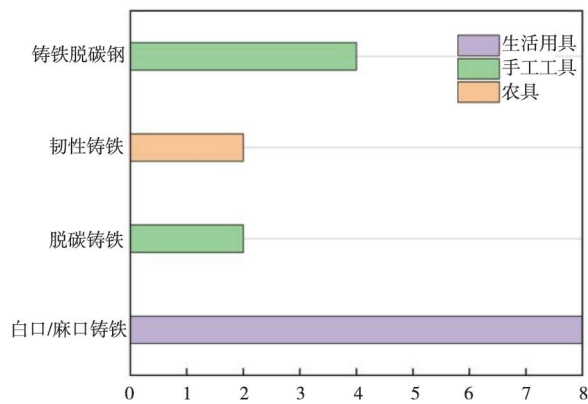


图5 大坡墓地不同器物类型制作工艺

Fig. 5 The manufacturing techniques of different artifact types from the Dapo cemetery

生铁制品中的碳含量较高，且碳元素主要以渗碳体形式存在，导致其质地脆硬易断。为解决这一问题，可采用退火工艺对生铁制品进行脱碳或柔化处理。中国古代退火技术可分为铸铁脱碳退火技术和铸铁石墨化退火技术两大类。生铁退火技术肇始于春秋晚期^[6]；至战国早期，已出现完全脱碳成钢与石墨化退火的铁器产品^[22]。战国中晚期，经过退火处理的铁器在数量和种类上都呈现显著增长^[23]。虽然战国末期炒钢技术的发明^[17]以及汉代百炼钢^[24]、灌钢技术^[25]和汉魏夹钢工艺^[26]的相继出现，推动了冶铁技术的发展，但铸铁退火技术因其工艺简单、成熟，在农具和一般工具制造领域仍长期沿用。

韧性铸铁是白口铁在还原或中性气氛中退火处理

而得到的。退火后，渗碳体分解析出石墨，析出的石墨一般呈团絮状。韧性铸铁在保持一定硬度和耐磨性的同时，又具备一定的韧性。大坡墓地出土铁甬的材质为黑心韧性铸铁，其中样品GD01边缘仍保留大量珠光体组织，应当是黑心韧性铸铁退火不足的残留产物。河南洛阳水泥制品厂工地出土的战国初期铁铲，是世界上最早的黑心韧性铸铁^[27]。尽管黑心韧性铸铁的生产难度比白心韧性铸铁高很多，但汉代冶铁工匠在使用高碳低硅白口铸铁坯件的生产条件下，经过退火得到的多数是黑心韧性铸铁^[28]。通过退火处理得到的黑心韧性材质农具更具韧性，适合高强度农业作业，在汉代已广泛使用，反映了汉代铸铁加工技术的成熟。

大坡墓地出土的手工工具为铸铁脱碳钢制品和脱碳铸铁。铸铁脱碳钢是白口铁在氧化气氛下退火并脱碳形成，其组织中夹杂物极少，质地纯净，基本上不析出石墨，具有良好的力学性能。铸铁脱碳钢在渑池汉魏时期窖藏铁器^[8]、河北满城汉墓铁镞^[29]、新郑地区汉代墓葬出土的铁削和铁剑^[14]中皆有发现。大坡墓地的4件铁削刀样品皆为铸铁脱碳钢制品。脱碳铸铁也可以认为是一种退火不完全的铸铁脱碳钢件，大坡墓地的2件铁铤样品为脱碳铸铁制品。中原地区已知最早的脱碳铸铁见于1976年新郑唐户南岗春秋晚期墓所出残铁器^[6]。战国时期，该类制品已较多使用，如陕西临潼新丰秦墓出土的三件铁农具均为脱碳铸铁^[17]。同时期，登封阳城铸铁遗址出土的铁锄也存在类似情况^[16]。此项技术在汉代仍继续使用，类似这样的制品在瓦房庄汉代冶铁遗址中也有发现^[27]。

综上，大坡墓地铁器在材质上可整体划分为生铁铸造制品与生铁退火制品两大类。其中，生铁铸造制品主要包括白口铁和麻口铁；而生铁退火制品则涵盖脱碳铸铁、铸铁脱碳钢以及韧性铸铁。结合器物的使用功能来看，大坡墓地出土铁器在材质与工艺选择上表现出一定的功能适应性：生活用器选用对韧性、强度等力学性能并无过高要求的白口铁和麻口铁制作；农具皆为韧性铸铁，在能够具备一定硬度和耐磨性的同时又具备一定的韧性，综合提高农具的使用寿命；对于力学性能要求更高的手工工具（刀），则选用铸铁脱碳钢制品。

