



# 河北徐水东黑山遗址出土铁器的实验研究\*

- ◆ 刘 海 峰 ( 北京科技大学冶金与材料史研究所 )
- ◆ 陈 建 立 ( 北京大学中国考古学研究中心 )
- ◆ 梅 建 军 ( 北京科技大学冶金与材料史研究所 )
- ◆ 石 磊 ( 河北省文物研究所 )
- ◆ 贾 金 标 ( 河北省文物研究所 )

**摘 要:** 本文对河北徐水东黑山遗址出土的 66 件战国至唐宋时期铁器样品进行了碳十四年代测定、金相组织观察和夹杂物成分分析,认为该遗址内出土的铁器制作年代集中于战国两汉时期,铁器的材质全为生铁和生铁制钢产品,采用了铸造、退火、炒钢、淬火以及可能存在的灌钢等工艺,同时该地区至少在汉代已能根据不同的材质和工艺制作不同的器物,本研究为深入认识战国两汉时期太行山东麓北段的钢铁技术提供了新的科学材料。

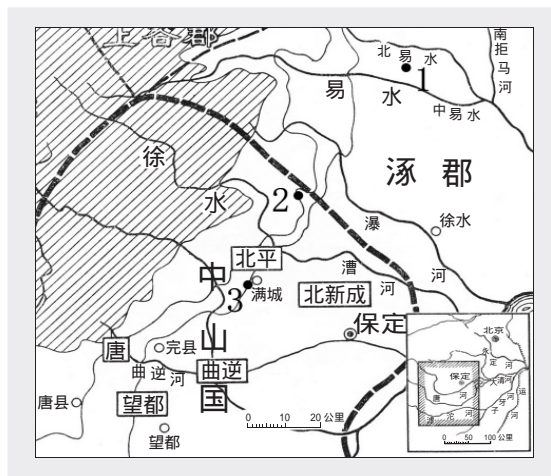
**关键词:** 冶金考古; 铁器分析; 东黑山遗址

**Abstract:** According to the results of 14C dating analysis, metallographic examination and slag inclusions analysis through unearthed iron objects from Dongheishan Site, Xushui County, Hebei Province, we found they were produced from Warring States to Han dynasty and the materials were mostly cast iron and steel which made from the technologies of cast, decarburization, puddling, quenching and may be confusion. Meanwhile, it is obviously that people in Han dynasty from this region used different materials and technologies to produce different objects.

**Key words:** Archaeometallurgy, Iron objects analysis, Dongheishan Site

东黑山遗址位于河北省保定市徐水县大王店乡,地理位置处于太行山山前低山丘陵与华北平原的接壤地带。2006 年河北省文物研究所对该遗址进行了考古发掘,认为遗址内存留有战国晚期、两汉、唐宋、金元和明清各代的遗迹、遗物,其中以战国城址和西汉中后期—东汉遗存最为丰富。战国时期该城址为燕南长城外围重要的军事设施,距离燕南长城重要关隘汾门仅十余公里,距离战国晚期燕国的政治中心燕下都也仅三十公里;两汉时期的居址位于汉代中山国北平县和涿郡之间,距离满城汉墓仅二十余公里,见图一。

东黑山遗址共出土 175 件铁器,其中战国两汉铁器计 137 件,占总数的 73%,出土铁器以农具、工具和兵器为主,分别占总数的 26% 23%和 18%。迄今,在该遗址附近的易县燕下都遗址和墓葬、满城汉墓、定县北庄和北陵头汉



图一 河北徐水东黑山遗址地理位置示意图

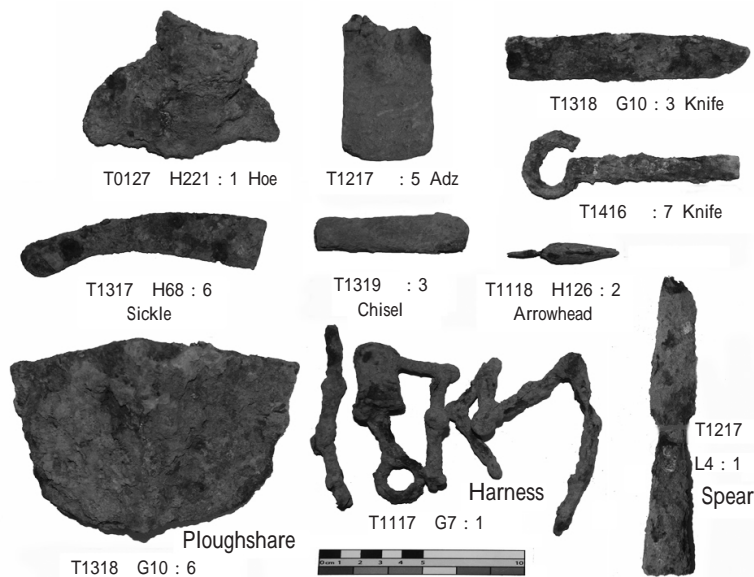
1. 易县燕下都遗址 2. 徐水东黑山遗址 3. 满城汉墓

\* 本文得到国家自然科学基金“中原地区早期铁器及冶铁遗址的新探索(No.51074010)”和国家文物局“指南针计划”资助。

多  
维  
视  
界

表一 东黑山遗址出土铁器和取样铁器情况

		战国 晚期	西汉 早期	西汉 中后期	东汉	唐宋	金元	明清	时代 不明	合计
农具	出土数	4	13	19	6	1	1		1	45
	取样数	2	4	6	4					16
工具	出土数	2	13	11	10		2	1	2	41
	取样数		4	7	1		1	1	2	16
兵器	出土数	1	7	9	6	2	5		1	31
	取样数		3	4	2		1			10
其他 种类	出土数	2	9	12	13	9	4		9	58
	取样数	1	3	4	6	6	1		3	24
合计	出土数	9	42	51	35	12	12	1	13	175
	取样数	3	14	21	13	6	3	1	5	66



图二 东黑山遗址出土铁器部分样品

墓等地出土了较多的战国(燕国)两汉时期的铁器,其中部分进行了科学分析和研究工作。这些工作的开展,为研究战国至汉代钢铁技术的发展提供了非常难得的考古资料,而东黑山遗址出土的大量铁器又为深入了解该时期太行山东麓北段的钢铁技术提供了全新的材料。为此本文对其中的66件铁器进行了年代学和材质、工艺的检测分析,分析的铁器样品占出土铁器总数的38%,见表一、图二。

### 一. 出土铁器的年代问题

为准确判定铁器的制作年代,选择了不同时段15件含碳量较多的铁器样品进行加速器质谱碳十四(AMS-<sup>14</sup>C)年代测定,该项工作完成于北京大学考古文博学院和重离子物理研究所,结果见表二。采用<sup>14</sup>C的半衰期为5568年,1950年为纪年起点,树轮校正使用的是OxCal软件。

