

复原“姑洗之大羽钟”的铸造研究与实践

李一辉<sup>1</sup> 李明安<sup>2</sup>

(1.长江职业学院国际学院; 2.武汉精密铸造有限公司)

**摘 要** 介绍应用现代铸造技术复原曾侯乙编钟中的“姑洗之大羽钟”的技艺和方法,揭示 2 400 多年前青铜铸造的技术水平和铸钟工匠的高超技艺。复原铸造“姑洗之大羽钟”的研究与实践,呈现曾侯乙编钟下墓前的原貌,对传承弘扬我国青铜铸造技术和编钟铸造技艺,具有历史意义和现实意义。

**关键词** 姑洗之大羽钟;复制;复原

**中图分类号** TG249.5 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.12.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research and Practice on Restoration of Dayu Bell of Guxi

Li Yihui<sup>1</sup>, Li Ming'an<sup>2</sup>

(1.International College, Changjiang Polytechnic; 2.Wuhan Precision Casting Co., Ltd.)

**Abstract:** The technical level of bronze casting and the super skill of bell crafts men more than 2 400 years ago were revealed by introducing the techniques and methods of using modern foundry technology to restore Dayu Bell of Guxi in The Chime-bells of Marquis Yi. The research and practice of restoring and casting Dayu Bell of Guxi presents the original appearance before The Chime-bells of Marquis Yi was buried, which is of historical and practical significance for inheriting and carrying forward the bronze casting technology and bell casting technology in China.

**Key Words:** Dayu Bell of Guxi, Reproduction, Restoration

曾侯乙编钟出土后,经国家文物行政部门批准,相关铸造企业工程技术人员遵循“以器为模”的原则,按照曾侯乙编钟原件的外观、尺寸、体量、纹饰和内在合金成分、金相组织以及残缺复原等要求,先后复制铸造(即按曾侯乙编钟出土原件铸造)了 5 套曾侯乙编钟。其中,1998 年为台湾省复制铸造的曾侯乙编钟,被海峡两岸音乐、文史、铸造等领域的专家学者评定为与曾侯乙编钟出土原件“形似、音似、神似”的作品。

多年来,我国研究者基于曾侯乙编钟铭文所述内容的研究,结合科学技术和文化艺术等相关研究成果发现:曾侯乙编钟出土原件在编钟编列、音律体系、冶金铸造和工艺美术等方面与其设计者的原有构思存在一定差距,并非原貌<sup>[1]</sup>。因此,复原铸造(即按曾侯乙编钟设计原貌铸造)曾侯乙编钟,不仅能够再现先秦时期的社会文化生活,也能够突破性地推动编钟编列、音律体系、冶金铸造和工艺美术等方面的研究与实践<sup>[1]</sup>。

据考,曾侯乙编钟在“楚王铸钟”加入前,为 8 组 65 件。“楚王铸钟”是曾侯乙死后楚惠王所赠,于编钟下葬

时临时加入编列,挤掉原在下层正中的一件甬钟,仅留下横梁上刻文“姑洗之大羽”<sup>[1]</sup>。“姑洗之大羽甬钟”(简称大羽钟)是曾侯乙原套编钟中最大的一件甬钟,其正鼓音为“大羽”,音高约为 A<sub>1</sub>;其侧鼓音为“羽角”,音高约为<sup>#</sup>C。由此可知,复原铸造曾侯乙编钟的重中之重是复原铸造“姑洗之大羽钟”。

1 大羽钟形制的复原

大羽钟的铣长、铣间、中长、舞修、舞广及正鼓厚、侧鼓厚、棱厚等形制尺寸基本上是无据可考的<sup>[2]</sup>。而且想要获得比较理想的音效,需要比曾侯乙编钟出土原件下层最大的“姑洗之大宫大甬钟”的形体大很多,这将打破曾侯乙编钟出土原件的整体结构和编列结构,影响复原铸造曾侯乙编钟的安全性和稳定性。

为解决以上难题,综合考虑大羽钟音效、编列布局和钟架的稳定性等诸多因素,参照曾侯乙编钟出土原件的结构、间距以及下层 1-1、中(下)层 1-2、下层 2-9、下

收稿日期:2021-07-18;修改稿收到日期:2021-08-21

第一作者简介:李一辉,男,1982 年出生,副教授,武汉(430074),E-mail:1720250072@qq.com

通信作者:李明安,男,1956 年出生,高级经济师,武汉(430034),E-mail:lma\_1113@163.com

引用格式:李一辉,李明安. 复原“姑洗之大羽钟”的铸造研究与实践[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(12):1 572-1 575.

