资阳汉代铜车马铸造工艺研究

郑　芦，马勤松，杨丽君，樊　斌，王　冲，郭建波
（四川省文物考古研究院，四川成都 610041）

摘要：资阳铜车马出土后，学者们从考古、保护修复等方面做了详尽研究，针对铜车马的制作工艺鲜有提及。本文借助便携X射线探伤仪、X射线荧光、扫描电镜和金相显微镜等，对铜车马的内部结构、基体成分和金属物相做了分析研究。结果表明，铜车马的马身、车轮和车身等结构单元是采用陶范铸造，先铸造各部位单体零件，然后采用榫卯结构和二次铸接的方式进行组合拼接。马腿中铁芯骨的作用为增强马腿的强度和支撑力。

关键词：铜车马；芯骨；分铸；文化交流

作者简介：
郑 芦（1995–），女，硕士，主要从事金属文物保护修复与科技研究。电话：18893782600，E-mai：1633127502@qq.com
通信作者：
郭建波，男，文博副研究馆员，硕士，E-mai：834682583@qq.com

中图分类号：TG146.1
文献标识码：A
文章编号：1001-4977（2025）04-0455-08

基金项目：
国家重点研发计划“移动式文物 X 射线断层成像关键技术与装备的研发及应用”（2023YFF0906600）。
收稿日期：
2024–10–02 收到初稿，
2025–02–20 收到修订稿。

2005年，四川资阳市雁江区雁江镇资溪村的兰家坡汉墓M1中，出土一驾铜车马（M1A：1），如图1所示，车型为轺车，双辕、单轴、双毂、双轮、横长舆、单衡和单轭，还有軎、伏兔、轴饰、笭、盖弓帽、盖杠管箍、加固杆和鞁饰等附件[1]。铜车马一经出土受到学者关注，并陆续有多篇研究文章见刊，包括铜车马的出土情况、年代、功用和组装工艺等研究内容[2]。铜车马提取后四川省文物考古研究院即时成立保护修复组，对其进行保护修复。修复过程中进行详细记录铜车马保存状况、修复材料、方法及制作工艺，并撰写成文予以发表[3]。这对本文讨论铜车马工艺问题有很大裨益。

考古发现汉晋时期铜马集中在甘肃和西南地区，以铜车马随葬的习俗源于战国，至汉代普遍在墓葬中随葬车马冥明器[4]。兰家坡M1A穴出土的铜车马为新莽时期的轺车，体量大，结构复杂，是直辕发展为双辕轺车的成熟标准形态，是汉晋时期双曲辕轺车模型的典型代表。因此，研究兰家坡M1A穴出土铜车马的铸造工艺对全面了解汉晋时期车舆马具的结构、制作工艺和功能等具有重要意义。文章将对资阳铜车马的基体成分和制作工艺进行剖析，与其他地区出土的铜车马进行比较，以期描绘出四川地区汉代铜车马的特点。

图1　资阳铜车马（头部为研究性复原件）
Fig. 1 Bronze horse and carriage unearthed from Ziyang city（the head is a research restoration）

1　样品信息及分析方法

1.1　样品信息

为了更好地了解铜车马的合金成分与制作工艺，本次分析检测对象取8个金属样

品，所取金属样品皆取自器物残破缺损处，在能够满足科学分析的条件下取最小尺寸样，取样信息见表1。

表1 铜车马取样表
Tab. 1 Sampling of the bronze chariot and horses

样品编号	样品类型	取样位置
TCM1	金属基体	马身内部前后铸接处
TCM2	金属基体	马右前腿内侧铸接处
TCM3	金属基体	马左前腿内侧铸接处
TCM4	金属基体	车厢
TCM5	金属基体	苓盒
TCM6	金属基体	车轮
TCM7	金属基体	人像内部披缝
TCM8	金属基体	马右前腿内部铁芯

1.2 分析方法

本次检测主要针对青铜器基体成分进行分析，采用的技术手段包括元素成分分析和金相组织分析。

1.2.1 合金成分分析

合金成分分析使用Horiba XGT-9000SL微区X射线荧光光谱仪与德国Zeiss EVO 18扫描电子显微镜配置牛津Ultim Max型X 射线能谱仪。

微区X射线荧光光谱仪测试条件为高压50 kV，电流1 000 μA，点扫描，120 s，分析结果经归一化处理，经多次扫描分析样品，其成分为多个视场分析结果的平均值。

