

# 江西上高蒙山遗址古代银铅冶炼技术研究

刘思然 陈建立 徐长青 Thilo Rehren

(北京 100083) (江西 南昌 330025) (塞浦路斯 塞浦路斯学院)

**摘要:**江西上高蒙山遗址是一处宋元时期大型银铅生产遗址,历史文献对其兴废时间、岁课额、生产组织方式等有过较多记载,但就其银铅生产技术则未有记录。本文对蒙山遗址多个地点的冶炼炉渣进行研究,通过与世界范围内多处银铅生产遗址的炉渣分析结果进行对比,重建蒙山遗址东西两冶炼区的古代银铅冶炼技术。研究结果显示,蒙山西区主要使用烧结—还原熔炼法冶炼含银铅矿石,而东区则主要使用铁还原沉淀熔炼法进行冶炼。铁还原沉淀熔炼法的技术优势在于可以避免对含银铅矿进行死焙烧,从而减少银在这一步骤中的损失,提高银的提取效率。目前由于缺乏两区域冶炼活动的准确年代数据,尚无法判断两种技术间的相互关系。对遗址冶炼遗物堆积进行考古发掘与年代测定将为理解该遗址空间布局及技术演进历程提供关键信息。

**关键词:**元代;白银;炼铅;铁还原法;技术选择

中图分类号:K879.9

文献识别号:A

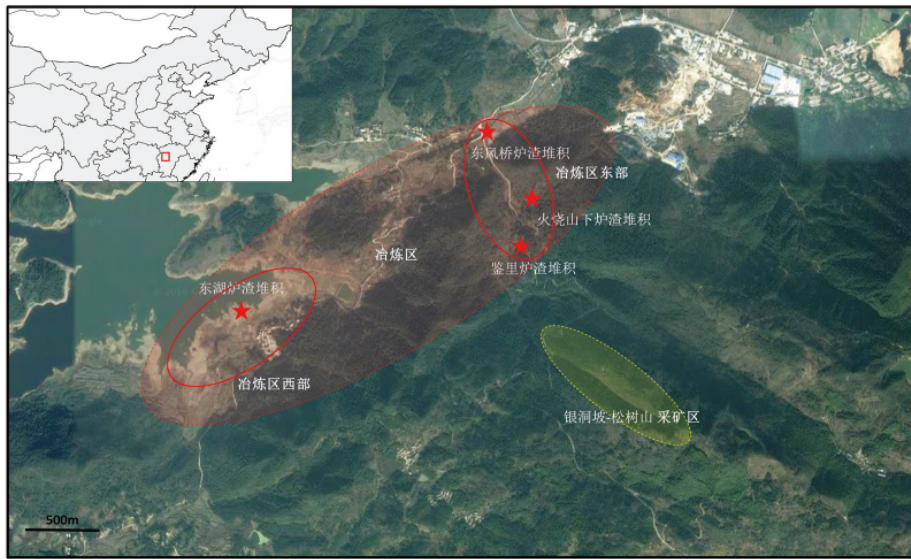
文章编号:1001-0327(2018)01-0101-11

蒙山遗址位于江西省上高县南部的蒙山乡,距今上高县城约13千米,是一处宋元时期重要的银铅生产遗址。南宋时此地即有银铅矿开采与冶炼活动,《江西通志》记“瑞州府上高县蒙山,在县南三十五里,有银铅坑冶。宋庆元六年(1200年)置银场于此。名其山曰多宝峰”<sup>[1]</sup>。根据古代矿洞外题刻显示,蒙山银矿于宝祐三年(1255年)第一次封闭,共计开采55年<sup>[2]</sup>。文献记载显示,这一阶段采冶管理模式为官督民办,得银以二八抽分<sup>[3]</sup>。元代是蒙山银矿生产的高峰期,《新元史·食货志》记“瑞州蒙山场,至元二十一年(1284年)拨粮一万二千五百石,办银五百锭,后拨至四万石。……延祐七年(1320年),依原定粮价折收原银七百锭,解提举司收纳”<sup>[4]</sup>。蒙山银场生产在元代中期以后开始出现衰落,泰定二年(1325年)蒙山提举司被罢,蒙山银场改归瑞州路统管,并于至正十年(1350年)因矿洞坍塌而再度封闭<sup>[5]</sup>。明代以后,仍有少量有关尝

试恢复蒙山银矿的记载,但试炼结果均显示蒙山银矿已经枯竭,再无开采价值。1977年吉林农安出土两枚年代为分别为元统三年(1335年)和至正十年(1350年)的元代银锭,其上刻文显示两枚银锭均系“蒙山银课”,为瑞州路总管府提调官办理,并详细记录了银场库官、库子、炉户及销银匠的姓名<sup>[6]</sup>。两枚银锭不仅为蒙山遗址元代的白银生产提供了实物证据,也显示了银场内部的层级管理体系。

蒙山银场规模化白银生产始自南宋时期,在元代早中期达到高峰,中央曾专设提举司督办银课,并划拨了专门的工本与冶户。蒙山银场高峰期银课约七百锭,按照两枚发现银锭实物的重量计算(约1.9千克),年银课总量约1330千克,为同时代之最。对于这样一处宋元时期重要的银铅矿场,学者已从文献出发对其起止年代、生产规模、管理方式等进行过梳理<sup>[7]</sup>。然而截至目前,尚少有学者从冶金技术的角度对该遗址进行研究。根据目前已

作者:刘思然,北京科技大学科技史与文化遗产研究院;陈建立,北京大学中国考古学研究中心;徐长青,江西省文物考古研究所;Thilo Rehren,塞浦路斯学院科技考古研究所。



图一 蒙山遗址卫星地图

采矿区位于银洞坡-松树山区域,冶炼区位于其西北方。四个主要炉渣堆积中鉴里、火烧山下和东风桥位于冶炼区东部,相互间距离不超过1千米。东湖炉渣堆积位于冶炼区西部,紧邻现代水库。

有的文献记载和冶金考古研究成果,中国古代主要使用火法冶炼含银硫化铅矿石,利用铅对银的亲和性将矿石中的银首先提取进入粗铅中,之后再通过灰吹法分离银铅<sup>[8]</sup>。火法炼铅工艺主要分为三种。第一种为直接熔炼法(roasting-reduction),首先通过焙烧使部分硫化铅矿石氧化,之后利用氧化铅与硫化铅直接反应得到金属铅。第二种为烧结—还原熔炼法(roasting-smelting)。首先通过焙烧使铅矿石脱硫,再通过还原冶炼脱硫的矿石得到金属铅。最后一种方法称为铁还原沉淀熔炼法(iron reduction process),利用铁的亲硫性将金属铅从其硫化物中置换出来。文献资料中并未记载古代蒙山银场具体使用了何种冶炼技术,因此本文将从考古调查和冶炼遗物科技分析出发,考察该遗址银铅冶炼工艺。

