
铜钉的原理探究^{*}

Cramps in Mending Ceramic Objects

赵守江 纪东歌

Zhao Shoujiang Ji Dongge

内容提要：

“铜瓷”是陶瓷修补技艺里一种重要且传播极其广泛的技术方法，铜钉作为其中关键性修补材料，其功能发挥与否直接关系到铜器的成败。本文从力学角度研究铜钉，对其材质、造型以及铜瓷工序进行了阐述，归纳出各技术要点所运用的物理力学原理。通过建立某一规格铜钉的有限元模型，分析了不同材质铜钉在上钉和定型阶段的力学特性，同时也验证了铜瓷技艺的科学性。研究结果有利于深入了解铜瓷技术，更好地指导瓷器修补方法，改进铜补技艺。

关键词：

铜钉 铜瓷 力学 ANSYS 有限元

ABSTRACT:

In traditional Chinese porcelain mending techniques, cramp is a key repair material, whose function is related directly to the success or failure of the attempt. This article expounds on the material, form, and procedures of the cramps, and then summed up the mechanical principles applied in key elements of the mending procedures. Subsequently, the finite element models of cramps of a certain specification are casted with a variety of source materials to analyze mechanical characteristics during the nailing and hammering stages, and also the scientificity of cramps was verified. The results not only helps to deepen the understanding of the craft, but can also better guide and improve the repair techniques.

KEYWORDS:

cramps, porcelain cramping, mechanics, ANSYS, FEM

^{*} 本文由故宫博物院 2015 年度课题“明清宫廷陶瓷修复研究”经费资助。

铜瓷是我国乃至全世界范围的一门古老的陶瓷修补技艺。它起源于古代民间的日常生活需求,随着制瓷技术的发展和瓷器使用的普及被迅速传播且广泛应用。最晚至元代,铜瓷在一定程度上已经成为一种市井习俗和社会行业¹,至明清时期,铜瓷工艺更是发展到了鼎盛。谚语“没有金刚钻,别揽瓷器活”就是源自铜瓷技术。

由于瓷器质坚性脆,一旦破碎后很难复原或继续使用。在铜瓷技术普及之前,陶瓷器的修补多为黏合剂拼粘或直接打磨,元末明初的《墨娥小录》



图1 “马蝗绊”龙泉窑青瓷碗 东京国立博物馆藏

记录有面筋加石灰制作黏合剂来修补瓷器,但缺点是“不可于水内久浸”。相比之下,铜瓷更加坚固可靠,适用面也广。清初期法国传教士殷弘绪在书信中写到:“使用金刚钻将破碎的瓷片予以接合,在中国成为一种职业,有专门从事瓷片修修复原的工匠。他们使用金刚钻就像是使用针般,於瓷器上钻几个小孔,再于小孔穿入极细的铜丝予以缝合。这样一来,瓷器就能照常使用,并且几乎看不出破裂的痕迹。”²铜补后的瓷器即铜器不仅外形保持完好,表面处严丝合缝,同时还保留着瓷器原本的使用功能〔图1〕。

而铜钉作为一种重要的陶瓷修补材料,与铜瓷技艺密不可分。铜瓷的工序主要由钻孔和砸铜钉两部分组成³——先将破损的器物绑扎固定,后用钻具在瓷器断裂的两边打孔,再将铜钉的两头分别敲入孔内以箍住器物,最后在空隙处涂抹上用生石灰粉和糯米汁(或鸡蛋清)调制好的白瓷膏以达到封护的目的。铜补后的瓷器之所以“滴水不漏”,其关键在于铜钉的作用。铜钉,旧时也称“铜子”“补钉”,是一种平面成扁平状的两脚回勾金属钉,其外形有些类似于建筑上所用的扒钉。它们多为铜瓷匠人自制,无固定标准,根据外观形状分类有柳叶钉、平钉、梅花钉等,虽看似简单,但由于特殊的形状和合理的工艺与组合确能保证其在铜合两片碎瓷片时拥有足够的“咬合力”。