从表中可以看出,考古判定的战国晚期铁器样品的<sup>14</sup>C测年数据与考古年代基本一致,西汉早期的两个样品数据中一个较为接近、一个偏早,西汉中后期三个数据中一个较为接近、一个稍晚(东汉)、一个晚到北朝时期,东汉两个数据分别早到西汉和战国,唐宋的三个数据都要早到战国两汉时期,金元和明清测出的碳为死碳,时代不明的两个测年年代分别落在西汉和东汉。

铁器的<sup>14</sup>C年代测定结果表明,考古判定年代在战国—唐宋期间和时代不明的13件样品中,有10件经<sup>14</sup>C测定可判定属于战国—西汉中晚期,2件属于东汉时期,显示出这批铁器在<sup>14</sup>C年代上具有很大的同一性,即大部分铁器的生产年代应在战国两汉时期。而金元和明清样品中的碳为死碳,从历史记载和前人研究来看,中国自宋代开始使用煤炼铁,煤中的碳即是死碳,说明了这两件铁器可能是用煤作为燃料冶炼或熔炼的,这点亦与样品中发现使用煤炼铁而导致的夹杂物中含有较多的硫化铁夹杂相符。因此,直接利用铁器中的碳进行<sup>14</sup>C年代测定,可以较好的反映出铁器的制作年代。

同时,应当注意的是由于铁器在后期可能经过了退火、脱碳、渗碳、锻打等热处理和加工过程,碳可能有新的来源,使得<sup>14</sup>C年代与铁器实际制作年代存在误差。因此,需要对<sup>14</sup>C年代与考古判定年代不相符的情况进行进一步细致的考察。对于铁器的<sup>14</sup>C年代比考古判定年代偏早这一现象,一般认为有三个重要的形成因素:年代偏差在100年以内的是由于使用的燃料所造成的,对于中国古代生铁冶炼而言,存在使用多年生的木材烧碳冶炼,因此铁器的<sup>14</sup>C年代实际比生产时要早,但这种偏差不会太大,比如西汉早期和东汉的几件样品;第二,由于铁器的持续使用时间较长,有些早期生产的铁器会出现在晚期地层中,但其<sup>14</sup>C年代仍能准确反映铁器的制作年代;第三,晚期生产铁器时还存在利用旧料重熔的问题,<sup>14</sup>C年代很可能测的是早期生产时带入的碳,唐宋的铁器样品<sup>14</sup>C年代远远早于考古判定年代可能是由于后两者造成的。对于2件出土于西汉中后期地层铁器的<sup>14</sup>C年代均晚于考古判定年代,其原因需从田野考古操作方面进一步考察。

### 二. 铁器的金相组织

在器物的残断处或在不影响其形制的前提下截取小块样品,并用酚醛树脂镶样,经打磨、抛光后,用4%硝酸-乙

醇混合液对样品进行侵蚀,然后利用 LEICA DM4000M 型金相显微镜观察其金相组织并拍摄进行组织照片,本次实验完成于北京大学考古文博学院,观察结果见表三。

### 三. 铁器中夹杂物的分析

铁中夹杂物的形成原因和来源非常复杂,一方面夹杂物的形成与冶炼技术和加工工艺有关,不同的技术和工艺的夹杂物的形貌、成分各不相同;另一方面夹杂物的成分又与冶炼中使用的矿石、炉料、燃料、添加剂等物质的化学成分有关,其中铁、锰、钛、磷、铜、硫多由矿石引入,硅、铝、镁、钾、钙多由炉料和添加剂引入,一般认为通过分析夹杂物的形貌特征和元素成分可以帮助判断铁器的制作工艺。本文根据金相组织观察结果,选择 11 件典型铁器样品对其夹杂物元素成分进行分析,并结合金相组织观察结果来综合判定铁器的工艺。本次测定夹杂物成分选用扫描电镜能谱无标样成分分析方法,所用的扫描能谱分析仪为中国文化遗产研究院的 Hitachi S-3600N 型扫描电镜及 EDAX Genesis 2000 XMS 能谱仪,分析所用激发电压为 20 千伏,收集时间 75 秒。为了能够比较真实的反映夹杂物的成分,选择大块的夹杂物采用面扫方式进行成分分析,分析结果见表四。

依据夹杂物的微观形貌特征,可以对 11 件铁器的夹杂物进行分类:

第一类是复相夹杂物,可分为两个类型。1A 型:T1219 2 是硅酸盐玻璃相基体上分布氧化亚铁颗粒,但其玻璃相基体与氧化亚铁颗粒的边缘不明显;1B 型:T0738 1 是典型的树枝晶状氧化亚铁-铁橄榄石型硅酸盐复相夹杂。

第二类是单相夹杂物,可分为两个类型。2A 型:T1117 H135 4、T0131 1 的单相夹杂物都是氧化铁;2B 型:T1418 H138 2 的夹杂物以单相硅酸盐夹杂物为主,T1318 1、T1217 2 也存有少量的单相硅酸盐夹杂物。

第三类是亚复相夹杂物,可分为三个类型。3A 型:

表二 15 件铁器样品碳十四测年结果

序号	实验室编号	考古编号	考古判定年代	<sup>14</sup> C 年代 (BP)	树轮校正年代	与考古判定年代是否相符
1	BA101285	T1217 :1	战国晚期	2145 ± 25	346BC(15.5%) 321BC 206BC(44.6%) 161BC 133BC(8.1%) 118BC	基本相符
2	BA101286	T1116 下 H99:1	西汉早期	2135 ± 25	336BC(2.2%) 331BC 204BC(47.6%) 148BC 141BC(18.4%) 112BC	基本相符
3	BA101287	T1217 :5	西汉早期	2190 ± 30	356BC(46.5%) 286BC 234BC(21.7%) 199BC	<sup>14</sup> C 年代 偏早
4	BA101288	T1116 :3	西汉 中后期	2035 ± 25	89BC ( 8.5%) 76BC 56BC (59.7%) 4AD	基本相符
5	BA101289	T1217 下 H156:1	西汉 中后期	1890 ± 25	77AD (68.2%) 131AD	<sup>14</sup> C 年代 偏晚
6	BA101290	T1419 :3	西汉 中后期	1615 ± 25	406AD(33.2%) 440AD 486AD(35.0%) 532AD	<sup>14</sup> C 年代 偏晚
7	BA101291	T1216 :5	东汉	2095 ± 25	166BC (60.0%) 91BC 71BC ( 8.2%) 60BC	<sup>14</sup> C 年代 偏早
8	BA101292	T1418 下 H149:1	东汉	2270 ± 35	394BC (36.2%) 357BC 285BC (32.0%) 234BC	<sup>14</sup> C 年代 偏早
9	BA101293	T1216 :1	唐宋	2205 ± 25	358BC ( 9.2%) 344 BC324BC (29.3%) 280BC 258BC ( 8.5%) 243BC 236BC (21.2%) 205BC	<sup>14</sup> C 年代 偏早
10	BA101294	T1217 :1	唐宋	1990 ± 25	37BC ( 6.8%) 30BC 21BC (10.3%) 11BC 2BC (37.0%) 29AD 38AD (14.1%) 51AD	<sup>14</sup> C 年代 偏早
11	BA101295	T1416 :1	唐宋	2300 ± 25	400BC (68.2%) 372BC	<sup>14</sup> C 年代 偏早
12	BA101296	T1316 :4	金元	死碳		符合
13	BA101297	T1319 :2	明清	死碳		符合
14	BA101298		时代不明	1925 ± 30	53AD (44.5%) 90AD 100AD(23.7%) 124AD	东汉
15	BA101299		时代不明	2125 ± 25	198BC (68.2%) 111BC	西汉

