

基于泥型铸造的型壳配方及成形工艺研究

章彤 万红 张磊 谢珍珍
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘要 中国古代青铜器盛行于先秦时期,现代出土的大量青铜器大多采用泥型铸造。通过对中国古代青铜器泥型铸造工艺及古法配方的研究,进行泥型铸造古法配方复原试验,并在传承古法的基础上,利用现代材料,优化古法泥型铸造配方及成形工艺,为现代泥型铸造方法提供技术工艺参数,达到弘扬古法泥型铸造的目的。

关键词 中国古代青铜器;泥型铸造;粘结剂;古法复原;优化配方

中图分类号 TG249.5

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.06.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Shell Mold Formula and Forming Process Based on Clay Mold Casting

Zhang Tong, Wan Hong, Zhang Lei, Xie Zhenzhen

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University.)

Abstract: Ancient Chinese bronze were prevailed from the pre-Qin Dynasty. A large number of bronze artifacts unearthed in modern times were mainly fabricated by clay mold casting. Through the research on the forming process and clay formula of ancient Chinese bronzes by clay mold casting, the restoration experiment of the ancient formula was carried out, and the shell mold formula and forming process were optimized by modern materials on the basis of inheriting the ancient method, so as to provide technical parameters for modern clay mold casting, achieving the purpose of promoting clay mold casting.

Key Words: Ancient Chinese Bronzes, Clay Mold Casting, Adhesive, Ancient Restoration, Optimized Formula

中国古代青铜器盛行于先秦时期,作为文化的载体承载着中国历史的进程。先秦时期中国青铜器主要铸造方法为泥型铸造,其作为一种从古代陶范铸造演变而来的传统铸造技术^[1,2],是制作中国古代青铜器的主要方法之一。泥型铸造基本可铸造礼器、兵器、生产工具等青铜器具,且制作出的青铜器表面纹饰非常精美^[3,4]。

谭德睿等^[5]将出土的古代泥型残块,镶嵌于现代方法制作的泥型壳中,并在相同浇注条件下,与使用纯现代工艺技术制得的泥型范块浇注出的工艺品相比较,发现含有古代出土的泥型所制出的工艺品纹饰较现代工艺技术制得工艺品更加清晰精致。原因是古代泥型范块中加入了植物质,即禾本类或木本类植物的茎、叶、壳等焚烧残留物(如稻芒、稻灰、草本灰等)。它们均含有大量植物硅酸体,这种植物硅酸体(以下称植物质)是植物体内的硅,通过根系从土壤中吸收,经导管传送,在细胞内腔或细胞之间以水合硅($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)的形式存在于植物体内,形成难溶的硅酸形态。植物质和石英类

现代材料的主要化学成分虽然同为 SiO_2 ,但前者属非晶质,只有经高温长时间加热,才能部分转变为结晶态,并且密度小(为 2.15 g/cm^3),含水量最大可达10%,此种物质在改善泥型性能中起着非常重要的作用。

研究发现,古法泥型铸造配方中以泥砂为主,配一定量植物质,泥型铸造在原生土中加入 SiO_2 可防止泥料因加热收缩引起变形^[6]。植物质富含植物硅酸体,可降低原生土的热膨胀率,使泥型有一定的发气能力,使泥型与铸件间形成气膜,减小了流动的摩擦阻力,改善了泥型性质,从而提升了充型能力,有利于铸造出轮廓清晰,纹饰精致的青铜器。在古法泥型铸造工艺中,泥型壳除了泥砂和植物质外,还加入了一定量的腐泥作为粘结剂,其中腐泥是选取的河塘淤泥中再加入一定量沤烂果皮胶物质,混入细泥制作而成^[7]。

目前关于泥型铸造复原古法配方的研究报道很少。本课题根据出土泥型残件化学成分,固定泥型固态材料(64.25%的泥砂+7.15%的植物质),通过改变腐泥(粘结剂)配比,探求还原古法泥型配方。再对复原古法配

收稿日期:2021-09-10;修改稿收到日期:2021-11-30

第一作者简介:章彤,女,2001年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1363533855@qq.com

引用格式:章彤,万红,张磊,等.基于泥型铸造的型壳配方及成形工艺研究[J].特种铸造及有色合金,2022,42(6):789-792.

