

试论汉代关中地区铁器生产原料的来源与流通

——郃城铸铁作坊出土铁遗物的冶金分析

林永昌¹ 陈建立² 种建荣³ 雷兴山² 赵艺蓬³ 陈钢³

(1. 香港中文大学人类学系/历史系 2. 北京大学考古文博学院 3. 陕西省考古研究院)

关键词: 郃城铸铁作坊, 金相分析, 铸铁脱碳钢, 原料

摘要: 关中地区汉代铁器工业的工作和讨论不多, 2010年发现的郃城遗址铸铁作坊, 这一问题提供了重要的新材料。本文在对作坊出土铁遗物全面整理的基础上, 选择107件样品进行金相组织分析。结果显示, 废弃的铁遗物中, 多数为白口铁和灰口铁残块, 以及若干铸铁脱碳钢工具和坯料、炒钢工具或坯料、韧性铸铁工具和麻口铁工具或容器残块。此外, 还从遗址土壤中筛选出与锻造有关、一般称为“锻造剥片”的薄铁片遗物。遗物的空间分布分析表明这些铁遗物集中回收准备重熔后, 因某种原因工匠无法利用而集中废弃。郃城铸铁作坊很可能通过回收附近聚落的废弃铁器重熔生产, 但部分铁遗物并非由本作坊直接生产。除铸铁外, 作坊还可能以锻造方式生产或修补铁器。因此, 对郃城作坊的分析, 有助于认识汉代关中地区县级聚落中铁器作坊的运作和资源流通分配情况。

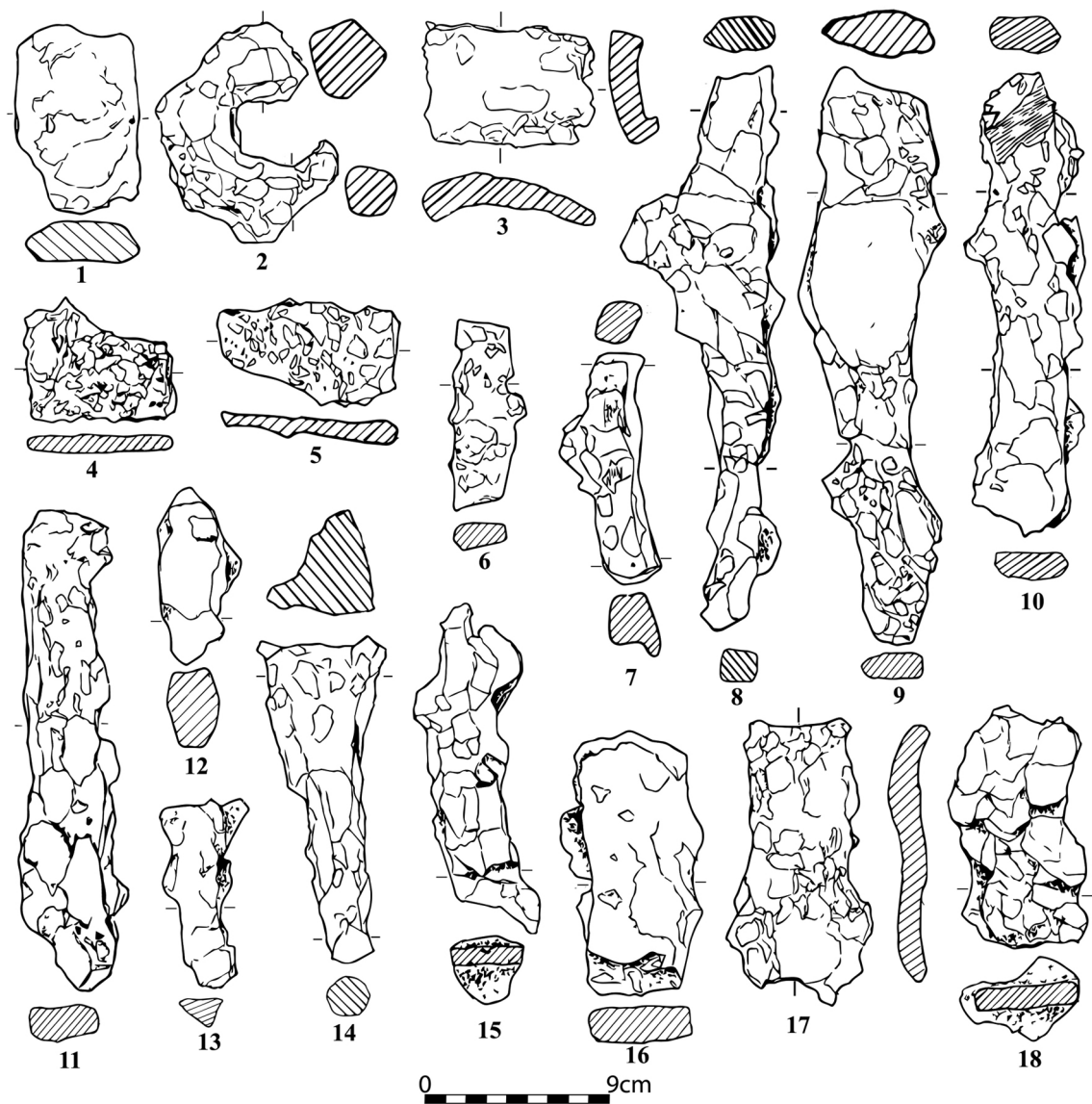
KEY WORDS: Taicheng iron foundry, Metallurgical analysis, Decarburized steel, Refined pig iron, Raw material

ABSTRACT: Even though there are fruitful archeological discoveries of Han capital, burials, and settlements in the Guanzhong region, only very few works in the literature discuss the local iron industry during the Han period. The iron foundry site in Taicheng discovered in 2010 provides new dataset to address this issue mentioned above. This article presents result of the metallurgical analysis of 107 specimens, which are sampled based on a comprehensive study of excavated material. Among these specimens, most of them are either white or grey cast iron. Other categories include decarburized steel (raw material and tools), refined pig iron (raw material or tools), malleable iron (tools), and mottled pig iron (tools or vessels). Furthermore, hammer scale—a direct evidence related to hammering—has been found through screening refilled soil. Based on the spatial distribution, all these iron remains were collected probably for re-melting, but were discarded in certain concentrated spots for unknown reasons. Therefore, the major source of raw material might come from collecting scrape iron—some of which were not even produced by the small iron foundry—from nearby settlements. Besides casting, the iron foundry also produced iron tools through hammering or repaired iron objects for nearby customers. This systematic analysis of iron remains provides fresh dataset to address the operation of iron foundry and distribution of iron in local administrative centers during the Han period in the Guanzhong region.

汉代为中国冶铁技术初期发展的重要时期, 以往在河南^[1, 2, 3]和山东^[4, 5, 6]等地冶铸铁作坊进行的大量工作, 为了解汉代铁器生产技术、组织和规模奠定了重要基础。近年来, 对作坊内冶炼遗物开展的科技分析研究^[7, 8], 也为更深入了解汉代铁器技术补充了更重要材料。相比之下, 关中地区为汉王朝的核心区域, 过去的分析多限于墓葬出土铁制品^[9, 10], 对秦汉时期居址或生产作坊所出土铁器的分析一直不多^[11, 12], 难以窥探关中区域内铁器技术发展的概况。在这一区域内, 虽然在长安城西市^[13, 14]、凤翔南古城^[15]等也发现过不

少的铁器作坊, 但一直未有较详细的报道和深入的分析。

2010年陕西省考古研究院在杨凌郃城遗址汉代墓地进行发掘, 并在聚落内发现并发掘了同时期的铸铁作坊^[16], 为解答上述问题提供了新材料。经钻探, 作坊应为当时的小型作坊, 面积不到1万平方米。由陶器分期和出土遗物大体可知, 作坊运作生产的年代大体在西汉早期^[17]。虽然作坊中尚未发现任何熔炉或炼炉, 但根据出土的陶范, 可以判断作坊的产品基本为铸造的锄和犁两类农具。在大部分单位发现数量不等的



图一 进行冶金分析的部分铁遗物

1. H31Y271(71124) 2. H31Y245(71108) 3. H33Y84(71168) 4. H34①Y88(71266) 5. H36Y123(71203)
 6. H33Y86(1)(71174) 7. H31①Y261(71119) 8. H31①Y266(71165) 9. H31Y274(71148) 10. H33Y81(71170)
 11. H28Y61(71290) 12. H5Y5(71274) 13. H33Y85(71171) 14. H31①Y258(71117) 15. H12Y2(71186)
 16. H31①Y250(71126) 17. H31Y277(1)(71150) 18. H12Y3(71187)

残铁块或铁器工具残块,此类铁遗物既有可能为作坊的工具,也有可能为回收的铁器甚至是板材一类的原料。但因为铁遗物总体甚为残破(图一),大部分无法仅凭外形判断其原来的性质。故本文在对出土铁遗物整理和分析基础上,选择铁器(或残铁块)进行分析,判断作坊出土铁器原来可能的性质,为探索汉代关中地区铁器作坊原料、生产技制和生产组织等问题提供新线索。

