

大云山编钟乐音性能复原铸造的研究与实践

李一辉¹ 李明安²

(1.长江职业学院国际学院; 2.武汉精密铸造有限公司)

摘 要 采用观察法和试验法,介绍了江苏盱眙大云山 1 号汉墓出土编钟复原铸造过程中的合金配比、翻制模型、修调蜡模、把控熔炼、刻凿锉磨等技艺与其精准发音的关联性,对研究中国青铜乐钟的型制尺寸、发音机制、调音方法以及双音铸调技术具有实践意义。

关键词 大云山编钟;复原铸造;乐音性能

中图分类号 TG249.5 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.10.028

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research and Practice on Music Performance Restoration for Dayunshan Bell

Li Yihui¹, Li Mingan²

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

Abstract: The relationship between the precise pronunciation and the alloy proportion, remaking model, adjusting wax mold, controlling melting, cutting file grinding and other techniques of the bell in the restoration casting process of the bell unearthed from the No.1 Han Tomb in Dayunshan in Xuyi, Jiangsu Province was analyzed by the methods of observation and experiment, which is of practical significance to investigate the size, pronunciation mechanism, tuning methods and the lost double-tone casting technology of Chinese bronze bell.

Key Words: Dayunshan Bell, Restoration, Music Performance

2009 年,江苏盱眙大云山 1 号汉墓出土了一套 19 件编钟(以下简称大云山编钟)。根据大云山编钟内腔的调音刻凿及焊补遗迹,结合实测音高分析,大致推测其应为[#]G 宫正声音阶,但音列模糊且杂乱。如以复制铸造(即按大云山编钟出土原件铸造)的理念,完成一套音律混乱的编钟,毫无意义。基于历史考证,考虑展陈需求,决定复原铸造(即按大云山编钟设计原貌铸造)。复原铸造大云山编钟,对研究失传的中国青铜乐钟双音铸调技术具有实践意义。

1 科学配比合金,确定音质基础

合金配比对编钟的声学、力学、铸造等性能的变化起到重要作用。本课题选取大云山编钟出土原件中的 2 件甬钟经相关考古研究机构取样并送检测试,分析得到大云山编钟的化学成分为 Cu、Sn、Pb 三元合金组成。2 件甬钟的 Cu 含量分别是 72.91%和 66.79%,Sn 含量分别是 12.05%和 15.91%,Pb 含量分别是 10.19%和 4.61%。对比曾侯乙编钟的 Cu 含量 73.66%~78.25%,Sn 含量 12.49%~14.46%,Pb 含量一般在

2%~3%之间。对比可知,大云山编钟成分除了 Pb 以外,Cu 和 Sn 含量与曾侯乙编钟接近。

为了研究合金配比对大云山编钟乐音性能的影响,抽取其中 2 件编钟进行频谱分析和人耳测听。发现大云山编钟与曾侯乙编钟音质(排除形制上的原因)基本一致。考虑到编钟形制和钟壁厚薄等客观原因,在保证复原铸造大云山编钟的乐音性能,达到演奏对编钟音质的要求,研制出大云山编钟复原铸造的合金成分见表 1。

表 1 大云山编钟复制铸造合金配方
Tab.1 Prescriptive of casting alloys in the restoration of dayunshan Bell %

钟号	w _B		
	Pb	Sn	Cu
上层 1~11 号钮钟	—	14	86
上层 12~14 号钮钟	4	15	81
下层 1~5 号甬钟	6	16	78

根据复制铸造曾侯乙编钟的合金配比,结合复制铸造曾侯乙编钟的实践经验,参考大云山编钟出土原件取样测试结果,考虑编钟体壁厚为 3~5 mm,在下层 1~5 号甬钟的合金配比时,加入 5%的 Pb,增强合金熔铸时

收稿日期:2021-07-12;修改稿收到日期:2021-08-01

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. 大云山编钟乐音性能复原铸造的研究与实践[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(10):1 318-1 320.

LI Y H, LI M A. Research and practice on music performance restoration for dayunshan bell[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(10):1 318-1 320.

的流动性。随着 Pb 的增加,将 Pb 由 14% 增加到 16%,以改善编钟的基音(即:由整体振动产生的基础音),减弱第二分、第三分以及后继分音,促使音色丰满悦耳。确定大云山编钟复原铸造过程中的金属 Sn 比例,原则上仍是以《周礼·考工记》所载“六分其金而锡居一”为基础的。同时,能够提升钟体抗击打性,满足其在现实演奏中的需要。