## 一、遗址调查

自上世纪四十年代起,考古和地质工作者已对蒙山地区进行了多次调查,发现了大量古矿洞和多处大型古代冶炼炉渣堆积<sup>[9]</sup>。江西省考古研究所、上高县博物馆与北京大学、

北京科技大学于2011~2014年间共同对蒙山遗址的古代采矿遗迹及几处炉渣堆积进行了调查。结果显示,古代采矿洞主要位于蒙山西南部的银洞山—松树山区域。此区域主要为热液型矿床,主要矿物为含银铅锌矿,脉石以方解石为主<sup>[10]</sup>。南延宗等于四十年代调查蒙山矿区时曾深入五处古矿洞进行调查,发现除方解石及少量铅锌矿外,矿洞中还残存有软锰矿( $MnO_2$ ),菱铁矿( $FeCO_3$ )及褐铁矿( $FeO(OH) \cdot nH_2O$ )等<sup>[11]</sup>。赣西地质大队曾对36件该区域的铅锌矿石样品进行化学分析,结果显示其平均Ag含量为24ppm,平均Pb/Ag比为136<sup>[12]</sup>。矿石银含量低于现代工业开采品味(80ppm),推测历时数百年的古代开采已经耗尽了当地含银较高的富矿。然而,考虑此地矿石样品的Pb/Ag比远低于其他多处古代矿山的银铅矿石<sup>[13]</sup>,推测该地区方铅矿中Ag相对富集,当古代高品位方铅矿较为充足时,应可被人类利用冶炼提取白银。

采矿区西北部为遗址的冶炼区,有多处大型古代冶炼炉渣堆积。本次对鉴里、东风桥、火烧山及东湖四处炉渣堆积进行了重点



图二 蒙山遗址鉴里及东湖冶炼炉渣堆积

调查,其中鉴里、东风桥、火烧山位于冶炼区的东部。东风桥炉渣堆积位于最北侧,距离采矿区直线距离约2千米。由于开挖泄洪渠,此堆积破坏较为严重,目前在泄洪渠两侧地表仍可见大量炉渣分布在一长约90米宽约40米的狭长地带,堆积厚度不明,炉渣总体较为破碎。火烧山下炉渣位于东风桥堆积东南侧,被原林场内所修建的房屋破坏,目前仅残余一长60米、宽20~40米的不规则区域。炉渣残块破碎严重。鉴里炉渣堆积位于火烧山南侧,是东区炉渣堆积中体量最大者,目前仍能观察到一高出地面9~20米的炉渣山。整个堆积长约170米、宽112米,总重量约50万吨左右。堆积中所见炉渣残块体量较大者直径约50厘米、厚8~9厘米,单块重量超过50千克。据当地村民反映,上世纪50年代此堆积的炉渣曾被用于修建公路地基,堆积厚度减少约1/3。

东湖炉渣堆积位于冶炼区西部,距离采矿区约2.5千米。此处炉渣主要沿现代水库区域分布,大量炉渣位于水库水位线以下,炉渣总量难以估测。目前露出水面的主要有四处地点,其中第四地点规模较大,面积约5000平方米,可见大量直径超过50厘米、厚度约12~15厘米的大型渣块,单块重量可超过50千克。

四处堆积所见炉渣致密,表面具有明显流动痕迹,单块炉渣体量较大,主要为竖炉排渣,炉渣流动性好,技术较为成熟。炉渣断茬处不见任何夹杂物,炉渣非玻璃态,基本无磁性。东风桥、火烧山以及鉴里炉渣均为黑褐

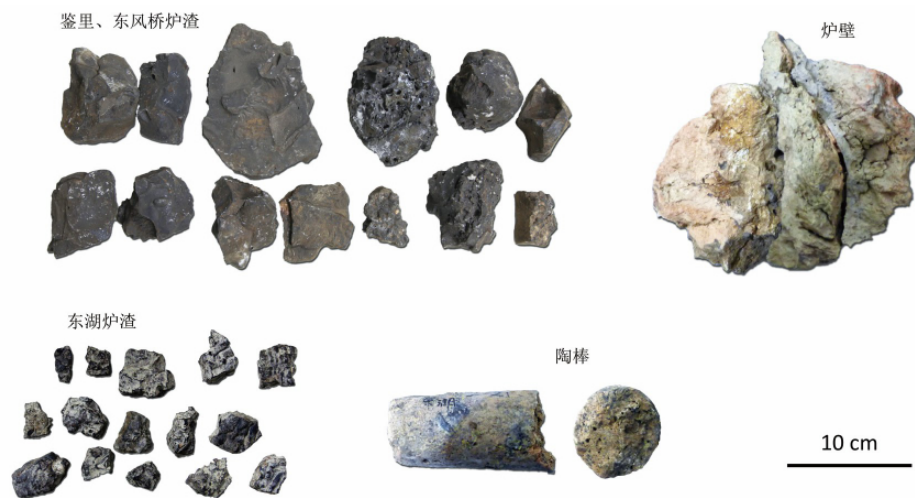
色,有时其表面可见铁锈附着。东湖炉渣则多呈灰白色。进一步剖面观察显示东湖炉渣灰白色区域主要集中于表层,内部仍呈黑褐色。东湖炉渣堆积主要集中于现代水库边缘,水库水位较高时炉渣堆积会整体没入水库以内,由于受到水的长期淋滤,可能导致表层部分元素流失。

除炉渣外,几处堆积中还发现大量炉壁残块,其内侧烧流呈玻璃态,外侧烧结程度较低,仍呈红褐色。东风桥及东湖两处堆积还出少量陶质棒状器物,其烧制温度较低,质地疏松易断裂,功能不明。本次及以往的多次考古调查均在四处炉渣堆积中发现少量瓷器残片,年代包含宋、元、明三代,鉴里炉渣堆积中还发现了数量较多的布纹板瓦。考虑到文献记载南宋至元时期为蒙山遗址的规模化生产期,如此大体量的炉渣堆积很可能在这一时间段内产生。但依调查资料很难判断几处炉渣堆积形成的先后顺序。

## 二、冶炼炉渣分析

本研究选取35件随机取得的古代炉渣样品进行分析。其中15件来自鉴里炉渣堆积,10件来自东风桥炉渣堆积,10件来自东湖炉渣堆积。利用Leica DM4000光学显微镜和日本电子JEOL Superprobe JXA8600电子探针配备Oxford Instruments INCA Energy Dispersive Spectrometer能谱仪对这些样品进行显微结构和平均成分分析,并对重点物相进行微区