铜瓷在古代作为一项市井手工行当,其铜钉的制作、选用以及铜补的工序、要点都是铜瓷匠们在实践中总结经验总结,且主要依靠师徒或家族传承的形式获得延续;随着工业现代化,行业逐渐凋零;依据“修旧如旧”,“最小干预”原则,铜瓷在文物修复中又受到制约。因此,铜瓷技艺长期得不到足够重视,理论研究成果匮乏,并且现阶段的学术研究集中在铜瓷的概念、制作工艺、历史以及艺术设计等方面的阐述⁴⁵⁶⁷⁸⁹,从科学分析角

1 李健:《没有金刚钻,别揽瓷器活——记首都文物普查中几件早期铜瓷工艺实物发现过程》,《中国文物报》2016年5月27日。

2 谢明良:《乾隆的陶瓷鉴赏》,《台湾学术季刊》2003年第2期。

3 纪东歌:《乾隆时期宫廷瓷器修补》,《南方文物》2014年第4期。

4 徐美慧:《由技到艺的民间传统铜瓷艺术》,沈阳大学硕士学位论文,2015年。

5 黄思洁:《传统“铜瓷”工艺特点及发展研究》,华南理工大学硕士学位论文,2016年。

6 黄修林、黄思洁、欧阳小胜:《浅谈“铜瓷”传统工艺及其发展趋势》,《陶瓷学报》2015年第4期。

7 王云庆、向怡泓:《铜瓷技艺》,《寻根》2017年第3期。

8 陈馨:《铜钉补瓷技术之中外比较》,《文博》2008年第5期。

9 袁啸波:《铜瓷,从中国到海外》,《收藏》2015年第23期。

度对铜瓷中铜钉所起的重要作用以及功能如何发挥却没有相关探讨。而研究铜钉的力学原理不仅有利于深入认识铜瓷这一传统非物质文化遗产,也能改进和完善铜补技艺,并对现代瓷器修复和修复史的研究具有指导意义。

一 铜钉及其工艺特征



图2 铜钉

“铜”,《玉篇·金部》解释为“以铁缚物”。这里“铁”指的就是铜钉或类似的金属丝或片。旧时民间使用的铜钉一般多为铁和铜制,且无标准形制。铜瓷匠在制作时,先用锤把金属丝的砸扁,然后剪成均等长的“段”,再拿专用盘钳夹住一端,砸出一个钉脚,并用同样的方法砸出另一钉脚¹。这样砸出来的铜钉就呈现出人们通常所看到的样式——腰部呈扁平菱形,并且两端分别有回勾钉角〔图2〕。后期出现的花式铜钉需根据雇主要求进行打制,造型上没有固定模式,因此这里不做统一分析。

铜钉按尺寸可简单分为:平铜钉、豆子钉、米粒钉、沙粒钉。铜钉很少现砸现用,需提前制备好几种规格。铜钉的形式依据所要铜补的器物大小而定,铜补大件器皿时用较大铜钉,铜补小件器物视断裂程度而定。

除了铁、铜质外,铜钉的选料还有金银等贵金属。根据出土和传世文物显示,明代的铜钉常见有铁、铜两种。明清时期,金钉和银钉才得以流行并多被应用于铜瓷中较为精细的“秀活”当中。有些地区由于地域金属资源的短缺,也曾使用过铅钉或者锡钉。但这两种铜钉因材质偏软、牢固程度低,使用极少²。