本文的分析主要包括三方面:(1)抽样铁器所代表的工艺技术;(2)尝试解决作坊出土残铁器和铁遗物所的性质;(3)探讨铁遗物的废弃原因和可能对应的作坊布局。

一、实验方法与检测结果

对铁器性质的分析,首先要判断铁遗物是否

表一 部分铁遗物鉴定结果

序号	单位号	种类	金相组织	材质判定结果
71108	H31①Y245: 1	铁器残块 (环首削刀)	珠光体 + 铁素体和魏氏组织, 含碳量不均匀, 边部约 0.4 - 0.5%, 中心较低, 为 0.3 - 0.4%, 在脱碳后再经渗碳和退火处理(图二, 1)	铸铁脱碳钢
71117	H31①Y258	残铁器	组织主要为铁素体, 有等轴化现象, 晶体粒度为 5 - 6 级, 并有大量块状氧化亚铁亚复相夹杂物, 成分中铁高硅底, 基体中磷钙比例高且波动较大。夹杂物分层分布, 且夹杂物和晶体有呈 u 形弯折和拉伸变形现象。组织中有许多道不易被侵蚀由磷偏析引起的带状组织, 应由多块炒钢迭打后弯折成形, 并有退火加工过程(图二 2 - 3)	炒钢
71119	H31①Y261	残铁器	组织主要为铁素体, 晶体大小差异较大, 粒度约 3 - 4 级。夹杂物量较小, 但有加工变形延伸现象。夹杂物以亚复相为主, 并有少量含氧化亚铁晶体的复相夹杂物。成分中铁高硅底, 铝、镁、钾含量低, 磷和钙含量较高且波动大。组织中有磷偏析引起的带状组织(图二 4)	炒钢
71121	H31①Y265	残铁器	组织主要为铁素体, 边部晶体大小较均匀, 粒度约 6 级, 中间粒度较大, 约 5 级, 并有较多块状含较多氧化亚铁的亚复相夹杂物, 部分呈点状分布, 磷、钙比例较高且含量波动大。出现因磷偏析引起的带状组织(图二 5)	炒钢
71126	H31①Y250	残铁器	基本为铁素体组织, 但晶体大小沿水平方向分为上下两层。高位晶体较小且有等轴化现象, 粒度为 6 级, 低位晶体较大且大小差异明显, 粒度约 3 - 4 级。夹杂物以亚复相为主, 沿水平方向变形延长, 并分成上下两行分布。下行夹杂物所在处有偏析引起带状组织。夹杂物成分中铁高硅低, 磷和钙比例高且波动大。位于低位的夹杂物基体中锰含量略高于高位。应由两块原料不同的炒钢迭打成形(图二 6)	炒钢
71144(1)	H31①Y282b	炉底积铁(?)	边部主要为珠光体 + 少量铁素体, 含碳量 0.6 - 0.8%, 有球状石墨析出, 偶见铸造缩孔, 芯部组织仍为过共晶白口铁组织和少量片状石墨析出, 可能未被充分脱碳处理(图二 7)	铸铁脱碳钢
71148(1)	H31Y274	残铁器	未完全锈蚀的夹杂物中有氧化亚铁枝晶残留痕迹(图二 8)	炒钢?
71153(3)	H31①Y280	残铁块	铁素体组织(晶体粒度为 5 - 6 级), 基体上有团絮状石墨析出, 局部有少量珠光体组织(图二 9)	韧性铸铁
71170	H33Y81	残铁器	芯部为珠光体的共析钢, 边部含碳量低且有较多铁素体组织, 偶见铸造缩孔(图二, 10)	铸铁脱碳钢
71171	H33Y85: 1	残铁器	铁素体组织为主, 晶体间有浮雕状组织(图二, 11)	熟铁
71174	H33Y86: 1	残铁器	组织主要为珠光体 + 铁素体, 亚共析钢组织, 含碳量约 0.4%, 偶见球状石墨析出(图二, 12)	铸铁脱碳钢
71186	H12Y2	残铁块	铁素体 + 少量珠光体组织, 含碳量约 0.1%(图二, 13)	铸铁脱碳钢

续表一

71203	H36Y123	铁器残块 (削刀)	铁素体+珠光体,亚共析钢组织。铁素体较均匀,大小面积相近且较小,含碳量约0.5%,有铸造缩孔,偶见球状石墨(图二,14)	铸铁脱碳钢
71290	H28:Y61	残铁器	珠光体+渗碳体组织(过共析钢),含碳量约1.8%,偶见析出的球状石墨(图二,15)	铸铁脱碳钢

可能为人工工具制品。但由于铁遗物保存情况差,除极少数铁器能判别出原器型外,大多在一般的分类整理时,都很容易被简单判断为“不规则”的残铁块。在取样以前,我们对出土铁器进行较系统的登记和分类整理。根据保存情况首先将这批铁器大致分为若干类型。第一类能明确原来为某类工具的残块,如H31所出土的残铁铲、戟、和可能为环首刀的环首等,但作坊中尚未见完整铁器出土,能明确为工具的数量也不多。本文称其为“铁器残块”。第二类是铁块外形相对规整,如呈条状或板块状,有可能为工具或铁锭一类的残块,但大多也因过于残断而无法判断原来性质,为以示区别,在下文中将这一类铁器称为“残铁器”。第三类为不规则型铁块,也就是无法通过外形判断原来到底是铁工具或“炉底积铁”^[18]一类的铁遗物,我们将其称为“残铁块”。第四类则与第三类相若,但表面大多黏附有铁渣、烧土或大量木炭,甚有可能和生产过程相关,或为熔炼时产生的炉底积铁一类遗物。在分类时,我们将其称为“炉底积铁”。在取样过程中,我们集中抽取第二和三类的铁器,因为第一类性质大体较为明确,而第四类为铁制品的可能性相对较低,而且和炼渣并不容易完全区分^[19]。对于第二和三类而言,冶金分析能发挥其最大作用,解决残铁器或铁块原来的工艺和性质。本文从各主要发掘单位中,最后共选取107件样品进行分析。

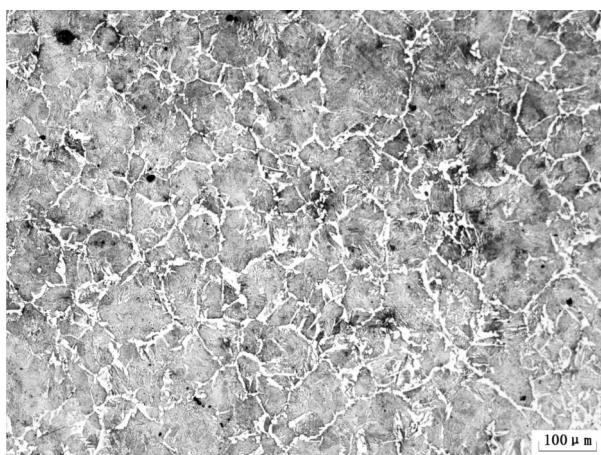
取样后的样品经过镶样、磨光、抛光后,用3%硝酸酒精溶液侵蚀,在北京大学冶金考古实验室和哈佛大学人类学系多功能实验室光学显微镜下观察样品的金相组织,并制图和拍摄照片,表一列出了14件金属部位保存较好的金相组织观察及材质判定结果。经观察后,我们根据铁器的保存情况,将鉴定结果分为两大类介绍。第一类因金属基体保存较好,因而能明确判断铁器(或残块)所代表的工艺或种类。第二类则保

存情况甚差,大多数仅保存小面积的金属基体,或只能仅凭因不同组织锈蚀后的残留来确定种类^[20],为以示区别,我们在鉴定结果后面加上问号、或只鉴定到基体的金属组织。在这批样品中,最后共有19件因为锈蚀严重,甚至连金相组织的痕迹也无法辨认。对于铁器中夹杂物成分,我们用扫描电镜能谱无标样分析,所用的分析仪为哈佛大学CNS中心的ZeissSUPRA55VP扫描电镜和EDAXGenesis能谱仪。分析所用激发电压为20kv,收集时间每点500ms,部分分析结果见表二。

二、金相组织和工艺技术的讨论

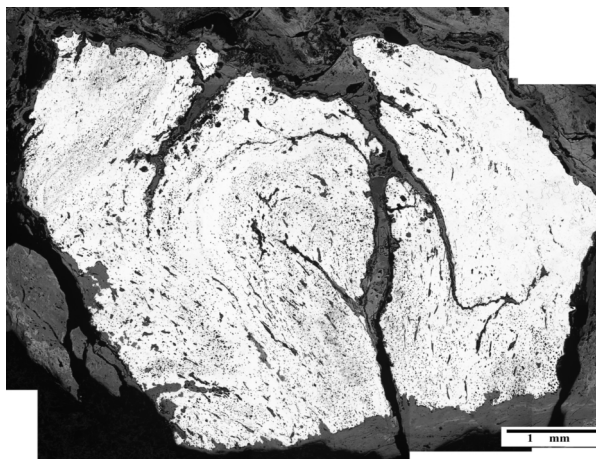
本文重点讨论从金相组织和外形看较明确为人工工具的制品,至于数量众多、且鉴定为白口铁、灰口铁、麻口铁等组织的样片,部分较难确定到底属于人工工具制品还是熔炼过程中的废品,在本文中的介绍则较为简略。

在分析的铁器样品中,共有4件能明确为炒钢制品。炒钢,即以生铁为原料入炉熔融并鼓风搅拌,促使生铁中碳氧化物炼成熟铁或钢制成的制品,一般也有较多夹杂物,但“其金相组织中含碳量较均匀,细长的硅酸盐夹杂物沿加工方向排列成行,与块炼渗碳钢夹杂物有明显差别;炒钢制品的夹杂,为单相硅酸盐夹杂,成分中硅高铁低,铝、镁、钾、锰较高,锰、磷在夹杂中较均匀,夹杂物细薄分散,变形量较大”^[21]。此外,夹杂物的微观结构与块炼铁不同。块炼铁是指在固体下还原铁矿石而得到的铁,金相组织为铁素体组织,有大块的氧化亚铁-铁橄榄石型硅酸盐共晶夹杂,变形量较低。夹杂物中铁高硅低,各种元素含量不均匀,特别是磷、钙、锰等元素有较大波动,基本不含或含少量的不兼容成分如钾、铝和镁^[22-24]。4件判断为炒钢的样品,成分中铁高硅低,磷钙比例高且波动大,铝、镁、钾、锰等比例



