

华觉明白选集

一下一

中原出版传媒集团
大地传媒

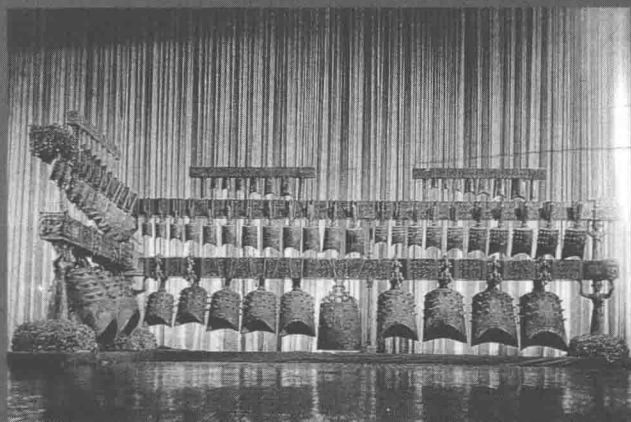
大象出版社

华觉明自选集

—下—

中原出版传媒集团
大地传媒

 大象出版社
• 郑州 •



曾侯乙编钟，湖北随县（今随州市）出土，战国



编钟正鼓部和侧鼓部的错金音名铭文

► 曾侯乙编钟冶铸技术与声学特性研究

华觉明 王玉柱

编钟在先秦乐器系列中占有重要地位。作为众乐之首的钟为宴饮、朝聘、祭祀所必备。“钟鸣鼎食”成为王公贵族权势名位的标志。钟的尺度、音律又与历算、权衡紧密相关。因此。编钟的铸作历来被视为国之大事，荟萃着该时期工艺技巧和音乐艺术的精华。

商周钟铙历来多有出土，其中以曾侯乙编钟的数量、组别最多，重量最大，音律最为完备，铸造最为精美。远在 2400 多年前的战国初期，竟出现如此宏美壮观，在声学、乐律学、冶铸技术和艺术等方面均达到很高水平的大型编钟群，是超出人们预想的，从而引起人们对编钟设计铸作及其声学性能奥秘的巨大兴趣。

一、曾侯乙编钟的铸造工艺 *



图一

钟的前身是铃和铙。最早的铜铃出自河南偃师二里头早商遗址，有钮，顶部有孔，可悬垂铃铛^①。值得注意的是，铃体虽小，已具日后编钟雏形，其截面是扁圆形的，和欧洲古代圆形乐钟有别（图一）。它用双面陶范铸成，使用了泥芯和自带泥芯（图二）。这在当时是较先进的技术。

最早的成组编排的乐钟是编铙。它们的共同特点是甬端透空、体短、扁圆形、曲于，形体较铃为大，铸型工艺也较进步，由侧浇改为倒浇（图三）。

由铙制转变为钟制，大约发生在西周中期。

* 本节部分内容参见华觉明、贾云福：《先秦编钟设计制作的探讨》，原刊《自然科学史研究》1982年第3期，曾在1981年第十六届国际科学史大会上宣读，摘载日本 *Historic Scientiaruns*, No.23, 1982。

钟甬仍透空，有枚，有明确的音程关系。钟腔内部于鼓部正中和侧面多有错磨痕迹，已掌握调音技术。钟位由倒置改为悬挂式，也是重大的进步，不但挥锤自如，演奏技巧得以提高，而且推动钟制的衍化，至西周后期又出现直悬的钮钟与铸钟。

钮钟后起，形制较简单。其铸型工艺如图四所示，钟体泥芯常自带定位芯撑，使芯的装配简易可靠，铸后在舞部、钲部形成透空或不透空的槽孔。我们按商周陶范铸造工艺复原试铸的曾侯乙钮钟铸型和复制件见图五。此项工作是由冯富根、白金金两位高级工程师和华觉明共同完成的。

铸钟平口，兼采甬钟、钮钟铸法。著名的四虎钲、秦公钲，形制复杂，经考察得知附饰有铸缝，和曾侯乙墓所出楚王钲一样，都是用复合范浇铸而成。

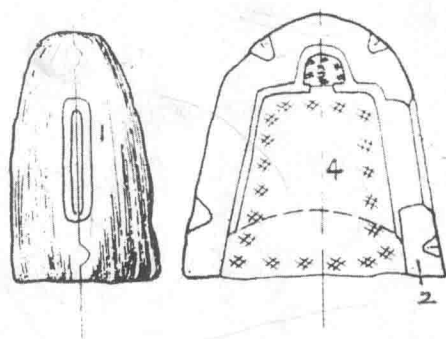
形制最复杂、铸造技艺最高超的是甬钟。自西周中期到春秋中期，甬钟形制逐渐完备，花纹日趋繁缛，工艺相应改进和定型。这样，经过1000年的发展，到战国初期出现铸型工艺极为复杂巧妙的曾侯乙甬钟，堪称商周陶范铸造的巅峰。

以曾侯乙中层三组第1号钟为例，铸型的制备需经以下工序：

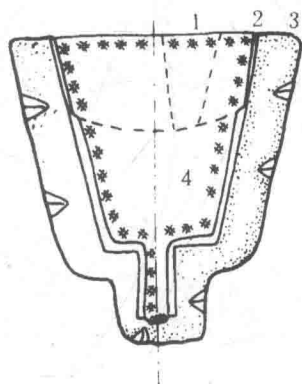
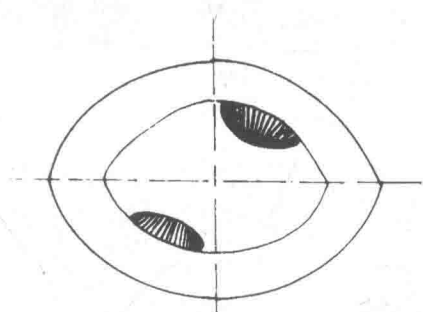
首先，按设计意图塑制钟样，用陶土依样制成半圆形的钟模，于模上划线和模刻铭文（图六）。

钟体各部纹饰分别用分范或印模成型。具体做法分述如下：

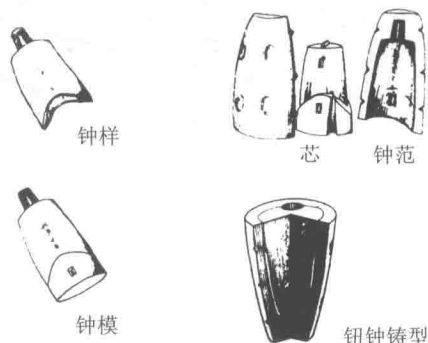
钟体周缘纹饰 如图七所示，纹饰分为若干段落。各段花纹均相同，只是长度和安置方位有别。各段落之间都有很窄而凸起的铸缝，表明所有分范都用同一范盒翻制，然后按画线位置依次安放在模上，根据需要或予裁短，或略加修整。安放时有意变更方位，或正或倒，使纹样有所变化，不致显得单调划一。