由于铜钉的尺寸以及铜补的位置没有固定标准,一旦因铜钉尺寸不合适,还是因铜钉之间距离大小不合适,都无法使破碎的瓷片咬紧,因此铜瓷匠的技艺以及经验至关重要。铜补时,首先依据器物特征和裂纹走势制定铜补方案。其次依据事先确定的位置在瓷壁上钻孔。孔眼厚度要恰到好处,应深入釉面以下,一般最大可为瓷器厚度的三分之二³。钻孔浅,铜钉之力扒不住瓷片,裂缝依旧。钻孔深,洞穿瓷片,无法达到“半铜”以使器物不漏水,甚至会损毁瓷器。两钻孔之间的距离应与铜钉的长度相吻合,钉脚的长度也须与钻孔深度相匹配。然后使用特制的弧勾刀将铜钉上入孔内,用槌轻击使其嵌牢。弧勾刀是一种特殊工具,其一端为圆弧形,中间有一个豁口用于矫正铜钉的弧度,另一端有一个类似钩针的小勾,作拉动上钉使用。铜钉的敲击定型极其考验铜瓷艺人的经验。技艺精湛者可“一锤定音”,甚至凭借敲击的声音就可以判断铜钉是否牢固。最后利用调剂好的白泥填实缝隙与孔眼。

通过以上过程可以发现,为使铜补后的瓷器能够坚固耐用,从材质、造型以及铜瓷工艺各细节处均运用了一些物理、力学知识以便充分发挥铜钉的作用,其简单归纳如下:

1 林新忠:《铜炉匠:捡根铁丝吃顿饭》,《走向世界》2013年第31期。

2 徐美慧:《由技到艺的民间传统铜瓷艺术》,沈阳大学硕士学位论文,2015年。

3 黄思洁:《传统“铜瓷”工艺特点及发展研究》,华南理工大学硕士学位论文,2016年。

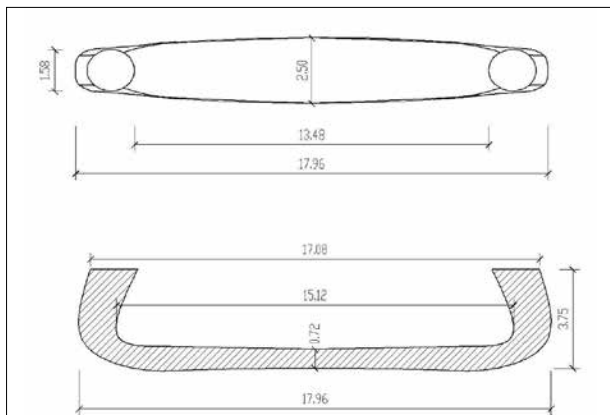


图3 铜钉的尺寸 (mm)

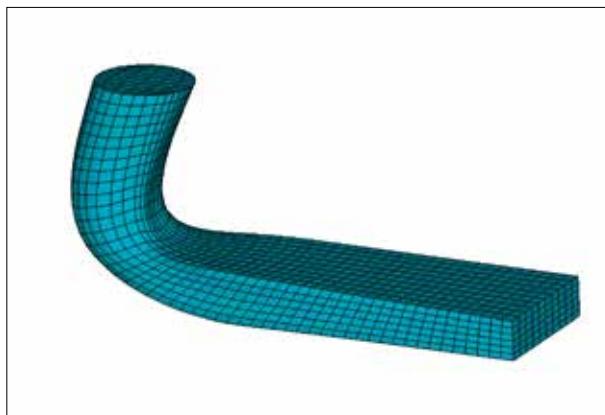


图4 铜钉的有限元模型

- 1、铜钉在材质方面选用了一些强度、硬度高且稳定性较好的金属材料。
- 2、腰部成扁状不仅降低了截面模量易于拉动上钉，而且增大了与瓷器的接触面积，更加稳固。
- 3、两端回钩造型以及相匹配的孔距能够确保铜钉有一定的初始预应力。
- 4、钉角短小，在相同的转动角度下，两钉角间能够产生更大的夹力。
- 5、缝隙与孔眼处填满白泥可使铜钉免于锈蚀，且不容易变形或错位。