3.2 河南地区汉代铁器制作工艺特点

基于大坡墓地出土铁器的鉴定结果所揭示的技术选择性特征，本文进一步结合河南地区汉代冶铁遗址、铸铁工坊、墓葬及窖藏中出土的、经过系统科学分析的363件铁器样品的材质与工艺数据，对河南地区

汉代铁器的制作技术特点展开综合探讨。

由图6可知，汉代河南地区的铁器中生铁技术占据绝对主导地位，生铁铸件（37.5%）与生铁退火制品（55.1%）、炒钢制品（7.2%）合计占比高达99.8%，表明汉代河南地区的铁器生产几乎完全建立在生铁冶炼技术体系之上。而块炼铁产品（0.3%）的极低占比，进一步凸显汉代冶铁业的技术革新。相较于战国时期河南地区块炼铁与生铁并存的格局^[30]，汉代河南地区几乎完全淘汰了块炼铁这一低效工艺，推动生铁技术成为绝对主流。不同于地处中原地区的河南地区，块炼铁技术在河南周边地区的汉代及以后时期与生铁技术长期并存^[31-35]。汉代中原地区通过中央集权体制对冶铁业实行严格管控，从宏观管理到微观管理，构成一套完善的职官体系和规章制度。汉武帝时期推行的“盐铁官营”政策，在全国49处重要冶铁地区设立专职“铁官”。每个铁官之下，都在关键的冶铁地点设立若干冶铁工坊，形成了覆盖全国的冶铁生产管理网络。仅河南地区就设置了多达7处大铁官，构建起从矿山到城邑的密集铸铁作坊网^[36]。官营体系通过规模化生产，强制推行高效稳定的生铁技术，以满足农业工具与日用器具的大规模需求，实现有序生产。

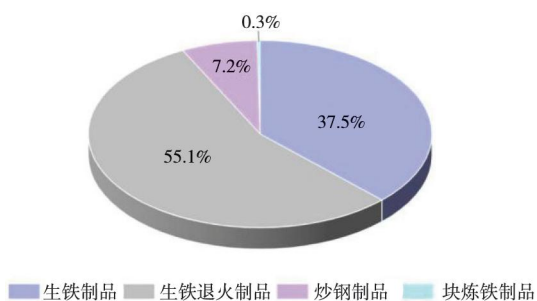


图6 河南境内出土汉代铁器材质分布饼图

Fig. 6 Pie chart of material distribution of the Han Dynasty iron artifacts unearthed in Henan region

河南地区出土汉代铁器材质鉴定结果显示（图7），铸造生铁中白口铁占71.3%，灰口铁19.9%，麻口铁仅占8.8%。由此可见，白口铁和灰口铁的生产在汉代河南地区是两种比较成熟的工艺，且白口铁占据主要地位，而麻口铁可能是生产白口铁和灰口铸铁中偶然得到的产品。白口铁因其良好的铸造性能及低廉的生产成本，常被直接用于制作对力学性能要求不高的日常器具。然而，其更重要的价值在于可作为退火处理的原材料。河南地区鉴定样本多取自生铁冶铸遗址，其中作为脱碳工艺原料的白口铸铁占比自然较高。相较白口铁，灰口铸铁有熔点低、流动性好、凝固收缩小和充填铸型能力好等优点。冷却速度、微量元素等是影响铸铁石墨化的关键因素^[37]。汉代工匠在

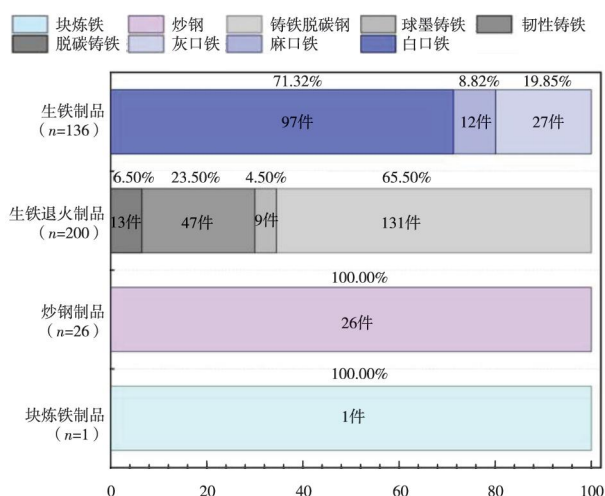


图7 河南境内出土汉代铁器材质分布堆积条形图

Fig. 7 Stacked bar chart of material distribution of the Han Dynasty iron artifacts unearthed in Henan region