ZHANG T, WAN H, ZHANG L, et al. Shell mold formula and forming process based on clay mold casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6):789-792.

方进行改良。泥料选用宝鸡地区(价高难购得),因此固定泥型材料(35.70%泥砂+7.15%植物质),以现代铸造工艺中铝矾土、石膏粉等材料代替少部分泥料;再因腐泥(陈腐有机质)实验室制备周期长且较为繁琐,以现代铸造工艺中常用粘结剂水玻璃代替,对古法泥型复原配方进行优化,从而提高泥型的综合性能,得到更优良的配方,达到满足现代泥型铸造需求的目的。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

所用材料有泥砂、有机质腐泥、植物质、铝矾土、石膏粉、水玻璃,具体见表 1。

表 1 试验用材料
Tab.1 Materials for experiment

材料	型号等级	产地
泥砂	100~320 目	陕西宝鸡
有机质腐泥 ^①	固态泥 250 目	江西南昌
植物质	200 目	江西南昌
铝矾土、石膏粉	工业纯	江苏青田
水玻璃	工业纯	山东烟台

注:采用粘度杯测定有机质腐泥粘度为 20~25 s/100 mL

1.2 泥型铸造古法复原配方分析

古法复原侯马铸铜遗址出土的泥型^[8]为复原对象,侯马铸铜遗址出土的泥型的化学成分见表 2(表中 R 表示金属或非金属元素,如 Fe、Ca、S 等)。

表 2 古代泥型的化学成分分析^[5]
Tab.2 Chemical composition of ancient clays^[5]

名称	出土地点	年代	$w_B/\%$				化学式
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	其他	
陶范	侯马铸铜遗址	东周	64.36	11.53	6.51	17.6	$2.22R_xO_y \cdot Al_2O_3 \cdot 9.49SiO_2$
原生土	侯马铸铜遗址灰土层下	东周	55.73	11.91	9.82	22.54	$2.70R_xO_y \cdot Al_2O_3 \cdot 7.95SiO_2$

古法复原泥型铸造固体粉料由 64.25%的泥砂及 7.15%的植物质构成,其中植物质由 2.15%的植物质焚烧体、2.15%的稻芒、1.425%的松烟灰和 1.425%的麻纤维焚烧至 600 ℃,保温 1 h,冷却后进行碾磨过筛制得。液态粘结剂加入量为固体粉料质量分数的 40%,根据腐泥和水的配比共分为 5 组配方,具体含量见表 3。

表 3 泥型铸造古法配方
Tab.3 Ancient formula of clay mold casting %

配方编号	w_B			
	固体粉料		粘结剂	
	泥砂	植物质	腐泥	水
A ₁	64.25	7.15	0	28.60
A ₂	64.25	7.15	7.15	21.45
A ₃	64.25	7.15	14.30	14.30
A ₄	64.25	7.15	21.45	7.15
A ₅	64.25	7.15	28.60	0

1.3 泥型铸造古法优化配方分析

在古法复原泥型铸造固体粉料(64.25%的泥砂+7.15%的植物质)的基础上,采用耐火材料替代泥砂和植物质,同时采用水玻璃代替腐泥粘结剂,粘结剂加入量为固体粉料质量分数的 40%,根据水玻璃和水的配比,共分为 5 组配方,具体含量见表 4。耐火材料配比为 7.14%的铝矾土、10.70%的石膏、7.14%的滑石粉、3.5%的石英。

表 4 泥型铸造古法改良配方

Tab.4 Ancient optimized formula of clay mold casting %

配方编号	w_B				
	固体粉料			粘结剂	
	泥砂	耐火材料	植物质	腐泥	水
A ₁	35.70	28.55	7.15	0	28.60
A ₂	35.70	28.55	7.15	7.15	21.45
A ₃	35.70	28.55	7.15	14.30	14.30
A ₄	35.70	28.55	7.15	21.45	7.15
A ₅	35.70	28.55	7.15	28.60	0

试验以朽木为原型,制作硅橡胶软膜,利用模具制作蜡型,并在蜡模上设计浇冒系统,以泥型制型壳,经脱蜡焙烧,最后浇注铜合金。

1.4 焙烧工艺

通过焙烧去除型壳中的水分、残留模料以及有机物等,以保证其具有低的发气量和良好的透气性。考虑古法条件下加热升温较缓慢,为还原古法而采用梯度升温,每升高 100 ℃保温 1 h,两种工艺所采用的焙烧工艺见图 1。