T1219 L4 :1、T1318 :1、T0131 F4 3、T1118 H126 2 和 T1217 2 的夹杂物以铁的氧化物为主同时含有较多的硅;3B 型:T1418 H138 2 的夹杂物虽然以单相硅酸盐夹杂物为主,但存在一种介于单相、亚复相之间的夹杂物,即一些夹杂物中既包含单相夹杂物又包含亚复相夹杂物。3C 型:T1217 H181 3 的夹杂物为两种锰含量不同的硅酸盐亚复相夹杂。

通过分析夹杂物元素成分可知,T1219 L4 :1、T1318 :1、T0131 F4:3、T1118 H126 2、T1418 H138 2、T1219 2 和 T0738 :1 夹杂物中铁高硅低,钾、钙、锰、

表三 河北徐水东黑山遗址出土铁器金相组织观察结果

序号	考古编号	考古年代	器物名	金相组织和夹杂物形貌观察	材质和工艺
1	T1119 :2	战国晚期	铲	过共晶白口铁 + 珠光体基体上有条状石墨和极少球状石墨	麻口铁
2	T1217 H191:1	战国晚期	镰	淬火马氏体组织 图三	铸铁脱碳钢和淬火
3	T1217 :1	战国晚期	盆口沿	珠光体 + 二次渗碳体 + 莱氏体组织 亚共晶白口铁	白口铁
4	T1116 H99:1	西汉早期	犁	珠光体 + 二次渗碳体 + 莱氏体组织 亚共晶白口铁	白口铁
5	T1217 :2	西汉早期	铲	莱氏体 + 一次渗碳体的过共晶白口铁组织	白口铁
6	T1217 :5	西汉早期	铍	自芯部向边部依次是过共晶白口铁和珠光体组织	脱碳铸铁
7	T1318 F7:5	西汉早期	犁	珠光体 + 二次渗碳体 + 莱氏体组织 亚共晶白口铁	白口铁
8	T1219 :2	西汉早期	镞	铁素体 + 珠光体组织 含碳量分布在 0.2-0.4%之间 呈现分层现象	炒钢
9	T1219 L4:1	西汉早期	矛	铁素体 + 珠光体组织 边部有魏氏组织 含碳量在 0.1-0.2%之间 呈现明显的分层现象 夹杂物细小且变形量大 沿加工方向排列	炒钢锻打
10	T1318 :1	西汉早期	镞	铁素体组织 晶粒度大小不一 介于 2-4 级之间 夹杂物细小且变形量大 沿加工方向排列	炒钢(熟铁)
11	T1117 H135 :4	西汉早期	钉	铁素体组织 晶粒度介于 2-4 级之间 有单相夹杂物	铸铁脱碳钢(熟铁)
12	T1216 :3	西汉早期	钉	铁素体 + 珠光体组织 含碳量在 0.2-0.5%之间	铸铁脱碳钢
13	T1219 :7	西汉早期	削刀	锈蚀严重 无法判定其材质	无法判断
14	T1416 J2:4	西汉早期	环首刀	铁素体 + 珠光体及其魏氏组织 含碳量约为 0.6%	铸铁脱碳钢
15	T1417 H85 :1	西汉早期	钩	珠光体 + 二次渗碳体的过共析钢组织 含碳量约为 1.4%	铸铁脱碳钢
16	T1418 :5	西汉早期	口沿	莱氏体组织 共晶白口铁	白口铁
17	T1117 H135 :2	西汉早期	残铁器	芯部是铁素体 + 珠光体及其魏氏组织 边部是铁素体组织	铸铁脱碳钢
18	T0127 H221 :1	西汉中后期	锄	锈蚀较严重 存有的金属中可观察到铁素体 + 珠光体组织	铸铁脱碳钢
19	T1219 H108:2	西汉中后期	插	自芯部向边部是珠光体、铁素体 + 珠光体、铁素体组织	铸铁脱碳钢
20	T1316 H69 :4	西汉中后期	镞	珠光体 + 二次渗碳体的过共析钢组织 含碳量约为 1.4% 有淬火马氏体组织	铸铁脱碳钢和局部淬火
21	T1317 H68:6	西汉中后期	镰	珠光体 + 二次渗碳体的过共析钢组织 含碳量约为 1.8%	铸铁脱碳钢
22	T1318 G10:6	西汉中后期	犁铧	珠光体 + 二次渗碳体 + 莱氏体组织 亚共晶白口铁	白口铁
23	T1419 :3	西汉中后期	犁铧	自芯部向边部是过共晶白口铁、铁素体 + 珠光体、铁素体	脱碳铸铁
24	T0131 :1	西汉中后期	镞	金相组织可分为两种形态,一种为铁素体组织,晶粒度大小不均,大者 2 级,小者 5 级;一种为铁素体 + 珠光体组织,含碳量约为 0.15%,均匀分层 图四	炒钢
25	T0131 F4:3	西汉中后期	镞	铁素体组织 晶粒度大小不均,大者 2 级,小者 4 级 夹杂物细小且变形量大 沿加工方向排列	炒钢(熟铁)锻打
26	T1418 F1:1	西汉中后期	镞	铁素体 + 珠光体组织 含碳量在 0.2-0.6%之间 均匀分层	炒钢
27	T1118 H126:2	西汉中后期	镞	铁素体 晶粒度 2-4 级 夹杂物细小且变形量大 沿加工方向变形拉长	炒钢(熟铁)锻打
28	T1118 :1	西汉中后期	锤	铁素体 + 珠光体组织的亚共析钢冷锻组织,含碳量约为 0.4% 图五	铸铁脱碳钢和冷锻
29	T1118 H126:3	西汉中后期	削刀	珠光体 + 二次渗碳体的过共析钢组织 含碳量不均匀 约为 1.8%	铸铁脱碳钢
30	T1416 :7	西汉中后期	削刀	珠光体 + 少量铁素体组成的亚共析钢组织、含碳量约为 0.7%,刃部有淬火马氏体组织	铸铁脱碳钢和局部淬火