河南地区成功生产出灰口铁，表明他们已在长期实践中掌握了通过控制冷却速率来调控铸件组织的规律，是我国古代冶铁技术的一项重要进步。

此外，由统计结果可知，最晚至汉代，河南地区工匠通过改进退火工艺，已经形成了以脱碳处理为主的铸铁脱碳钢技术和以石墨化退火为主的韧性铸铁技术。河南地区汉代生铁退火制品主要包括四大类型：铸铁脱碳钢、韧性铸铁、脱碳铸铁以及球墨铸铁。从分布比例来看，铸铁脱碳钢占据主导地位，占总体的65.5%，表明该工艺在当时被广泛应用。这一现象与其优良的综合性能密切相关，它能够满足从工具到兵器等多种器类的制造要求，因而成为河南地区汉代铁器生产中最主流的退火制品。韧性铸铁所占比例为23.5%，位居第二。这类材料通过石墨化退火获得，具有良好的耐磨性和一定的抗冲击能力，尤其适用于需要承受反复摩擦或中等载荷的农具和手工工具。脱碳铸铁与球墨铸铁的占比均较低，分别为6.5%和4.5%。脱碳铸铁多为退火不完全的产物，力学性能不均，因此适用范围有限。而球墨铸铁在汉代尚属偶发性技术产物，其出现可能源于特定成分的白口铸铁在适当退火条件下析出球状石墨。这一比例结构清晰地反映了汉代河南地区对生铁退火技术的理性认知与主动选择：在追求性能与成本平衡的前提下，铸铁脱碳钢成为最优解；而在特定功能需求背景下，韧性铸铁也占有重要地位。占比极低的球墨铸铁与脱碳铸铁，则从侧面体现出当时技术实践中仍存在的偶然性与局限性。

4 结语

对巩义大坡墓地出土的8件西汉时期铁器所取16件样品的科学分析结果表明，该批铁器可分为铸造生

铁和生铁退火制品两大类。生铁铸造产品用于日用器皿；退火产品则根据性能需求应用于农具和手工工具。这一差异化的材质选择，反映了西汉时期巩义地区工匠对不同钢铁材料力学性能的深刻理解。结合河南地区汉代铁器样品的系统数据，揭示了河南地区汉代铁器生产以生铁技术体系为核心的鲜明特征。白口

铸铁、灰口铸铁的成熟应用，与铸铁脱碳钢、韧性铸铁等退火制品的规模化生产，共同构成了一套高效、稳定的技术体系。这一技术格局的形成，不仅体现了汉代工匠对材料性能的深刻理解与主动选择，更与中央集权体制下“盐铁官营”政策对生产网络的严格管控密切相关。