LI Y H, LI M A. Research and practice on restoration of Dayu bell of Guxi[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(12):1 572-1 575.

层 2-10 等 4 件大甬钟的音形尺寸比例关系<sup>[2]</sup>,分析下层 13 件大甬钟的铤长、中长、铤间、鼓间、舞修、舞广等形制尺寸,反复测算,优化设计。经泥型放样、制作泡模型钟体、多维度视角比对等,最终确定大羽钟铤长为 90.5 cm、铤间为 71.8 cm、鼓间为 52.8 cm、中长为 68.8 cm、舞修为 61.2 cm、舞广为 44.8 cm<sup>[2]</sup>。基于上述尺寸,考虑胶模、蜡模、铜合金的经收缩量,制作石膏型母模,并将液态蜡料挤压成型大羽钟蜡模,严格遵循精算尺寸,铲、刨、修、调,完成大羽钟铸造蜡模。

## 2 大羽钟铭文的复原

曾侯乙编钟出土原件上有 2 800 多字的铭文,记录着编号、记事、标音以及诸如音名、阶名、八度组、曾国与楚、周、齐、晋的律名和音阶名称的对应关系等乐律理论,是曾侯乙编钟重要宝典遗存要素之一。由于大羽钟没有出土原件参照,铭文的字体、间架、格式等可以比照其他编钟还原,其铭文字数和铭文内容的还原是一项十分困难的工作。

为解决以上难题,本着尊重历史的科学态度,依据曾侯乙编钟相关考古发掘资料,反复研究其他相同标音编钟的音铭、律名、阶名及对应关系的铭文结构组成,邀请多位长期从事曾侯乙编钟音乐考古研究的专家,共同研讨、反复比较、编制范本,最终确定大羽钟上 78 个字的铭文内容。并按曾侯乙编钟出土原件铭文字体、间架、格式篆刻于钟体蜡模上。

为还原大羽钟表面的纹饰形位尺寸,首先,对相邻“姑洗之大宫钟”纹饰的三维形位尺寸逐一比对、精确计算;其次,绘制三维图像对比下层多件大甬钟的艺术感观效果,复印放大取样;最后精雕修刻成模,还原钟体鼓部的纹饰模片(见图 1)。从相邻大甬钟的舞部、篆带部位翻制纹饰模片,镶嵌于大羽钟大甬钟体坯的相应位置。既保证钟体外型尺寸的误差精度,同时也满足复原铸造曾侯乙编钟纹饰整体一致的设计要求。

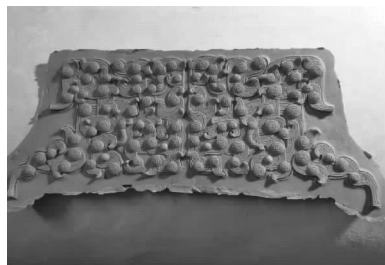


图 1 纹饰模片  
Fig.1 Decorative mold

## 3 大羽钟乐音的复原

曾侯乙编钟作为旋律乐器,是根据当时它在整个乐

队中所扮演的角色(乐队配器中它所处的地位及常用的表现手法)来确定其声特性的,特别是他的振程时间长短<sup>[3]</sup>。而编钟音质是否优良是衡量复原铸造编钟能否成功的重要标志。对于首次复原铸造体量超大的大羽钟更是考验。编钟音色、音准等音效的优劣,除铜合金配比和形制尺寸(合瓦形)外,更为重要的是通过对称和均匀的磨削调校编钟内壁厚度来实现。由于合瓦形编钟属于板式振动发音原理,在人工磨削钟体内腔时,受到不易观察、不易测量、不易转位等客观因素的影响,钟壁厚薄的对称和均匀难以精准把握。质量超过 240 kg 的大羽钟磨削调校更难以控制。