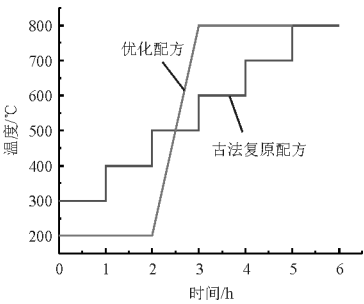


图 1 泥型焙烧工艺图

Fig.1 Baking process of clay mold casting

2 试验结果及分析

2.1 泥型配方的对比分析

采用 HB-XQY-II 智能型砂强度仪测定焙烧后型壳试样的室温抗弯强度和抗拉强度;采用 ZTY 智能型砂型透气性测试仪测试型壳的透气率;采用 SYD-2801H 针入度自动试验器测试型壳的针入度;采用 D8ADVANCE-A25 型 X 射线衍射仪分析型壳相组成。

图 2 为根据 XRD 物相分析结果所得泥型配方的含

量。由图 2 可知,古法复原配方的成分分析与侯马铸铜遗址出土的泥型中主要成分 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 的成分相近。古法复原 A 类配方与优化 B 类配方相比较,优化 B 类配方加入铝矾土、石膏、滑石粉、石英代替泥砂量,因此其 CaO 以及 SiO_2 总量降低,并促进了 CaSO_4 的生成,使得其他含量上升。但配方中植物硅酸体含量不变,关键性的非晶质 SiO_2 成分不发生变化;只是晶质 SiO_2 降低。

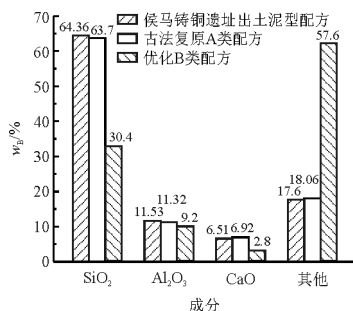


图 2 泥型配方的含量

Fig.2 Formula content of different clay molds

2.2 优化前后的抗弯强度及抗拉强度

图 3 为粘结剂中腐泥和水玻璃含量对焙烧后泥型壳室温抗拉、抗弯强度的影响。由图 3a 可见,采用水玻璃作为粘结剂时,泥型壳试样室温抗拉、抗弯强度均较低,分别仅为 0.08 MPa 和 0.19 MPa。粘结剂中加入腐泥后,泥型试样室温强度显著改善。随着粘结剂中腐泥含量增加,泥型试样室温抗拉、抗弯强度均逐渐提高,当完全采用腐泥作为粘结剂后,泥型试样室温抗拉、抗弯强度均达到最大值,分别为 0.43 MPa 和 0.65 MPa,相比未加入腐泥时提高了 437.5% 和 242.1%。由图 3b 可见,单纯采用水作为粘结剂时,泥型试样室温抗拉、抗弯强度均较低,分别仅为 0.20 MPa 和 0.41 MPa。粘结剂中加入水玻璃后,泥型试样室温强度显著改善。随着粘结剂中水玻璃含量增加,泥型试样室温抗拉、抗弯强度均逐渐提高,当完全采用水玻璃作为粘结剂后,试样室

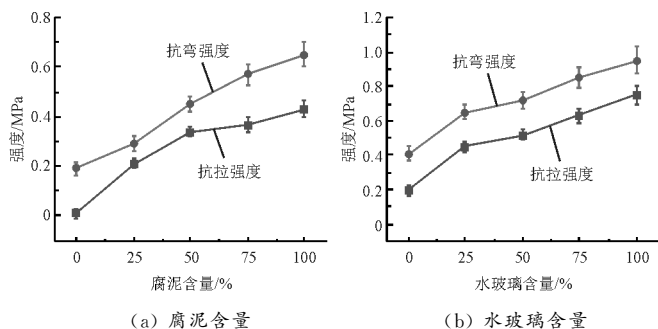


图 3 腐泥含量和水玻璃含量对泥型室温抗拉、抗弯强度的影响

Fig.3 The effects of sapropel content and sodium silicate content on the tensile strength and bending strength of the clay mold