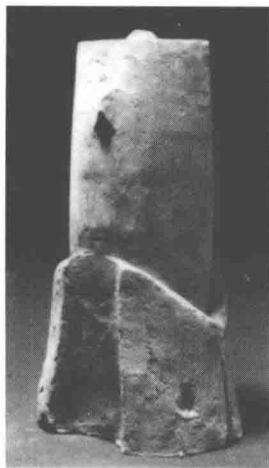
图二



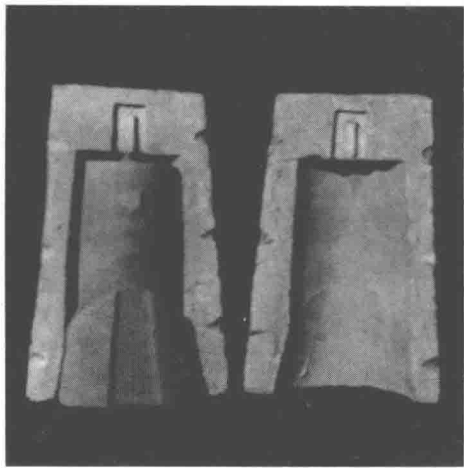
图三



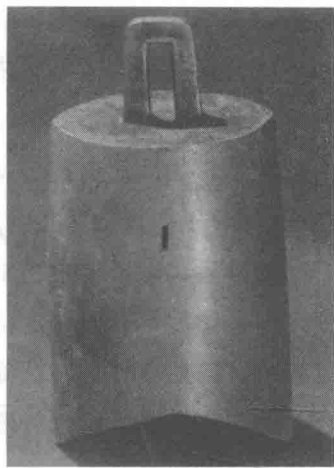
图四



1. 泥芯

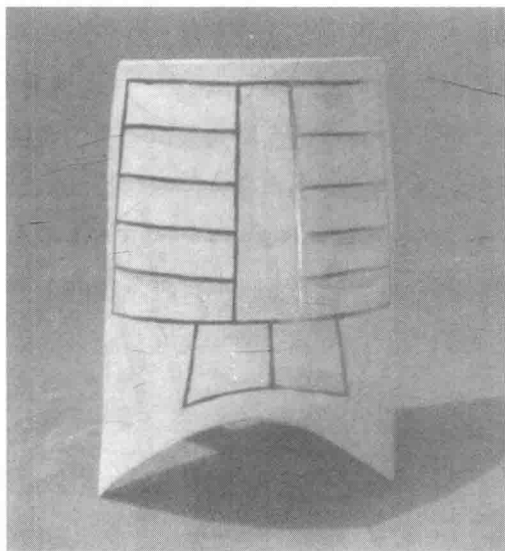


2. 铸型



3. 复制件

图五

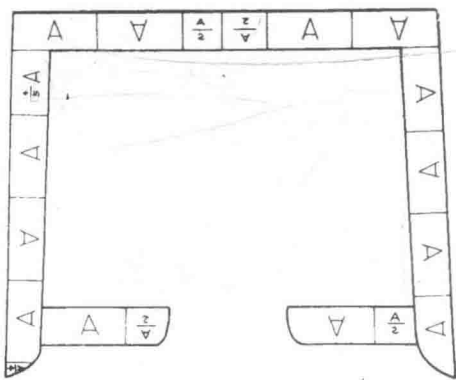


图六

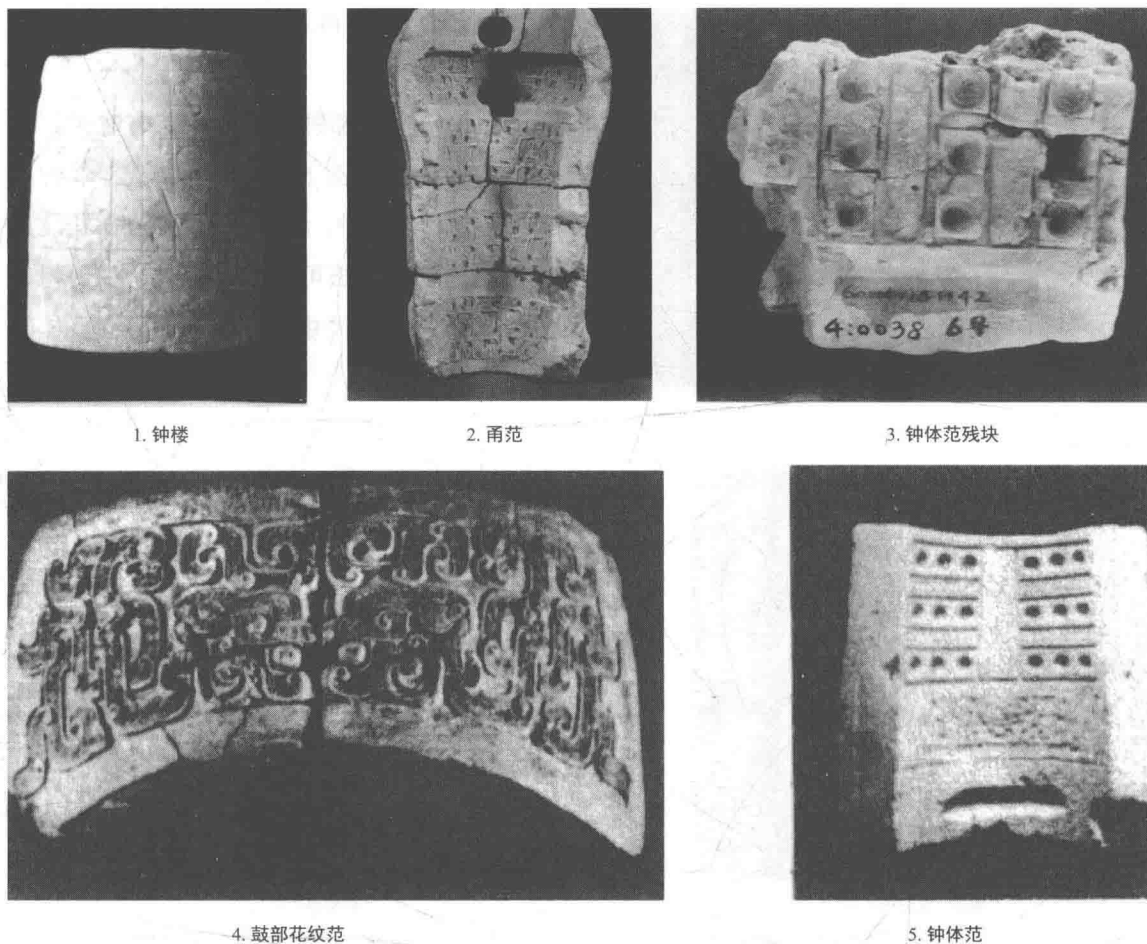
郭宝钧指出，春秋战国时期由许多相同单元组成的繁缛细密的铜器花纹，是用印模于范面按捺而成^②。这种模印花纹较浅，各单元相接处没有凸缝而有印痕，有时有错印和漏印。曾侯乙甬钟钟缘纹饰属高浮雕型（高约2毫米），接缝凸起而整齐，未见错漏印痕，钟体又具较大弧度，不是用印模成型的。