样品经抛光、喷碳后，使用扫描电子显微镜进行背散射图像观察，并使用能谱仪进行能谱分析。扫描时选择样品内部未经锈蚀的区域并尽量增大扫描面积。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20 kV，工作距离6~10 mm，激发时间≥60 s。考虑到铜器样品存在成分偏析和锈蚀等因素，分析时尽量选取锈蚀较少的不同部位进行多次分析，而后取平均值代表该样品的成分组成。分析结果经归一化处理，成分含量以质量分数表示。

1.2.2 金相组织分析

铜质样品金相组织分析使用ZEISS Axio Imager. M2m 金相显微镜，观测条件为5~50 × 物镜，BF视场下观察并拍摄。金相观察前，按照标准的试样制作方法，使用镶样树脂冷镶，将表1样品沿截面包埋，再使用Stuers Tegramin-25磨抛机按金相样品制作的标准步骤进行打磨和抛光。先在金相显微镜下观察未侵蚀样品的形貌及夹杂物等情况，经3%三氯化铁盐酸酒精溶液侵蚀后，进行金相组织观察和拍照。通过金相组织观察可以判断青铜器的制作工艺是铸造还是锻造，有无铸后受热或铸后加工，探究金属的晶界、分布状况及其形态，并观察是否有非金属类的夹杂物的情况等基本信息。

铁质样品包埋方法与铜样品相同，浸蚀使用2%硝酸酒精溶液，侵蚀前先观察有无夹杂物。此次分析时，在打磨抛光过程中发现铁质基体已锈蚀，无法获取金相信息。

2 分析结果

2.1 合金成分

从表2中EDS的分析结果可以看出，铜质样品材质皆为铅锡青铜，7件铜质样品的铜平均含量为81.2%，锡平均含量为5.7%，铅平均含量为13.1%。可见铜车马整体为低锡高铅配比。TCM8为铁质芯骨，经XRF检测铁含量为100%。

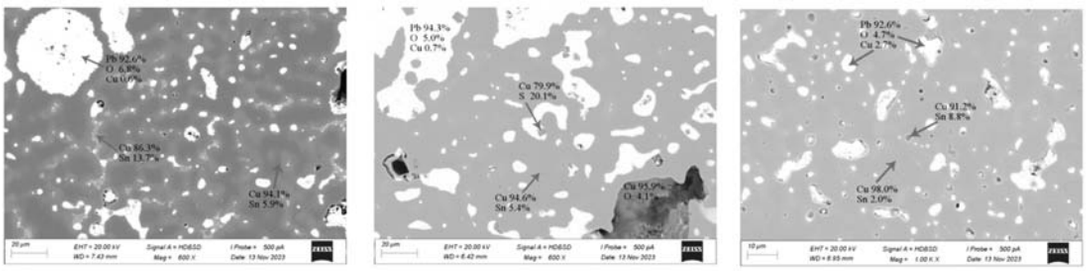
表2 EDS检测结果
Tab. 2 EDS test results

样品编号	主要元素含量（wt%）			材质
	Cu	Sn	Pb	
TCM1	75.2	7.5	17.2	Cu-Sn-Pb
TCM2	79.2	4.6	16.2	Cu-Sn-Pb
TCM3	82.6	5.3	12.1	Cu-Sn-Pb
TCM4	85.9	4.7	9.4	Cu-Sn-Pb
TCM5	76.5	8.6	14.9	Cu-Sn-Pb
TCM6	75.8	5.0	19.2	Cu-Sn-Pb
TCM7	78.1	8.3	13.6	Cu-Sn-Pb