温抗拉、抗弯强度均达到最大值,分别为 0.75 MPa 和 0.95 MPa,相比未加入水玻璃时提高了 275% 和 131.7%。

2.3 优化前后泥型壳室温透气率的影响

图 4 为粘结剂中腐泥含量和水玻璃含量对焙烧后泥型壳室温透气率的影响。由图 4 可见,随着粘结剂中腐泥含量增加,试样室温透气率逐渐下降。粘结剂中腐泥含量低于 50%,试样室温透气率的下降较为平缓。当腐泥含量为 50% 时,室温透气率为 $117 \text{ cm}^4/(\text{g} \cdot \text{min})$,相比未加入腐泥时仅降低了 4.1%。但当腐泥含量超过 50% 后,室温透气率明显下降,当腐泥含量为 75% 时,室温透气率仅为 $105 \text{ cm}^4/(\text{g} \cdot \text{min})$,相比未加入腐泥时降低了 13.9%。继续增加腐泥含量,透气率下降变得平缓。随着水玻璃含量增加,室温透气率逐渐下降。水玻璃含量低于 25% 时,室温透气率的下降较为平缓。当粘结剂中水玻璃含量为 25% 时,室温透气率为 $114 \text{ cm}^4/(\text{g} \cdot \text{min})$,相比未加入水玻璃时仅降低了 1.7%。但当水玻璃含量超过 25% 后,试样室温透气率明显下降,当水玻璃含量为 50% 时,室温透气率为 $98 \text{ cm}^4/(\text{g} \cdot \text{min})$,相比未加入水玻璃时降低了 12.5%。继续增加水玻璃含量时,试样室温透气率下降变得平缓。

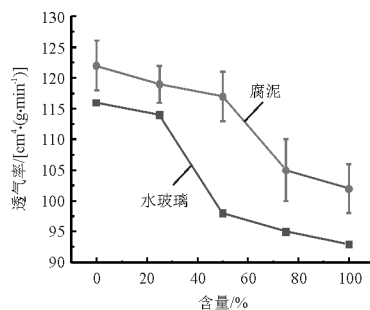


图 4 腐泥含量和水玻璃含量对泥型壳室温透气率的影响

Fig.4 The effects of sapropel content and sodium silicate content on the air permeability of the clay mold at room temperature

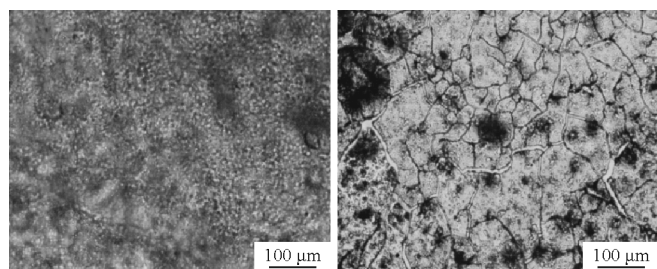
浇注时铸件会发生变形甚至出现裂纹,主要原因是型壳的强度不足^[9]。浇注时,型壳内的气体无法及时排出,发生受热膨胀而形成高压气障,使得合金熔体不能充分填充模具型腔,并最终导致铸件出现气孔或浇不足等缺陷。从 A、B 两组配方可以看出,A 组配方中,添加 14.30% 的腐泥(A_3),获得的泥型壳综合性能最佳;B 组配方中, B_2 配方获得的泥型壳综合性能最佳。对

表 5 采用不同配方时泥型壳的性能

配方	抗拉强度/MPa	抗弯强度/MPa	透气率/%
A_3	0.34	0.46	117
B_2	0.45	0.65	114

比 A_3 和 B_2 , 虽然 B_2 配方的透气率相比 A_2 配方略有下降(2.6%), 但抗拉强度和抗弯强度却分别提高了 32.4% 和 41.3%, 可见, 优化配方要优于古法复原配方。