那么，这种纹饰有没有可能采用相反的方法，即先用阴文范盒翻制阳文分模，逐一嵌入钟模中，再翻出钟体铸范呢？作者经过研究，否定了这种可能性。因为，如采用这种做法，纹饰各段接界处将是凹线而不凸起。其次，钟体曲度较大，纹样又为高浮雕的，若整块铸范从模直接翻制，脱模时，纹样势必受损，不可能像曾侯乙甬钟这样完整少瑕。再则，商周铸铜遗址中迄未发现此类实物，而分范、范盒及划线的钟模在侯马春秋冶铜遗址中均有出土（图八），有的分范出土时仍和范盒紧扣在一起。

基于同一理由，很明显，甬钟也不是用失蜡法铸造的。有人认为，钟体及甬部的蟠龙纹特别是龙身与甬部界画上细如发丝的花纹，必须用蜡才能塑出。实际情况并非如此。商周青铜器铸造



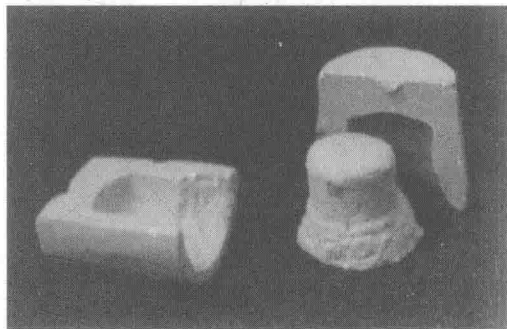
图七



图八

的复原试验已证实，细的陶土和蜡一样，具有极好的受塑性和复印性^③。甬钟纹饰完全可以在泥模上塑出并翻制成范。这样的泥范在侯马也有出土。

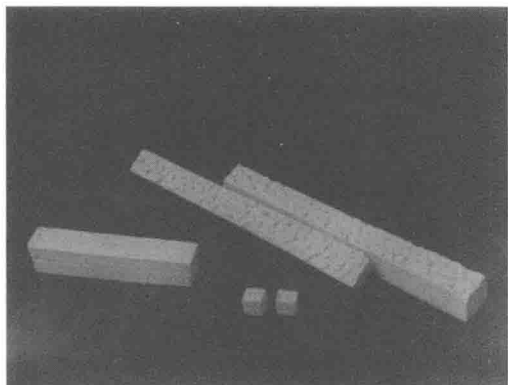
枚部分范 枚范都从枚模翻制（图九），干燥后置于钟模之上，其侧加泥，成为枚部分范。枚间花纹可以印制。枚范端部可修削得很薄。所以，枚间花纹有时几乎和枚接壤。



图九

篆带纹饰 经观察有甲、乙两种。甲种由六个相同的花纹单元正倒相间地组成。乙种由五个这样的单元加上左右各半个单元组成。它们其实是出自同一范盒，只是因为裁切部位不同而成为两种纹样。所用范盒的纹样应是由若干阳文陶模拼成，而这些陶模又出自同一阴文模盒，做法是很巧妙便捷的（图一〇）。

以上诸纹饰分范及鼓部分范安放到钟模上，须干燥到有一定强度不致因受压变形（需

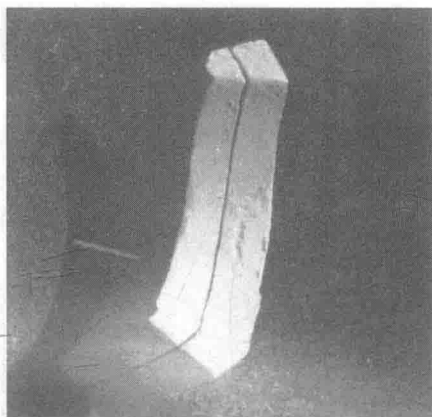


图一〇

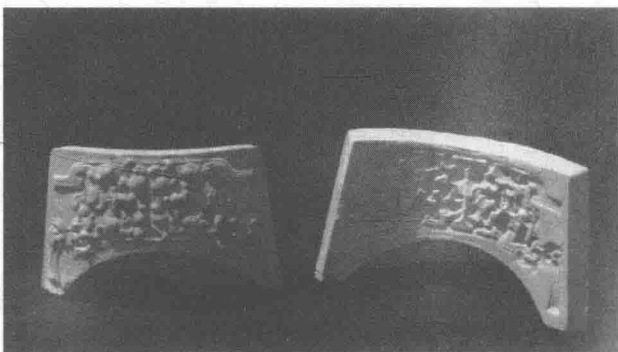
5~7 天或更长时间），再加泥料制成钟体铸型（图一一）。

为简化工序，相邻钟的纹饰分范有时用同一模具翻制。例如曾侯乙下层二组第 1、2、3 钟，第 4、5 钟，第 6、7 钟，第 8、9 钟的鼓部花纹尺寸完全相同。这种做法可以省工省时，由于相邻的两件钟或三件钟的尺寸相近，并未影响整体的观感。