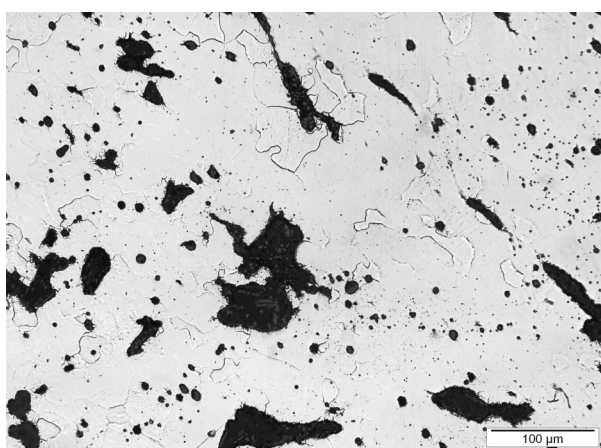
图二 1. 71108

珠光体 + 铁素体, 出现魏氏组织, 边部含碳量较高



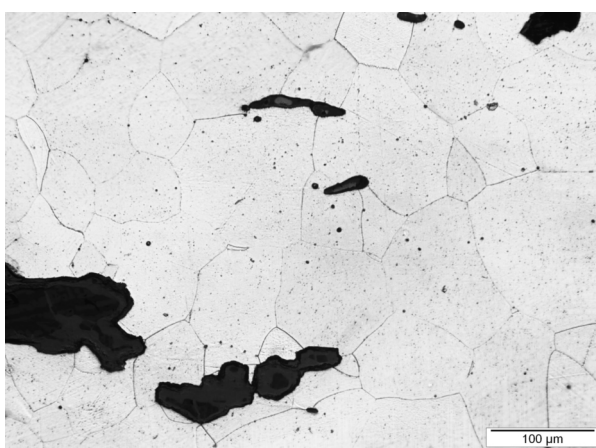
图二 2. 71117

金相组织全貌拼接图



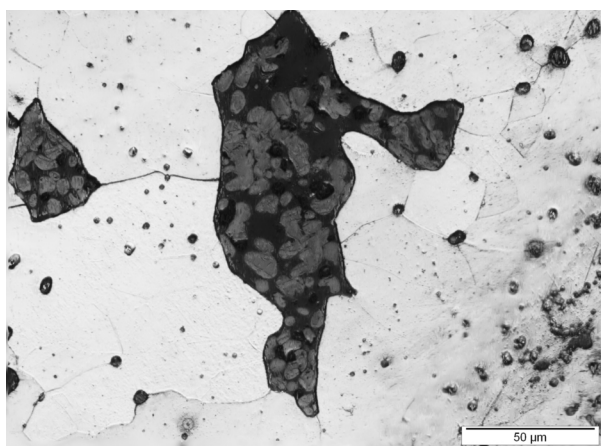
图二 3. 71117

铁素体组织 + 块状亚复相夹杂物



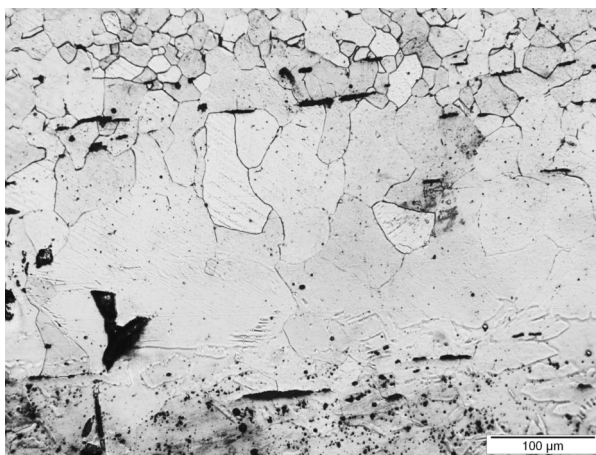
图二 4. 71119

铁素体组织及亚复相共晶夹杂物



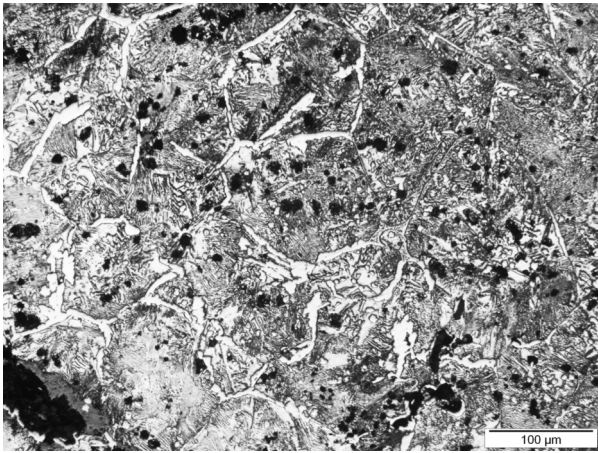
图二 5. 71121

铁素体组织 + 块状亚复相夹杂物

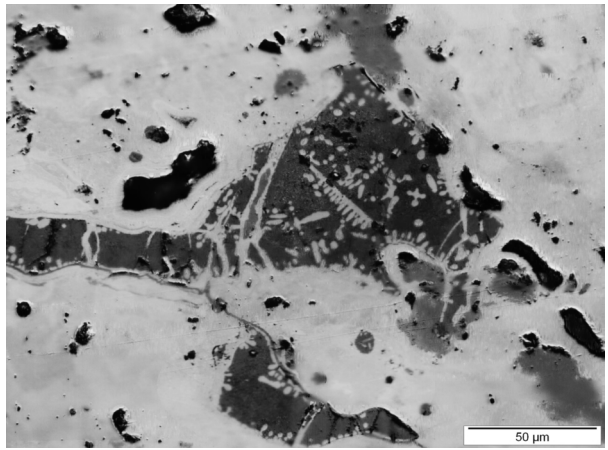


图二 6. 71126

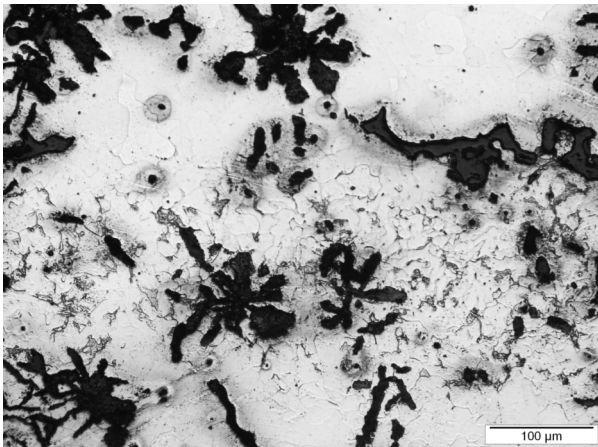
铁素体组织, 夹杂物分两行水平延伸分布



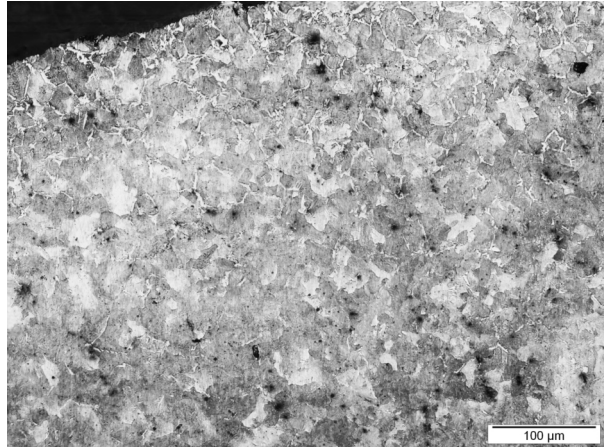
图二 7. 71144(1)
铁素体 + 珠光体组织



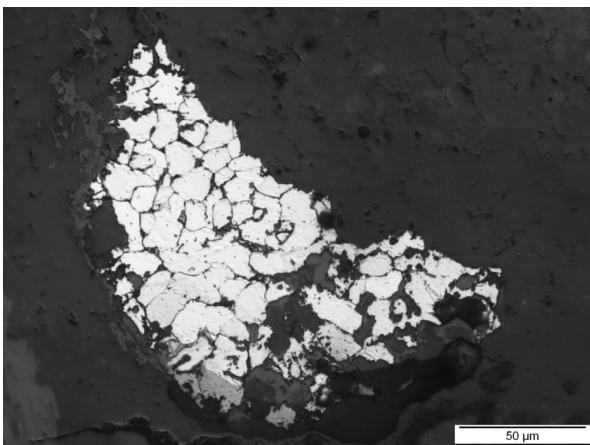
图二 8. 71148 (1)
块状夹杂物痕迹, 夹杂物中保留有氧化亚铁晶体



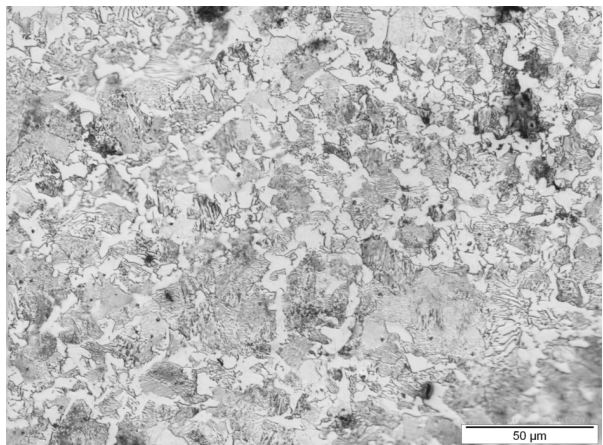
图二 9. 71153(3)
铁素体组织, 有片状石墨析出,
中间为偏析引起的带状组织和少量珠光组织



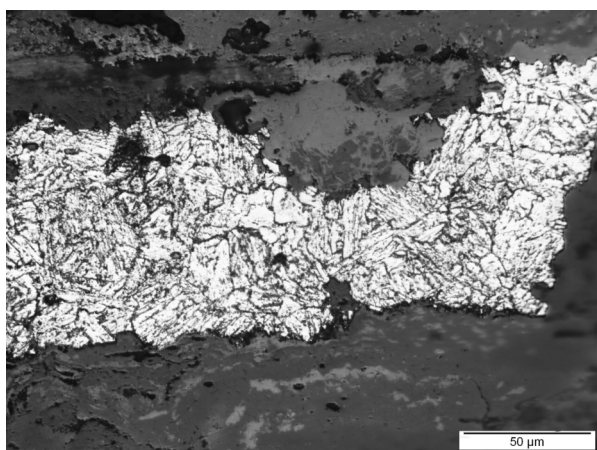
图二 10. 71170
芯部珠光体组织(共析钢) 边部为珠光体 + 铁素体组织