为解决以上难题,基于蜡模钟体上对称度和均匀度修调相对容易的实践经验,将修调定音的重点放在钟体蜡模上。首先,比较分析复制铸造曾侯乙编钟大甬钟的数据,优化铤部、正鼓、侧鼓和铤棱等振动发音部位的对称点壁厚,计算出大羽钟发音部位可调音高的厚度。其次,制作尺寸精准(预放收缩量)的石膏钟体压型模具,采用压蜡设备和工装压制对称度好、壁厚均匀的钟体蜡模。再次,定制专门的长臂千分尺,在铲削修调钟体蜡模过程中,适时检测钟体蜡模对称点的壁厚,保证钟体蜡模对称点的厚薄误差超出 0.1 mm。最后,严格按照铤部、正鼓、侧鼓和铤棱厚度经验设计尺寸,循序、对称地铲修铤、鼓、棱等乐音敏感区域。通过以上操控,将大羽钟的正、侧鼓可调校音分值,控制在 300 音分的最佳校磨厚度之内,突破了曾侯乙编钟下层大甬钟未低于 500 音分厚度的先例,不仅保证了大羽钟的音色、音准,而且缩短了编钟磨削调校音的工期,提高了铸制效率。

## 4 大羽钟复原的工艺

### 4.1 大羽钟复原的制壳工艺操作

曾侯乙编钟出土原件中体量最大的“姑洗之大宫钟”,质量为 202 kg,因音低而钟壁较薄,表面纹饰繁缛精细,人工制壳作业需 3、4 名工匠配合操作,经过 8~10 次的搬移、翻转浸(刷)浆料、撒砂、硬化、风干等多道工序才能完成。由于以前全凭人工操作,很难消除浆料浸(刷)堆积、残料滴流和撒砂不均所导致的型壳风干不匀、脱层变形和裂缝破壳等问题,造成钟体表面的夹砂、气孔、膨胀和凹陷等缺陷明显。而大羽钟若采用人工操作涂料制壳的方式,容易浇注不成功或后续工序的品质问题。

为解决以上难题,根据大羽钟型制尺寸,针对制壳的工艺操作难点,专门设计了内、外装夹制壳翻转工装(见图 2),辅助人工制壳涂料。采取先钟外,后钟内,分序结壳的方法进行。首先,将钟体蜡模安装在 4 个支撑

杆滚轴的外层专用工装上(见图3),调整好转轴的支撑杆顶住内壁,将滚轴的两端搁置在托轮上,在钟体蜡模表面淋刷调配好的浆料。然后,边撒砂边转动,均匀撒砂。反复淋浸硬化剂,待完全干燥,去除浮砂后再涂下一层。依此完成4层后去除转轴支撑架,将钟体蜡模安装在内层专用滚架上,采取上述同样工艺步骤,涂制钟体蜡模内层。经过实际操作,最终获得较为理想的工艺效果。浇注后的大羽钟不仅没有出现夹砂、气孔、膨胀和凹陷等铸造缺陷,还克服了因铸造缺陷修补对大羽钟音效的影响。在减轻制壳作业人员劳动强度的同时,提高了制壳作业效率。