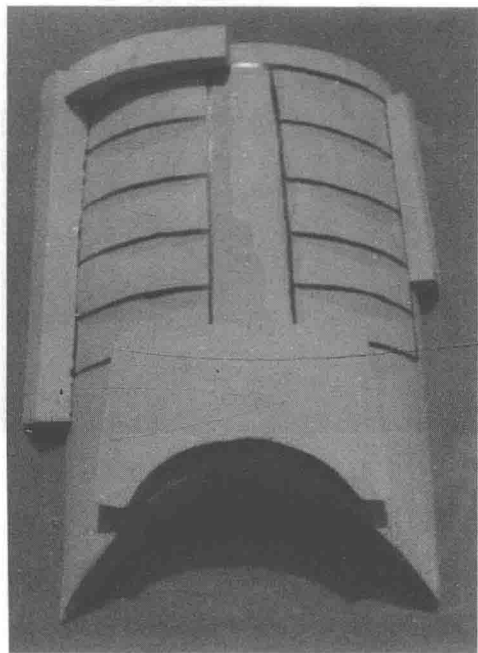
舞部、甬衡和甬的各面分范也用范盒制作，



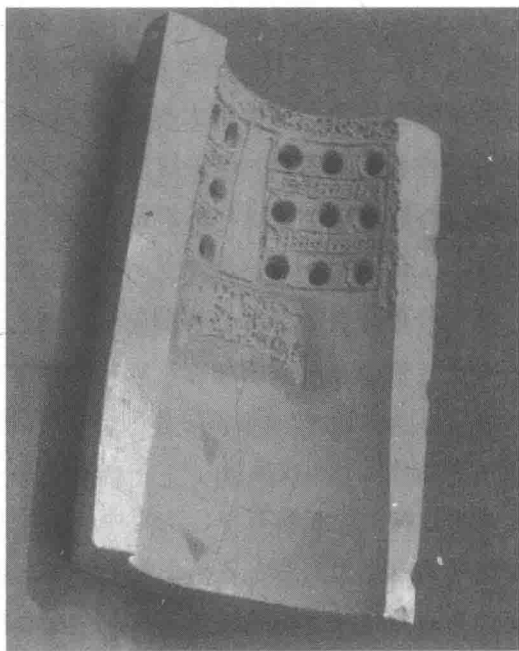
1. 鼓部分范由范片翻制



2. 鼓部分范和范片

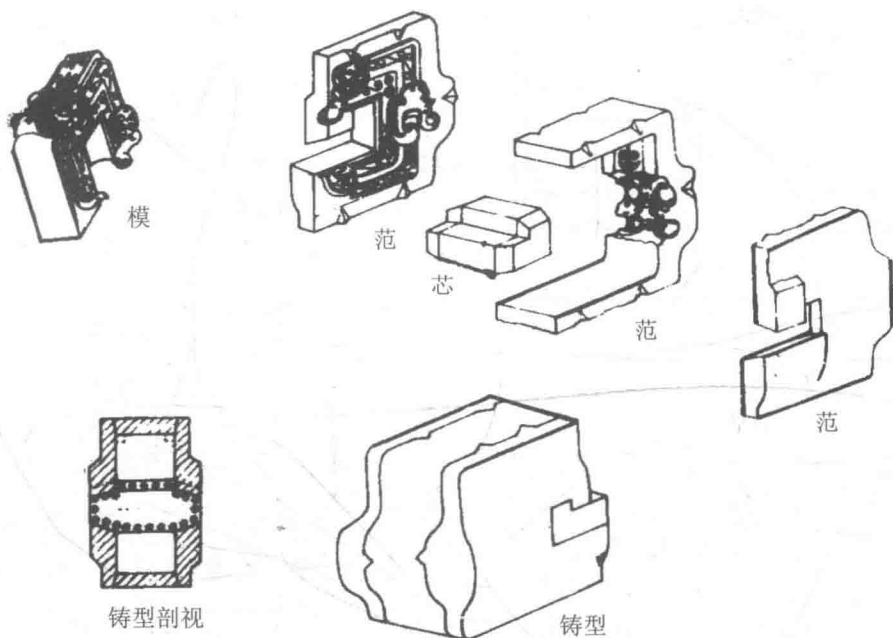


3. 各分范在钟模上的安放



4. 钟体范

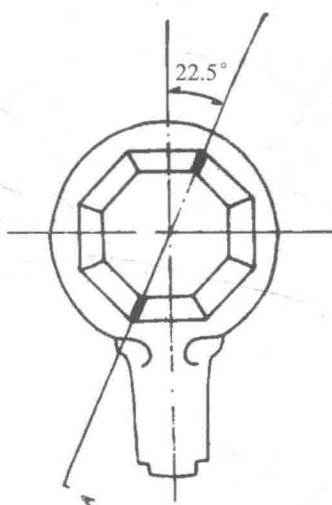
图一一



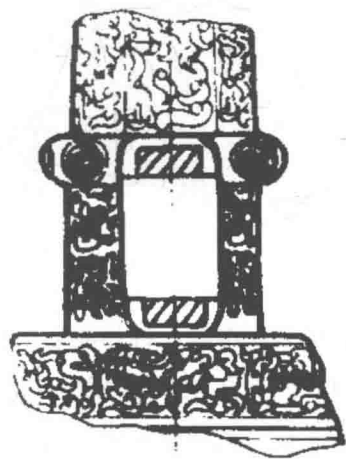
图一二

斡的分范则从斡模翻制（图一二）。甬面的八块分范分嵌于对开分型的甬范内。甬范系按对角线分型。分型面与钟斡中心线成 22.5° 夹角，由此形成的铸缝清晰可见（图一三）。所有这些分范组合到一起，成为甬部铸范。

斡范在组合时插入甬范。铸后于斡的周围留有明显的铸缝（图一四）。它和甬范铸痕再次证明，甬钟确是复合陶范



图一三

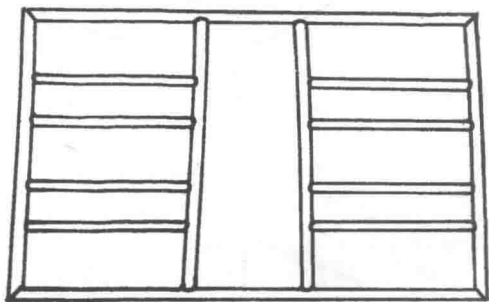


图一四

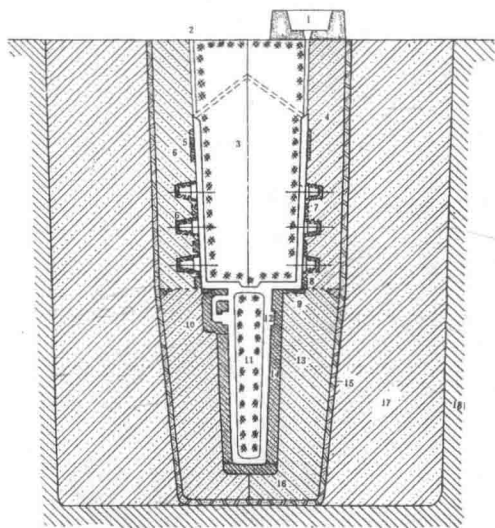
所铸。如使用失蜡法，决不可能只在甬部两棱才有突出的铸缝，也不会在斡周出现封闭的反映斡范厚度的铸缝，而只能是在斡和甬相接处留下蜡模焊接的痕迹。

甬部各分范组装后，于接合处用模具压印花纹使接缝消失，铸后成为凸起的界划。从图一五可知压印次序是先横向后纵向。侯马钟范界划也有同样的情形。

钟体和甬部泥芯都用芯盒翻制。芯盒又可从钟模和甬模翻出。由实物检验可知，大型甬钟的泥芯分为两层，外层用细砂泥作面料，烘烤后呈红色，内层用粗砂泥掺以大量植物纤维及木炭屑。曾检测钟甬内层芯料的化学成分为： $\text{SiO}_2 69.9\%$ ， $\text{Al}_2\text{O}_3 12.72\%$ ， $\text{CaO} 0.83\%$ ，



图一五



图一六

为保证装配准确，钟体泥芯顶端正中画有十字线，铸后在钟腔留有相应的铸痕。整个铸型分两段，四个层次，共用范、芯 136 块，一次浇注成形，下层大钟可用槽道浇注（图一七~图一九）。或钟甬先铸，嵌入铸型内与钟体铸接成形（图一七、图一八）。制型过程中，需用模具 12 种（表一、表二）。

MgO 1.54%，Fe₂O₃ 4.07%，FeO 0.96%，TiO₂ 0.50%，MnO 0.075%，K₂O 1.94%，Na₂O 1.19%，C 0.14%（已烧损），Cu 0.55%，Pb 1.6%。

泥芯坯件需经修削。这是一件极精细的工作，对控制钟的壁厚和断面形状从而对于钟的音律有重要影响。传统的做法是将芯面划线分格，再由梳刮削。线愈宽，格愈细，芯的形状尺寸就愈精确。刮去的厚度即是钟的壁厚。刮下的芯土重量的八倍左右，即是熔化时所需金属料重^④。侯马春秋铸铜遗址出有骨梳，有可能于制芯时使用。