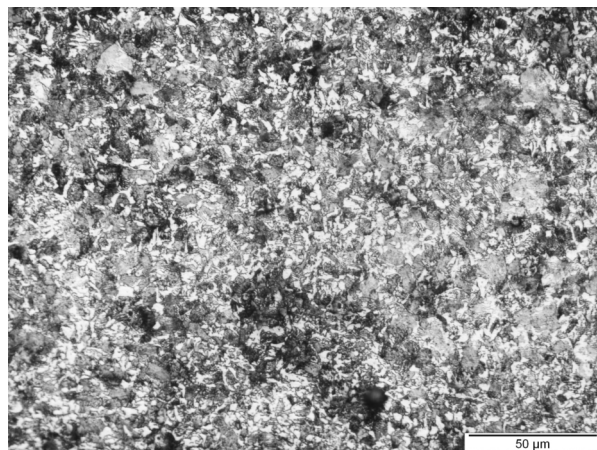
图二 11. 71171
基体为铁素体, 晶体间有浮雕状组织



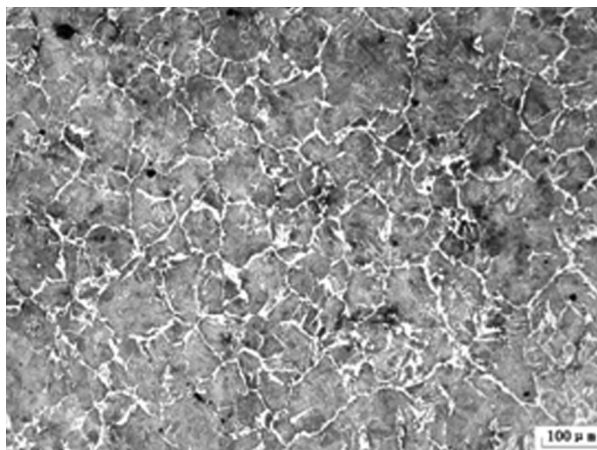
图二 12. 71174
珠光体 + 铁素体组织(亚共析钢)



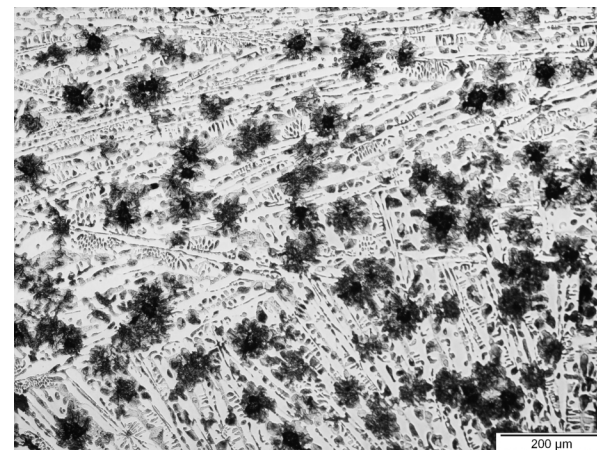
图二 ,13. 71186
铁素体和淬火马氏体组织



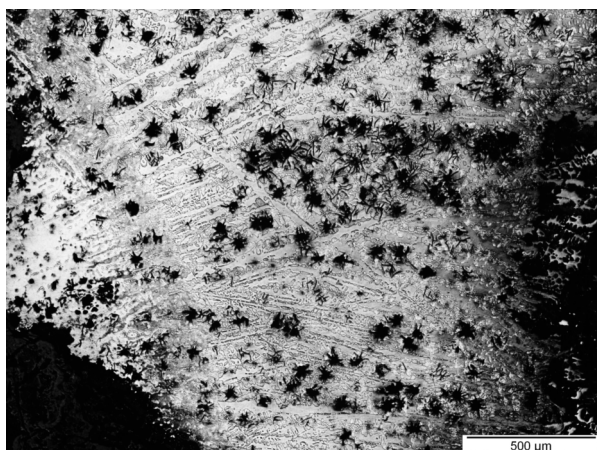
图二 ,14. 71203
亚共析钢组织(铁素体 + 珠光体)



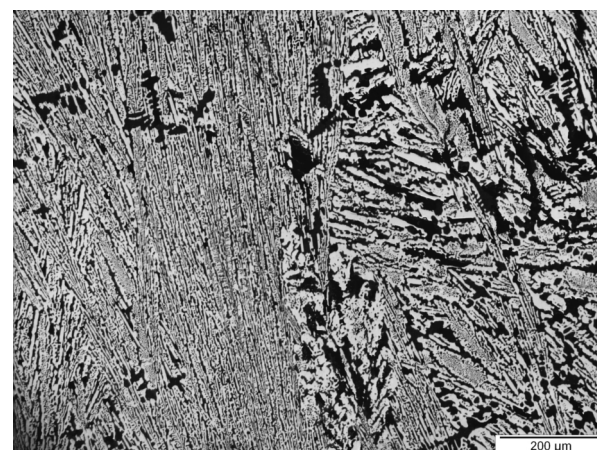
图二 ,15. 71290
珠光体 + 渗碳体组织(过共析钢) 出现魏氏组织



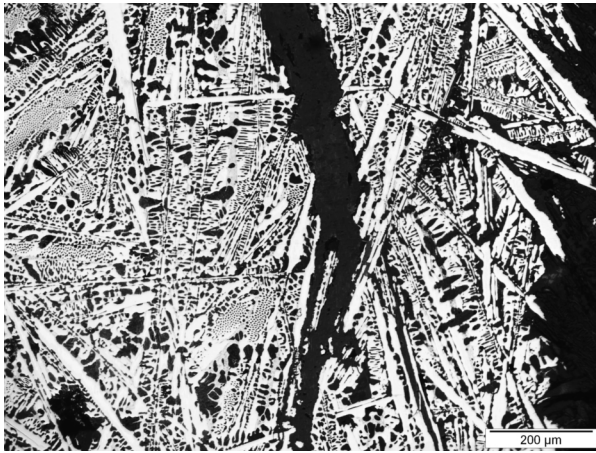
图二 ,16. 71120
过共晶白口铁和团絮状石墨析出



图二 ,17. 71274
中心为过共晶白口铁组织,边部为铁素体 + 团絮状石墨的韧性铸铁,中间为过渡层

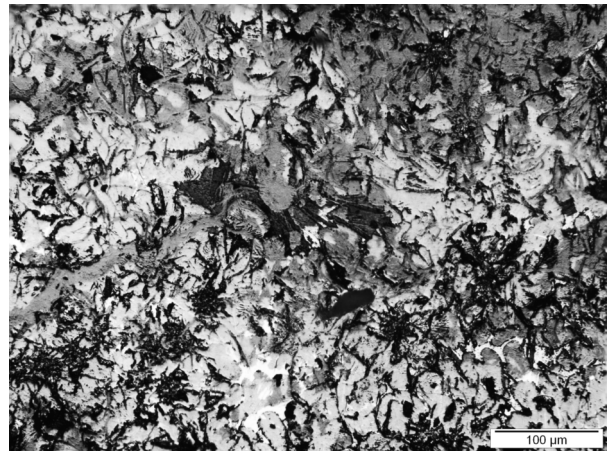


图二 ,18. 71232
共晶白口铁(左侧)和过共晶白口铁(右侧)



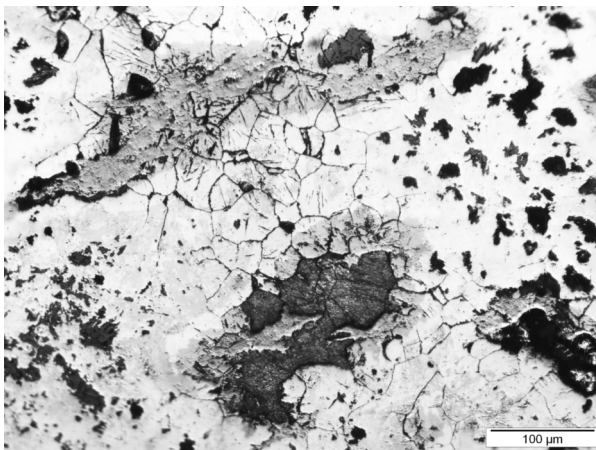
图二 19. 71264

莱氏体 + 一次渗碳体的过共晶白口铁组织



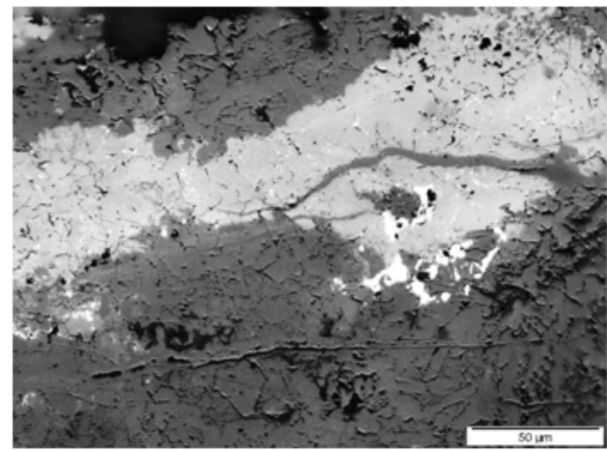
图二 20. 71106

大量片状石墨,部分有少量的珠光体组织



图二 21. 71165

珠光体锈蚀后组织痕迹



图二 22. 71150(1)

铁素体 + 少量珠光体锈蚀后组织痕迹

图二 部分样品的金相组织

低(表二)。71117的金相组织中(图二 2、3)基体为铁素体组织,有大量变形量大的亚复相夹杂物,夹杂物、铁素体、较难浸蚀的带状组织呈u形的弯折现象,应由多块炒钢叠打后再弯折成形。71119主要为铁素体组织(图二 4),有少量复相夹杂物,夹杂物有变形延伸,并出现不易被浸蚀的带状组织。晶体间有浮凸组织。71121中有大量亚复相夹杂物(图二 5),也基本未见弯折或沿伸现象。样品71126的金相组织以铁素体为主(图二 6),但大小差别较大,上侧晶体较小,下侧间较大,夹杂物以亚复相为主,分上下两行沿水平方向延伸,中间有磷偏析引起的带状组织,应由至少两块炒钢叠打而成。