续表三

序号	考古编号	考古年代	器物名	金相组织和夹杂物形貌观察	材质和工艺
31	T1217 H156:1	西汉中后期	刀	自芯部向边部是过共晶白口铁、珠光体、铁素体 + 珠光体、铁素体组织 图六	脱碳铸铁
32	T1318 G10:3	西汉中后期	刀	过共析钢的魏氏组织,含碳量约为 0.8%	铸铁脱碳钢
33	T1318 G10:5	西汉中后期	刀	芯部为珠光体组织,含碳量约为 0.6%,刃部为淬火马氏体组织,有单相夹杂物沿加工方向排列 图七	铸铁脱碳钢锻打和局部淬火
34	T1319 :3	西汉中后期	凿	在横截面观察到自芯部向边部依次是熟铁、亚共析钢(高碳)、亚共析钢(低碳)、亚共析钢(高碳)、亚共析钢(低碳)组织,纵剖面自芯部向边部依次是熟铁、亚共析钢、过共析钢、亚共析钢、锈蚀、亚共析钢、过共析钢、生铁、熟铁、锈蚀组织,每层厚度在 0.2-0.7mm 之间,基质地纯净、未发现有夹杂物 图八、图九	可能是灌钢
35	T1117 G7:1	西汉中后期	镰	珠光体 + 二次渗碳体的过共析钢组织,含碳量不均匀,低者 0.8%,高者达 1.4%	铸铁脱碳钢
36	T1217 H181 :3	西汉中后期	钩	铁素体 + 珠光体组织,组织均匀分层,各层含碳量均匀,在 0.1-0.2%之间,单相夹杂物细小且变形量大,沿加工方向排列	炒钢锻打
37	T1217 :1	西汉中后期	残铁器	铁素体组织,晶粒度不均,介于 2-4 级之间,有较多的单相夹杂物沿加工方向变形拉长,同时有少量的复相夹杂物	炒钢(熟铁)锻打
38	T1217 :2	西汉中后期	残铁器	锈蚀较严重,存有的金属中可观察到铁素体组织,单相夹杂物较多,夹杂物细小且变形量大,沿加工方向拉长	炒钢(熟铁)锻打
39	T0131 :6	东汉	镰	锈蚀严重,无法判定其材质	无法判断
40	T1416 :1	东汉	镰	铁素体 + 珠光体组织的亚共析钢组织,含碳量约为 0.6%	铸铁脱碳钢
41	T1216 H48 :1	东汉	铍	过共晶白口铁以及基体上分布条状石墨	麻口铁
42	T0131 :1	东汉	刀	铁素体 + 珠光体组织的亚共析钢组织,含碳量不均匀,低处约为 0.1%,高处约 0.3%	铸铁脱碳钢
43	T1418 H138:1	东汉	铍	铁素体组织,晶粒度 2-3 级,夹杂物细小且变形量大,沿加工方向排列	炒钢(熟铁)锻打
44	T1418 H150:1	东汉	铍	铁素体组织,晶粒度 3-5 级	铸铁脱碳钢(熟铁)
45	T1418 H138:2	东汉	钩	铁素体组织,晶粒度 2-4 级,夹杂物细小且变形量较大,沿加工方向排列	炒钢(熟铁)锻打
46	T1116 :3	东汉	残铁器	亚共晶白口铁组织基体上大量分布条状石墨	麻口铁
47	T1216 :5	东汉	残铁器	自芯部向边部是过共晶白口铁、铁素体 + 珠光体、铁素体组织,芯部有团絮状石墨	韧性铸铁
48	T1216 :6	东汉	残铁器	锈蚀严重,存有的金属中可观察到过共晶白口铁	白口铁
49	T1418 H149:1	东汉	残铁器	珠光体 + 二次渗碳体 + 莱氏体组织,亚共晶白口铁	白口铁
50	T1418 H149:2	东汉	残铁器	铁素体 + 少量的珠光体组织,晶粒度 2-4 级,组织均匀分层,夹杂物细小且沿加工方向排列	炒钢锻打
51	T1116 :2	东汉	残铁器	铁素体组织,晶粒度不均,大者 2 级,小者 4 级	铸铁脱碳钢(熟铁)
52	T1416 :1	唐宋	铲	莱氏体 + 一次渗碳体组织的过共晶白口铁	白口铁
53	T1820 :1	唐宋	带钩	莱氏体组织,共晶白口铁	白口铁
54	T0129 :2	唐宋	残铁器	自芯部向边部是珠光体、铁素体 + 珠光体、铁素体组织	脱碳铸铁
55	T0131 :1	唐宋	残铁器	铁素体组织,晶粒大小不均,大者晶粒度 2 级,小者晶粒度 5 级,局部有浮凸组织,夹杂物细小且变形量大	炒钢(熟铁)
56	T1216 :1	唐宋	残铁器	珠光体 + 二次渗碳体 + 莱氏体组织,亚共晶白口铁	白口铁
57	T1219 :1	唐宋	残铁器	铁素体 + 少量的珠光体组织,含碳量约为 0.1%	铸铁脱碳钢

续表三

序号	考古编号	考古年代	器物名	金相组织和夹杂物形貌观察	材质和工艺
58	T1219 :2	金元	镞	铁素体 + 少量的珠光体组织, 铁素体晶粒度大小不均, 在 2-4 级之间; 夹杂物细小变形量大, 沿加工方向排列	炒钢
59	T1316 :2	金元	方钉	珠光体 + 二次渗碳体 + 莱氏体组织, 亚共晶白口铁	白口铁
60	T0131 :1	金元	残铁器	自芯部向边部依次是过共晶白口铁、铁素体 + 珠光体、铁素体组织	脱碳铸铁
61	T0738 :1	明清	钉	铁素体组织, 晶粒度大小不均, 大者 4-5 级, 小者 2 级, 有孪晶组织、浮凸组织和复相夹杂物, 夹杂物细小且变形量大, 分布极不均匀, 有的沿加工方向呈带状分布, 图十	炒钢锻打
62		时代不明	钉	铁素体 + 珠光体及其魏氏组织, 含碳量约为 0.4%	铸铁脱碳钢
63		时代不明	斧	珠光体 + 二次渗碳体的过共析钢组织, 含碳量约为 1.2%	铸铁脱碳钢
64		时代不明	残铁器	铁素体 + 珠光体及其魏氏组织, 含碳量约为 0.1%, 单相夹杂物细小变形量大	炒钢
65		时代不明	残铁器	过共晶白口铁 + 珠光体基体上有条状石墨	麻口铁
66		时代不明	残铁器	白口铁和珠光体基体上有条状石墨分布	麻口铁