浇口和排气孔道于泥芯上开设。不少中层甬钟底缘有明显的浇口遗痕，一般是 2 处或 4 处，对称分布，宽度约为钟壁之半。

钮钟和中小甬钟均由钟口缘倒浇。由于钟的壁厚自上而下逐渐增加，倒浇有利于金属液顺序凝固。如由钮端或甬端正浇，金属液流通不畅并会冲击泥芯。采取倒浇，有利于钟上部花纹清晰美观，缺点是钟口缘有时出现缩松、缩孔和气孔。

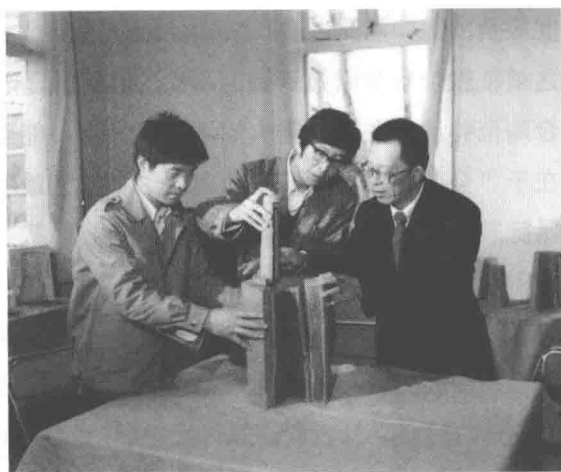
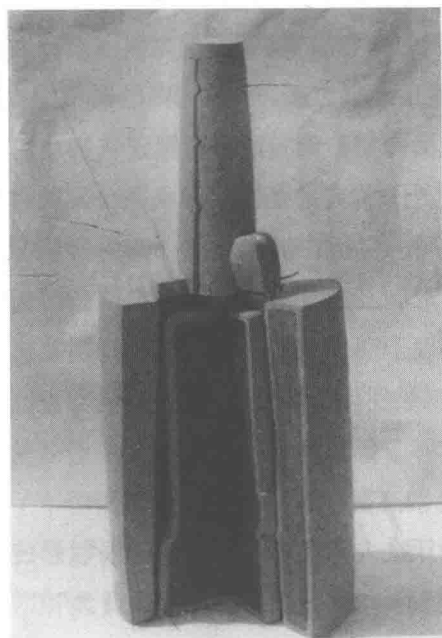
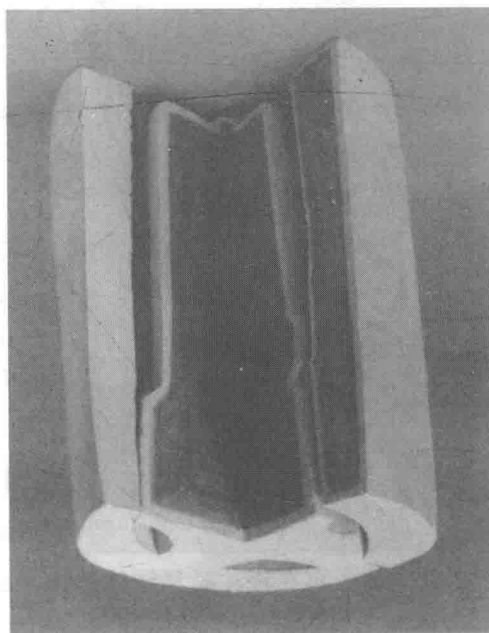
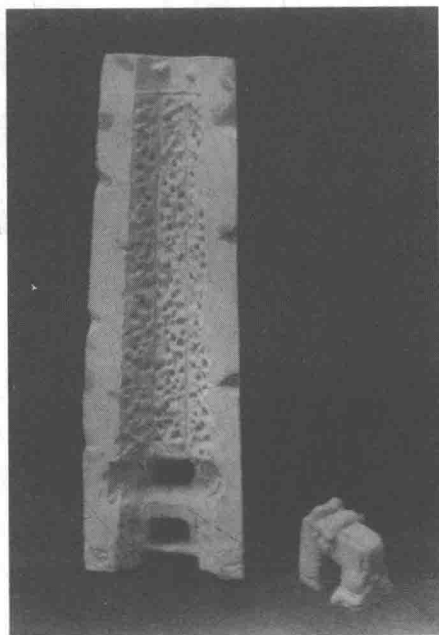
综上所述，曾侯乙甬钟的铸型可由甬部铸范、泥芯和钟体铸范、泥芯组成（图一六）。为

表一 甬钟铸型的构成

甬钟铸型 (136)	甬部泥芯 (1)	甬部铸范 (1)	衡部分范 (1)
			甬部分范 (2) —— 甬的各面分范 (8)
	钟体铸范 (2)	钟体泥芯 (1)	斡部分范 (3)
			舞部分范 (4)
			周缘纹饰分范 (19)
			枚部分范 (12) —— 枚范 (72)
			篆部分范 (8)
			鼓部分范 (2)

表二 制作甬钟铸型所用模具

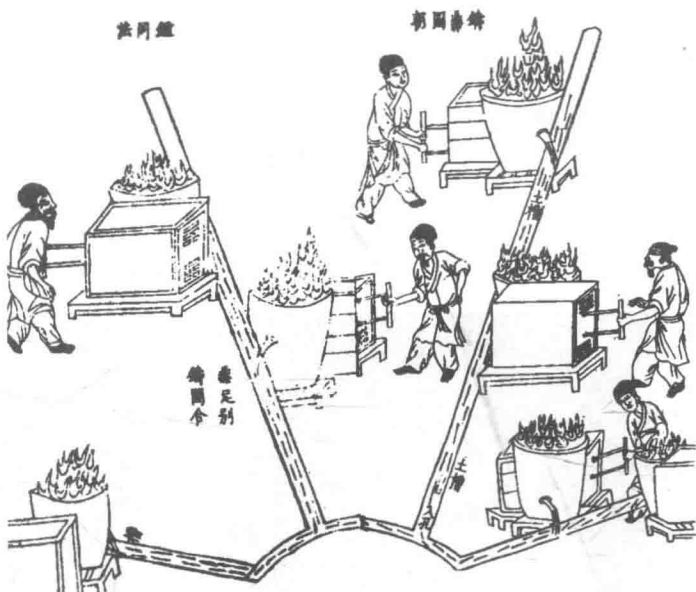
模型:	钟体 (2)	甬部 (1)	
芯盒:	钟体 (1)	甬部 (1)	
范盒:	甬面 (1)	舞部 (1)	周缘纹饰 (1)
	枚 (1)	篆带 (1)	鼓部 (1)
印模:	钲部界划 (1)		



图一七



图一八



图一九

大型甬钟的铸作难度比中小型甬钟要大得多，如曾侯乙下层第1组第1号钟通高达154.3厘米，重206千克。如此皇皇巨制，体形既大，分量又重，各个工艺环节均存在技术难点。细察下层大钟，甬部及甬端均铸镶红铜纹饰^⑤，不可能从甬处浇注，而且所有大钟的口缘均无浇口遗痕，只舞部四片花纹间隔处有磨砺痕迹并有较多铸造缺陷。据此判断，大钟是从舞部浇注，甬部先铸，再在浇注时和钟体铸接。这样，可降低铸型高度，使造型、浇注等工序简化。