据分析,共有7件样品能明确为整体为铸铁脱碳钢的制品(表三)。若把生铁加热到一定温度,在固体状态下进行等比较完全的氧化脱碳,可得到高碳钢、中碳钢、低碳钢,这种方法称为铸铁固体脱碳成钢法^[25]。属这一类型工艺的制品中,铸铁脱碳钢是指完全脱碳成钢的制品。样品71108的金相组织为珠光体+铁素体,并出现魏氏组织,含碳量不均匀,周边高于芯部(图二, 1),说明在锻打成型后经渗碳处理,但因保温时间较长而形成的魏氏组织也影响了其使用性能。71170芯部为珠光体的共析钢组织,样品边部含碳量较低(图二 10)。71174为铁素体+珠光体的亚共析钢组织,晶体大小较均匀(图二, 12)。

表二 炒钢制品夹杂物部分元素分析结果

部位及夹杂物类别			Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	
71119	夹杂物 1	点 2	浅灰相	0.2	0.1	1.3	11.5	2.8	0.2	0.3	0.5	0.2	0.4	82.5
		点 4	深灰相	0.2	0.3	0.5	18.2	2.2	-	0.2	0.6	0.2	0.4	77.3
	夹杂物 2	点 1	深灰相	1.1	0.4	0.4	1.5	20.2	-	1.3	33.6	0.2	0.3	41.1
		点 2	浅灰相	0.3	0.7	1.1	18.9	4.7	-	0.2	2.7	0.2	0.4	70.8
	夹杂物 3	点 1	深灰相	0.6	0.5	0.4	0.6	0.7	0.6	0.3	0.2	0.1	0.2	95.8
		点 2	浅灰相	0.6	0.6	0.4	0.6	0.6	0.5	0.2	0.2	0.1	0.3	95.9
	夹杂物 4	点 1	浅灰相	-	1.3	1.5	8.8	9.9	1.0	0.5	7.6	0.3	0.9	68.3
		点 2	深灰相	0.1	0.2	0.1	0.6	0.9	0.2	0.1	0.3	0.1	0.2	97.2
	夹杂物 5	点 1	深灰相	0.3	1.5	3.2	18.5	13.9	1.2	2.0	18.2	0.3	1.0	40.2
		点 2	亮相	0.1	0.1	-	0.3	0.3	0.6	0.1	0.1	0.2	0.3	98.0
		点 5	浅灰相	0.4	0.1	0.8	3.1	0.4	0.6	0.3	0.6	0.1	0.4	93.3
	大面扫		0.2	0.5	1.1	6.2	3.5	0.5	0.5	4.3	0.1	0.6	82.5	
71121	夹杂物 1	点 1	浅灰相	0.2	0.7	0.5	10.6	15.5	-	0.4	8.6	0.1	0.7	62.9
		点 3	亮相	0.2	0.4	1.2	5.7	5.7	0.3	0.7	3.4	0.1	0.6	81.7
	夹杂物 2	点 1	浅灰相	0.2	0.8	0.8	8.3	19.4	0.1	1.4	17.6	0.1	0.6	50.6
		点 2	亮相	-	0.2	0.6	1.2	0.6	0.1	0.2	0.5	0.2	0.3	96.1
	夹杂物 3	点 1	浅灰相	0.2	0.6	0.4	6.0	16.8	0.2	0.6	9.9	0.2	0.8	64.3
		点 3	亮相	-	0.1	0.5	0.4	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	98.1
	夹杂物 4	点 1	浅灰相	0.4	0.7	0.9	7.0	13.3	0.3	0.7	7.4	0.1	0.8	68.4
		点 2	浅灰相	0.3	0.2	-	0.7	0.5	0.2	0.1	0.3	0.1	0.3	97.5
	点 5	亮相	0.5	0.4	0.8	2.0	2.0	-	0.2	0.9	0.2	0.4	92.6	
71126	夹杂物 1	点 1	深灰相	0.3	1.1	2.5	14.4	9.8	-	1.1	12.2	0.2	0.4	57.8
		点 3	浅灰相	-	0.4	1.1	6.8	1.2	0.2	0.5	2.2	0.2	0.5	86.9
	夹杂物 2	点 1	深灰相	0.1	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	96.3
		点 3	亮相	0.6	1.0	1.4	7.1	6.3	0.7	0.7	8.3	0.2	0.3	73.4
			浅灰相	0.5	0.7	0.8	2.3	1.5	0.3	0.2	1.6	0.1	0.2	91.8
	夹杂物 3	点 1	深灰相	1.2	1.4	2.0	7.7	12.7	0.6	0.8	18.3	0.2	0.4	54.8
		点 2	浅灰相	0.2	0.7	2.4	11.8	2.0	1.5	0.7	3.6	0.3	0.5	76.4
	夹杂物 4	点 1	浅灰相	-	0.9	0.3	2.9	20.2	0.5	0.1	9.7	0.1	2.2	63.1
		点 2	亮相	-	0.1	0.5	1.3	1.6	0.4	0.1	0.5	0.2	0.6	94.8
	夹杂物 5	点 1	浅灰相	-	-	0.1	1.6	1.7	0.2	0.2	0.9	0.2	0.8	94.5
		点 4	深灰相	-	0.5	0.2	15.1	9.5	0.3	0.3	3.3	0.2	3.2	67.5
	夹杂物 6	点 1	深灰相	-	0.2	0.5	1.2	2.9	0.5	0.5	1.9	0.4	0.8	91.3
点 2		浅灰相	-	0.1	0.1	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.1	0.3	98.2	
	点 3	亮相	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.3	98.6	

续表二

71117	夹杂物 1	点 2	暗灰相	0.5	0.5	0.2	2.7	25.4	-	1.6	40.4	0.3	0.4	27.9
		点 3	亮相	0.4	0.3	0.3	0.4	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.3	97.9
		点 4	亮相	0.3	0.5	0.3	3.1	24.3	-	1.4	37.3	0.2	0.5	32.2
	夹杂物 2	点 1	深灰相	0.2	0.4	0.8	7.4	15.2	0.2	0.6	9.1	0.2	1.3	64.6
		点 2	浅灰相	0.8	0.6	0.7	0.8	1.4	0.1	0.4	0.3	0.2	0.4	94.3
	夹杂物 3	点 1	深灰相	0.8	0.7	0.2	1.7	28.8	-	0.8	53.5	-	-	13.6
		点 3	亮相	0.4	0.5	0.5	1.5	1.6	0.2	0.3	2.6	0.2	0.3	92.0
		点 4	浅灰相	1.2	0.6	0.9	5.9	16.8	0.2	0.7	25.8	0.1	0.4	47.3
		点 5	浅灰相	0.8	0.4	0.4	3.8	7.6	0.1	0.7	15.5	0.3	0.4	70.1
		点 7	亮相	0.9	0.5	0.9	7.3	5.0	0.2	0.7	11.0	0.3	0.4	72.9
		点 8	深灰相	1.1	0.7	0.3	2.3	22.6	0.1	0.9	38.2	0.1	0.2	33.5
	夹杂物 4	点 1	浅灰相	0.4	0.4	0.4	1.0	0.2	0.5	0.2	0.7	0.3	0.6	95.4
		点 2	深灰相	0.6	0.7	5.3	11.5	1.0	0.2	0.5	5.5	0.8	0.6	73.4
	夹杂物 6	点 6	浅灰相	0.7	0.5	0.5	7.9	10.3	-	0.4	7.4	0.2	0.9	71.1
		点 8	深灰相	-	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	98.8
	夹杂物 7	点 1	浅灰相	0.2	-	0.4	2.0	3.8	-	0.1	0.2	0.2	0.4	92.8
		点 4	深灰相	-	0.1	0.1	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	98.1

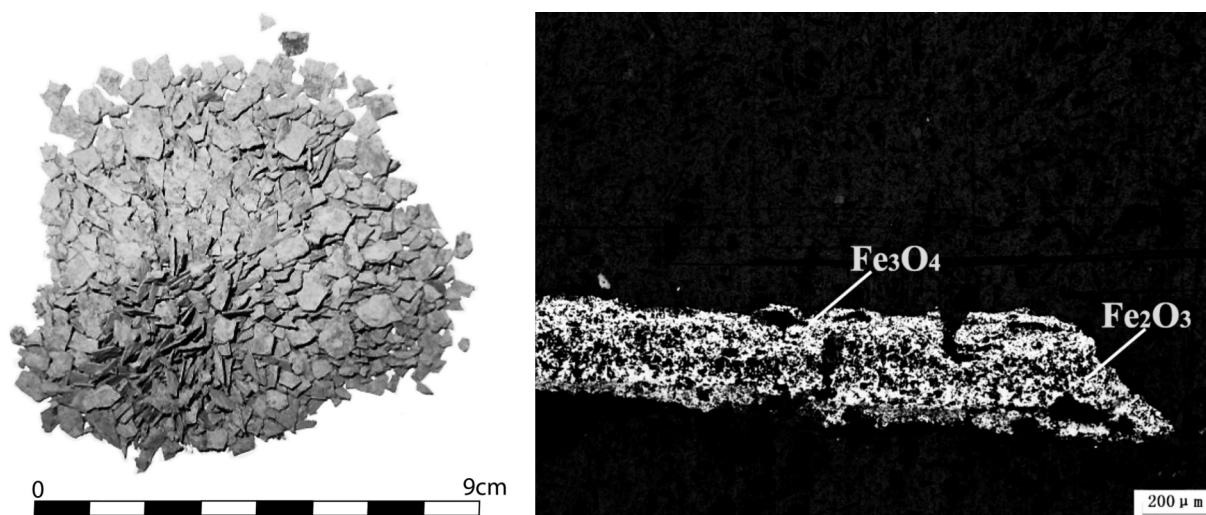
表三 鉴定结果统计

	白口铁	灰口铁	麻口铁	韧性铸铁	铸铁脱碳钢	炒钢	炒钢?	熟铁	完全锈蚀	总数
铁器残块/容器	1	1	1		2			1	3	9
残铁器	12	1	9		4	4		10	6	47
残铁块	20	3	6	2			1	5	7	43
炉底积铁?	1		3		1			1	2	8
总数	34	5	19	2	7	4	1	17	18	107