古法复原泥型壳配方中泥砂按一定配比占总固体量的 90%, 而优化配方里由于往泥砂中加入了约 40% 的铝矾土、石膏粉等耐火材料, 即泥砂的占比降低至 50%, 正是这些现代耐火材料的加入, 使得泥型壳强度明显提升。同时, 优化配方还将粘结剂用易取得的水玻璃替换了腐泥, 图 5 为 A_3 和 B_2 两种配方获得的泥型壳的显微组织形貌。由图 5a 可见, A_3 配方中, 水、泥砂以及植物质之间处于明显分离状态, 这是因为古法配方中粘结剂为腐泥经陈腐后所得到的植物基胶质, 其主要成分为水和有机质, 经焙烧后其粉粒进行堆叠, 未有明显的粘连。由图 5b 可见, B_2 配方中, 水玻璃、泥砂以及其他粉料之间存在着明显的硅氧键刚性网状结构, 这是因为其粘结剂为水玻璃, 由于水玻璃发生水解反应, 生成的硅酸分子先结合成长链分子, 再进一步形成骨架结构, 使水玻璃失去流动性, 变成硅酸凝胶。硅酸凝胶粘结砂粒, 从而使泥型壳强度提高。

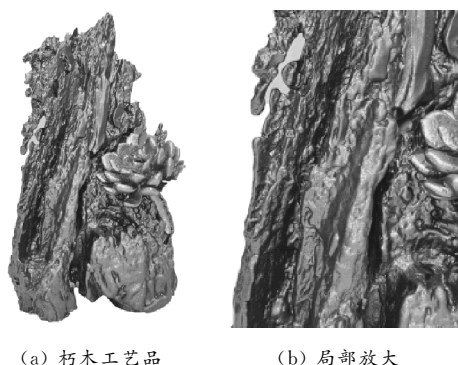


(a) 古法复原配方 (b) 优化配方
图 5 不同配方制得的泥型壳显微组织

Fig.5 Microstructure of clay mold shell with different formula

3 浇注成形工艺品

图 6 是以朽木为原型, 采用优化配方 B_2 浇注出的



(a) 朽木工艺品 (b) 局部放大
图 6 采用 B_2 优化配方浇注的 H62 黄铜朽木工艺品
Fig.6 H62 brass deadwood crafts by pouring casting with optimized B_2 formula

朽木工艺品。其尺寸为 110 mm×210 mm×70 mm, 壁薄为 3~45 mm, 材质为 H62 黄铜。表面经喷漆处理, 可以看出, 表面纹饰清晰, 外型精美。

4 结 论

(1) 古法复原泥型配方固态材料(64.25% 泥砂 + 7.15% 植物质), 加入腐泥和水(占固体粉料质量分数 40%)作为粘结剂, 腐泥与水比为 3:1 配方的综合性能最好, 此复原配方中含 63.70% 的 SiO_2 , 与山西侯马铸铜所用陶范成分相近, 其植物质中非晶质 SiO_2 在古法成型工艺细化纹饰方面起到关键作用。在制作型壳中提高含水量, 增加焙烧后泥型的发气能力, 增强透气性, 从而提升了充型能力, 有利于铸造出轮廓清晰, 纹饰精致的青铜器。

(2) 优化泥型铸造配方中, 在植物质为 7.15% 的基础上, 加入铝矾土、石膏等材料代替泥料, 以水玻璃为粘结剂代替腐泥(陈腐有机质), 以现代易得材料改良古法复原配方, 结果表明, 优化泥型的抗弯强度、抗拉强度都得到了明显提升, 浇注出的工艺品纹饰清晰精致。

参 考 文 献

- [1] 王福淳. 我国的艺术铸件[J]. 铸造技术, 1996(5): 24-26.
- [2] 吴坤仪. 中国古代铸造技术史略[J]. 哈尔滨工业大学学报(社会科学版), 2001, 3(4): 39-42.
- [3] 谭德睿, 陈美怡. 艺术铸造[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996.
- [4] 万红, 熊博文, 卢百平. 论中国古代青铜器的范铸法[J]. 铸造技术, 2015, 36(9): 2 320-2 323.
- [5] 谭德睿, 徐惠康, 黄龙. 中国青铜时代陶范铸造技术研究[J]. 考古学报, 1999(2): 211-250.
- [6] 万红. 艺术铸造[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2019.
- [7] 谭德睿, 黄龙, 王永吉, 等. 植物硅酸体及其在古代青铜器陶范制造中的应用[J]. 考古, 1993(5): 469-474.
- [8] 耿家齐. 中国古代及现代泥型铸造[J]. 成都科技大学学报, 1988(6): 151-157.
- [9] 荆海鸥. 高温焙烧对铸造用石英砂工艺性能的影响[D]. 西安: 西安理工大学, 2004.

(编辑: 刘卫)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com