二 铜钉的力学模型分析

为了研究铜钉的力学性能，以一常用规格的铁质铜钉为例〔图3〕，首先进行精确测量，以备进行建模和模拟研究。

此次采用有限元软件 ANSYS(15.0)建立铜钉的三维有限元模型。模型选用 3D20 节点的 solid95 实体单元。该单元采用协调的位移插值函数，可很好地适应曲线边界，对不规则形状具有较好的精度^[1]。鉴于铜钉的对称性以及建模的便利性，截取其二分之一做简化计算〔图4〕。此时，模型的 3D 实体单元总数为 3000 个。

在实际嵌入铜钉过程中，钉角会由于外扩产生一定的夹力。因此建模分析时，采用固定铜钉的中部截面，于钉角部位施加不同位移荷载的方法。其中位移荷载值为两钉角之间外扩距离的一半。为对比研究铜钉的性能差异，赋予有限元模型不同的材料属性。

（一）低碳钢铜钉的分析

旧时民间铜补多用铁铜钉，而铁合金的品种很多。通常若按含碳量划分，铁可分为生铁、熟铁和钢。生铁是含碳量大于 2.11% 的铁碳合金，坚硬、耐磨、流动性好易铸造，但脆性较大。熟铁也称锻铁或纯铁，含碳量小于 0.0218%，具有良好的塑性，但强度较低。为了改善纯铁性能，常加入少量碳元素。当含碳量在 0.0218%—

1 王新敏、李义强、许宏伟：《ANSYS 结构分析单元与应用》，第 191～195 页，人民交通出版社，2011 年。

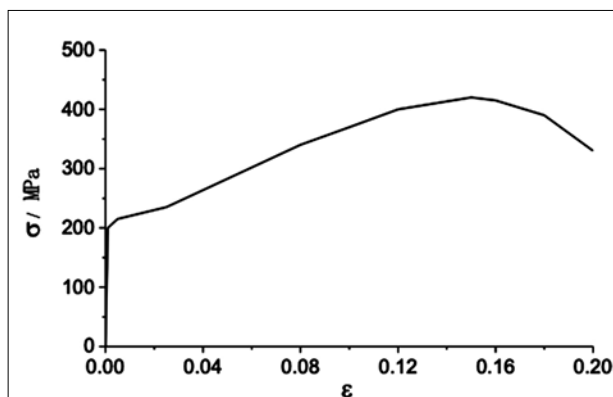


图5 Q235 低碳钢的应力应变曲线

2.11% 时, 铁碳合金既提高了强度和硬度, 又具有良好的塑性, 适于锻造, 轧制等加工, 俗称钢¹。

中国的钢铁冶炼具有悠久的历史。市面上很早就出现了不同种类的铁合金制品, 但受限于科学技术水平, 尤其在民间, 铁合金常被笼统地称作铁。而且, 钢炉匠可利用风箱、铁炉子和铁砧等常备工具对不太理想的铁合金进行锻打和热处理, 以改善金属的物理力学性能。因此, 虽然称做“铁铜子”, 其本质一般都为钢质铜钉。

现选取普通的 Q235 低碳钢进行分析, 其弹性模量取 210Gpa, 泊松比 0.3。它的应力应变曲线如〔图 5〕所示。

通常情况下, 两钻孔之间的距离与铜钉的长度相匹配。若具体到图 3 所示的铜钉, 则两钉角之间的净距由原来的 13.48mm 最大能够扩宽到 15.12mm, 即在模拟分析时单个钉角端部可施加水平位移荷载 0.82mm。此时, 钉角与腰身近乎成 90°。直角。