图三 蒙山遗址所见古代冶金生产遗物

成分检测。为了数据的准确性,在分析西区东湖堆积炉渣时避开炉渣遭到侵蚀的表层,只针对其内部未受影响的区域进行检测。

炉渣平均成分见表一,大部分样品均为Fe-Si-Ca系炉渣,并含有大量的MnO(平均13.4 wt%)和少量ZnO(3.2 wt%),仅西区东湖炉渣MSS-DH9成分较为异常,其CaO含量超过40 wt%而FeO含量只有4.6 wt%。根据前述地质调查结果,MnO和CaO均为蒙山银铅矿脉石的主要成分,在冶炼过程中大部分进入炉渣。部分样品中含有少量F,且在其炉渣基质中发现了数量较多的CaF<sub>2</sub>晶体,可能说明该遗址所用矿石的脉石中可能含有少量萤石。35个炉渣样品的平均PbO含量为1.7 wt%,大部分样品PbO含量在1 wt%~2 wt%之间,显示这些炉渣应与炼铅活动有关。显微分析显示,两区域炉渣中均含有大量铁橄榄石(Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)与锰橄榄石(Mn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)的固溶体及少量铁尖晶石(FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)晶体,铅颗粒发现较少。根据不同氧化物在炉渣熔融过程中行为的差异将炉渣主要成分归入SiO<sub>2</sub>(SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),CaO(CaO),FeO(FeO+MnO+ZnO)三组分后重新归一化绘入CaO-FeO-SiO<sub>2</sub>三元相图中(图四)。结果显示蒙山炉渣的软熔温度基本在1000℃~1150℃之间,考虑到未纳入考察的

K<sub>2</sub>O,PbO等氧化物均具有较强助熔效果,因此估测蒙山遗址银铅冶炼的操作温度不会明显高于1200℃。古代工匠在渣型选择方面较为合理,且工艺技术稳定,渣型未见明显变化。

尽管三元相图所显示的软熔温度近似,蒙山几处堆积地点炉渣的化学成分却存在显著差异(图五)。鉴里与东风桥炉渣FeO和ZnO含量的平均值分别为35.5 wt%和3.8 wt%,而东湖炉渣此两种氧化物的平均含量仅为21.5 wt%和1.2 wt%。东湖炉渣MgO,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和K<sub>2</sub>O含量的平均值分别为2.3 wt%,4.4 wt%和3.0 wt%,而鉴里与东风桥炉渣仅为1.3 wt%,2.8 wt%和0.7 wt%。鉴里与东风桥大部分炉渣样品的SO<sub>3</sub>含量在1.5 wt%以上,平均值为2.5 wt%。东湖炉渣SO<sub>3</sub>含量最高者仅有0.7 wt%,且大部分样品的SO<sub>3</sub>含量低于扫描电镜能谱检出限。

显微观察显示鉴里与东风桥炉渣中含铅硫化物夹杂较多,为炉渣中Pb、S、Zn的主要载体,而炉渣玻璃基质基本不含Pb(平均1.3 wt%)。对32个直径较大的硫化物夹杂进行微区面分析,结果显示其Pb、Fe、Zn平均含量分别为17.2 wt%、33.7 wt%和11.4 wt%,光镜下可观察到硫化亚铁(FeS)、硫化铅(PbS)、硫化锌(ZnS)三个主要物相。除此以外,许多硫化物颗粒中观察到大量弥散分布的氧化铁。根