71203 为铁素体 + 珠光体的亚共析钢组织, 晶体大小亦较均匀(图二, 14)。71186 的组织为铁素体, 不见有夹杂物, 应经铸铁脱碳钢(图二, 13)。71290(图二, 15) 的组织为珠光体 + 渗碳体(过共析钢) 和魏氏组组织, 偶见析出的球状石墨。71144(1) 一侧为珠光体 + 少量铁素体的铸铁脱碳钢组织, 部分则保存原来的过共晶白口铁组织, 可能属于脱碳不完全的制品(图二, 7)。以上样品基本不见或仅有极少量的夹杂物, 但偶见球状石墨析出和铸造缩孔, 金相组织应属于铸铁脱碳钢。

韧性铸铁也是通过退火脱碳改善白口铁性能的方法。在加热到 900℃ 或稍高的温度下进

行较长时的退火, 便可使白口铁中的渗碳体分解成石墨。在柔化处理较充分的情况下, 会得到基体为纯铁素体并有发展等比较完善的团絮状退火石墨^[26]。经鉴定, 共有 2 件样品属于韧性铸铁, 当中, 71153(3) 的基体已脱碳成铁素体组织, 并保留有析出的团絮状石墨(图二, 9)。71274 的组织则有过渡性退火现象。一侧已脱碳成韧性铸铁, 另一侧则保留原来的过共析钢组织(图二, 17)。另外, 有 19 件样品组织中有经退火处理而析出的片状甚至是团絮状石墨, 但石墨一般分布甚不均匀, 片状石墨多在样品的边部出现, 且保存原来的白口铁组织, 如 71120(图二, 16), 这一类属于“麻口铁”的样品可能经过不充分的



图三 H31 出土的锻造剥片和金相组织

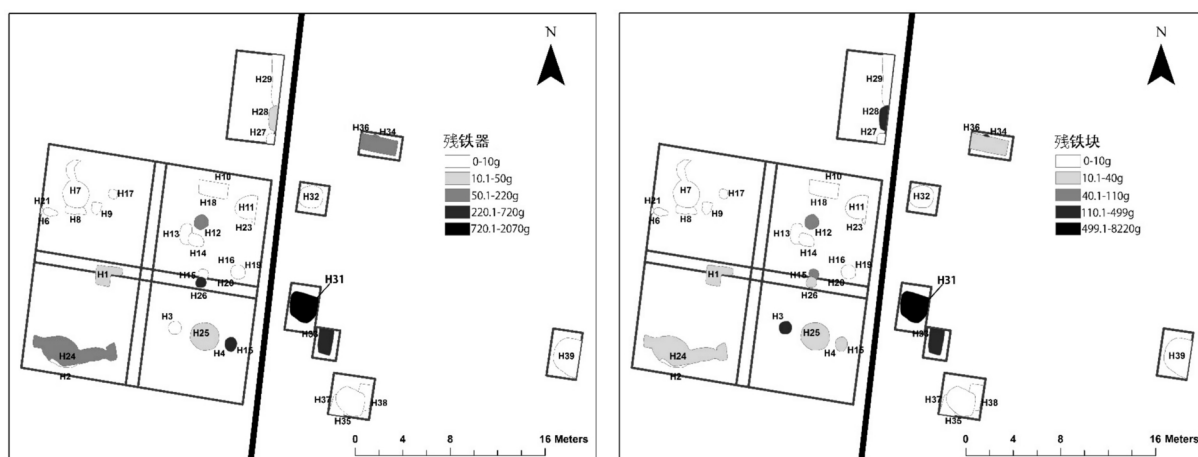
柔化处理。其性质相对复杂,既有可能为铁锭一类遗存,也有可能是铁工具或容器的残块。

在本次分析的样品中,大部分样品为白口铁和灰口铁组织。能判断为白口铁的样品共 34 件(表三),当中有 4 件仅残留有珠光体和莱氏体的痕迹,未锈蚀前应为白口铁组织。在这批样品中,绝大多数为过共晶白口铁(莱氏体+一次渗碳体),如 71264(图二,19) 所见。另外有 2 件样品含碳量则较不均匀,组织为过共晶和共晶白口铁(莱氏体)组织,如 71232(图二,18) 所见。在这批样品中,有 5 件鉴定为灰口铁,灰口铁的组织主要为片状石墨,如 71106(图二,20) 所示,除经生铁脱碳处理而成,灰口铁也有可能和炉内积铁有关。灰口铁的形成取决于化学元素的含量(主要为硅)和冷却速度^[27]。在高硅和较慢的冷却速度下,铁溶液往往凝固成灰口铁组织。因熔炉即使熔炼后也有保温功能,使炉内积铁冷却较慢,原来的奥氏体析出石墨,便能以铸造的方法产生灰口铁。鉴定为白口铁和灰口铁的样品,除可能为人工制品外,也有可能为铁原料或者是熔炼的废品。

在上文中已提及,作坊出土部分的铁器锈蚀甚为严重,但因铁器腐蚀具有选择性,因而凭锈蚀痕迹仍确定铁器原来的金属组织。例如,在样品 71148(1) 中,金属基体已全部锈蚀,但组织中保存较多块状夹杂物和中间的原来的氧化亚铁晶体痕迹(图二,8),原来很可能为炒钢(?)。另

外,有 17 件样品因保存情况不佳,只能确定为以铁素体为主要组织的熟铁,原来很可能为块炼铁、韧性铸铁或炒钢而成的制品。这一类金属基体保存情况又可分为两类。第一类共有 6 件,样品仍残留有少量金属基体,组织基本为铁素体组织,但在保存面积和锈蚀范围未见有夹杂物残痕,如 71171(图二,11)。第二类共有 11 件样品,金属基体已基本完全锈蚀,但仍保留有铁素体和少量可能为珠光体组织的痕迹,如和 71165(图二,21) 和 71150(1)(图二,22)。属这一类样品,虽然组织中不见有夹杂物痕迹,但因块炼铁或熟铁往往先沿夹杂物开始腐蚀,仅凭金相组织无法进一步判断到底是何种工艺制品。但从金属组织来看,因原来并非是白口铁或灰口铁组织,为熔炼时产生的铁废品可能性甚低,大多应为经人工加工的制品。

需加说明的是,在发掘过程中,我们还发现,并从别单位中以筛选方法收集到大量可能和锻造有关的薄铁片(hammerscale)(图三),此类遗存在以往的工作中较少注意,但是在其它地区的铁器制作遗址中却经常发现,且在锻冶炉附近会有聚集分布的现象^[28,29],我们暂时参考日文考古报告中通用的名称,将其定名为“锻造剥片”。这一类型的薄铁片基本已完全腐蚀,但从金相组织中仍能看出 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 的分层组织,应为铁器的表层氧化后在锻打时剥落的残留物。这一类遗存的出现,说明作坊也兼有锻打制作铁器



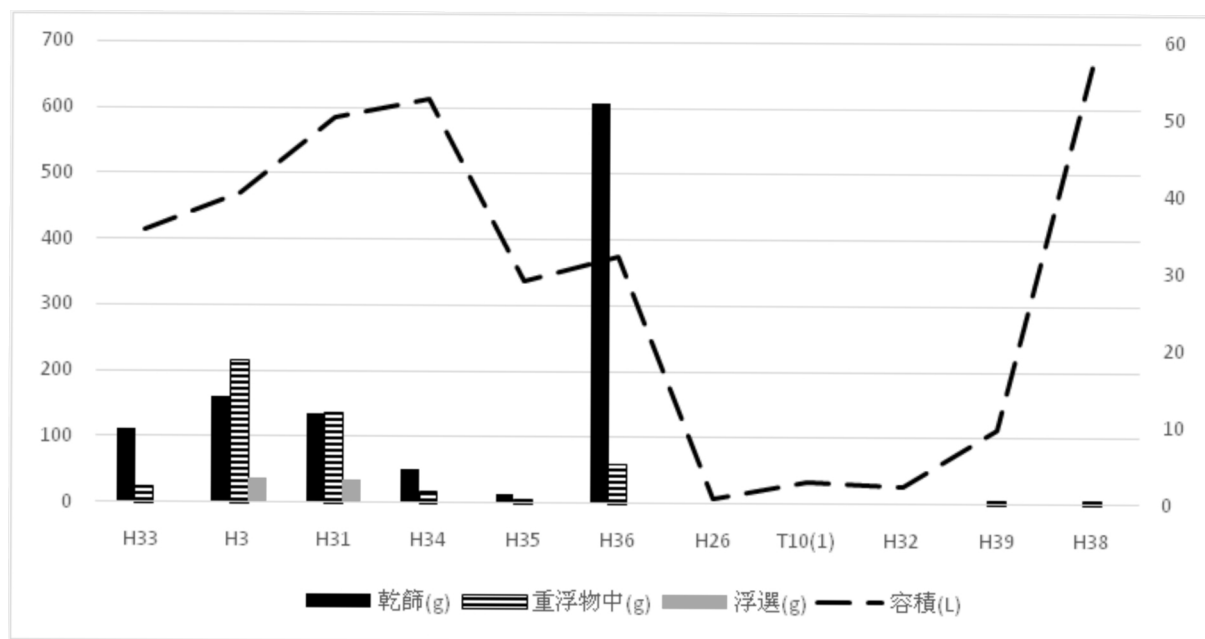
图四 作坊中各单位出土残铁器和残铁块重量

的功能。

三、铁遗物性质和作坊内的空间分布

尽管作坊中出土的铁器大多属残块,在判别原来性质时有一定困难,但抽样样品的金相分析却一定程度上帮助解决对残块性质的研究,也有益于对其它性质相似残块的讨论。结合对铁残块的综合分析,我们对这批铁器性质的新认识可总结为以下数点:

首先,在确定为铸铁脱碳的样品中,71290和71170的外形十分规整且呈长方形块条状(图一 10、11),基本看不出有刃部,厚度也与一般的削刀不同。71170组织为共析钢组织,71290则为过共析钢组织并有魏氏组织,两件铁器应为生铁铸成后经脱碳处理的小型铁锭或坯料。在与作坊对应的郟城墓地中,出土的环首削刀和削刀个别由铸铁脱碳坯料锻打成形^[30],因此,这一类坯料除了可以被重熔回炉外,还可用来直接打制成削刀一类的工具。



图五 若干单位土壤中锻造剥片的重量和所取土壤的容积
(左侧 Y 轴标记表示锻造剥片的重量刻度,右侧 Y 轴标记表示土壤容积刻度)

其次,在整理资料中,共有6件铁器呈C形或S形的环状,从外形判断很可能为环首削刀一类工具残破的环部。我们取出其中的3件样品71107、71108(图一,2)、71169进行分析。据结果,71107已全部锈蚀,无法鉴定;71108的金相组织为铸铁脱碳组织;71169则为熟铁组织。因环首削刀大多以铸铁脱碳钢为原材料,3件样品符合环首削刀的工艺,作坊中其余3件环状铁块也很能为环首削刀残件。此外,样品71203(图一,5)外形和环首削刀刀身十分相似,金相则为珠光体+铁素体的亚共析钢组织,原来也应该为环首削刀一类的工具残块。至于其余两件鉴定为铸铁脱碳钢的样品71174(图一,6)和71186(图一,15),整体因呈条块状,原来为环首削刀一类工具的可能性也甚高。原来判断为“炉底积铁”的不规则铁块71144(1)(图二,7),其原来的性质则较为复杂,既有可能为工具残块,又或者是脱碳较不充分的坯料。

第三,在本次分析,有4件样品能明确为炒钢组织,但4件铁器皆因较残破,难以确定原来是否为工具或何种工具,在分类时都归入“残铁器”的类品。这4件铁器都呈长条状(图一,7、14、16),但断面形状不一。经分析,71117由多块炒钢叠打、再弯折成形,原来应为锥、凿一类的工具。71126由两块原料不同的炒钢叠打成形,可能也属于某类工具。至于其余2件铁器到底原来是工具或炒钢坯料,则暂时无法判断。炒钢制品除了可被重熔外,还可直接重新制作铁器。在郃城墓地中,曾出土过数件削工或铲一类的工具,由多块炒钢材料叠打成形,由于组织中包夹较长的锈蚀孔隙,这些材料部分应是重新利用的废钢。从工艺制作而言,在西汉时期重新利用废材再重新锻打成工具是相当普遍的现象,在其它以往的分析中也发现过不少的例子^[31,32]。此外,由于在郃城作坊中不少单位皆出土“条块状”较不规则的“残铁器”,在这一类的铁器的金相分析结果中,有近20%的样品鉴定为熟铁组织,如71150(图一,17)、71165(图一,8)和71187(图一,18),因此,我们推测作坊的“残铁器”中,相当部分应该是准备重新回炉或再锻打加工的铁工具废材。

第四,在出土的“残铁器”中,有部分较薄且

呈一定的弧状,如71124(图一,1)、71168(图一,3)等,原来很可能为某类容器的残块。经分析,71124为共晶白口铁和灰口铁混合的麻口铁组织,71168则为熟铁。在未分析的残铁器中,还包括有可能为铁釜器耳一类残块(H36Y119)。由于较大型的铁容器一般都由浇铸而成型,在作坊单位中出土的呈弧状的片状“残铁器”,部分应为铁容器的残块。

第五,在外型甚不规则的残铁块,如71174(图二,12)所属的类别中,近一半为白口铁组织。但我们同时也发现了2件韧性铸铁(图二,9、17),其中一件已被完全柔化处理,原来应该是某类工具或者是坯料的残块。另外,还有5件样品组织为熟铁。尽管从外型看,这一类铁遗物几乎无法进行分类,但金相分析表明,当中至少有近13%原来应是某类废弃的铁工具或直接用于回炉生产的原料残块。

需要说明的是,除上文所讨论的部分,在我们所记录数量的残铁器中,从残块外型能判断原来器型的种类还包括空首钎、锤、铁臼和作为武器的戟,这些铁器大多残破,基本没有保存完整者。由于作坊中出土相对数量的“残铁器”和部分的“残铁块”,实际为坯料、回炉重熔的原料或重新锻打的废材,这些未分析且残破的残铁器也很可能是回收的原料。因此,大量的数据证明,郃城作坊应该是以重熔和回收各类工具或容器的废材来获取主要原料的小型作坊。类似的考古现象,在以往的铸铁作坊工作中其实也有所发现。例如,在瓦房庄的发掘中,基本未发现铁矿石块,但是却出土数量较多的长方形铁板和破碎铁块,个别表面还有被熔化痕迹。报告认为,板形铁材和被回收的废旧铁器,应是原料之一^[33]。而现代地质调查也表明,陕西地区铁矿石分布在秦岭山区、汉中地区和陕北高原,而整个关中盆地中基本没有大型铁矿^[34]。由发掘整理可知,作坊也未见可以确定为矿石或者是矿石粉末的遗物,在出土的工具中也未有可以确定为加工矿石者,进一步可证明上述郃城作坊出土废弃铁遗物的性质。

为分析作坊中废弃铁遗物的出土背景和埋藏原因,我们首先把所有单位中残铁器和残铁块在分类后记录重量,再分为由少到多的若干等级并在图四中进行标记。由分布图可看出,残铁器

和残铁块在作坊已发掘的范围内较普遍分布,但是 H31 不论是在残铁器还是在残铁块的出土重量中,都明显高出其它单位。此外,由整理的数据可知,H31 出土的炼渣重量也是所有单位中最多。换句话说,作坊中发现大部分残破的铁遗物,主要与炼渣共出。由于在出土单位所见的铁残块,一般较为残破,体积相对较小,有可能原来一些体积较大的铁块或质量较好的原料已被重熔,出土所见者,则可能为工匠利用后剩下的边角碎块。根据当代废铁回收业的情况,在回收重熔前工人一般根据铁器的积量和锈蚀情况,将废铁分成不同的级别然后再处理^[35]。从郃城铁遗物的分布,我们推测在重熔或重新锻打制作以前,工匠也很可能对废铁进行分类并集中存放。最后因某些缘故,部分较残破的残块无法被重熔和利用起来,并与炼渣一并废弃。至于其它单位中少量分布的铁器残块,也有可能是因含金属铁较少、较难利用起来而偶然抛弃的废品。

此外,在上文提及的锻造剥片也有集中分布的现象。为了解单位中出土锻造剥片的情况,我们在发掘时对若干单位提取未被过筛的土壤后(图五),首先以磁铁以人工方法将锻造剥片吸出,然后在对土壤进行浮选提取炭化植物遗存时,对重浮物和轻浮物再一次用磁铁把未能吸出的锻造剥片收集,最后将所有的锻造剥片进行称重统计。由图五可看出,H36 的土壤量不及 H3、H31、H33 和所打破的 H34,但这一单位中所出土锻造剥片的重量要远高于上述单位,说明 H36 锻造剥片较富集的现象并非由取样量较多造成。此外,在收集和浮选时,我们也对定为战国时期单位(H32、H38、H39)的土壤对行对比,由于在这些单位中,基本不见有锻造剥片的出现,可以确定,锻造剥片并非在西汉以前遗址上活动留下而在后期的“再生堆积”,而且这一类遗物肯定和郃城铁器作坊的生产相关。虽然一般来说,锻造剥片都会有以锻冶炉为中心、向四周扩散分布的现象,越靠近锻冶炉,分布就很密集。但是,被 H36 所直接打破的 H34,出土的锻造剥片量却不及前者的 1/6,说明在锻冶后,剥片很可能被重新收集起来并重新利用。而不是直接在锻打后进入到堆积单位中。H36 发现较多的锻造剥片,则可能因被收集的锻造剥片部分无法被重新利

用,而与其它废品一同废弃。

值得注意的是,在郃城作坊中,目前尚未发现过可以浇铸条材的陶范,也没有浇铸锄、铤和镢以外其它种类工具的陶范。因此,作坊中废弃的条材一类的坯料、容器和部分工具残块,肯定并非由作坊生产,应是从其它地方生产再运到郃城聚落。当然,锻造剥片的发现,说明作坊兼有通过锻打制作或维修铁器的功能,作坊、乃至附近墓地出土的一些通过锻打能制作而成的工具可能由作坊的工匠所生产。但可以肯定的是,不仅是铁原料或者是坯料,作坊乃至整个郃城聚落所使用的铁器工具或容器,部分应通过交易获得。即使部分铁器可能由郃城作坊加工制作,其原料也并非由作坊直接生产。作坊除了铸造农具,还有回收和重新加工铁器的功能。聚落中居民所使用的铁器,在锈蚀后可能被送到作坊重熔再铸造其它工具。在有关秦汉地方行政的出土材料^[36]中,曾记载县和都官在每年 7 月份要验查有物品(公器),并将快要锈蚀、无法使用的铁器变卖。所变卖的对象,肯定是能从新回收铁器的地方型小铁器作坊,也就是汉武帝在实行盐铁专卖以后的“小铁官”。根据金相组织和铁器的考古学分析,郃城作坊应属于这一类地方性小作坊。除了为当地居民提供农具外,作坊还可能从事较简单的工具(如环首削刀或铲)制作,其所用的原料则包括两大类:第一类为由其它作坊或冶炼中心所生产的原料,并以铁锭方式运送到作坊中。第二类则可能为因锈蚀或残损的铁器,被交易或送往作坊中重熔生产。

四、结语

受资料保存情况和发掘面积的制约,在郃城作坊的工作中我们尚未发现与生产直接相关的遗迹单位,出土的铁器大多以残破的铁块为主,一般成形或保留原来主要特征的铁器不多。但是,通过系统的整理和选取样品进行分析,结果不单说明这批铁遗物代表的工艺技术,更揭示出铁遗物背后关中地区复杂的铁器流通、回收和生产体系。本次分析的主要结论为如下数点:

(1) 作坊出土的较规整的铁工具遗物中,部分应为以铸铁脱碳钢材料制作的环首削刀残块;而

无法确定器型的“残铁器或残铁块”类别遗物,包括的种类则十分复杂,既有铸铁脱碳钢坯料,又有炒钢工具、生铁浇铸的容器或组织为熟铁的工具。作坊中出土不规则的铁残块,部分是经退火处理的人工工具制品,也可回收用作原料重新使用,因此,作坊除使用通过运输而来的铁锭一类原料外,也循环回收聚落中的废旧铁制品为原料。

(2) 作坊出土的铁遗物中,还包括与锻造工序相关的“锻造剥片”。因此,作坊除以铸造为主外,还通过锻打制作或修补铁器工具。作坊中出土的铁遗物残块,部分也可能作为回收再锻打加工的坯料。

(3) 作坊铁遗物的空间分析表明,作坊中的残铁块一类的遗物在回收进入作坊后,可能经过初步的分类和集中存放,最后因无法重新利用而与炼渣集中堆弃;与锻造工序有关的锻造剥片,也有被先集中收集,然后再与其它废弃物一并废弃的考古现象。作坊中出土的铁遗物,很可能只代表作坊所使用原料的一小部分。

(4) 除作坊所使用的原料外,作坊所回收的废弃品中也有个别应非作坊所生产的制品,表明在郃城聚落中存在着多条铁器供应的路线。聚落除了有自身的作坊供应铁器制品,还从其它渠道获取原料和以各种工艺制成的铁制品。

本文为文物局文化遗产保护领域科学和技术研究课题“西汉时期关中地区冶铁工业的形成与特点”和“田野考古与文物保护信息采集与定量处理技术研究”阶段性成果。浮选工作得到波士顿大学考古系博士生薛轶宁协助,谨致谢忱!

- [1] 河南省文化局文物工作队. 巩县铁生沟[M]. 北京: 文物出版社, 1962.
- [2] 郑州市博物馆. 郑州古荥镇汉代冶铁遗址发掘简报[J]. 文物, 1978(2): 28-43.
- [3] 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[J]. 华夏考古, 1991(1): 1-110.
- [4] 群力. 临淄齐国故城勘探纪要[J]. 文物, 1972(5): 45.
- [5] 东平陵故城联合考古队. 2009年山东平陵故城考古发掘主要收获[N]. 中国文物报, 2010-7-16(4).
- [6] 杨勇, 魏成敏, 徐龙国等. 山东临淄齐故城冶铸遗存考古调查发掘取得重要收获[N]. 中国文物报, 2013-7-19(8).
- [7] 陈建立. 中国古代金属冶铸文明新探[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

- [8] 杜宁, 李建西, 张光明, 王晓莲, 李延祥. 山东临淄齐国故城东北部冶铁遗址的调查与研究[J]. 江西理工大学学报, 2011(6): 32: 12-15.
- [9] 刘成. 龙首原西汉早期墓出土金属器件的能谱及金相显微组织分析[C]//西安市文物保护考古所编. 西安龙首原汉墓. 西安: 西北大学出版社, 1999: 262-270.
- [10] 郭美玲, 陈坤龙, 梅建军等. 陕西黄陵寨头河战国墓地出土铁器的初步科学分析研究[J]. 考古与文物, 2014(2): 121-127.
- [11] 北京科技大学冶金史研究室. 角楼建筑遗址出土铁器金相鉴定报告[C]//中国社会科学院考古研究所编. 汉长安城未央宫: 1980-1989年考古发掘报告. 北京: 中国大百科全书出版社, 1996: 269.
- [12] 杜蕻远, 韩汝玢. 汉长安城武库遗址岗土部分铁器的鉴定[C]//中国社会科学院考古研究所编. 汉长安城武库. 北京: 文物出版社, 2005: 132-133.
- [13] 中国社会科学院考古研究所. 1996年汉长安冶铸遗址发掘简报[J]. 考古, 1997(7): 5-12.
- [14] 中国社会科学院考古研究所. 1992年汉长安冶铸遗址发掘简报[J]. 考古, 1995(9): 792-798.
- [15] 陕西省考古所凤翔发掘队. 陕西凤翔南古城村遗址试掘记[J]. 考古, 1962(9): 493-95 8.
- [16] 赵艺蓬, 种建荣, 陈钢. 陕西杨凌郃城汉代铸铁作坊遗址[N]. 中国文物报, 2012-3-16(8).
- [17] 种建荣, 林永昌, 赵艺蓬等. 论关中地区西汉早期居址陶器谱系: 以郃城铸铁作城为中心. 待刊.
- [18] Wagner, Donald. Science and civilization in China, Vol. 5: Chemistry and chemical technology. Part 11: Ferrous metallurgy [M]. Cambridge: Cambridge University Press. 2008: 68. 炉底积铁, 是指在生铁冶炼或熔炼时因炉内温度或气氛不均匀, 或因意外突然停炉, 使炉内特别是鼓风口以下部分凝固的铁块, 因而无法直接从炉内排出, 另外, 炉底积铁也可能包括在炉底因未能完全排出而凝固的铁块。
- [19] 对于遗址出土的炼渣, 我们将另行撰文分析。
- [20] 戎岩. 申明铺遗址出土腐蚀铁器的微观分析[J]. 咸阳师范学院学报, 2012, 27(4): 87-90. 由于铁由铁碳合金组成, 铁相对于其它组织是阳极, 而按阴极性大小的排序为石墨>渗碳体>莱氏体>珠光体>铁素体。因此, 铁器的腐蚀是具有成分选择性, 合金中活性较强的组元会首先选择性溶解。
- [21] 韩汝玢. 古代炼钢技术[C]//韩汝玢, 柯俊主编. 中国科学技术史(矿冶卷). 北京: 科学出版社, 2007: 614.
- [22] 陈建立, 韩汝玢. 汉晋中原及北方地区钢铁技术研究[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 31.
- [23] 张周瑜. 山东章丘东平陵故城冶铁遗址冶金考古研究[D]. 北京大学考古文博学院硕士学位论文. 2014: 68-70, 85. 文中详细讨论了熔炼或冶炼过程中炉渣、金属铁次间磷转移, 并提出炒钢制品“也可能存在铁的氧化物、磷钙复杂化合物、玻璃相-橄榄石、玻璃相-浮氏体-橄榄石、玻璃相-浮氏体等夹杂。”

(下转 125 页)

释“朵”甚是;实际上1999年出版的拙著《秦文字集证》270页已释“朵”,谓“朵于禾上加一短竖,为指示字”。一些技术性的错误也是因为粗心。如719页右栏误置“上”字形在“工”字条下,该条辞例“栎阳工上造间”,编者本应切取“工”字,却误切了“上”;又如791页误置“丘”字在“刑”字条下,该条辞例“与战刑(邢)丘城”,本应切取“刑”字,却误切了“丘”字。这些都是不应有的错误,我们要引为深刻的教训。对词语的注释大多沿袭原注,后来有很多学者提出了不同意见,见仁见智。如睡虎地秦简《法律答问》“当三环之下”,“环”原整理者读“原”,意为

宽宥从轻,后来张家山汉简整理者、钱理群、夏利亚提出各自的看法,《读后记》认为钱先生的说法甚佳,“环”训返还。此类问题形成定论有一个过程,似仍有讨论的余地。拙编有4册,约400万字,存在的不足乃至错误恐远不止以上这些,后来我自己也发现了一些,如0153、3262二条“蓄”应合并;0757、2540二条“雍”应合并;0537、2032二条“诱”应合并;1148、2370二条“憂(忧)”字应合并;0745、2600二条“翼”字应合并。诚恳盼望读者继续指正!

王辉 2015年8月6日

(上接109页)

- [24]杨菊,李延祥,赵福生,楼朋林.北京昌平马刨泉长城戍所遗址出土铁器的实验研究——兼论炒钢工艺的一种判据[J].中国科技史杂志,2014,35(2):177-187.
- [25]韩汝玢.古代炼钢技术[C]//韩汝玢,柯俊主编.中国科学技术史(矿冶卷).北京:科学出版社,2007:604.
- [26]韩汝玢.中国古代钢铁冶金技术[C]//韩汝玢,柯俊主编.中国科学技术史(矿冶卷).北京:科学出版社,2007:388.
- [27]Wagner, Donald. Science and civilization in China, Vol. 5: Chemistry and chemical technology. Part 11: Ferrous metallurgy [M]. Cambridge: Cambridge University Press. 2008:162.
- [28]Sim, David. Beyond the Bloom: Bloom refining and iron artifact production in the Roman world [M]. Oxford: Publishers of British Archaeological Reports 1988.
- [29]Veldhuijzen, Harald Alexander and Rehren, Thilo. Slags and the city: early iron production at Tell Hammeh, Jordan and Tel Beth - Shemesh, Israel [C]. Metals and Mines: Studies in Archaeometallurgy, edited by Susan La Niece, Duncan Hook and Paul Craddock, pp. 189-201. London: Archetype Publications. 2007.
- [30]林永昌,陈建立,种建荣等.陕西杨凌郃城墓葬出土铁器金相实验分析及相关问题.待刊.
- [31]北京科技大学冶金史研究所,徐州汉兵马俑博物馆,徐州狮子山楚王陵出土铁器的金相实验研究[J].文物,1999(7):84-91.
- [32]韩汝玢.吉林榆树老河深鲜卑墓葬出土金属文物的研究[C]//吉林省文物研究所编.榆树老河深.北京:文物出版社,1987:146-156.
- [33]同[3]:1-110.
- [34]陕西卷编委会.中国矿藏发现史:陕西卷[M].北京:地质出版社,1996.
- [35]Carlson, Albert S., and Charles B. Gow. 1936. Scrap Iron and Steel Industry [J]. Economic Geography 12 (2): 175-84.
- [36]工藤元男.睡虎地秦简所见秦代国家与社会[M].曹峰,广瀨薰雄译.上海:上海古籍出版社,2010:28-30.

(责任编辑 张鹏程)