依据上述的铜补工序, 铜钉的受力情况主要分为上钉和定型两个阶段, 其计算结果分别参见〔图 6〕与〔图 7〕。

由图 6 可以看出, 在上钉过程中, 变形主要发生在铜钉的腰部, 而且多为弹性变形, 仅钉角和腰中的局部会产生塑性变形。铜钉能够产生 23.81N 的夹力, 其中冯米塞斯应力最大值为 263MPa, 稍高于材料的屈服强度 235MPa, 但低于抗拉强度 420MPa。在定型阶段, 如图七所示, 塑性变形则集中发生在钉角部位, 最大冯米塞斯应力值达到 416MPa, 接近低碳钢的抗拉强度。而钉角之间的夹力接近 32.59N。

无论在上钉阶段还是在定型阶段, 施加不同位移荷载后铜钉产生的拉力各异, 即两钉角之间固定的扩宽程度对应特定的夹紧力; 随着位移荷载的增加, 铜钉的夹力均呈增涨趋势; 而经过敲击定型后, 夹力又会有所增大。具体特征如图 8 所示: 上钉时, 位移荷载小于 0.08mm, 即两钉角之间的扩宽值小于 0.16mm, 铜钉的内夹力近乎成直线迅速增长, 表现为弹性性状; 随着位移荷载的增大, 夹力的增长速率逐渐放缓, 此时关系曲线呈明显的非线性; 而当位移荷载大于 0.2mm 后, 夹力的增长进一步减慢, 图中曲线段几乎为水平状。相比于上钉时期, 定型时的夹力 - 位移曲线在趋势上与之相似, 但略有区别。如在位移荷载较小的弹性段, 曲线斜率更大, 即夹力增长更快; 中间非线性段范围明显缩短; 其后, 随着位移荷载的增大, 铜钉的夹力始终保持增长趋势。

通过上述分析可知, 首先, 铜钉即使轻度外扩, 相当于钉角发生微小转动, 也能够获得较大的夹紧力; 并且由于最终变形主要集中于铜钉转折处, 因此在制作铜钉时, 钉角不应太长, 也不必弯曲过大。其次, 与钉角的净距相比, 钻孔之间距离不必要太宽。如综合考虑拉动上钉的难易程度以及敲击定型后的夹力, 针对上述型号的铜钉, 两钻孔之间的净距可比钉角最小净距宽约 0.1mm 即可。若为了获得更大的铜钉预夹力, 两钻孔的净距可与钉角的最大净距相同, 即 15.12mm〔图 3〕。