表一

蒙山遗址银铅冶炼炉渣平均成分表

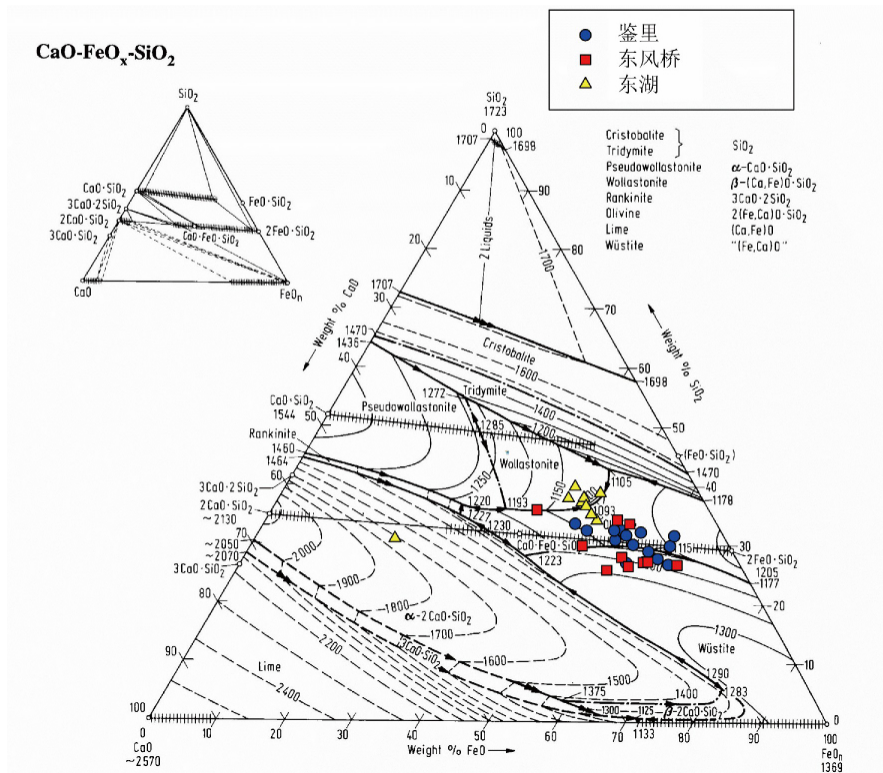
编号	区域	取样地点	F	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MnO	FeO	ZnO	PbO	Ag
MSS- 1	东区	鉴里	bdl	1.1	3.4	31.2	0.2	1.5	0.6	10.3	9.3	38.1	2.7	1.6	bdl
MSS- 2	东区	鉴里	bdl	0.7	1.6	30.3	bdl	1.7	0.1	5.1	12.9	40.8	4.7	2.2	bdl
MSS- 3	东区	鉴里	bdl	0.7	1.9	25.7	bdl	3.9	0.4	13.8	10.6	38.7	4.0	0.4	bdl
MSS- 4	东区	鉴里	0.0	0.8	2.5	28.9	bdl	3.9	0.5	12.5	11.0	35.1	3.0	1.6	bdl
MSS- 5	东区	鉴里	bdl	0.8	1.7	29.2	bdl	0.8	0.3	11.8	11.2	40.1	2.7	1.4	bdl
MSS- 6	东区	鉴里	bdl	0.8	1.4	25.7	bdl	2.6	0.2	8.5	16.5	39.5	4.2	0.6	bdl
MSS- 7	东区	鉴里	bdl	0.9	3.1	29.9	bdl	1.0	0.6	11.1	9.4	35.1	2.7	6.3	bdl
MSS- 8	东区	鉴里	bdl	0.2	1.9	26.7	bdl	0.2	0.3	11.5	13.4	40.7	4.2	1.0	bdl
MSS- 9	东区	鉴里	bdl	1.0	1.9	26.9	bdl	4.9	0.5	9.4	10.2	39.2	4.5	1.6	bdl
MSS- 10	东区	鉴里	bdl	1.3	1.6	26.5	bdl	3.0	0.2	9.4	13.9	38.7	4.6	0.7	bdl
MSS- 11	东区	鉴里	bdl	1.1	3.5	30.8	bdl	3.0	0.5	14.9	8.1	33.4	3.1	1.7	bdl
MSS- 12	东区	鉴里	bdl	0.8	3.0	29.9	bdl	2.1	0.6	10.2	13.7	34.2	2.7	2.8	bdl
MSS- 13	东区	鉴里	bdl	0.2	1.8	28.1	bdl	3.3	0.1	6.2	14.5	38.7	4.9	2.3	bdl
MSS- 14	东区	鉴里	bdl	1.1	2.2	30.8	bdl	1.9	0.7	8.9	11.9	38.3	2.7	1.5	bdl
MSS- 15	东区	鉴里	1.7	0.6	2.4	32.3	bdl	0.5	0.6	17.3	8.0	33.1	2.3	1.3	bdl
MSS- DFQ1	东区	东风桥	bdl	0.7	2.7	31.8	bdl	3.5	0.3	9.1	12.0	34.6	3.7	1.5	bdl
MSS- DFQ2	东区	东风桥	bdl	1.8	3.4	33.0	bdl	1.7	0.6	10.1	11.4	33.7	3.0	1.1	bdl
MSS- DFQ3	东区	东风桥	bdl	1.9	2.7	25.7	bdl	3.6	0.6	9.7	14.1	35.9	4.6	1.2	bdl
MSS- DFQ4	东区	东风桥	1.4	1.9	2.9	23.2	bdl	7.6	0.5	15.0	12.3	30.4	4.5	0.2	bdl
MSS- DFQ5	东区	东风桥	bdl	2.1	3.0	26.9	bdl	2.0	0.7	13.0	11.9	32.2	7.4	0.9	bdl
MSS- DFQ6	东区	东风桥	bdl	1.1	1.7	25.3	bdl	2.9	0.3	6.9	15.6	38.5	6.2	1.5	bdl
MSS- DFQ7	东区	东风桥	bdl	2.0	3.1	24.9	bdl	4.7	0.7	12.3	14.6	33.0	4.6	bdl	bdl
MSS- DFQ8	东区	东风桥	bdl	3.5	2.5	28.7	bdl	2.8	0.4	18.0	11.2	29.3	2.8	0.9	bdl
MSS- DFQ9	东区	东风桥	bdl	2.5	5.9	33.6	1.1	bdl	2.9	17.4	5.3	25.6	3.1	2.6	bdl
MSS- DFQ10	东区	东风桥	bdl	1.8	3.1	26.1	bdl	2.0	0.7	10.3	15.3	36.2	3.8	0.7	bdl
MSS- DH1	西区	东湖	bdl	2.0	6.2	31.9	0.6	0.4	3.7	9.7	11.7	31.0	0.9	1.9	bdl
MSS- DH2	西区	东湖	2.2	2.1	3.5	35.3	0.7	bdl	2.1	14.5	24.4	12.4	0.8	2.1	bdl
MSS- DH3	西区	东湖	1.9	3.0	3.3	37.1	0.7	bdl	2.4	12.8	13.9	22.1	0.7	2.2	bdl
MSS- DH4	西区	东湖	bdl	3.3	4.5	35.0	1.0	bdl	3.7	12.2	16.2	21.1	1.6	1.4	bdl
MSS- DH5	西区	东湖	bdl	2.4	4.8	34.8	0.9	bdl	3.3	10.8	18.1	19.1	1.4	4.4	bdl
MSS- DH6	西区	东湖	bdl	1.7	3.8	35.0	0.4	bdl	1.5	12.9	22.0	19.1	1.1	2.5	bdl
MSS- DH7	西区	东湖	bdl	1.3	5.6	35.5	0.7	0.7	5.0	7.4	11.9	28.0	1.8	2.3	bdl
MSS- DH8	西区	东湖	0.6	2.1	3.4	33.4	0.7	bdl	2.0	13.1	25.7	16.2	0.9	1.8	bdl
MSS- DH9	西区	东湖	3.5	1.9	3.5	29.3	0.3	bdl	1.6	42.0	12.7	4.6	bdl	0.6	bdl
MSS- DH10	西区	东湖	bdl	1.8	4.3	31.6	1.0	bdl	2.6	16.8	13.7	25.5	1.8	0.7	bdl

表中数据均为质量百分比,当所检测元素低于仪器检出限(约0.1 wt%)时以 bdl 表示。

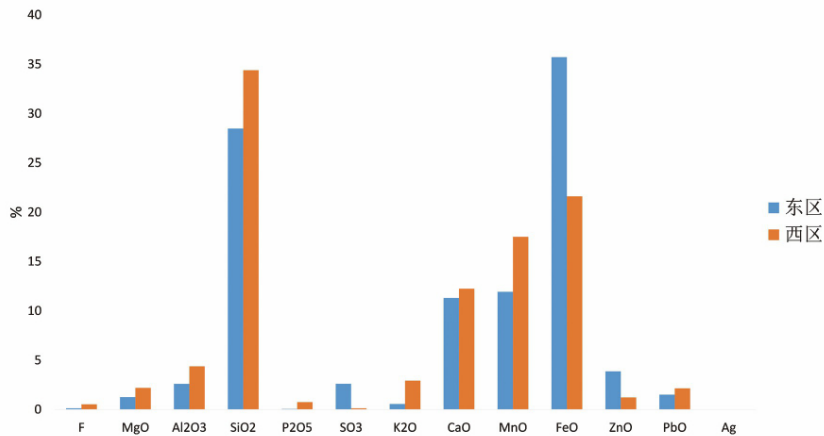
据Fe-S-O相图可知(图六),在氧化气氛下熔融硫化亚铁中可溶解氧,并在冷却过程中析出FeO<sub>x</sub>。东湖炉渣中几乎不见任何硫化物,铅主要赋存于炉渣的玻璃基质中(平均7.1 wt%,最高19 wt%)。三处堆积炉渣中都发现了数量很少的铅金属颗粒,显示冶炼产品与炉渣的分离程度较好。扫描电镜能谱微区分析显示,半数铅金属颗粒中含有高于能谱检出限的Ag(>0.1 wt%),说明冶炼产生的铅锭中应含银,但限于所分析颗粒的数目与尺寸无法对其具体含银量进行评估。