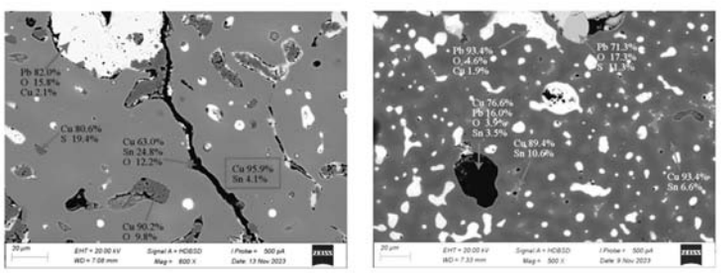
此外，通过扫描电镜及能谱数据分析发现，7件铜样品中有5件发现了非金属夹杂物，夹杂物以硫化物为主，主要与铅一起分布。从图2的TCM2、TCM6发现的硫化物夹杂中硫含量均为20.1%，样品TCM4硫化物夹杂中硫含量为19.4%，样品TCM5硫化物夹杂中硫含量为11.3%，样品TCM7硫化物夹杂中硫含量为18.5%。硫化物夹杂的存在，显示铜冶炼过程中有硫化矿物的加入，中国古代铜器显微组织中多有铜的硫化物存在，硫化物含硫一般在25%左右，与硫化亚铜（Cu_2S）中的硫含量20%相近[5]。

2.2 金相组织

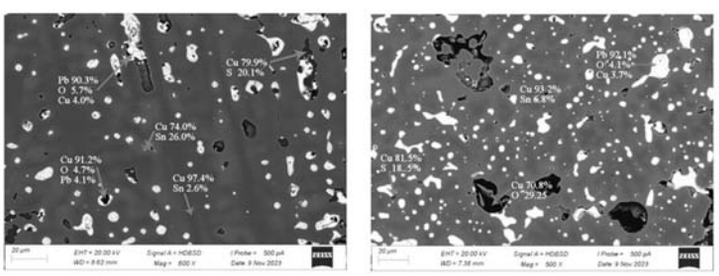
根据金相组织观察结果（表3）显示，该件铜车马为铸造成形，7件铜样品基体为铜锡 α 固溶体枝晶组织，均可见较高含量的铅，呈颗粒状、条索状、多角状、球状分布于晶间，样品TCM2、TCM4、TCM5、



（a）TCM1　　（b）TCM2　　（c）TCM3



（d）TCM4　　（e）TCM5



（f）TCM6　　（g）TCM7

图2　TCM1-7背散射电子图像

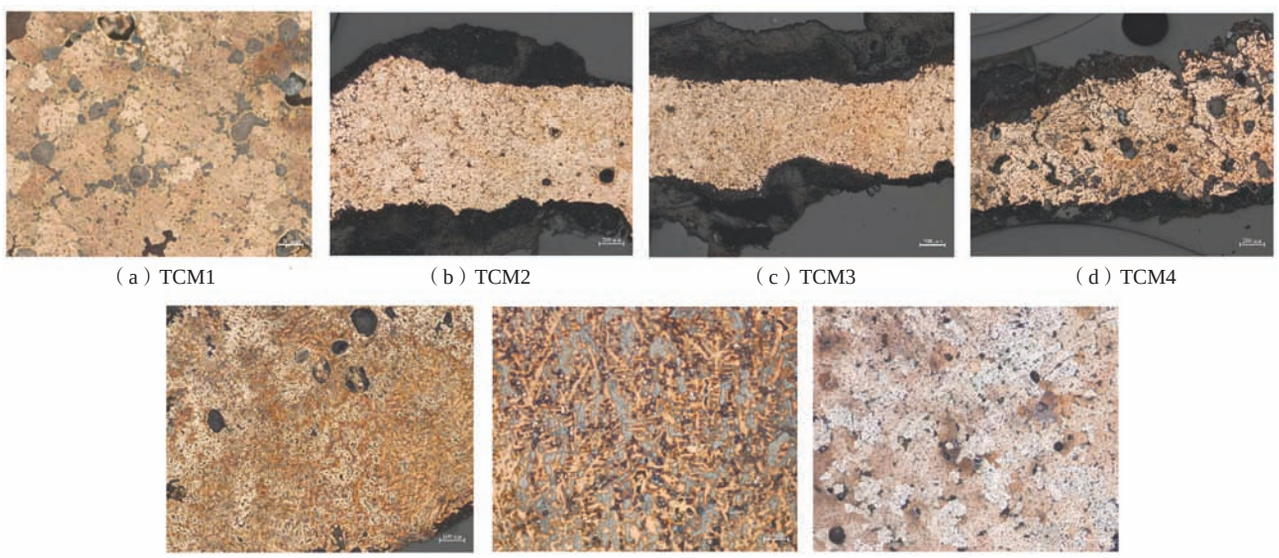
Fig. 2 Backscattered electron images of the TCM1-7