为了取得大云山编钟复原铸造的更好效果,在合金配比方案拟定后,选取了 4 件编钟进行试验,为正式推进大云山编钟的复原铸造,取得了宝贵数据。具体数据见表 2。

表 2 4 件编钟试验数据

Tab.2 The testing statistics of four kinds of bells												
编钟	$w_B/\%$			主要部位尺寸/mm						铸态音高		
	Cu	Sn	Pb	钟体壁厚	正唇厚	侧唇厚	棱唇厚	音梁宽	音梁长	正鼓	侧鼓	
上 1-1	86	14	—	4	14.5	16	18	19	23	#c ⁴ -40	#f ⁴ -40	
上 1-8	86	14	—	4	13	15	17	26	62	g ² +25	C ³ -45	
上 1-14	83	15	3	5	13	15	13.5	32	52	f ¹ -25	a ¹ +10	
下 1-5	81	16	4	5.5	16	15	10	40	65	g+8	a-3	

2 制作编钟模型

编钟的形制、尺寸与乐音性能关系十分密切。腔体浑圆的编钟,最大问题是袅袅的余音在演奏乐曲中相互干扰,所有被敲击过的编钟均会嗡嗡作响,音乐旋律受到严重干扰,乐音性能被大大削弱。据大云山编钟可考,汉代铸钟工匠已不知先秦时期青铜编钟铸造技术中抑制余音的内涵,该编钟虽没有改变“合瓦型”基本形制,但腔体趋向浑圆,整体厚度趋薄,因而余音延长拖沓。

大云山编钟复原铸造的模型制作过程必须经过工装准备、硅胶选配、编钟清理、泥型制作、脱模剂涂刷、胶层砂布垫衬、石膏背板制作等多道工序。在翻制模型过程中,一是需要关注翻制编钟于口处的棱状内唇和侧鼓部的楔形音梁^[1];在大云山编钟上,与乐音性能直接相关的编钟内部音梁,其造型正视为长方形,侧视为楔形,翻制模型时必须保持这个根本特征。因此,首次制作编钟的于口和音梁等影响发音的内腔部位,以尽可能保留编钟发音机制的相关形制数据,作为日后对钟体蜡模内腔的形制修调的实际参照;二是需要关注 5 件甬钟是经过文物修复才得以恢复整体形貌的,所以在用硅胶翻制模型时,即要保证翻制模型的相关形制尺寸精确无误,同时又不能造成这些价值连城的文物再次受损。要充分考虑到制作模型时可能经过的每一个细节,用软体材料衬托于钟腔内部加以保护,防止修复的编钟在制作模型过程中出现意外。同时,采用硅胶按比例调配固化

剂,用植物液配制脱模剂,以保护编钟不受腐蚀损坏;三是增加涂胶层次,保证涂胶层厚薄均匀,加强涂胶背衬,做好胶模保护。

制作模型分为两部分。第一部分为 19 件编钟钟体模型制作,这也是最为核心的内容。第二部分是制作悬挂编钟的簠簣,即通常所说的钟架。大云山编钟簠簣是中国青铜乐钟考古发掘史上首次所见装有青铜、鎏金、云纹银璧的簠簣。簠簣铜饰件在技术上也是整个制作模型的重点。

3 修调钟体蜡模

对比分析我国现有考古发掘出土的百余套编钟的形制尺寸、钟体结构以及发音机制的参数,认为铸造大云山编钟的工匠们可能误将编钟的腔壁铸造薄了,导致音高严重偏低。只能采取锉磨钟腔内壁的方式进行调音,且由音高往音低方向调校,以保护好钟体外表的造型与纹饰。同时,通过“焊贴”加厚腔壁,尽可能地提高发音,但结果不够理想。

钟体蜡模内壁的修调,直接决定铸造编钟的音质和音高。大云山编钟复原铸造需要制作硅胶外模以制作钟体蜡模。钟体蜡模是与大云山编钟出土原件一致的阳模。对钟体蜡模铲削修调,促使钟体蜡模外形接近原件的同时,修饰了表面纹饰,修整了局部瑕疵,更是铲调了内腔音壁和音梁。确保钟体蜡模音和形均符合复原铸造要求。

钟体蜡模制作与修调过程中需要注意两点:一是铸造钟体腔壁要比其正确音高所需要的厚度稍厚,为调音锉磨留有余量;对编钟发音来说,钟体腔壁的厚薄与钟体形制的大小是存在科学比例的,钟体腔壁的过厚或过薄都会对编钟的音色产生影响。二是根据复制铸造曾侯乙编钟等千余套不同大小乐钟的经验,尤其基于复制铸造洛庄汉墓出土编钟的实践经验,按照音乐考古专家所设计的音列,精确计算大云山编钟腔壁厚度,并在钟体蜡模上得到准确实施。由于制作模型时,一般只能翻制外模,而出土编钟钟体内腔表面均有差异,音梁的造型、位置、厚度均有不同,所以只能通过测量,获取大量数据,绘制音梁及调音刻凿所需图形,并对这些部位翻制局部模型,作为对钟体蜡模内腔修调形制时的参照以及确定蜡模腔壁厚度和内腔表面造型的依据。