### 三、讨论

本次研究共检测蒙山遗址35件炉渣样品,根据其平均铅含量超过1 wt%且炉渣内包含金属铅颗粒判断这些炉渣均系铅冶炼渣。炉渣中半数铅颗粒银含量超过0.1 wt%,显示冶炼所得的铅中应含银。吉林农安发现两枚蒙山银锭上所刻文字明确记载了该银场在炉户之外还有销银匠这一工种,显示银铅分离与制作银锭应在银场内部完成。然而目前调查资料中并未发现与灰吹法银铅分离步骤有



图四 CaO-FeO-SiO<sub>2</sub>三元相图显示两区域炉渣软熔温度相似 约在1000℃-1150℃之间



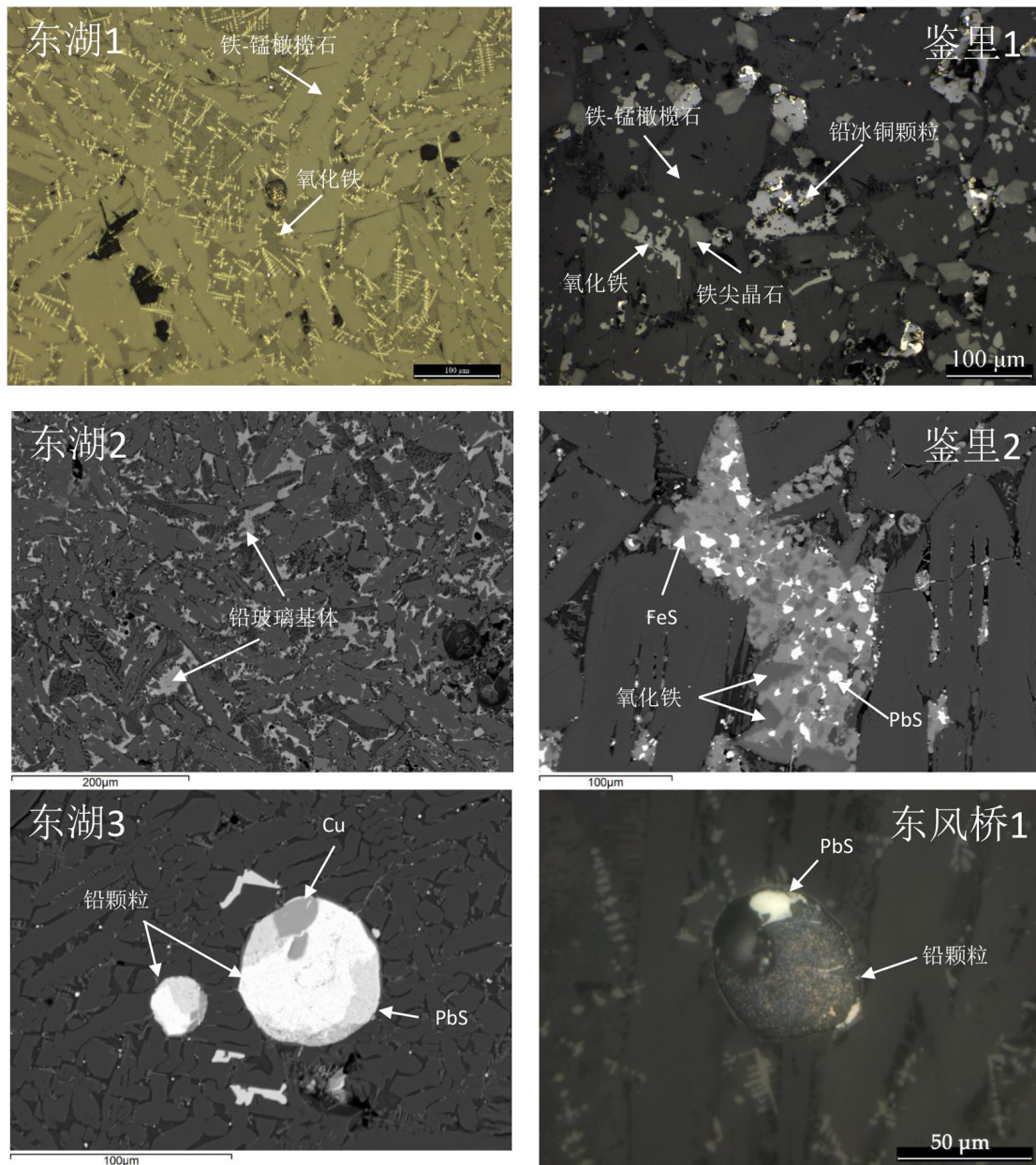
图五 蒙山东西区炉渣平均成分对比

关的遗迹与遗物，因此尚无法判断银铅分离操作的具体地点。

不同堆积地点炉渣在化学成分与微观组织上存在显著差异，显示遗址内部可能存在

不同种类的冶炼技术。依照炉渣类型及堆积地点地理位置可将遗址冶炼区大致分为东西两区，东区包括鉴里、火烧山下和东风桥堆积，而西区为东湖堆积。西区炉渣SO<sub>3</sub>含量较





图六 蒙山东区炉渣中的硫化物颗粒与金属铅颗粒

东湖1: 炉渣基质主要包含铁-锰橄榄石, 氧化铁晶体以及玻璃基质。东湖2: 炉渣扫描电镜背散射电子照片, 玻璃基质中因富含PbO而显示较高亮度。东湖3: 炉渣中包含的铅颗粒, 部分颗粒夹杂有Cu及PbS。鉴里1: 炉渣主要包含铁-锰橄榄石, 氧化铁晶体, 铁尖晶石晶体以及大量铅冰铜颗粒。鉴里2: 炉渣中的铅冰铜颗粒内包含FeS, PbS及数量较多氧化铁晶体。东风桥1: 炉渣内包含的铅颗粒及其中的PbS夹杂。