1 宋维锡:《金属学》,第 247~249 页,冶金工业出版社,1989 年。

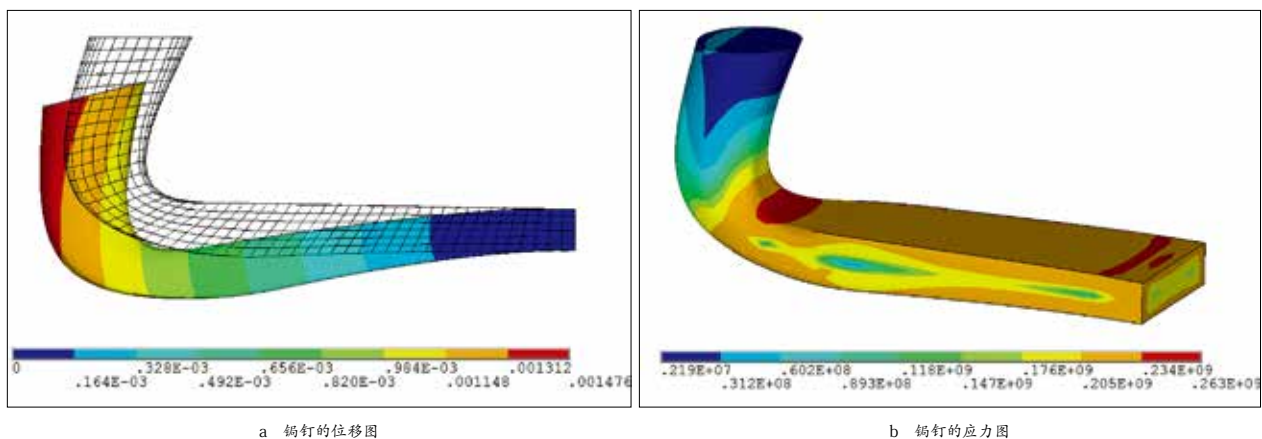


图6 铜钉的位移与应力分布图（上钉）

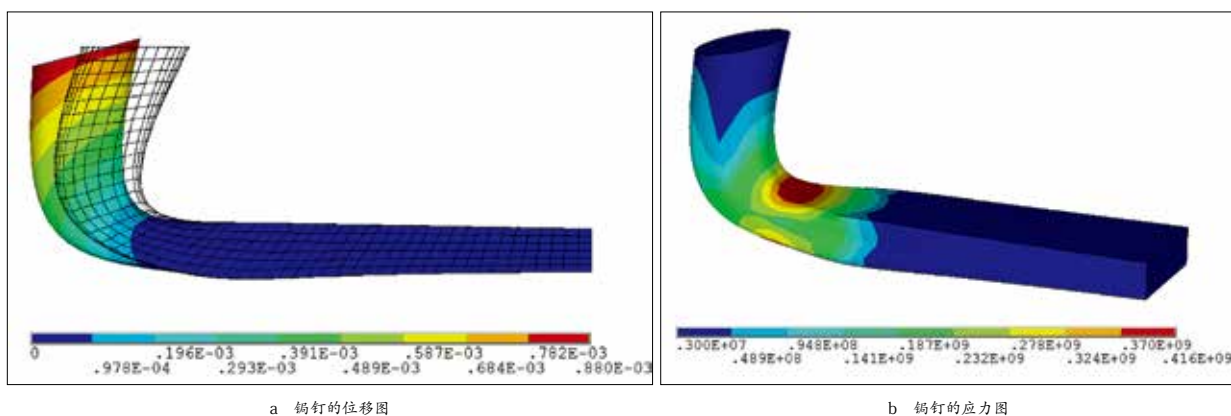


图7 铜钉的位移与应力分布图（定型）

（二）其它材质的铜钉性能对比

相较于金属铁，铜在人类文明进程中的应用更久远。与其它金属不同，铜在自然界中既以矿石的形式存在，同时也以纯金属的形式存在。依据历史形成的习惯，按色泽可将铜及其合金分为紫铜、黄铜、白铜和青铜四类¹。其中，黄铜材质的铜钉最为常见。

黄铜是以锌为主要元素的铜基合金。它比纯铜的强度高、硬度大、耐腐蚀，光亮更持久，而且切削、加工以及耐磨等机械性能也较突出。由于色泽美观，根据成分可由浅黄到深黄甚至接近黄金，因此黄铜常被用来制做装饰品。黄铜合金的牌号众多，力学