表四 东黑山出土铁器夹杂物分析结果

考古编号	扫描部位	Fe	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	夹杂物描述
T1117 H135:4	单相夹杂物面扫	93.6	0.3	0.9	0.5	1.5	0.2	0.1	-	3.1	-	-	氧化铁
T1219 L4:1	亚复相夹杂物面扫	90.4	-	0.4	0.4	3.8	3.2	-	-	2.0	-	-	铁氧化物夹杂为主, 含硅
	亚复相夹杂物暗相	73.4	-	1.1	-	17.7	5.2	-	-	2.6	-	-	
T1318 :1	亚复相夹杂物面扫	94.1	-	-	0.2	3.0	1.2	0.3	-	1.1	-	0.3	铁氧化物夹杂为主, 含硅; 有单相硅酸盐
	亚复相夹杂物暗相	84.9	-	0.8	0.3	11.7	1.0	-	-	0.7	-	0.7	
	单相夹杂物面扫	84.9	-	-	-	10.4	2.4	-	-	-	-	2.4	
T0131 F4:3	亚复相夹杂物面扫	68.6	0.8	0.8	2.4	13.0	7.3	-	0.8	5.5	-	0.8	铁氧化物夹杂为主, 含硅
	亚复相夹杂物亮相	70.1	0.1	1.4	2.5	18.4	2.7	-	1.8	2.5	-	0.6	
	亚复相夹杂物暗相	44.2	1.6	0.9	9.0	12.1	11.6	-	10.1	10.1	-	0.5	
T1118 H126:2	亚复相夹杂物面扫	92.8	-	-	-	2.4	1.4	1.2	-	2.3	-	-	铁氧化物为主的夹杂中含有少量的硅
	亚复相夹杂物暗相	96.2	-	-	-	-	-	2.1	-	1.7	-	-	
	单相夹杂物面扫	91.8	-	-	0.4	3.4	1.1	0.3	-	2.4	-	0.6	
T1217 :2	亚复相夹杂物面扫	89.7	-	-	-	4.8	4.5	-	-	-	-	1.1	铁氧化物夹杂为主, 含硅
	亚复相夹杂物亮相	91.2	-	-	-	5.6	2.4	-	-	-	-	1.0	
	亚复相夹杂物暗相	74.6	-	-	-	18.5	4.2	-	-	-	-	2.7	
	单相夹杂物面扫	73.5	-	-	-	10.4	12.2	-	-	1.9	-	2.0	
T1217 H181:3	锰高亚复相夹杂物	10.6	0.3	1.5	3.2	59.0	-	-	1.9	6.8	3.8	12.9	两种锰含量不同的硅酸盐
	锰低亚复相夹杂物	40.1	0.4	0.7	4.3	37.5	5.9	0.4	2.8	5.3	-	2.6	
T1418 H138:2	亚复相夹杂物面扫	82.1	-	0.5	-	10.2	1.2	0.7	-	2.2	-	2.2	铁氧化物夹杂中含硅; 存在单相硅酸盐夹杂
	亚复相夹杂物亮相	43.6	-	1.2	2.1	30.5	2.5	1.8	0.7	8.7	-	9.0	
	亚复相夹杂物暗相	58.4	-	-	-	29.3	1.9	-	-	5.9	-	4.5	
	单相夹杂物面扫	49.8	-	0.6	1.6	27.5	3.0	1.9	0.6	6.1	0.3	8.8	
T0131 :1	单相夹杂物面扫	99.7	-	-	-	-	0.3	-	-	-	-	-	氧化铁

续表三

考古编号	扫描部位	Fe	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	夹杂物描述
T1219 :2	复相夹杂物面扫	85.6	-	-	2.0	7.8	1.4	1.2	0.4	1.8	-	-	硅酸盐玻璃相基体上岛屿状分布氧化亚铁颗粒,图十一
	复相夹杂物暗相	66.9	0.5	0.5	3.7	17.7	3.6	3.3	0.7	3.3	-	0.4	
T0738 :1	复相夹杂物面扫	74.5	0.1	0.3	5.0	10.1	4.7	0.5	0.5	1.7	-	2.8	树枝晶状氧化亚铁-铁橄榄石型硅酸盐夹杂,图十二
	复相夹杂物暗相	68.9	-	0.9	1.5	16.3	6.0	-	1.1	1.8	-	3.5	
	复相夹杂物中深色	52.6	-	1.6	43.4	0.5	-	-	-	-	0.4	1.7	

铝、磷等元素成分波动较大。

通过观察金相组织可知,这 11 件样品都为熟铁或亚共析钢材质,其中 T1219 L4 :1、T1318 :1、T0131 F4 :3、T1217 :2、T1217 H181 :3、T1118 H126 :2、T1418 H138 :2、T0131 :1、T1219 :2 和 T0738 :1 金相显微镜下夹杂物较多、形态细小、变形量大、基本上都沿加工方向排列,而只有 T1117 H135 :4 材质较为纯净。

一般认为,生铁和铸铁脱碳钢制品的质地纯净,夹杂物以单相硅酸盐为主。炒钢制品的夹杂物较为复杂,因为其不仅经过了生铁冶炼的过程,会有单相硅酸盐夹杂物存在,同时又经过了生铁炒炼成熟铁再渗碳的过程,其夹杂物存在 FeO,并与硅、锰等杂质氧化后共存,在形貌上呈现出向复相过渡的趋势,但边缘不明显,称之为亚复相夹杂物<sup>⑩</sup>。

综合以上分析认为 T1219 L4 :1、T1318 :1、T0131 F4 :3、T1118 H126 :2、T1217 :2、T1217 H181 :3、T1418 H138 :2、T0131 :1、T1219 :2 和 T0738 :1 的金相组织和夹杂物都比较接近炒钢制品的特征,可以判定其制作工艺为炒钢。T1117 H135 :4 则应为铸铁脱碳钢的熟铁制品。

此外,T1219 :2(金元)、T0738 :1(明清)这两件铁器的含碳量高于早期的铁器,可能与当时使用煤炼铁有关。T0738 :1 是一件明清时期的钉,材质判定为炒钢,其夹杂物形貌为树枝晶状氧化亚铁-铁橄榄石型硅酸盐复相夹杂,反映出在熔炼过程中原料液态还原不充分,处于半熔融状态,同时在锻打过程中又不能去除夹杂物,可能说明晚期炒炼熟铁成钢的过程与前段存在不同。

#### 四. 东黑山铁器的材质和制作工艺

综合金相观察和扫描电镜分析结果,对 66 件铁器样品的材质和工艺进行了判断,认为白口铁 13 件,麻口铁 5 件,脱碳铸铁 5 件,铸铁脱碳钢 22 件,韧性铸铁 1 件,炒钢 17 件,1 件待定,无法判断 2 件,见表五。

东黑山遗址出土铁器的材质以钢制品和铸铁产品居多,分别采用了铸造、退火和炒钢等制铁、制钢技术,辅之以热锻、冷锻和淬火等热处理工艺。

未经退火的铸铁产品有 18 件,主要以

农具为主。铸铁退火的产品根据其脱碳程度的不同可分为脱碳铸铁、铸铁脱碳钢,有些铸铁脱碳钢含碳量较低已经接近于熟铁。东黑山遗址中铸铁退火的产品有 28 件,其中工具基本为钢制品。用生铁铸造农具推动了农具的广泛使用,采用铸铁退火技术获得钢制品,改善了器物的性能,这也是为什么工具多使用钢制品的原因。