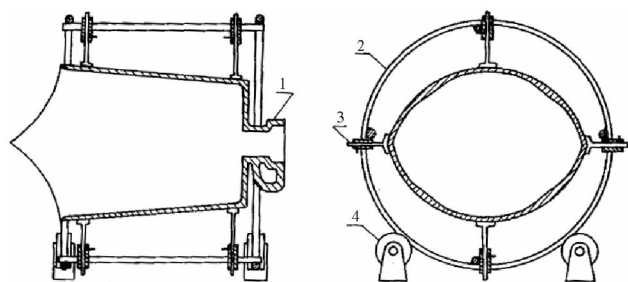


图2 制壳翻转工装

Fig.2 Turning assemble for shell-making

1.钟体蜡模 2.圆环 3.支撑杆 4.槽轮

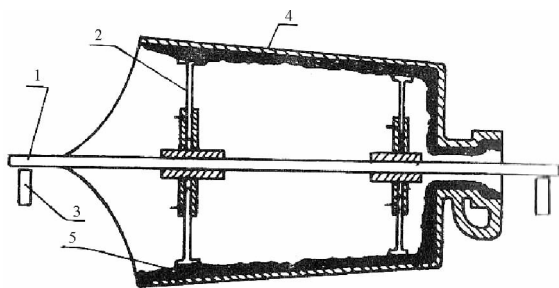


图3 制壳专用工装

Fig.3 Special gear for shell

#### 4.2 大羽钟复原的退火工艺操作

大羽钟浇注后,因钟壁厚薄不均,会产生应力集中,从而影响基频的稳定和音质的统一,这也是铸造编钟一直存在的工艺难题。据考采用“范铸法”铸造的曾侯乙编钟,通过延缓脱范时间而自然退火的方法,不可能完全消除钟壁厚薄不均和应力较为集中的问题,达到稳定基频、改善音质的目的。而今复原铸造大羽钟采取“失蜡法”精密铸造,自然冷却退火的效果虽比“范铸法”好,但要完全消除钟壁厚薄不均和应力较为集中的问题,采取热处理退火工艺才有更好保障。由于大羽钟形制结构较为特殊,钟壁较薄,在退火的高温状态下容易变形,所以,复制铸造和仿制铸造大羽钟不宜实施热处理退火。

为解决以上难题,大羽钟采用机械热处理的工艺方

法。一是选取一件与大羽钟相似的大甬钟进行退火工艺试验,对比分析、检测总结退火工艺参数,修改工艺方案、制定操作规程;二是为防止大羽钟在退火的高温状态下发生变形、损毁,根据大羽钟形制尺寸和内腔结构,设计制作退火保护、支撑装备等,对大羽钟铸造进行工艺保护;三是将保护、支撑好的大羽钟置于箱式退火炉中,缓慢提升温度,达到620℃后随炉冷却。经比对复原铸造大羽钟退火前后的测音频谱数据,结合人耳测听,结果表明,退火处理后的大羽钟基频明显稳定,音色明显改善。

#### 5 大羽钟簋簠的复原

据曾侯乙编钟出土原件簋簠(钟架)上遗留下来的痕迹考证:曾侯乙编钟出土原件下层短梁曾被截短。该梁所挂均为爬虎套环,套环位置以朱线框定,下1-3套环的朱线框西侧紧靠铜套,使下1-3号钟的位置显得狭窄。若让原下1-3号钟(现下1-2号钟)归位,已难以容纳<sup>[1]</sup>。由此可见,下短梁无法容下曾悬挂于此的大羽钟,以及其他2件需要归位的大甬钟(共3件大甬钟)。复原铸造曾侯乙编钟簋簠(钟架)必须增高、加长才能悬挂复原铸造的大羽钟和需要归位的2件大甬钟。保证复原铸造曾侯乙编钟的簋簠(钟架)增高、加长后的安全性、稳定性和结构性相统一十分重要。

为解决以上难题,在复原铸造曾侯乙编钟簋簠(钟架)的制作过程中,注重理论计算和实图(物)放样相结合,进行多方面改进以确保复原铸造的曾侯乙编钟簋簠(钟架)的安全、稳定和协调。一是优化均匀钟与柱、钟与钟、钟与座、钟与梁的间距,在保证曾侯乙编钟出土原件簋簠(钟架)整体结构的前提下,尽量减少增高、加长尺寸,保证簋簠(钟架)复原制作后的安全、稳定。复原铸造曾侯乙编钟短簋簠(钟架)的中、下层钟架加长50cm,增高19cm;二是在不影响感观效果的前提下,提升簋簠(钟架)底座、铜人和底座高浮雕的整铸工艺,使底座质量增加150kg,进一步保证簋簠(钟架)复原制作后的安全、稳定;三是增加下层底座、铜人内部铸构件结构的设计,增加底座结构配合的强度。并在中、下层木梁立柱内榫镶入金属铜套,与铜人立柱铆结装配(曾侯乙编钟出土原件是木榫与铆配合,其间隙较大),缩小配合间隙,增大配合面,从而减少簋簠(钟架)中、上层敲击演奏时的晃动。经反复调整、修改,确保在复原铸造簋簠(钟架)增高、加长、添重的状态下,更加安全、稳定,而且美观。