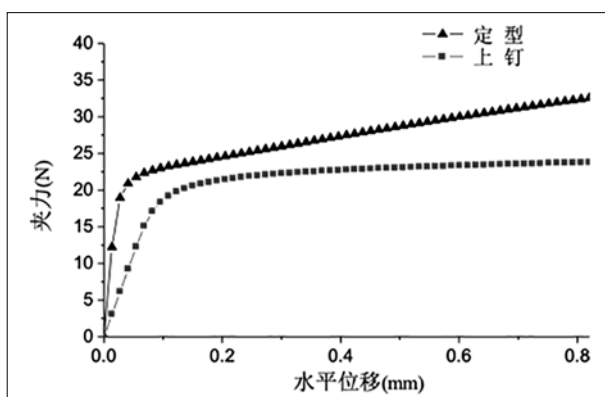


图8 单钉角的位移与夹力对应曲线

¹ 宋维锡：《金属学》，第458页，冶金工业出版社，1989年。

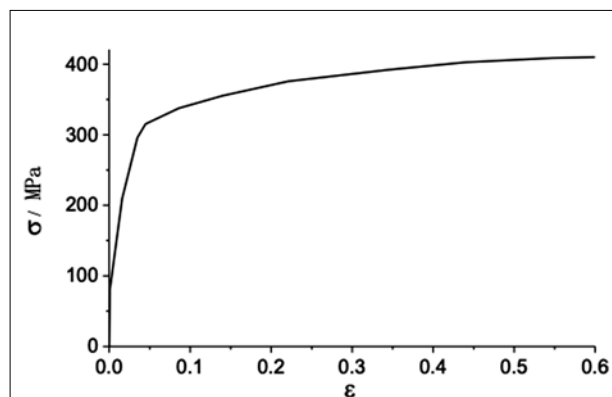


图9 H62 黄铜的应力应变曲线

性能也与加工工艺及热处理的状态有关, 根据资料¹选取 H62 普通黄铜进行分析, 性能参数见 [图 9]。

铜钉制作所选用的贵金属主要为银和金。银具有银白色的金属光泽, 对可见光的反射率达 91%。纯银质地柔软, 具有优异的可加工性能, 化学稳定性也比铁、铜要高²。为了提高纯银的硬度和强度, 最早通过添加合金元素 Cu 制备了一系列银铜合金, 如 990 银合金, 958 银合金以及 925 银等³。其中 925 银合金的熔点低, 强度、硬度高, 亮度、光泽接近于铂金,

在银制品上获得了广泛引用。然而, 银易与空气中悬浮的硫化物和水分反应变黑, 影响外观。现阶段通过添加其它元素合金化已制备出抗硫化变色性能更优异的银合金。

黄金是一种较稀有、较珍贵的金属。它柔软, 具有金属中最强的延展性, 抗化学腐蚀和抗变色能力极高, 在高温下也不氧化、不变色、不损耗, 俗称“真金不怕火炼”。外表艳丽的黄金一直是社会地位和财富的象征, 除了储备与投资, 也常被用于制作装饰品。饰品金的纯度多用 K 数表示, 如 24K 表示纯金⁴。其中的 18K 金饰不但拥有黄金珍贵的价值, 又因其成分比例完美, 具有延展性强、坚硬度高、色彩多变的优点。

其中, 贵金属银和金的部分力学性能参数见 (表 1) 所示。

表1 银与金的力学性能参数⁵

贵金属	弹性模量G GPa	切变模量E GPa	屈服强度Rp0.2 MPa	抗拉强度σb MPa	泊松比ν
Ag	75.92	29.4	20-25	150	0.38
Au	78.74	28.2	10-25	126	0.42

通过分析发现图 10: 相较于低碳钢, 无论是上钉还是定型阶段, 在位移较小时, 黄铜铜钉的夹力增长均较为缓慢。例如, 为获得 20N 的夹力 (定型), 黄铜铜钉的钉角间距需扩宽 0.51mm, 大约是低碳钢铜钉的 7.3 倍, 其含义就是为保证铜钉能提供足够的预夹力, 黄铜铜钉的钻孔间距需更宽。不过随着钉角间距的变大, 黄铜铜钉的夹力持续增加。当两钉角间距扩到最大的 1.64mm 时, 夹力为 31.9N, 仅比低碳钢 32.6N 略低。

而金银质软, 即使施加到最大位移, 铜钉的夹力也很低。因此, 纯的金银并不太适用。后期若想采用贵金属制作铜钉, 可选取金、银的合金, 如 925 银、18K 金等。