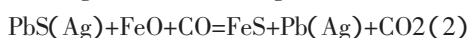
低, 炉渣中只发现橄榄石、氧化铁、铅颗粒和玻璃基质, 冶炼产物应只有含银铅锭与炉渣。东区炉渣的平均SO<sub>3</sub>含量为2.5 wt%, 且炉渣中发现大量铅冰铜颗粒, 因此推测冶炼产物

中除含银铅锭外还产生了较大量的铅冰铜副产物。根据炉渣中夹杂铅冰铜颗粒的成分推测, 此铅冰铜主要包含FeS, PbS和ZnS。

化学成分及矿物组成与西区炉渣类似的

古代银铅冶炼炉渣还曾发现于河南新郑郑韩故城遗址<sup>[14]</sup>、山东临淄石佛堂遗址<sup>[15]</sup>、古希腊时期的劳力昂(Laurion)、Siphnos<sup>[16]</sup>、捷克的Přibram<sup>[17]</sup>、德国威斯特伐利亚的Siegerland<sup>[18]</sup>、德国海德堡的Wiesloch<sup>[19]</sup>、英国的Combe Martin、印度的Dariba和Agucha<sup>[20]</sup>以及巴基斯坦的Nal和Khuzdar<sup>[21]</sup>等遗址。以上所述炉渣的共同特点为S含量很低( $SO_3 < 1.5 \text{ wt}\%$ )、PbO含量波动较大,总体低于25 wt%(图七)。根据以往研究,这一类型的炉渣主要对应于烧结—还原熔炼法。此法由于铅矿石在烧结过程中脱硫,其冶炼炉渣中的硫含量较低,Zn、Fe、Mn等伴生元素都形成氧化物进入炉渣。并且由于脱硫与还原两步分开进行,还原熔炼中可施加较强的还原性气氛,因而使得炉渣中PbO含量降低。烧结—还原熔炼法是世界范围内最为常见的古代铅冶炼方法,时至今日仍在被广泛沿用。

化学成分与蒙山东区炉渣接近的古代炼铅渣发现较少,目前仅见于江西上饶包家<sup>[22]</sup>、重庆石柱<sup>[23]</sup>、山西翼城<sup>[24]</sup>、广西贺县铁屎岭<sup>[25]</sup>以及奥地利巴德—佳斯坦地区的Angertal遗址<sup>[26]</sup>。这些炉渣的共同特点为S含量较高( $SO_3 > 2 \text{ wt}\%$ )、且PbO含量很低( $< 6 \text{ wt}\%$ )。 $SO_3$ -PbO散点图中此类炉渣与前述的烧结—还原熔炼法炉渣明显处于不同区域(图七),显示其冶炼工艺可能不同。几处遗址中,江西上饶包家遗址冶炼技术经过较为系统研究,且其炉渣的化学成分与蒙山东区炉渣最为接近。包家炉渣的平均 $SO_3$ 含量约为2.5 wt%,对其炉渣进行显微分析时发现其中含有大量金属铁颗粒及FeS含量很高的铅冰铜颗粒,因此判断其冶炼技术为铁还原沉淀熔炼法<sup>[27]</sup>。此技术与烧结—还原熔炼法的主要区别在于铅矿石不需要经过焙烧脱硫,含硫矿石通过与金属铁或含铁氧化物直接置换反应得到金属铅,其反应过程可表示为:



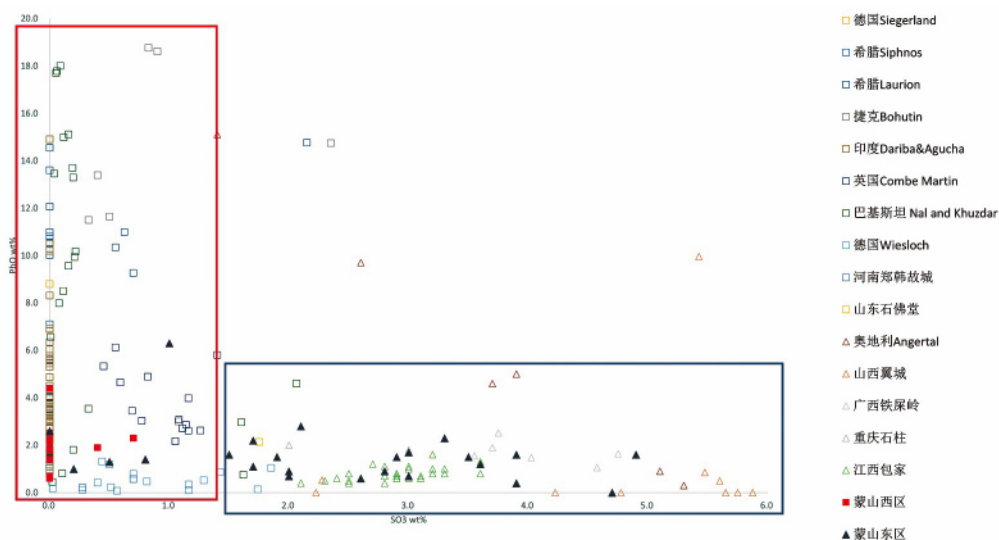
反应产生的FeS在高Fe炉渣中溶解度较

高,无法完全分离,造成炉渣中S含量较高,且物相组成中出现大量含FeS的铅冰铜颗粒。蒙山东区炉渣在化学成分与物相组成上符合以上两特征,因此判断其冶炼技术可能与铁还原沉淀熔炼法较为接近。然而所分析的25件东区炉渣中并未见金属铁颗粒,且铅冰铜颗粒中多见氧化铁晶体,其冶炼过程可能与反应(2)较为接近。模拟实验研究已经证明,即使只使用富含氧化铁的块炼铁炉渣与硫化铅进行反应,也可以成功获得金属铅,且所获铅冰铜中常见氧化铁夹杂物<sup>[28]</sup>。综上所述,蒙山遗址内部可能曾经存在两种不同的冶炼技术,西区主要以烧结—还原熔炼法为主,东区则以铁还原沉淀熔炼法为主。

铁还原沉淀熔炼法在我国古代应用历史的研究目前处于起步阶段,文献中有关此法最早的记载为清乾隆年间,且只见其被应用于坩埚炼铅而非竖炉炼铅工艺中<sup>[29]</sup>。世界范围内有关铁还原沉淀熔炼法应用于竖炉冶炼的记载最早见于19世纪英国冶金学家John Percy所著的《Metallurgy of Lead》,其中详细记述了德国Upper Harz地区18世纪冶炼工匠使用此法从硫化铅矿石中提铅的过程<sup>[30]</sup>。19世纪以后出版多部冶金学著作中都记载了在炼铅竖炉中加入金属铁促进硫化铅还原<sup>[31]</sup>,并提及可使用铁精炼渣(finishing slag)、铁矿石以及焙烧过的铅冰铜等富含氧化铁的原料代替金属铁进行反应<sup>[32]</sup>。