炒钢是将生铁作为原料,在炒钢炉内鼓风搅拌熔融,使生铁中的碳氧化,炼成熟铁或钢的工艺。目前在全国多地发现有西汉时期的炒钢制品,如贵州赫章可乐遗址<sup>⑪</sup>、福建武夷山城村汉城遗址<sup>⑫</sup>、云南江川李家山墓地<sup>⑬</sup>、广东南越王墓<sup>⑭</sup>、河南南阳瓦房庄遗址<sup>⑮</sup>、巩县铁生沟遗址<sup>⑯</sup>等,其中徐州狮子山楚王陵出土的 5 件炒钢铁器被认为是最早的<sup>⑰</sup>。东黑山遗址分析的铁器中,炒钢制品多达 17 件,其中西汉早期有 3 件且全为兵器,西汉中后期和东汉分别达到 7 件和 3 件,也多为兵器。说明该地区炒钢技术的出现也是比较早的,并且多用在制作兵器上,可能说明了当时兵器的制作与农具和工具的制作因其对性能和产量的要求上的区别而多采用炒钢技术而非铸铁退火技术。

淬火是将钢件加热到奥氏体化温度并保持一定时间后快速冷却的一种工艺,淬火可提高钢件的硬度,增强器物的使用性能。迄今为止所知最早的淬火产品是侯马乔村墓地出土的战国中晚期的镰<sup>⑱</sup>,满城汉墓出土的刘胜佩剑和错金刀书经鉴定为仅在刃部经过局部淬火处理<sup>⑲</sup>。东黑山遗址中 1 件战国晚期的镰(T1217 H191 :1)经过淬火处理,说明该地区也较早使用了该工艺。西汉中后期的 1 件钺(T1316 H69 :4)、1 件削刀(T1416 :7)和 1 件刀(T1318 G10 :5)都只在其刃部发现淬火马氏体组织,说明局部淬火工艺在当

表五 东黑山检测铁器种类和材质分布表

种类	生铁	脱碳铸铁	铸铁脱碳钢	炒钢	其他	合计
农具	7	2	6		1(无法判定)	16
工具	1	1	11	1	2(1 件可能为灌钢, 1 件无法判定)	16
兵器			1	9		10
其他	9	2	5	7	1(韧性铸铁)	24
合计	17	5	23	17	4	66



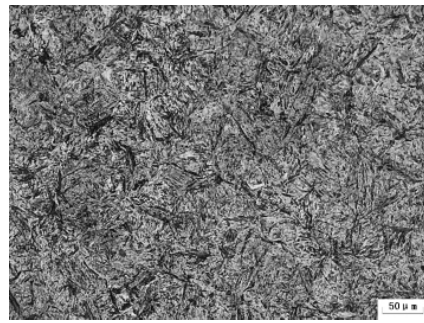
时已普遍使用。

T1319 3 为西汉中后期的凿,其金相组织显示铁素体、铁素体+珠光体、珠光体、生铁组织均匀分层、相互重叠,可能为灌钢。早期的灌钢具体操作方法未见记载,据沈括《梦溪笔谈》中对“杂炼生铁”的记载,灌钢是把生铁和熟铁按一定比例配合,共同加热至生铁熔化而灌入熟铁中去,熟铁由于生铁浸入而增碳的方法。柯俊等对河南出土的4件六朝铁器和1件明代铁器分析认为它们是灌钢制品,其金相组织分高、低碳层,高低碳层间有明显的碳扩散现象<sup>②</sup>。陈建立等分析的1件北票喇嘛洞铁器金相组织不均匀,分为球化珠光体和铁素体+珠光体组织,有亚复相和单相夹杂物,夹杂物处又有高碳组织,判定为灌钢组织<sup>②</sup>。这两处铁器的金相组织与李约瑟所进行的模拟实验得到的灌钢样品<sup>②</sup>组织基本相同。对T1319 3样品的横截面和纵剖面进行了观察,在横截面可以看到自芯部向边部依次是熟铁、亚共析钢(高碳)、亚共析钢(低碳)、亚共析钢(高碳)、亚共析钢(低碳)组织,其纵剖面自芯部向边部依次是熟铁、亚共析钢、过共析钢、亚共析钢、锈蚀、亚共析钢、过共析钢、生铁、熟铁、锈蚀组织,基质地纯净、未发现有夹杂物,可能与灌钢形成的组织特征相同,但每层厚度仅为0.2~0.7毫米之间,明显具有操作难度,故其需要进一步的取样观察,以确定其材质和工艺。

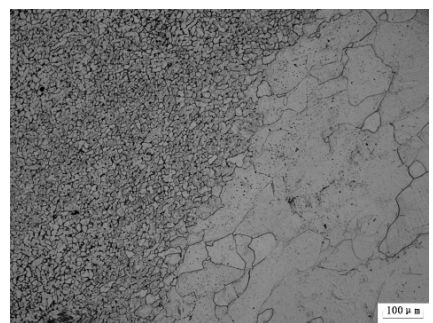
### 五. 战国两汉时期太行山东麓北段钢铁技术初探

依据考古地层和<sup>14</sup>C年代可知,这批铁器的制作年代集中在战国两汉时期,对这批材料进行研究有助于帮助我们了解战国两汉时期太行山东麓北段的钢铁技术。下文讨论中所涉及的铁器年代综合了<sup>14</sup>C年代和考古年代,其中有<sup>14</sup>C年代的以<sup>14</sup>C年代为准,故战国时期的铁器为6件,两汉铁器为49件。

东黑山遗址出土的战国时期6件铁器中有白口铁3件,麻口铁、脱碳铸铁和铸铁脱碳钢各1件,其中4件为农



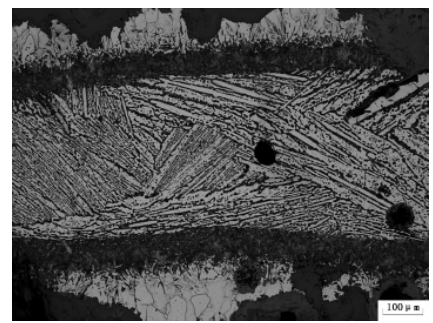
图三 T1217⑧H191:1,镰,战国晚期,淬火马氏体组织,铸铁脱碳钢,淬火。



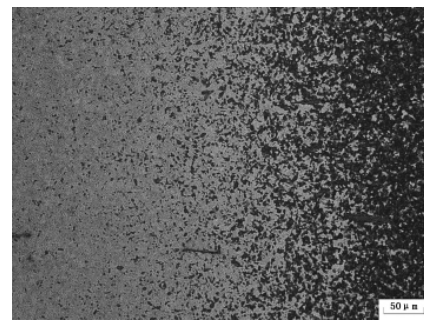
图四 T0131⑥:1,镞,西汉中后期,金相组织可分为两种形态,一种为铁素体组织,晶粒度大小不均,大者2级,小者5级;一种为铁素体+珠光体组织,含碳量约为0.15%,均匀分层,炒钢。



