《自然科学史研究》 第 43 卷 第 3 期（2024 年）：281—294
Studies in the History of Natural Sciences Vol. 43 No. 3(2024)

关于青铜刻刀在青铜器上錾刻铭文的可行性研究

张 凯✉
（上海博物馆，上海 200003）

摘 要 文章分析了不同锡(Sn)含量的青铜刻刀(12%、16%、20%、23%、26%、30%)在青铜板(含锡 12%)上的刻铭试验，发现其均能刻铭成功，差异体现在刻铭的效果和刻刀的磨损上，含锡 20%的刻刀刻字效果明显且刻刀持久耐用，低于此值的刻刀出现卷刃，高于此值的刻刀出现磨平或崩刃，且刻字效果不太理想。随着含锡量的增加，青铜的硬度先升后降，在加入铅(Pb)后，青铜的硬度普遍降低，为錾刻的实施提供了良好条件。此外，通过考察宏观的力学性能和微观的金相组织，本文分析了上述试验现象产生的原因，并在扫描电镜和 XRD 的配合下，更深入地讨论了硬度先升后降的机理。从技术角度看，青铜时代早期的刻铭并不难实现，无需借助铁质工具，这为西周时期晋侯苏钟以及更早的商代刻铭提供了试验和理论依据。

关键词 铸铭；刻铭；青铜刻刀；晋侯苏钟；刻刀实验
中图分类号 N092
文献标识码 A **文章编号** 1000-0224(2024)03-0281-14

1 青铜器刻铭的研究现状

现有青铜器的铭文多以铸铭为主，刻铭出现较少。见于报道的科学出土的最早刻铭铜器为商晚期戚家庄出土的 4 件青铜器[1]，此外广西武鸣勉岭也出土了一件商晚期的刻铭青铜卣，刻铭发现在卣盖内[2]。非科学出土的商晚期刻铭器则在私人藏家和海外博物馆中均有分布[3-4]。此后，也陆续发现了一些两周时期的刻铭铜器，其中名气最大者当属晋侯苏钟，到了秦代前后，刻铭铜器已较为多见。图 1 为晋侯苏钟(第 10 枚)的铭文图片，可以观察到刻铭的特点：字体线条不圆滑，线口呈“V”形槽，边缘参差不齐，连笔处直线对接，且每笔均有顿挫、切削痕，致使笔体中心弯折，细节处更呈现出明显的锯齿状錾刻形貌，可见此器的铭文系刻铭无疑。

收稿日期：2022-10-24；**修回日期**：2023-12-04。
作者简介：张凯，1986 年出生，山西阳泉人，博物馆馆员，研究方向为古代金属工艺及技术史，Email：418760598@qq.com。



图 1 晋侯苏钟(第 10 枚)部分刻铭细节

关于刻铭铜器的工艺讨论,杨欢等人将铸后的铭文加工分为錾铭、刻铭和磨铭三类[5],其中 Rutherrord John Gettens 和 Donna Strahan 认为弗利尔美术馆的两件青铜器垫片铭文和旧金山亚洲美术馆戴布里奇收藏的一件商晚尊属于磨铭。[6-7]而其余学者将錾铭和刻铭统一归类为刻铭,这是合理的,因为錾铭和刻铭虽呈现方式不同,但其材料力学性能一致,仅是针对的基体刚度(刚度是指材料抵抗弹性变形的能力,而在描述接触表面的受力或变形时可特指接触刚度)不同而已,因此可以统一为刻铭。刻铭的讨论集中出现在晋侯苏钟上,马承源在对比了东周戈和商鞅方升的刻痕后,认为晋侯苏钟的刻铭应为铁质刻刀所为。[8]李朝远认为晋侯苏钟有可能使用了含镍量高的陨铁刻刀[9],关晓武等人则从陨铁、高锡刻刀和人工制钢三个角度初步分析了晋侯苏钟刻铭的可能性[10],但并未设计模拟实验予以验证。

此外,史本恒等人在分析新莽时期铜度量衡器上的刻痕时,做了铁质刻刀在青铜基体上的刻铭实验[11],验证了铁质刻刀刻铭的可行性,但其刻刀选材为市售小钢锤和碳素钢錾刻刀,这些工具是在现代工艺下加工而成,其基体并非铸态,而是经过冷加工和渗碳处理的,原文中的 HRC 达到了 60,因此模拟实验的还原度还需进一步验证。为此,特在原有实验基础上,用熟铁和石墨分别浇铸了 4 种含碳量不同的铸态铁质刻刀,其硬度数据如表 1。

表 1 铸态铁质刻刀不同含碳量的硬度值

含碳量 (非 Fe 元素<2%)	0.45%		1%		3.2%		4.3%	
HRC	33.5	36	31	29.4	51.2	57.4	29.7	33.5
	38.4	34.2	30.2	28.4	56.8	50.8	31.5	28.8
	33.7	32.8	30.8	31.4	55.2	54	32.1	32.7
HRC 均值	34.77		30.2		54.23		31.38	