4 严控熔炼工艺

大云山编钟钟体蜡模翻制完成后,经过配料、浸涂、硬化、风干、脱蜡、煅烧、熔炼、浇注等多道工序。其中,熔炼对编钟成音性能具有直接影响。

大云山编钟的合金成分为高锡青铜,其结晶范围宽,枝晶发达,在凝固的后期,铸件从内到外仍存在着大量的显微通道,迫使富 Sn 溶体沿 α 枝晶间的显微通道渗出富 Sn 分泌物,俗称冒 Sn 汗。Sn 汗中富集 δ 相,造成铸件内外成分不均匀,铸件组织疏松,甚至产生热裂,影响编钟音质^[1]。

为了解决以上问题,熔炼工艺从 3 个方面控制:一是做好炉料的精选和预热,选用高电解铜和云锡,保证新料占比大于 80%,并在熔炼前对 Cu、Sn 进行高温烘烤,减少炉料中的水分;二是适当调整化学成分,如加入少量 Zn,缩小结晶温度区间,以防止产生反偏析^[1];三是尽可能提高编钟铸型的冷却速度,如采用埋壳冷却,风吹降温等办法。

5 采取机械退火稳定编钟音频

基于编钟试验数据分析,钟体合金是由 α 熔体、 $\alpha+\beta$ 共析体、Pb、少量夹杂物组成,属于典型的锡青铜铸态组织^[2]。 α 固溶体一般为铸态组织的树枝状晶,也有非铸态组织的等轴状晶^[2]。对组织为 α 固溶体等轴状晶的试样进行 X 射线面扫描,表明 Sn 的分布较为均匀^[2]。由此可推测,当初铸造大云山编钟时,有可能已采用了预热铸型并延时脱范,充分利用金属余热实现均匀退火,以改善金属组织,减少残余应力。

为此,在大云山编钟复原铸造时,也采取了机械热处理工艺,以通过均匀退火改善大云山编钟复原铸造的金相组织,增强抗敲击性,保持音频稳定。

6 刻凿锉磨音梁调校编钟乐音

青铜编钟调音技术从西周时期的“开槽控隧”法开始,至春秋时期的“内唇锉磨”法,再到战国时期的“音梁磨励”法(历经几百年的发展渐变,编钟的“音梁”由低平且短小发展到高耸且长条的“音脊”,直至成为板块形状的“音塬”^[3])。在大云山编钟于口内的楔形音梁首端两侧,清晰可见密集刻凿痕迹,应为窄首平头凿子所刻。通过分析,该类刻凿痕迹应为编钟完成铸造以后,调音所留下的。与先秦时期编钟调音锉磨的主要部位在于口内侧两正鼓、两锐角和四侧鼓等 8 个位置不同,大云山编钟调音刻凿的主要部位集中于楔形音梁首端两侧^[3]。

根据复原铸造惯例,结合大云山编钟发音机制和调音特点,基于大云山编钟出土原件外型、腔体壁厚以及于口棱状内唇、楔形音梁的尺寸,复原铸造了 4 件用于开展试验的编钟,即:5 号甬钟,1、8 和 14 号钮钟。应用

窄首平头凿子模拟刻凿进行调音(见图 1),经验证,该方法虽较为复杂且效率低,但也能够调出满足要求的音准效果。同时,模拟应用先秦时期编钟的锉磨方法进行调音(见图 2),能够达到不错的音准效果,如:将 8 号钮钟于口棱状内唇锉磨 2~3 mm,其音高即可实现较大幅度降低(经测,该钟锉磨后为 $\sharp c^4$ -46 音分,较锉磨前的 d^4 -1 音分降低了 145 音分)。将两种调音方法及结果进行对比,因此可知,先秦时期锉磨的调音方法比汉代(大云山编钟)的刻凿调音方法更科学,调校的编钟音质性能更优良,也为调校大云山 19 件编钟提供了实践参照。



图 1 刻凿调音

Fig.1 Carving chisel tuning



图 2 锉磨调音

Fig.2 Rasion tuning

为了既能确保大云山编钟复原铸造的发音准确,又能尽量保持大云山编钟出土原件的内腔壁形制,采取适当增加编钟钟体正、侧鼓部厚度,这样不仅保留了与大云山编钟出土原件一致的内腔壁形制,也使得复原铸造的大云山编钟钟坯发音保持可调的设计音高余量。

7 结 语

大云山编钟在复原铸造过程中,通过科学配比合金、制作编钟模型、修调钟体蜡模、严控熔炼工艺、刻凿锉磨音梁等,使音律准确、音阶流畅、音色统一、音量合适、余音适度以及正、侧鼓音隔离度均达到技术要求,并为日后深入研究我国青铜乐钟的型制尺寸、发音机制、调音方法以及双音铸调技术,提供了参考和借鉴。

参 考 文 献

- [1] 王子初,李明安. 江苏盱眙大云山 1 号墓出土西汉编钟的复制研究[J]. 艺术百家, 2018(1): 98-110.
- [2] 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.
- [3] 王子初. 中国青铜乐钟的音乐学断代——钟磬的音乐考古学断代之二[J]. 中国音乐学, 2007(1): 5-14.

(编辑:刘卫)