大钟的熔化浇注应和类似的大型铸件相同，用大型竖炉熔化铜水，由槽道灌注（图一九）。宋濂《大钟颂》记明代铸钟，铜水“循窾而入，肃肃有声”^⑥，翟楚贤《观铸钟赋》也说：“开窾泉注，归模电射。”^⑦欧洲古代铸钟也采用同样方法。

编钟铸作的完美，历来为人称道，并常被专业的冶铸工作者和冶金史家误认为非用失蜡法不能成就。例如，艾奇逊（L.Aitchson）就说过：“十分肯定的是，中国人在公元前第二千纪末之前，就使用失蜡法铸钟。”^⑧我们的研究则证明，包括曾侯乙钟在内的先秦乐钟都是用复合陶范铸造。在不使用失蜡法的条件下，能获得形制高度复杂、尺寸相当精确的乐钟，关键在于“分范合铸”的娴熟使用。这种技艺最早出现于商代中期，由于它能得到复杂器形又可保持其整体性，适合于乐钟的声学性能要求，因而被引用于铸钟，得到很完善的发展。

二、簠虞结构及其设计制作

簠虞是钟架的古称。《礼记·明堂位》说：“夏后氏之龙筓虞。”郑注：“所以悬钟也，横曰筓……植曰虞。”古人常以钟虞对举，如屈原《楚辞·九歌》：“箫钟兮瑶虞。”

《庄子》说：“梓庆削木为鐻（虞），见者犹鬼神。”《考工记》说：“梓人为筓虞”，

梓为攻木之工,簣虞通常是木结构的,信阳长台关、涪陵、固始古墓葬有木制簣虞和编钟同出。

曾侯乙编钟群的簣虞铜木结构中最引人注目的是铜人钟簣。经X光透视和超声波探测,得知其体腔中空。它的形体由复合陶范铸造成形,两端接装方形截面的铜榫,分别插入簣和跗座中(图二〇)。跗座遍饰高浮雕型的变体龙纹,附饰是预先铸就,在浇注跗座时与它铸接的。跗座下又设一铜盘,由盘的十字形凸棱和座相配。盘周有四个铜环,便于提携安装,环钮做成象鼻形。座和盘的装饰当即《说文解字》所说(簣虞)“饰猛兽之象于其足”。铜人连同跗座、铜盘构成虞体,重达300千克。于省吾曾指出“兴”为“举”之本字^⑨,虞从虍从兴,属于形声兼会意之字。金人双手上举,承托钟簣,和“虞”的原意正相符合。



图二〇

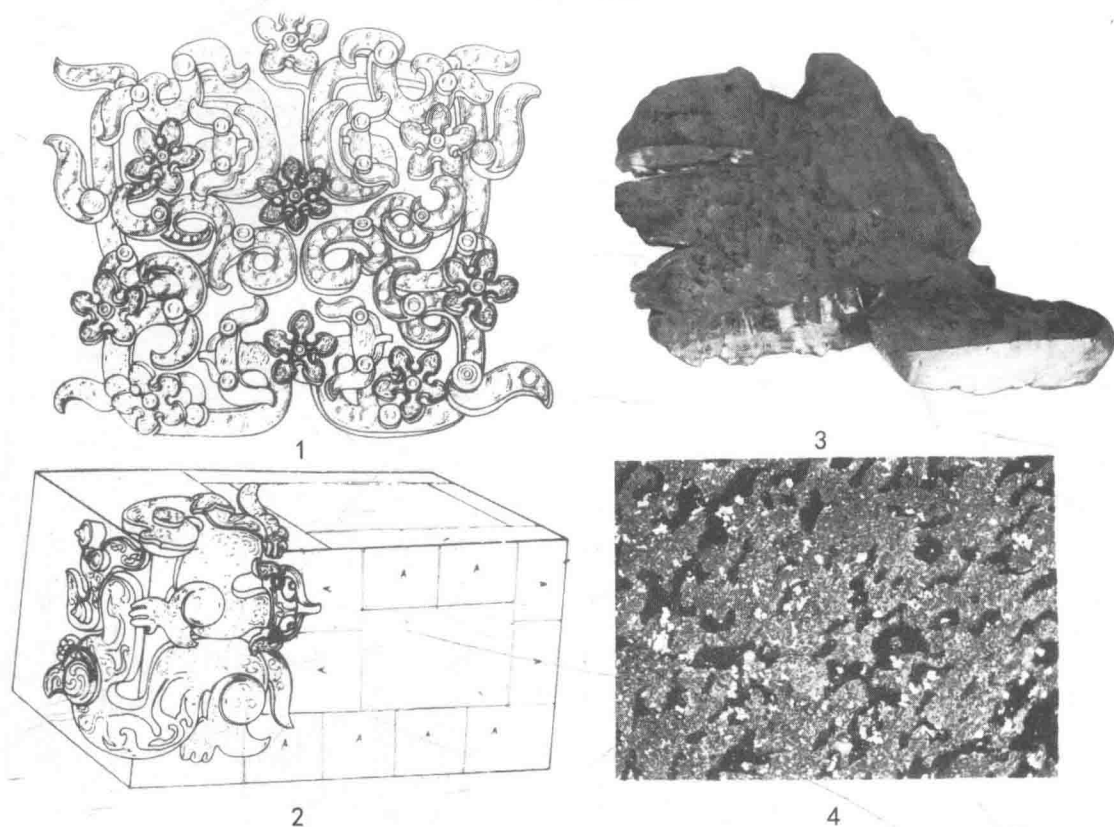
关于簣的形制,《考工记》说:“小首而长,博身而鸿,若是者谓之鳞属,以为筍。凡攫拏援簣之类,必深其爪,出其目,作其鳞之而。深其爪,出其目,作其鳞之而,则于眦必拨尔而怒。苟拨

尔而怒,则于任重宜,且其匪色必似鸣矣。”鳞属即是鱼类,而龙是“鳞虫之精者”,它能负重,能鸣,用作簣是适宜的。曾侯乙钟簣彩绘特别是簣端金钲的高浮雕型蟠龙附饰,正是深爪、出目、鳞甲隆起的形象,亦即扬雄《甘泉赋》所说:“金人伋伋其承钟虞兮,嵌严严其龙鳞。”据作者考察,下层簣端金钲蟠龙附饰是分铸嵌接的,钲的中线有合范的错缝。中层金钲为加强装饰效果,采用高透雕型花卉状附饰(“金华”),是预先铸就,浇注时和钲铸接的。金钲蟠螭纹饰和编钟周缘纹饰相同,是用同一范盒翻制的分范,或正或倒地组合成形的,钲和木簣由铅锡合金灌注固接(图二一)。

簣虞结构的坚固性和稳定性是至关重要的。为此,采取了以下措施:

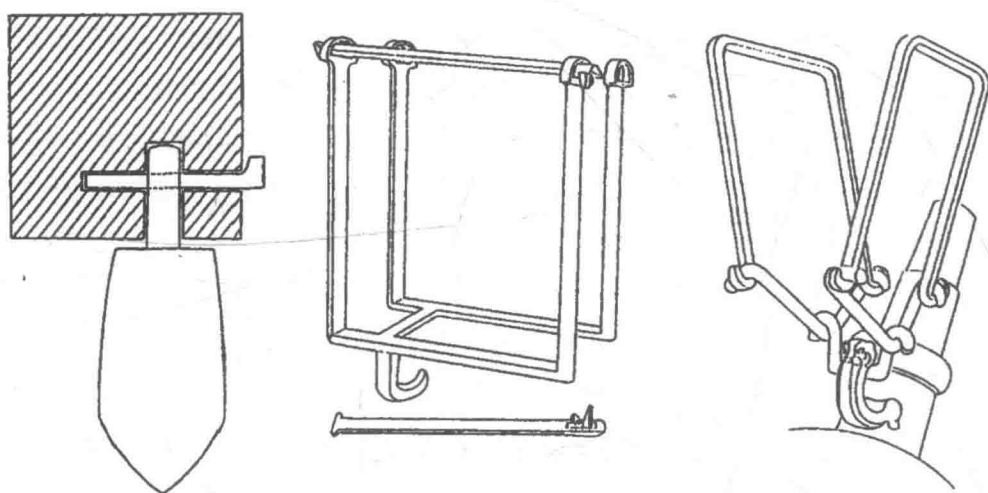
1. 木簣用截面粗大的优质木材制作,钟虞用青铜铸造,以保证钟架有足够的强度。考虑到西簣跨度很大,在簣的中点增设了枰形铜虞来加强支撑。铜虞下设跗座扩大了承压面积,减少了单位面积所受压力,重心落在跗座范围之内,有利于整个簣虞构架的稳定。

2. 特钟和单列编钟的簣虞,一般作一字形排列。多组别的编钟群采取Ⅱ形或Ⅲ形的平面布置即所谓“宫悬”或“轩悬”,使构架各边互为犄角之势,不易倾倒。下层金人连同跗座、底盘均用铜铸,总重超过1000千克,使整套钟乐装备的重心下移,也有利于增加其稳定性。



图二一 金钏纹饰及其与木簨的固接

1. 金钏纹饰 2. 纹饰构成 (A, 共 10 处) 3. 固接所用锡铅合金 4. 锡铅合金的金相组织, 100×



图二二 编钟悬挂方法

1. 上层钮钟 2. 中层甬钟 3. 下层甬钟

3. 上层钮钟直悬，中层甬钟后倾（击钟者位于簋虞之后），下层甬钟前倾（击钟者位于簋虞前方）。这不仅是为演奏方便，也使钟的重量分布均匀，重心落在簋的中心线上，钟架不易倾倒，利用了青铜作为脆性金属材料抗压能力强而抗弯能力较弱的点。

4. 材料力学计算表明，空心构件的抗弯能力较实心构件为优。所以，钟虞铜人做成空心，主要的不是为节省金属，也不是为增强共鸣作用，而是为了增加强度特别是抗弯强度。

欧洲乐钟在敲击时，钟的摆度较大，而编钟悬挂牢靠，很少摆动。这是中国编钟的一个优点，也是旋律演奏所要求的，正如王黼所说：“（编钟）叩之则牢结不动”，如果“摇曳而生余音，失之远矣”^⑧。曾侯乙编钟采取三种悬挂方式：钮钟直悬，钟钮插入簋孔内，用铜销固定，中层甬钟悬挂在青铜构件的钩上，下层甬钟的悬挂结构更复杂（图二二）。它们的效果都很好，出土时只个别钟自架上脱落。

综上所述，曾侯乙编钟簋虞结构合理，具有很好的稳定性和强度，制作精巧。它和编钟群构成了一个完美的整体，珠联璧合，相映得彰，在充分满足功能要求的同时，达到了技术和艺术的统一。

三、钟体结构、振动模式和编钟各部位的声学性能

（一）钟体结构

先秦编钟独特的声学特性，是由独特的钟体结构所决定的，曾侯乙钟也是这样。兹分述如下：

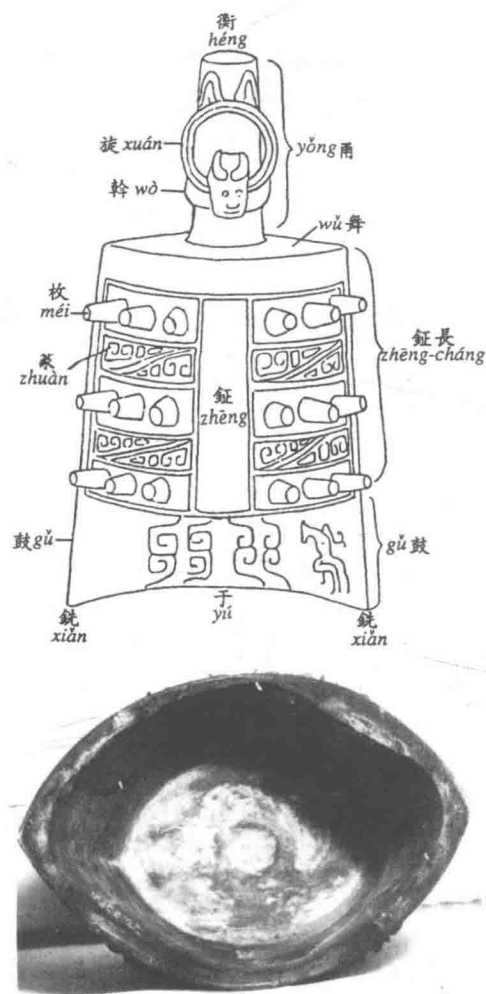
1. 钟体横截面

如上文已指出的，铜质响器从早商的铃开始，其横截面已是扁圆形。沈括《梦溪笔谈》称为“合瓦式”，是非常准确的。作者曾考察过 20 多组总数 200 余枚先秦编钟，它们的截面无例外地是由两个大半圆弧对称组成，近似两片瓦扣合在一起，其圆形可通过仔细测量，用直尺和圆规（即古代所谓规矩）精确绘出。所以把编钟说成是“椭圆形”的，是不正确的。

确认这一点非常必要。正因为钟的截面是两个圆弧相交，所以在相交处形成锐边而不是像椭圆那样的平滑曲面。这个锐边有更大的壁厚，形成铣棱，可遏制声波传递，使钟的声响较快衰减，利于旋律演奏^⑨。这就是沈括所说：“古乐钟皆扁如合瓦，盖钟圆则长，扁则声短。”而梵钟和欧洲的圆形钟，由于截面为正圆形，又有均匀的壁厚，声波沿圆周传播，衰减缓慢，击钟稍快便会产生混响，不宜用于奏乐。

2. 音脊

中国编钟结构的又一特点是音脊的设置。它在多数情况下，是于钟腔内对应于侧鼓音敲击部位，对称分布的四处凸起。这些凸起部底宽上窄，自底缘向上逐渐收缩，直到钲部下缘为止。脊的厚度在底缘处约为钟厚的 1.5 倍，脊与钟壁的过渡带，形成平缓的坡面，音脊的设置对形成编钟独特的双音结构是有重要意义的（图二三）。