参考文献：

- [1] LIU Y X, SUN S Y, MA L, et al. Coexistence of bloomery iron and cast iron in a Qin state cemetery dating to the mid Warring States period [J]. *Archaeological Research in Asia*, 2025, 41: 100595.
- [2] DOU Z H, PENG Q H, LIU Y X, et al. Iron artefacts used at an ancient jade mine in the Hexi Corridor: a technical observation [J]. *Archaeometry*, 2025, 67 (5): 1343-1354.
- [3] 陈坤龙, 梅建军, 潜伟. 丝绸之路与早期钢铁技术的交流 [J]. *西域研究*, 2018 (2): 127-137.
- [4] 邱亮辉. 郑州古荥镇冶铁遗址出土铁器的初步研究 [J]. *中原文物*, 1983 (特刊): 242-246.
- [5] 赵青云, 李京华, 韩汝玢, 等. 巩县铁生沟汉代冶铸遗址再探讨 [J]. *考古学报*, 1985 (2): 157-183.
- [6] 柯俊, 吴坤仪, 韩汝玢, 等. 河南古代一批铁器的初步研究 [J]. *中原文物*, 1993 (1): 99-107.
- [7] 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 [D]. 北京: 北京科技大学, 1991.
- [8] 北京钢铁学院. 河南浉池窖藏铁器检验报告 [J]. *文物*, 1976 (8): 52-58.
- [9] 张周瑜, 陈建立, 潜伟, 等. 浉池窖藏铁器工艺特点研究 [J]. *华夏考古*, 2024 (4): 120-132.
- [10] 李京华. 河南镇平出土的汉代窖藏铁范和铁器 [J]. *考古*, 1982 (3): 243-251.
- [11] 李仲达. 河南镇平出土的汉代铁器金相分析 [J]. *考古*, 1982 (3): 320-321.
- [12] 河南省文物考古研究院. 永城西汉梁国王陵与陵园 [M]. 郑州: 中州古籍出版社, 1996: 276-293.
- [13] 李京华. 河南长葛汉墓出土的铁器 [J]. *考古*, 1982 (3): 322-323.
- [14] 周义岚, 魏国锋, 李清临, 等. 新郑地区汉代墓葬出土铁器的科技研究 [J]. *有色金属 (冶炼部分)*, 2024 (12): 167-176.
- [15] 林腾昌, 门兵, 程雄, 等. 热处理对铸态钢中硫化锰夹杂物的影响 [J]. *中国冶金*, 2021, 31 (4): 48-54.
- [16] 河南省文物研究所, 中国历史博物馆考古部. 登封王城岗与阳城 [M]. 北京: 文物出版社, 1992: 329-336.
- [17] 刘亚雄, 陈坤龙, 梅建军, 等. 陕西临潼新丰秦墓出土铁器的科学分析及相关问题 [J]. *考古*, 2019 (7): 108-116.
- [18] 杨菊, 李伟敏. 北京路县故城遗址东南部出土汉代铁器的科技研究 [J]. *博物院*, 2024 (2): 16-31.
- [19] 唐电, 王欣, 陈俊锋. 福州开元寺铁佛铸造技术特征探讨 [J]. *铸造*, 2023, 72 (7): 917-922.
- [20] 唐电, 王欣, 陈孔发. 福州开元寺铁佛的XPS分析 [J]. *铸造*, 2023, 72 (5): 529-535.
- [21] LIU Y X, MARTINÓN-TORRES M, MEI J J, et al. Cast a different iron: grey and mottled cast iron production in early China [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2020, 46: 184-192.
- [22] 苗长兴, 吴坤仪, 李京华. 从铁器鉴定论河南古代钢铁技术的发展 [J]. *中原文物*, 1993 (4): 91-100.
- [23] 北京钢铁学院压力加工专业. 易县燕下都44号墓葬铁器金相考察初步报告 [J]. *考古*, 1975 (4): 241-243.
- [24] 韩汝玢, 柯俊. 中国古代的百炼钢 [J]. *自然科学史研究*, 1984 (4): 316-320.
- [25] 乔尚孝, 潜伟. 灌钢工艺新探 [J]. *自然科学史研究*, 2021, 40 (2): 161-174.
- [26] 吴伟, 李晓岑, 李硕阳. 夹钢制作工艺初探 [J]. *自然科学史研究*, 2024, 43 (1): 48-61.
- [27] 李众. 中国封建社会前期钢铁冶炼技术发展的探讨 [J]. *考古学报*, 1975 (2): 1-22.
- [28] 《中国冶金史》编写组. 河南汉代冶铁技术初探 [J]. *考古学报*, 1978 (1): 1-24.
- [29] 杜蕪运. 满城汉墓出土铁器的金相鉴定 [J]. *考古*, 1981 (1): 77-78.
- [30] 姚智辉, 史杭. 对中国古代块炼铁技术的思考 [J]. *洛阳考古*, 2020 (1): 40-44.
- [31] 江晶. 西汉海昏侯刘贺墓出土铁兵器科学分析研究 [D]. 南宁: 广西民族大学, 2023: 83.
- [32] 邹桂森, 蒙长旺, 黄全胜, 等. 广西平南六浊岭冶铁遗址出土冶金遗物初步研究 [J]. *有色金属 (冶炼部分)*, 2022 (6): 124-129.
- [33] 沈睿文, 易曙峰. 安溪青洋下草埔冶铁遗址的几点初步认识 [J]. *自然与文化遗产研究*, 2021, 6 (3): 48-58.
- [34] 郭美玲, 陈坤龙, 安文荣, 等. 集安洞沟古墓群山城下墓区出土铁器的初步科学分析 [J]. *北方文物*, 2021 (2): 57-67.
- [35] ZHANG M Y, CHEN Y L, GE L J. The use of bloomery iron in Chengdu plain during the Eastern Han Dynasty: evidence from slag inclusions included in iron artifacts [J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2025, 17 (1): 26.
- [36] 李京华. 汉代大铁官管理职官的再研究 [J]. *中原文物*, 2000 (4): 27-32.
- [37] 祖方道. 生长条件对灰口铸铁共晶凝固过程石墨形态的作用 [J]. *铸造*, 2012, 61 (1): 11-16.