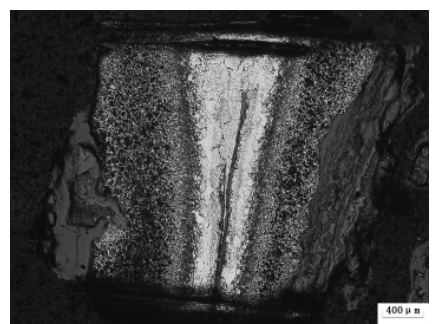
图五 T1118⑥:1,锤,西汉中后期,铁素体+珠光体组织的亚共析钢冷锻组织,含碳量约为0.4%,铸铁脱碳钢。



图六 T1217⑥H156:1,刀,西汉中后期,自芯部向边部是过共晶白口铁、珠光体、铁素体+珠光体、铁素体组织,脱碳铸铁。



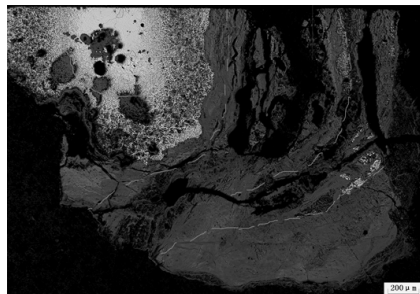
图七 T1318⑥G10:5,刀,西汉中后期,左边刃部为淬火马氏体组织,右边为铁素体+珠光体组织、珠光体组织,有单相夹杂物沿加工方向排列,铸铁脱碳钢,局部淬火。



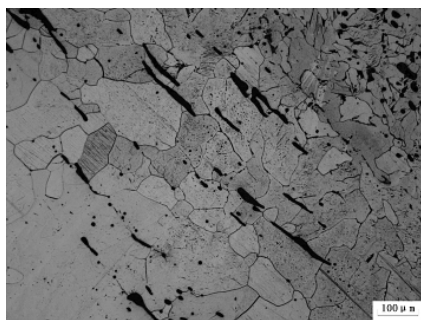
图八 T1319⑥:3,凿,西汉中后期,横剖面,铁素体、铁素体+珠光体、珠光体组织均匀分层、重叠分布。

具,有1件经过淬火处理,说明东黑山遗址战国晚期的铁器主要以铸铁和铸铁脱碳制品为主。李仲达等<sup>②</sup>对燕下都遗址出土的14件铁农具进行金相鉴定,认为铁农具全部为铸造成形,有些还经过退火处理,说明燕国已采用白口铁铸件和白口铁铸件退火脱碳处理后的产物来制作铁农具,使铁农具不仅保留了白口铁坚硬、锋利和耐用的性能,又有一定的韧性。他们还于燕下都遗址中12件兵器进行了金相鉴定,认为4件是铸造成形,8件熟铁或钢制品皆为锻制。北京钢铁学院对燕下都M44中的9件铁器进行了金相鉴定,认为

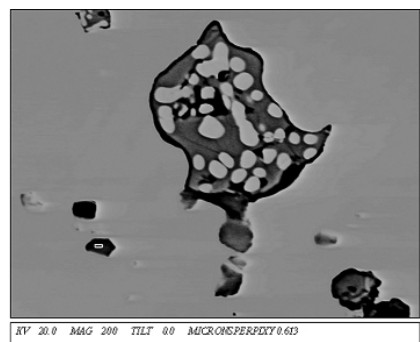




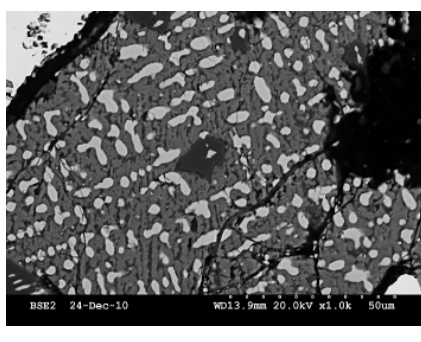
图九 T1319⑥:3, 凿, 西汉中后期, 纵剖面, 可分为四层, 自芯部向边部依次是铁素体、铁素体+珠光体、锈蚀、珠光体+生铁、残留有铁素体组织的锈蚀。



图一〇 T0738②:1, 钉, 明清, 铁素体组织, 有孪晶和浮凸组织, 复相夹杂物细小且变形量大, 分布极不均匀, 沿加工方向呈带状分布, 炒钢锻打。



图一一 T1219③:2, 镞, 金元, 复相夹杂物二次电子像, 硅酸盐玻璃相基体上岛屿状分布氧化亚铁颗粒, 铁高硅低, 钙、铝、磷等元素成分波动较大, 炒钢。



图一二 T0738②:1, 钉, 明清, 复相夹杂物背散射电子像, 树枝晶状氧化亚铁-铁橄榄石型硅酸盐夹杂, 铁高硅低, 镁、钙、锰、铝、磷等元素成分波动较大, 炒钢。

其中6件兵器为熟铁或钢制品,并且都经过反复锻打,其中3件进过淬火。燕国使用钢材制作兵器,并经过锻制、淬火等工艺,提高了兵器的机械性能<sup>⑤</sup>。对燕下都遗址、M44和东黑山遗址中经过分析的45件铁器的材质进行统计,认为燕国当时存在块炼铁、生铁铸造、退火、淬火和锻造工艺,同时生铁铸造和退火脱碳技术后来居上,逐渐取代了块炼铁技术,形成了较完备的钢铁技术体系。

经过分析的东黑山遗址两汉时期铁器有49件,其中有白口铁7件,麻口铁3件,铸铁脱碳钢19件,脱碳铸铁3件,炒钢13件,韧性铸铁1件,1件可能为灌钢,无法判断的2件。北京钢铁学院曾对满城汉墓出土的20件铁器进行了金相观察,发现有熟铁、白口铁、灰口铁、麻口铁、韧性铸铁等多种材质,出现了局部淬火的新工艺,还出现了反复锻造以改善均匀度来提高钢材质量的新工艺,被认为是“百炼钢”技术的原始形态<sup>⑥</sup>。清华大学铸工教研组也对满城汉墓出土的6件铁器进行了金相观察,认为2件为白口铁、1件为锻打后慢冷的钢,3件为经过退火处理的钢<sup>⑦</sup>。综合东黑山遗址和满城汉墓出土的铁器分析结果,认为汉代该地区钢铁技术完全以生铁和生铁制钢技术为主,较早的出现了炒钢技术和局部淬火工艺,并可能最早出现了灌钢和百炼

钢的制钢工艺,其钢铁技术领先于全国。

东黑山遗址出土的不同类型铁器中钢制品所占的比例不同,兵器均为低碳钢或熟铁材质,农具中占42%,工具中占82%,说明当时已经根据不同器物的性能要求而采取不同的材质。兵器较多的使用了炒钢并普遍采用锻造成形,农具和工具则全为生铁、铸铁脱碳钢和脱碳铸铁,说明生铁铸造和退火脱碳技术适合于大规模生产农具和工具,而炒钢则适合于兵器的制作。使用白口铁铸件和白口铁铸件退火脱碳处理后的产物来制作农具,不仅保留了白口铁坚硬、锋利和耐用的性能,又有一定的韧性,同时推广了铁农具的适用范围,延长了其使用寿命,推动了当时农作技术的全面发展。工具和兵器均普遍采用钢制品,是对其质量的保证。