18世纪以前有关铁还原沉淀熔炼法的文献资料极为匮乏,目前只见印度14世纪文献Dhātūpatti对此法有过记载<sup>[33]</sup>。蒙山东区炉渣及上饶包家遗址炉渣的冶金考古研究将此法在中国出现的时间大为提前,为探索这一技术在中国古代乃至世界范围内的发明与传播提供了新的材料。保守估计此区域内三处堆积的炉渣总量可接近百万吨,所反映冶炼规模十分可观。在如此大规模的生产中使用铁还原沉淀熔炼法尚数首见,而炉渣中较低的PbO含量显示此地区工匠已经能够较为熟练地运用此法。相对于历史更为悠久的烧结—





图七 蒙山东、西区炉渣与其他多处古代银铅冶炼遗址的炉渣的SO<sub>3</sub>、PbO含量散点分布图。红框内炉渣SO<sub>3</sub>含量较低,推测为烧结-还原冶炼技术产物。蓝框内炉渣SO<sub>3</sub>含量较高,推测为铁还原沉淀熔炼法产物。

还原熔炼法,铁还原沉淀熔炼法的一大优势是不需要对含银硫化铅矿石进行焙烧,因而减少了银在焙烧步骤中的损失。20世纪初,冶金学家们似乎已经取得共识,当铅矿中的银含量较高时不宜对其进行焙烧。Heinrich Hofman曾总结当矿石中银含量达到100盎司每吨时(约0.28%),不宜对矿石进行焙烧,因为这会使得大量银随着焙烧中产生的烟气流失,从而降低银的提取效率<sup>[34]</sup>。Plattner也通过实验证明,焙烧含银矿石粉末时银的流失量会随着焙烧时间的延长显著增加<sup>[35]</sup>。依此看来,不需要焙烧矿石的铁还原沉淀熔炼法在处理含银较高的富矿时具有优势,可能成为古代工匠选择此法进行冶炼的一个主要动因。

蒙山遗址东西区两种冶炼技术间的相互关系目前仍不明晰。一种假设是两种技术的使用时代有别,且两技术间存在演进与替代关系。文献资料显示此遗址的使用时间包括南宋与元两个主要阶段,冶炼技术可能在这一较长时间段内由于多种内外因素的影响而产生变化与进步。尤其考虑到元代时蒙山银场较高的白银课额,白银生产的效率也许在这一时期变得更加重要。相比烧结-还原熔炼

法,铁还原沉淀熔炼具有明显优势,故而成为遗址的主要冶炼技术。一个可类比的案例为英格兰南部的德文郡(Devon)地区的银铅生产业。13世纪晚期此地区开始使用形制较小的敞炉(bole hearth)冶炼银铅,以木柴为主要燃料。随着经济的发展,白银对于英国社会尤其是王室的重要性不断增加,德文郡(Devon)地区银铅冶炼规模与资本投入也不断加大,工匠逐渐在15世纪末引入称为“fynnyngmyll”的水力鼓风竖炉,以利用品位更低的矿石以及重熔早期冶炼所遗留的高铅炉渣。16世纪以后又出现了敞炉(ore hearth)-竖炉(slag hearth)结合的技术,将敞炉冶炼生成的高铅炉渣进一步在竖炉中冶炼,提高冶炼效率<sup>[36]</sup>。17世纪以后该地区开始用煤作为燃料冶炼以支持更大规模的生产<sup>[37]</sup>。这一技术演进过程显示,同一地区随着社会需求的增加以及冶炼技术的发展,工匠的技术选择也会相应变化。

另一种可能性是,在蒙山遗址的某个历史阶段内两种技术曾经并存。蒙山地区除了文献记载较为详细的官营白银生产业之外,还可能存在着较大规模的私营冶铸活动,尤其是蒙山提举司裁撤以后的晚期阶段。由于工艺

水平与生产管理的差异,两区域工匠的冶炼技术选择也有不同。对这一问题的继续探索需要依靠进一步的田野考古发掘与年代测定,解决两区域各炉渣堆积的形成时间问题。

#### 四、结语

本文通过考古遗址调查与冶炼炉渣科技分析对蒙山遗址古代银铅冶炼技术进行了研究。根据炉渣分析结果判定蒙山遗址内部至少存在两种不同的铅冶炼技术,西区主要使用烧结—还原熔炼法,而东区主要使用铁还原沉淀熔炼法。东区数量巨大的炉渣堆积显示铁还原沉淀熔炼法至迟在元代时已在本遗址得到了广泛应用,而选择此技术的原因很可能是为了在处理含银量较高的铅矿石时减少银的损失,提高提取效率。依据现有资料难以判断遗址东西两区是否存在年代上的早晚关系。因此要判断此两种冶炼技术是否在本遗址存在演进替代关系仍需对几处炉渣堆积进行进一步的考古发掘与年代测定工作。

附记:本文为国家文物局“江西古代冶金遗址的调查与研究”,国家自然科学基金(项目编号:51704023)。本研究得到江西省文物考古研究所、上饶县广播电视文化局的大力支持,特此表示感谢。

注释:

- [1]谢旻等:《江西通志—清光绪六年重修本》,四库总目提要。
- [2]王庆莘:《上高县蒙山银矿遗址》,《南方文物》1983年第4期,第35~36页。
- [3]许有壬:《至正集卷七五》,影音文渊阁四库全书。
- [4]柯劭忞:《新元史·食货志》,上海古籍出版社,1989年。
- [5]吴小红:《元代瑞州路蒙山银场的生产和管理》,《江西师范大学学报(社会科学版)》2007年第6期,第71~76页。
- [6]谷潜:《元代蒙山岁课银锭的发现和研究》,《中国钱币》1986年第3期,第27~35页。
- [7]夏湘蓉、李仲均、王根元:《中国矿业开发史》,地质出版社,1980年,第129~130页,同注[5]。
- [8]韩汝玢、柯俊主编:《中国科学技术史—矿冶卷》,科学出版社,2007年,第316~327页。
- [9]胡春涛:《江西蒙山古银矿小考》,《江西文物》1990年第3期,第32~38页。

[10]江西地质调查局902队:《江西新余—上高蒙山地区1/5万地质矿产普查报告》,国家地质档案馆X00060182,1977年;廖明和:《江西蒙山地区非—多金属矿床地质特征与矿床成因》,《地球科学前沿》2012年第2期,第211~216页。

[11]南延宗、杨振翰:《江西上高蒙山地址矿产》,《江西省地质调查所地质汇刊》1941年总第6号,第1~24页。

[12]赣西地质调查队:《江西省上高县太子壁锡多金属矿区初查补充设计》,国家地质档案馆X00067019,1984年。

[13]Nakanishi, T. and Izawa, E. 2014. Evolution of silver-smelting technology of Japan in the middle of sixteenth century. *ISIJ International*, 54 (5), 1093~1097.