表3　金相组织观察结果

Tab. 3 Metallographic microstructures observations

样品编号	金相组织观察记录	组织形态	材质
TCM1	基体为铜锡α固溶体枝晶组织，晶间零星分布有（α+δ）共析组织，铅呈颗粒状、条索状、椭球状存在于晶间。	铸造	铅锡青铜
TCM2	基体为铜锡α固溶体枝晶组织，铅呈颗粒状、岛状和椭球状分布于晶间，硫化物呈颗粒状多与铅夹杂伴生。	铸造	铅锡青铜
TCM3	基体为铜锡α固溶体枝晶组织，铅呈颗粒状、条索状分布于晶间。	铸造	铅锡青铜
TCM4	基体为铜锡α固溶体枝晶组织，铅呈颗粒状、条索状分布于晶间，硫化物呈颗粒状多与铅夹杂伴生，样品轻微锈蚀，有铸造缺陷。	铸造	铅锡青铜
TCM5	基体为铜锡α固溶体枝晶组织，铅呈颗粒状、多角状和球状分布于晶间，硫化物呈颗粒状多与铅夹杂伴生，轻微锈蚀，有铸造缺陷。	铸造	铅锡青铜
TCM6	基体为铜锡α固溶体枝晶组织，偏析明显，枝晶细长，铅呈颗粒状、多角状填充于晶间，硫化物呈颗粒状多与铅夹杂伴生，样品轻微锈蚀。	铸造	铅锡青铜
TCM7	基体为铜锡α固溶体枝晶组织，铅呈颗粒状、多角状、球状分布于晶间，有铸造缺陷。	铸造	铅锡青铜

TCM6存在硫化物夹杂多呈颗粒状与铅伴生。其中TCM1、TCM2、TCM3所选部位为铸接位置，组织形态为铸造组织，证明器物各部位在连接过程中使用铜液以铸接的方式进行连接。金相照片见图3。



（a）TCM1　（b）TCM2　（c）TCM3　（d）TCM4

（e）TCM5　（f）TCM6　（g）TCM7

图3　TCM1-7金相照片

Fig. 3 Metallographic images of the TCM1-7

3　铸造工艺

通过表面观察和高分辨率便携式数字X射线DR检测系统（德国Yxlon Smart Evo 300D），判断铸造方法、连接工艺和内部结构等信息。

青铜器的铸造方法有范铸法与失蜡法，范铸法是古代铸造的基础，分铸法是指器物的主体与附件分开铸造或一件青铜器整体经先后两次以上铸造而成的一种铸造工艺。结构复杂的青铜器可通过分铸铸接、焊接、榫卯结构的方式实现不同构件之间的连接。其中焊接是通过特定的物理化学过程，使两个分离的物体产生原子间结合而连接的成形方法，钎焊是将熔点低于被焊金属的钎料熔化之后，填充在两构件间隙，并与被焊金属相互扩散实现连接[6]。通过研究三星堆出土青铜器的铸造工艺，可以认为，通过在模具中浇注铜液使两部分结合的现象属于铸造连接[7]。这种方式与铸接及范铸技术相一致，是通过浇注铜液来实现不同构件之间的连接，因此可将其称为铸造连接。

结合表2的成分数据分析可知，TCM1、TCM2、TCM3为连接部位，基体的成分与器体的成分基本一致，均为铜锡铅三元合金。且样品TCM1、TCM2、TCM3的金相组织也表明器物在连接过程中使用铜液以铸接的方式进行连接。这一特性明显区别于钎焊中所用焊料的成分。因此，本文认为铜车马中连接部位的连接方式属于铸接工艺。

从外部观察，铜马分为脖颈、马身、马尾及四条马腿；铜车分为车辕、衡、轭、舆、轴、毂、軎、轮、伏兔、苓盒和加固杆等。通过肉眼观察与X射线图像显示，可以明显看出，其铸造工艺为陶范铸接，先将车与马的各部位分别铸成单体铸件，再两两通过铸接或铆接的方式进行连接。下面分构造单元介绍铜车马制作工艺。