#### 6 结 语

复原铸造大羽钟,是在复制铸造曾侯乙编钟的基础

弱磁场处理对烘干硬化水玻璃型砂性能的影响

周 洪  
(攀枝花学院钒钛学院)

**摘 要** 用磁选管设备处理水玻璃,研究了磁感应强度和处理时间对烘干硬化水玻璃砂性能的影响。试验发现,在弱磁场中水玻璃最佳处理方案是磁感应强度为 0.4 T、磁化处理时间为 30 min,型砂强度提高约 37%,可减少型砂中水玻璃加入量 20%。结果表明,弱磁场对水玻璃进行处理可以降低水玻璃的粘度,同时也可提高水玻璃砂的干抗压强度;磁化处理的水玻璃砂型要比未磁化处理的应更注意防潮。

**关键词** 水玻璃;弱磁场;型砂;强度

**中图分类号** TG221<sup>+</sup>.1;TG249.5

**文献标志码** A

**DOI**:10.15980/j.tzzz.2021.12.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of Low-intensity Magnetic Field on Properties of Drying Hardened Sodium Silicate Molding Sand

Zhou Hong  
(College of Vanadium and Titanium, Panzhihua University)

**Abstract:** The effects of magnetic induction intensity and treatment time on the properties of drying hardened sodium silicate molding sand were investigated through treating sodium silicate with magnetic separator. It is found that the optimized treatment scheme of sodium silicate in low-intensity magnetic field is magnetic induction of 0.4 T and magnetization treatment time of 30 min, where the strength of molding sand can be increased by about 37%, and the amount of sodium silicate in molding sand can be reduced by 20%. The results show that the viscosity of sodium silicate can be reduced and the dry compressive strength of sodium silicate sand can be improved by low magnetic field treatment. The sand mold made of magnetized sodium silicate should be paid more attention to moisture-proof than that of unmagnetized sodium silicate.

**Key Words:** Sodium Silicate, Low-intensity Magnetic Field, Molding Sand, Strength

水玻璃砂具有易紧实、劳动强度低、操作简便、能耗低、生产现场无毒无味等特点,被认为是最有可能实现清洁生产的绿色铸造工艺<sup>[1,2]</sup>,但在生产中发现,溃散性差是水玻璃砂突出问题之一。近年的研究发现,要提高水玻璃砂的溃散性,最根本的方法在于降低型砂中水玻璃的加入量<sup>[3]</sup>。因此,寻找消除水玻璃“老化”的方法

成为提高水玻璃砂溃散性的重要研究方向,其中对磁场处理水玻璃及其型砂性能的研究得到关注。张岩等<sup>[4]</sup>研究了用中强磁场处理的水玻璃配制型砂,发现经 0.9~1.0 T 磁场处理后的水玻璃配制的型砂抗压强度可提高 46%,首次提出使水玻璃砂磁化改性的最佳磁感应强度在 0.9 T 左右。王兴琳等<sup>[5]</sup>使水玻璃流过电

**收稿日期:**2021-06-24;**修改稿收到日期:**2021-11-01

**作者简介:**周洪,男,1966 年出生,副教授,四川攀枝花(617000),E-mail: pzhu\_zhouhong@163.com

**引用格式:**周洪. 弱磁场处理对烘干硬化水玻璃型砂性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(12):1 575-1 577.

ZHOU H. Influence of low-intensity magnetic field on properties of drying hardened sodium silicate molding sand[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2021, 41(12):1 575-1 577.

上,实现编列复原、调律精确及工艺提升等方面的一次超越。不仅呈现曾侯乙编钟下墓前的原貌,对传承弘扬我国青铜铸造技术和编钟铸制技艺,具有历史意义和现实意义,更是对传承弘扬我国音乐历史文化、增强民族文化自信具有实践意义和借鉴意义。

参 考 文 献

[1] 王子初.复原曾侯乙编钟及其设计理念[J]. 中国音乐,2012(4): 42-

49.

[2] 李明安. 复原曾侯乙编钟的实践及工艺突破[J]. 中国音乐,2012(4): 71-74, 101.

[3] 郑荣达. 曾侯乙编钟复制的音律定位研究[J]. 黄钟(武汉音乐学院学报),1998(3): 32-36.

(编辑:刘卫)