[14]李延祥、刘海宇、杜宁、蔡全法:《郑韩故城梳妆台出土炉渣初步研究》,《中国国家博物馆馆刊》2012年第2期,第126~131页。

[15]李延祥、杜宁、李建西:《山东临淄齐国故城石佛堂炼铜遗存的调查与研究》,《华夏考古》2014年第1期,第3~10页。

[16]Kassianidou, V. 1992. Monte Romero (Huelva), a Silver Production Workshop of the Tartessian Period in SW Spain. PhD Thesis, UCL Institute of Archaeology, 47~69.

[17]Ettler, V., Cervinka, R. and Johan, Z. 2009. Mineralogy of medieval slags from lead and silver smelting (Bohutín, Příbram District, Czech Republic): towards estimation of historical smelting conditions. *Archaeometry*, 51 (6), 987~1007.

[18]Rehren Th., Schneider, J., Bartels, C. 1999. Medieval lead-silver smelting in the Siegerland, West Germany. *Journal of Historical Metallurgy Society*, 33 (2), 73~84.

[19]Str bele, F., Wenzel, T. and Kronz, A. 2010. Mineralogical and geochemical characterization of high-medieval lead-silver smelting slags from Wiesloch near Heidelberg (Germany)—an approach to process reconstruction. *ArchaeolAnthropolSci*, 2, 191~215.

[20]Craddock, P. T., Cartwright, C., Eckstein, K., Freestone, I. C., Gurjar, L., Hook, D., Middleton, A. and Willies, L. 2013. Simple sophistication: Mauryan silver production in northwest India. *The British Museum Technical Research Bulletin*, 7, 79~93.

[21]Siddiqui, S. A. and Sharp, W. E. 1993. Lead smelting slags near Nal, Balochistan province, Pakistan. *Geoarchaeology*, 8(5), 395~411.

[22]刘思然、陈建立、徐长青、Rehren Thilo:《西上饒包家金银冶炼遗址的冶金考古调查与研究》,《南方文物》2016年第1期,第122~131页。

[23]Xie, P. and Rehren, Th. 2009. Scientific analysis of lead-silver smelting slag from two sites in China. In: Rehren, Th. & Mei, J. (eds.) *Metallurgy and Civilisation: Eurasia and Beyond*. London: Archetype, pp 177~183.

[24]程群、李延祥、李建西等:《山西省翼城县东南两处遗址的炉渣研究》,《中国国家博物馆馆刊》2012年第2期,第132~139页。

[25]李延祥、周卫荣：《广西贺县铁屎岭遗址宋代锡铅及含锡铁钱冶炼技术初步研究》《有色金属》2000年第2期，第91~95页。

[26]Mongiatti, A., Rehren, Th., Martínón-Torres, M. and Cech, Brigitte. 2009. Smelting of gold and silver ores in Renaissance Austria. In Giunilia-Mair, A (ed). *Archaeometallurgy in Europe II 2007*. Milan: Associazione Italiana di Metallurgia, pp 60~67.

[27]Liu, S., Rehren, Th., Chen, J., Xu, C., Venunan, P., Larreina-Garcia, D., Martínón-Torres, M. 2015. Bullion production in imperial China and its significance for sulphide ore smelting world-wide. *Journal of Archaeological Science*, 55, 151~165.

[28]Liu, S. 2015. Gold and silver production in imperial China—Technological choices in their social—economic and environmental settings. PhD Thesis. UCL Institute of Archaeology, 222~229.

[29]周文丽、刘思然、刘海锋、陈建立：《中国传统坩埚炼铅技术初探》《自然科学史研究》2014年第2期，第201~215页。

[30]Percy, J. 1870. *The Metallurgy of Lead*. London:

John Murray, 357~384.

[31]Eissler, M. 2013[1891]. *The Metallurgy of Argentiferous Lead*. London: Forgotten Books, 56.

[32]同注[29]。

[33]Dube, R. K. 2006. The extraction of lead from its ores by the iron-reduction process—a historical perspective. *JOM*, 58(10), 18~23.

[34]Hofman, H.O. 2013[1918], *Metallurgy of Lead*. London: Forgotten Book, 315.

[35]Plattner, K. 1856. On the causes of the serious loss of silver which occasionally takes place during the roasting of silver ores. *Journal of the Franklin Institute*, 62 (3), 201~203.

[36]Claughton, P. 1994. Silver—Lead a restricted resource: technological choice in the Devon mines. *Bulletin of the Peak District Mines Historical Society* 14 (3), 54~59. Claughton, P. and Smart, C. 2010. The Crown silver mines in Devon: capital, labour and landscape in the late medieval period. *Historical Metallurgy* 44(2), 112~125

[37]Paynter, S., Claughton, P. and Dunkerley, T. 2010. Further work on residues from lead/silver smelting at Combe Martin, North Devon. *Historical Metallurgy*, 44(2), 104~111.

## **A Study of Ancient Silver and Lead Smelting at the Shanggao Mengshan Site in Jiangxi**

Liu Siran; Chen Jianli; Xu Changqing; Thilo Rehren  
(Beijing 100083) (Nanchang, Jiangxi 330025) (London, UK)

**Abstract:** The Shanggao Mengshan site in Jiangxi was an important site for large scale silver and lead production in the Song and Yuan periods. Historical sources record a great deal about the period of its rise and fall, annual quotas and the organization of production at the site, but say nothing of the production techniques. This paper studies the slag produced at multiple sites around Mengshan and compares it with several silver and lead production sites from around the world. In this way, silver and lead metallurgical techniques at the Mengshan site can be reconstructed. The area west of Mengshan mainly used sintering-reduction smelting to smelt silver and lead deposits; the eastern side used iron reduction precipitation smelting. The advantage of the iron reduction precipitation smelting method is that one can avoid dead roasting the silver and iron ore, thus decreasing the loss of silver during this step and increasing the efficiency of silver extraction. As there are presently no data to date the smelting activities of these two areas, we are unable to determine the relationship of these two types of techniques.

**Keywords:** Shanggao Mengshan site; Song Yuan period; Silver and lead smelting technology

(责任编辑、校对: 段姝杉)