3.1　铜马

马头亡佚，脖颈前端为圆形榫头，与马头连接方式应为榫卯结构。脖颈下侧与马身前端各有一方形榫头与卯眼，尺寸大小相吻合，脖颈刚好能插入马身，且可分离，二者采用榫卯结构连接（图4、图5）。马身于腰部分为前后两部分，前身与后身先分铸成两个单体，再铸接成完整的马身，在腰部可见清晰的二次

图4　脖颈下侧榫头

Fig. 4 The tenon on the lower side of the neck

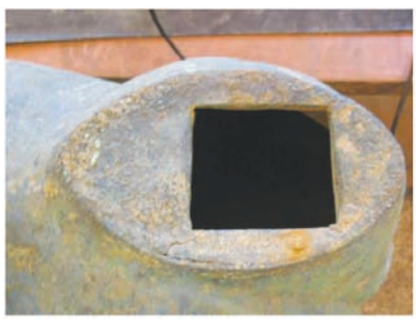


图5　马身榫眼
Fig. 5 Horse body mortise

铸接痕迹，接口内侧也残留有二次铸造的毛刺（图6、图7）。另铸四条腿足，铸造时为了强化腿部强度和支撑力在腿内腔范土中加一根的铁芯（图8），浇注铜液

图6　马身连接处（外部）
Fig. 6 Horse body junction（outside）

图7　马身连接处（内部）
Fig. 7 Horse's body junction（internal）

图8　马腿内铁芯
Fig. 8 Iron core inside the horse's leg

铸成铁骨铜腿，再与马身铸接为一体。马尾也是先铸成单体铸件，再与马身通过榫卯结构相连接（图9）。

图9　马尾连接
Fig. 9 Ponytail connection

3.2　铜车

铜车的双辕为空心，横截面呈长方形，辕内残留范土，双辕均分段铸造，辕身中间均有二次接铸的痕迹。双辕前端安装衡，衡为空心圆管，衡与辕采用铸接方式连接。衡正中安装“人”字形轭，轭首呈尖细圆柱体，轭身呈圆台形，其横截面近扁椭圆形，轭首与衡正中以铸接方式相连，拟绑缚状。每侧轭軥、辕曲颈末端的内侧安装加固杆，加固杆与轭軥和辕相接处均为铸接。毂呈横置的空心圆壶形，毂外缘留出一圈榫眼以安装辐条，辐条以直接插入毂外缘榫眼的方式相接，插入部分较长，以固定辐条（图10、图11）。双毂之间横贯轴，轴呈中间粗两端细的空心圆柱体，轴内范土保存完好，轴以两段分铸，中间对接处留有接铸痕迹。

图10　毂外缘榫眼
Fig. 10 Outer edge of the hub tenon

轮牙空心，牙内残存有范土，横截面呈五边形，通过X光射线图像清晰可见，每个轮牙均为分段铸造，左轮牙分17段，右轮牙分18段。每段轮牙呈圆弧形，段与段之间通过铸接方式连接，最终拼接成一个完整的轮牙。辐条与轮牙的连接采用插接的方式。在每段轮牙的中间位置，先预设浅凹坑，将每节辐条端头插

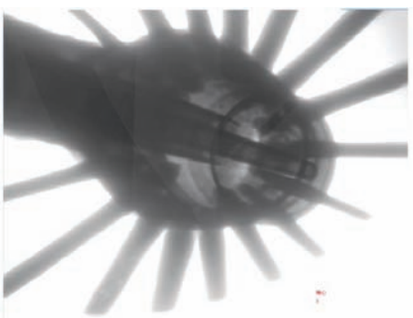


图11　辐条安装
Fig. 11 Spoke mounting

入到凹坑内，即可实现插接。车毂固定辐条，辐条连接轮牙，这样车毂、辐条、轮牙就组成一个完整的车轮（图12）。

前軨立板与右軨于舆内连接处残留有二次接铸的铜液痕迹。笭底板外壁正中、左右侧面有明显的合范线。

图12　右轮局部X射线探伤照片
Fig. 12 Partial X-ray flaw detection photos of the right wheel

3.3　铜驭手

根据铜驭手上残留的范线分析，其身体左右两侧为分范界面。由于驭手高度较低，因此外范仅分为前后两块进行浇注。从X光射线图像可见垫片的痕迹（图13）。驭手的身体为中空结构，头腔与腹腔相连。依据内部范线的分布，驭手内芯分为四段拼接，分别为头部、颈部至腹中部、腹中部至腹下部，以及腿部（图14）。驭手的双手为实心结构，采用单独铸造并一次成形。手臂与身体的连接方式是通过在手臂位置预留孔洞，使手部可以直接插入完成连接。两者并非永久固定，而是可拆卸设计（图15）。