## 六. 结论

铁器样品的年代学研究表明这批铁器<sup>14</sup>C年代具有很大的同一性,大部分属于战国两汉时期,

部分直至唐宋时期才被埋藏,再一次证明了铁器<sup>14</sup>C年代能够较好的反映铁器样品的制作年代。对于<sup>14</sup>C年代与考古判定年代不相符的情况,我们建议应结合考古发掘材料进行进一步考察。

通过考察战国两汉时期太行山东麓北段燕下都遗址、满城汉墓和东黑山遗址出土铁器的材质和工艺表明,战国两汉时期该地区块炼铁技术与生铁技术同时并存,战国晚期开始生铁和生铁制钢技术快速取代块炼铁技术,其中生铁铸造和铸铁退火技术广泛运用在制作铁农具和工具中,炒钢技术多用于制作铁兵器,该地区最早的炒钢制品也出现在西汉早期;自战国晚期开始出现的淬火工艺发展到西汉中后期出现了局部淬火工艺,西汉中后期还有可能出现了灌钢制品,并能根据不同器物的性能选择不同的材质和工艺。铁质农具、工具和兵器性能的优化和广泛使用促进了当地农业、手工业等社会经济领域的快速发展,推动了生产的发展和社会的进步。

致谢:本工作得到了河北省文物研究所韩立森所长的大力支持,北京科技大学韩汝玢教授对论文的实验和写作给予了详尽而具体的指导,北京科技大学孙淑云教授、李延

祥教授、潜伟教授、李秀辉副教授、陈坤龙博士、孟祥伟以及北京大学考古文博学院吴小红教授等对本工作提供了支持和帮助,北京大学考古文博学院潘岩老师、高世君老师、伦敦大学学院刘思然协助完成部分实验工作,在此表示感谢。

参考文献:

贾金标、齐瑞普、石磊、杨景峰:《河北徐水东黑山遗址考古发掘取得重大收获》,《中国文物报》2007年1月17日第2版。

河北省文物研究所:《燕下都》,文物出版社,1996年。

中国社会科学院考古研究所、河北省文物管理处:《满城汉墓发掘报告》,文物出版社,1980年。

河北省文物局文物工作队:《河北定县北庄汉墓发掘报告》,《考古学报》1964年第2期。

定县博物馆:《河北定县43号汉墓发掘简报》,《文物》1973年第11期。

中国社会科学院考古研究所、河北省文物管理处:《满城汉墓发掘报告》,第2页,文物出版社,1980年。

仇士华、蔡莲珍:《我国古代冶铁燃料的<sup>14</sup>C鉴定》,《中国考古学研究》,第359~363页,文物出版社,1986年。

Craddock P. T., Wayman M. L., Jull A. J. T. The radiocarbon dating and authentication of iron objects. *Radiocarbon*, 2002, 3:717-732;陈建立、韩汝玢:《汉晋中原及北方地区钢铁技术研究》,第37页,北京大学出版社,2007年。

陈建立、韩汝玢:《汉晋中原及北方地区钢铁技术研究》,第37页,北京大学出版社,2007年。

陈建立、韩汝玢:《汉晋中原及北方地区钢铁技术研究》,第31~33页,北京大学出版社,2007年;Philippe Dillmann, Maxime L, Hérítier. Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings: supply of materials and diffusion of smelting processes. *Journal of Archaeological Science*, 2007, 34:1810-1823; Eleanor Blakelock, Marcos Martínón-Torres, Harald A. Veldhuijzen, Tim Young. Slag inclusions in iron objects and the quest for provenance: an experiment and a case study. *Journal of Archaeological Science*, 2009, 36:1745-1757.

⑪ 陈建立、韩汝玢:《汉晋中原及北方地区钢铁技术研究》,第32页,北京大学出版社,2007年。

⑫ 陈建立、黄全胜、李延祥、韩汝玢:《赫章可乐墓葬出土铁器的金相实验研究》,贵州省文物考古研究所:《赫章可乐2000年发掘报告》,第195~206页,文物出版社,2008年。

⑬ 陈建立、杨琮、张焕新、杨繁德:《福建武夷山城村汉城出土铁器的金相实验研究》,《文物》2008年第3期。

⑭ 李晓岑、韩汝玢、杨帆:《羊甫头出土金属器的初步研究》,云南省文物考古研究所、昆明市博物馆、官渡区博物馆:《昆明羊甫头墓地》,第996~1009页,科学出版社,2005年。

⑮ 北京科技大学冶金史研究室:《西汉南越王墓出土铁器鉴定报告》,广州市文物管理委员会、中国社会科学院考古研究所、广东省博物馆:《西汉南越王墓》,第389~395页,文物出版社,1991年。

⑯ 河南省文物研究所:《南阳北关瓦房庄汉代冶铁遗址发掘报告》,《华夏考古》1991年第1期。

⑰ 中国冶金史编写组:《关于河三遗址的铁器分析》,《河南文博通讯》1980年第4期。

⑱ a.北京科技大学冶金与材料史研究所、徐州汉兵马俑博物馆:《徐州狮子山西汉楚王陵出土铁器的金相实验研究》,《文物》1999年第7期;b.陈建立、韩汝玢:《汉晋中原及北方地区钢铁技术研究》,第72页,北京大学出版社,2007年。

⑲ 段红梅:《三晋地区出土战国铁器的调查与研究——兼论中国钢铁技术第一次大发展》,北京科技大学博士论文,第44页,2001年。

⑳ 北京钢铁学院金相实验室:《满城汉墓部分金属器的金相分析报告》,中国社会科学院考古研究所、河北省文物管理处:《满城汉墓发掘报告》,第369~176页,文物出版社,1980年。

㉑ 柯俊、吴坤仪、韩汝玢、苗长兴:《河南古代一批铁器的初步研究》,《中原文物》1993年第3期。

㉒ 陈建立、韩汝玢:《汉晋中原及北方地区钢铁技术研究》,第91~92页,北京大学出版社,2007年。

㉓ Joseph Needham. *The development of iron and steel technology in China*. Newcomen Society, 1958:30-31.

㉔ 李仲达、王素英、苏荣誉、石永士:《燕下都铁器金相考察初步报告》,河北省文物研究所:《燕下都》,第881~895页,文物出版社,1996年。

㉕ 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》,《考古》1975年第4期。

㉖ 北京钢铁学院金相实验室:《满城汉墓部分金属器的金相分析报告》,中国社会科学院考古研究所、河北省文物管理处:《满城汉墓发掘报告》,第369~176页,文物出版社,1980年。

㉗ 清华大学铸工教研组:《满城汉墓部分铁器的金相学考察报告》,中国社会科学院考古研究所、河北省文物管理处:《满城汉墓发掘报告》,第388~389页,文物出版社,1980年。

(责任编辑:刘慧中)