1 曾艳祥、姜志宏、许永强等:《H62 铜合金本构模型构建及游动芯头拉拔力影响分析》,《科学技术与工程》2016 第 28 期。

2 蒋鹤麟:《银饰品的制造与应用》,《贵金属》1998 年第 4 期。

3 沈丁杰:《热处理工艺对 925 银合金显微组织和硬度的影响》,华中科技大学硕士学位论文, 2007 年。

4 杨青青:《高性能足金和 925 银强化机制与抗腐蚀行为的研究》,华中科技大学博士学位论文, 2007 年。

5 黎鼎鑫:《贵金属材料学》,第 49、50 页,中南工业大学出版社, 1991 年。

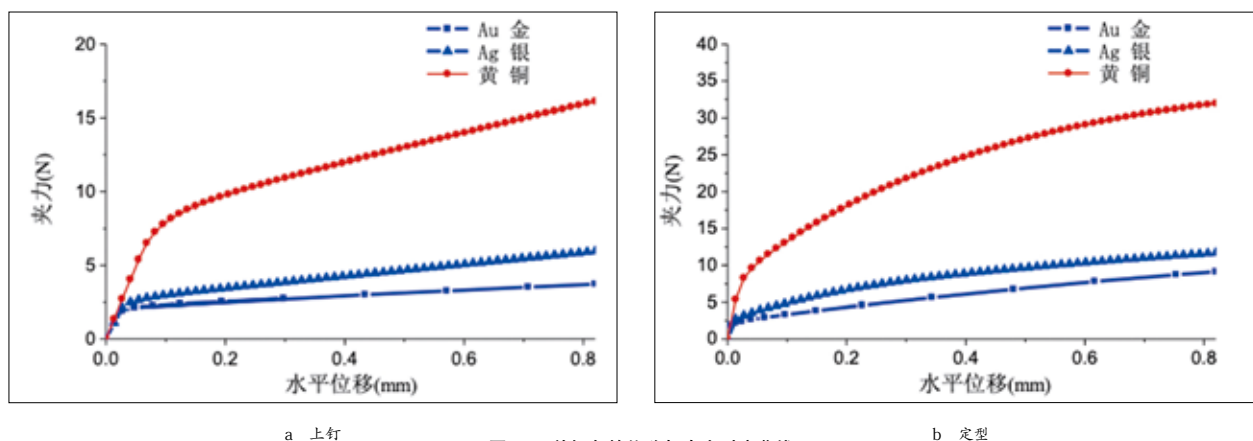


图 10 单钉角的位移与夹力对应曲线

三 结 论

“铜钉补瓷”作为一项历史悠久且独具特色的传统非物质文化遗产，是中国瓷文化发展中不可或缺的重要组成部分。其中，铜钉不仅体现着“修复艺术”之美，更肩负着“缝补生命”的重任，在陶瓷史、陶瓷修补史、手工艺史和艺术设计方面具有重要的研究价值。

本文针对铜器中铜钉所发挥的作用，阐述其材质、造型以及铜瓷工艺流程，分析归纳了各技术细节所运用的物理、力学原理。通过建立铜钉的有限元模型进行验证，对比研究了在上钉和定型阶段不同材质铜钉的力学特性。经分析发现：

1、从铜钉形状的设计来看，随着钉角之间距离的扩宽，铜钉的夹力呈增涨趋势。而且通常情况下，铜钉的夹力前期增长较快，中后期趋缓。因此，铜钉的回钩造型以及稍大的钻孔间距能够确保铜钉有一定的初始预应力。

2、不同材质的铜钉经敲击定型后，夹力均会比上钉时有所增大，其中位移较小时增幅最大。这也侧面验证了铜钉的扁状腰部有利于上钉。

3、由于最终的变形主要集中在折弯处且微小的钉角转动即可获得较大的预夹力，因此在制作铜钉时，钉角不应太长，也不必弯曲过大。

4、铜钉性能的发挥与其材质密切相关。Q235 低碳钢性能优异，拥有更高的弹性模量和屈服强度，相同的转角可产生更大的夹紧力。与之相比，H62 黄铜铜钉的夹力前期增长幅度较缓。为保证铜钉能提供足够的预夹力，两钻孔之间的距离需略宽。而金、银质软，从力学方面来看并不适用于制作修补瓷器的铜钉。

[作者单位：故宫博物院文保科技部]