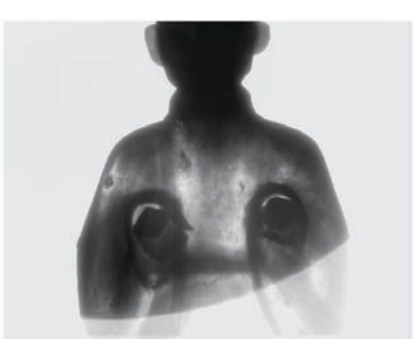


图13　铜驭手垫片
Fig. 13 Copper rider gasket

图14　铜驭手身体
Fig. 14 Copper rider body

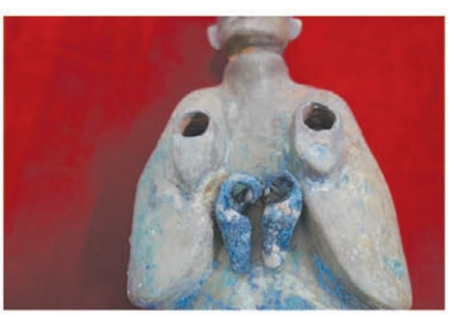


图15　铜驭手手部连接
Fig. 15 Copper rider hand connection

4　讨论

4.1　马腿中芯骨的使用

汉晋时期铜车马出土范围主要有甘肃、四川和贵州等地。根据正式公布的考古材料，贵州兴仁县交乐墓群的M6出土的铜车马，铜马分为头、耳、颈、身和腿等共11个部件分段铸造，后组装套合而成[8]；M19出土的驾车俑由左、右手和躯体三部分套合而成[9]。贵州兴义、兴仁汉墓的M8：33，铜马分段铸造，装配而成，分头、耳、颈、身躯、尾和四肢十一段，除双耳外其余皆为砂模空心铸造，装配接头为子母口，有17个销拴固定[10]。铜车各部件以范土铸造，轴、辕内部留有范土[11]。甘肃兰州市华林坪的M11[12]、张掖葫芦墩汉墓，甘肃敦煌市南湖东汉墓出土的铜牛、车，甘肃武威市雷台汉墓出土的铜奔马与铜马仪仗队铜马制作技术均为范铸法，先铸马头、身躯，分铸马腿，再铸

接成一体，铜腿内铸夹铁芯骨[13-15]。四川绵阳何家山2号东汉崖墓出土的铜马HM2：55为分铸铆接，马的头颈、胸、腰和腿等分九部分铸造而成，各部连接处均有子母口和钉孔，套合后用铆钉连接[16]。上述有关铜车马的相关研究仅甘肃武威市雷台汉墓出土的铜奔马有芯骨的研究记录，其余考古材料与研究均未提及芯骨。

关于铜器铸造中芯骨的问题多位学者已有相当多的研究。学术界将芯骨的存在作为判断失蜡法铸造的重要特征之一，邵安定通过对比范铸法和失蜡法的工艺流程，认为设置芯骨作用主要是提高泥芯在焙烧前的强度，是失蜡法必要的技术措施，指出秦始皇陵出土青铜水禽为失蜡法铸造[17]。杨欢研究秦始皇帝陵青铜马车铸造工艺，认为其芯骨、针状芯撑、铜片补缀及范芯夹杂碎陶片等是失蜡法铸造工艺的重要特征，并以此推测我国在不晚于秦代可能已经出现了失蜡法铸造工艺[18]。王琦通过探伤分析、成分检测、观察表面铸造痕迹和马蹄底内残存的铁芯认为铜奔马是沿用商周时代传统的青铜陶范铸造法分段铸造铸接而成，马右后腿内夹铸的卯榫状铁芯骨，其作用为增强马腿的强度和支撑力[15]。资阳铜车马的芯骨作用与上述器物一样，即增强马腿的强度和支撑力。同时，据郭建波等人在三星堆神树残件中发现使用芯骨的证据[19]，其作用亦有提高内芯强度的作用。这证明芯骨的使用早在商代晚期就已存在。国外研究中，美国大都会博物馆藏的青铜马（公元前480~470年）[20]、青铜人像（公元前5世纪中期）[21]中发现铁质芯骨，青铜人像中的芯骨呈空心。