图二三

铃和铎都没有音脊。就现有资料来看，音脊是从西周中期开始随着编铎向编钟的转变而出现的。这一结构为编钟所独有，并且不见于早期文献记载（《考工记》于钟腔内部只提到凹下的“隧”而未提及凸起的音脊）。一直到清代，冯水才注意到钟腔内的凸起部，但未予以正确的命名与解释，在《冯氏乐书》第二种《钟攲钟隧考》一文中，他认为凹者为“隧”，凸者为“攲”（参见下文）。

3. 钟体纵截面

编钟的纵截面厚度也不均匀，除去制作误差造成的起伏外，通常是自舞部至底部逐步增厚，形成声弓（声唇）。下部质量的相对集中，使鼓部钟腔成为主要发音部位，对钟的音响起着决定性作用。

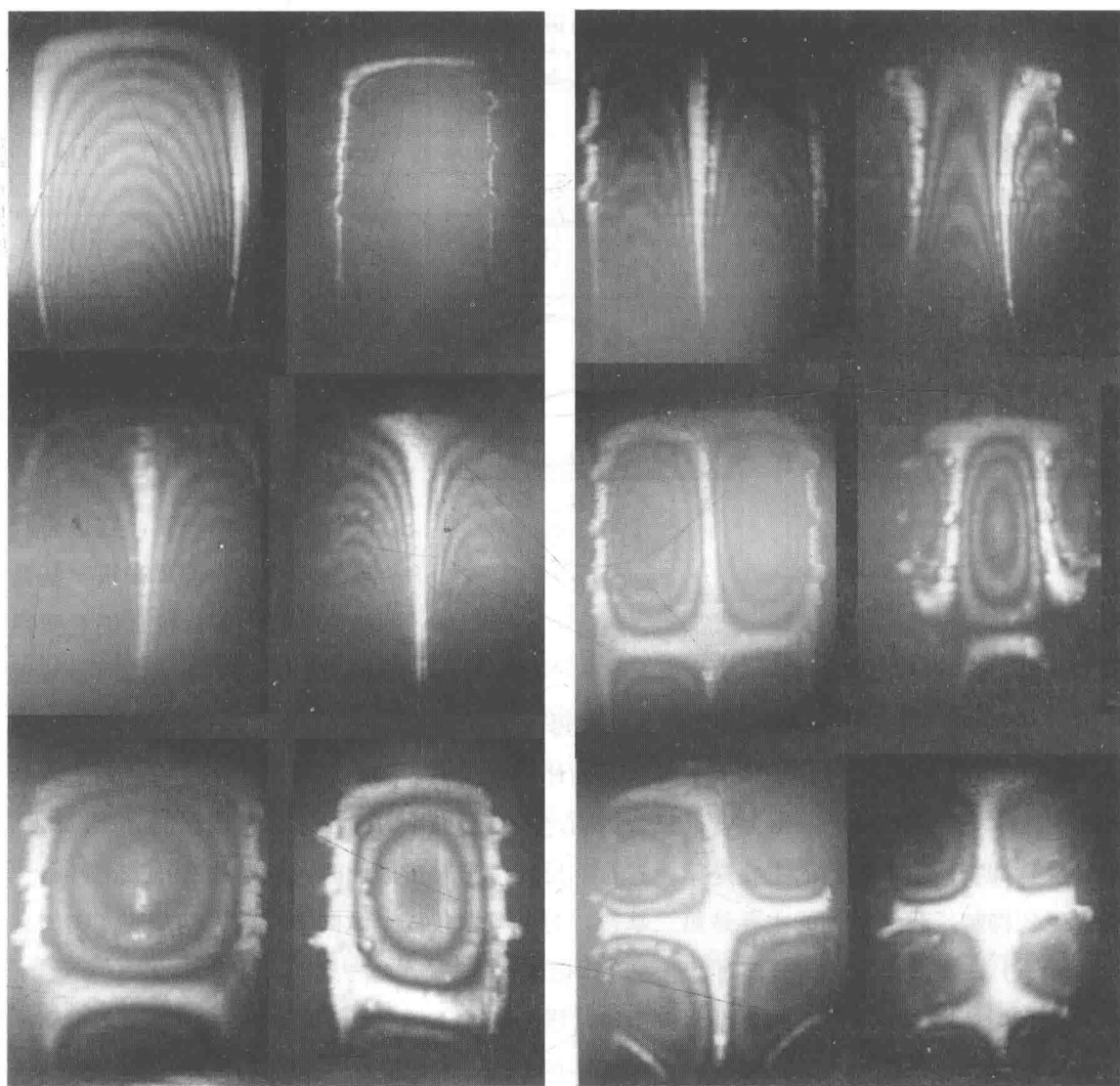
4. 枚和乳钉

枚和乳钉也为编钟所特有。它们是作装饰用的还是具有某种声学功能，长期以来众说纷纭，关于这个问题，将在下文予以阐述。

（二）振动模式

编钟的音响结构决定于钟体的结构，它的发声机制须由钟的振动模式来说明。但由于编钟的形制和振动方式都很复杂，敏感度强，检测时易产生大的误差。作为珍贵文物，任何测试方法都必须在对原件无任何损伤的前提下方可采用。作者比较了各种测试振动模式的方法，认识到采用激光全息摄影技术有可能精确记录编钟各部位对不同频率策动的反应，通过全息图像能直观地观察到整个编钟的振动状态、节线分布和振幅大小，又由于所用激光器功率很小，对原钟不会产生任何损伤，乃是现阶段最理想的测试方法。这个设想得到著名学者王大珩先生和哈尔滨科技大学贾陇生、常滨久等先生的支持。在中国科学院资助下，我们于1980年秋冬，检测了曾侯乙上、中层编钟。通过测得的各种频率的钟的振动模式，确定了振型分类、节线与音响结构、钟体结构、质量分布与节线变态的内在关系，从而揭示了编钟声学特性的机制，并为编钟复制和调音提供了科学技术依据^⑥。

测试时，是用正弦电信号激励编钟使之发生简谐振动，用激光全息时间平均法记录振动模式。光路经专门设计，激光光束由分光镜分成物光和参考光。物光从振动的钟体反射到全息底片上，与参考光相干，形成干涉条纹。若钟体全息图再现像亮度为I，静态全息像亮度



b	b'
c	c'
d	d'

e	e'
f	f'
g	g'

图二四 曾侯乙中层三组1号钟正、侧位的振动模式

为 I_0 ，根据时间平均法基本原理应有 $I = I_0 J_0^2(\rho)$ ，即振动亮度分布由静态亮度被宗量 $\rho = 2\pi/\lambda\alpha (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)$ 的第一类零级贝塞尔函数所调制。 α 为物体某点振幅，当 $\alpha = 0$ 时， $\rho = 0$ ， $J_0^2(\rho) = 1$ ， $I = I_0$ ，图像上最亮的明线即是节线。远离节线， ρ 随 α 增大，逐次出现暗、明条纹（即等幅线），亮度逐级减弱。所以，全息再现像能直观地给出振动模式、节线振动区分布和各点振动强度。

图二四为曾侯乙中层三组第1号钟的激光全息像，显示了钟在静态和六种频率下正、侧位的振动模式（表三）。