从上述研究中可以看出，在不同的时代、地域和器类中都发现了芯骨的实例，且其材质各异。这些例证表明，从商晚期到汉代，中国古代青铜器制作中虽然存在技术断层，但我们有理由推测，芯骨作为一种青铜器制作技术，长期存在并持续使用，其功能基本一致。在西方早期青铜器制作中，芯骨作为失蜡法的特征出现，在公元前5世纪中期，相当于我国东周时代[21]。跨时空的研究中，我们并不意图探讨技术与文化的相互碰撞或传播。在如此遥远的地域与漫长的时间背景下，东西方都催生了相同的青铜器制作技术-芯骨，这为解读其技术源头提供了更广阔的思路。

4.2 铜车马的分铸技术

根据考古出土的汉代铜车马资料，其铸造技术主要反映出以分铸法为主的技术体系。铜马的铸造过程基本分为头、耳、脖颈、身、腿和尾等多个部位的分段铸造，随后通过榫卯、套接等方式进行组合连接，形成完整的铜马。这一工艺在铜车的制作中同样明显，特别是在辕、轴和车轮的分段铸造上。车轮通常由多个部分组成，包括轮辐和轮圈，这些部分均采用分铸技术进行独立铸造，并通过紧固装置进行连接，这不仅增强了结构的稳固性，也提高了制作的灵活性。

在驭手的铸造过程中，其双手及躯体的分段铸造技术同样体现了分铸法的应用。这种技术体系自秦时期已趋于成熟，秦始皇帝陵出土的一、二号铜车马便是采用分铸法制作[22][23]，其制作技术代表了当时的先进水平，表明当时的分铸工艺已达到相当高的水平。

白云翔将这一现象总结为模块化生产，强调这种生产方式在汉代得到了广泛应用，延续了秦时期的生产模式[24]。资阳铜车马的分铸技术不仅反映了汉代模块化生产在民营手工业上的应用，更成为汉代模块化生产的典型实例。这种技术的普及和发展，标志着古代铸造工艺的进步，推动了铜车马的制作水平达到新的高峰。

5 结语

本研究深入探讨了芯骨与分铸法在中国古代青铜器制作中的技术演变及其文化内涵。从商晚期至汉代，不同地域与器类中发现的芯骨实例显示出这种制作技术的长期存在与功能的一致性。尽管在某些时期存在技术断层，在西方早期青铜器制作中，芯骨作为失蜡法的特征出现在东周早中期，表明东西方在青铜器制作技术上的相似性。

汉代铜车马的铸造工艺主要反映出分铸法的技术体系，包括对马身、车轮和其他部件的分段铸造，随后通过榫卯结构和二次铸接组合而成。特别是在车轮的制作中，采用了分铸技术，增强了结构的稳固性和制作的灵活性。资阳铜车马采用陶范法铸造，马后腿的铁芯骨则起到了增强强度的作用。

这种分铸技术不仅代表了汉代模块化生产的典型实例，也反映了当时民营手工业的创新能力。整体而言，资阳铜车马的分铸技术标志着古代铸造工艺的进步，推动了铜车马制作水平的提升，同时体现了技术与文化的密切结合，促进了社会经济的发展与文化的传承。

参考文献：

[1] 胡昌钰，黄家祥，任江，等. 四川资阳市雁江区兰家坡汉墓发掘简报 [J]. 四川文物，2019（1）：5–31.

[2] 任江. 四川资阳市雁江区兰家坡汉墓初步研究 [J]. 四川文物，2019（1）：52–68.

[3] 冯陆一，樊斌，郝翔. 资阳青铜车马的修复 [J]. 文物修复与研究，2009（1）：28–34.
[4] 李永平. 考古发现汉晋时期铜马及相关问题研究 [J]. 四川文物，2007（4）：52–59.
[5] 孙淑云. 中国古代金属材料显微组织图谱-有色金属卷 [M]. 北京：科学出版社，2011：169.
[6] 潘春旭. 中国古代青铜器的现代材料学 [M]. 北京：冶金工业出版社，2023：77.
[7] 郭建波，蔡秋彤，肖庆，等. 三星堆青铜器分铸连接工艺辨析 [J]. 铸造，2025（2）：166–174.
[8] 贵州省考古研究所. 贵州兴仁交乐汉墓发掘报告 [C]// 贵州省博物馆考古研究所编.贵州田野考古四十年（1953~1993）. 北京：科学出版社，1993.
[9] 李飞. 贵州兴仁县交乐十九号汉墓 [J]. 考古，2004（3）：51–58.
[10] 贵州省博物馆考古组. 贵州兴义、兴仁汉墓 [J]. 文物，1979（5）：20–35.
[11] 陈炳应. 兰州、张掖出土的汉代铜车马 [J]. 文物，1988（2）：46–48.
[12] 敦煌市博物馆. 敦煌南湖东汉墓清理简报 [J]. 陇右文博，2002（2）：21–23.
[13] 甘博文. 甘肃武威雷台东汉墓清理简报 [J]. 文物，1972（2）：16–24.
[14] 甘肃省博物馆. 武威雷台汉墓 [J]. 考古学报，1974（2）：87–109.
[15] 王琦. 甘肃武威出土铜奔马铸造工艺初探 [J]. 文物保护与考古科学，2021，33（2）：30–35.
[16] 何志国. 四川绵阳何家山2号东汉崖墓清理简报 [J]. 文物，1991（3）：9–19.
[17] 邵安定. 秦始皇帝陵园出土彩绘青铜水禽制作工艺及相关问题研究 [M]. 北京：科学出版社，2019：22–48.
[18] 杨欢. 秦始皇帝陵出土青铜马车铸造工艺新探 [J]. 文物，2019（4）：88–96.
[19] 郭建波，田灏，余健，等. 三星堆出土青铜器铸造工艺补议 [J]. 南方文物，2021（3）：145–152.
[20] JOSEPH V N. The forgery of our Greek bronze horse [J]. The Metropolitan Museum of Art Bulletin，1968，26（6）：253–256.
[21] JENNIFER A H. The Riace bronzes：a comparative study in the style and technique [D]. Master thesis for University of West Florida-Pensacola，2005.
[22] 袁仲一，程学华. 秦陵铜车马的结构及制作工艺 [J]. 西北农业大学学报，1995，23（增刊）：59–65.
[23] 侯介仁，杨青. 秦陵铜车马的铸造技术研究 [J]. 西北农业大学学报，1995，23（增刊）：89–93.
[24] 白云翔. 汉代模块化生产的考古学观察 [J]. 考古，2022（11）：107–120.

Research on the Casting Techniques of the Han Dynasty Bronze Horse and Carriage Unearthed from Ziyang City

ZHENG Lu, MA Qin-song, YANG Li-jun, FAN Bin, WANG Chong, GUO Jian-bo
(Sichuan Provincial Institute of Cultural Relics and Archaeology, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:
After the excavation of the Ziyang bronze chariot and horse, scholars have conducted detailed research on archaeology, protection and restoration, but there is little mention of the production process of the bronze chariot and horse. This paper utilized portable X-ray flaw detectors, X-ray fluorescence, scanning electron microscopy, and metallographic microscopy to analyze the internal structural information, base composition, and metallic phases of the bronze chariots and horses. The results indicated that the structural units of the horses, wheels, and bodies of the chariots were cast using the ceramic mold method, where individual components were first cast and then assembled using mortise-and-tenon joints and secondary casting. The iron core within the horse's legs serves to enhance the strength and support of the legs. This research is beneficial for understanding the casting techniques of bronze artifacts in the Sichuan Basin, particularly the application and development of core rode, and for comparative studies with similar technologies in other regions.

Key words:
bronze chariots and horses; iron core; segmented casting; cultural exchange

（编辑：张允华，zyh@foundryworld.com）