续表

HRC 转化为 HB	≈326	≈288	≈554	≈298
原实验青铜板（ZCuPb10Sn10）HB	70			

经过补充实验的数据可知，铸态铁质刻刀（无论从钢的成分还是至铸铁区间）的 HRC 远未达到 60，但其折算硬度 HB 均远大于原实验用的铸态青铜板硬度，因此，铁质刻刀可以对青铜进行刻铭是无疑的。从现有研究来看，学术界普遍接受铁质刻刀在青铜基体上的刻铭，争议的焦点则在于，青铜时代的刻铭器是否用铁质刻刀或较为常见。目前人工冶铁和陨铁的相关考古发现均已提到了商代[12-14]，但尚无法证明铁器初期即已将铁质刻刀用于刻铭，而商周时期的青铜刻刀则屡有出土。

因此本文选取的研究内容为：针对不同锡含量的青铜刻刀，用实验验证其在青铜基体上刻铭的可行性，并对刻铭现象进行机理分析。

2　不同锡含量的青铜刻刀刻铭实验

2.1　实验方案

分别浇铸 6 把不同锡含量的青铜刻刀和 1 块青铜板，青铜刻刀的锡含量分别为 12%、16%、20%、23%、26%、30%；青铜板的锡含量为 12%（成分选择依据见后文分析）；实验参照晋侯苏钟铭文拓片的“子”字和笔体进行施刻，以确定不同锡含量的刻刀在青铜板上的刻字效果。为保证青铜铸件的强度和硬度，铸件使用陶范铸造，陶土就地取材，待阴干后焙烧。实验中的熔炼温度 1 150℃，浇铸温度 1 050℃，熔炼装置为自制的中频感应石英坩埚，并通入氩气进行保护，准备工作如图 2 所示。



图 2　熔炼装置

2.2 青铜板的成分选择

由于晋侯苏钟全部为刻铭,且年代在西周,所以此次实验将参照编钟而设计青铜板。鉴于晋侯苏钟的成分目前尚未公布,因此可通过总结已做过科学检测的编钟,在其中选择一组合适的成分作为实验参考,见表 2。

表 2 青铜板的选材参照

编钟统计资料				实验需求	
年代	出土地	含锡量	含铅量	材质选择	试板规格(mm)
西周	宜昌万福垴遗址(甬钟)[15]	5%、12%、15%	少量	①Sn:12%; ②Sn12%—Pb5%; ③Sn12%—Pb10%	三种不同成分青铜板的规格均为:100×100×5
	博罗衡岭墓地(甬钟)[16]	12%—19%	3%—11%		
春秋	夏晌铺墓地(铃钟)[17]	6.9%、11.7%、14.9%	4%、2.7%、1.4%		
	广州增城庙岭(甬钟)[18]	11.8%、16.5%	23.8%、14.6%		
	随州文峰塔墓地(甬钟)[19]	14%、15%、19%	10%		
战国	长治分水岭墓地(钟)[20]	10.55%、16.12%	4.97%、23.1%		
	曾侯乙编钟(甬钟)[21]	12%—14.6%	2%		

通过表 2 的资料可以看出,即使在同一时代,编钟的成分也不固定,但锡含量基本稳定在 12%—15%的为多,考虑到青铜的偏析和铜质腐蚀流失的情况,会导致含锡量升高,因此青铜板的选材拟定在锡含量的下限,即 12%。同时考虑到青铜器中还存在少量的铅,因此特浇铸三种合金成分的青铜板,即 Cu-Sn12%、Cu-Sn12%—Pb5%、Cu-Sn12%—Pb10%;青铜板刻字的一面允许打磨,但不能进行机加工,以防止加工硬化的现象。浇铸的青铜板如下图 3 所示。

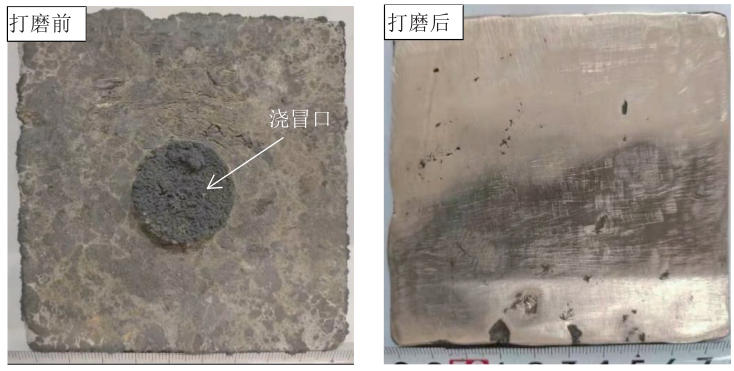


图 3 青铜板

2.3 青铜刻刀的设计

青铜刻刀从商代就已有出土,如安阳殷墟王裕口村贞人墓地出土的铜刻刀[22],安阳大司空出土的铜刻刀以及苗圃北地出土的立鸟形铜刻刀等[23]。西周时期,宁夏彭阳姚河塬遗址出土了一类铜三棱刻针[24],随州叶家山也出土了多种形制的青铜刻刀,有三角形刃、椭圆环刃、双面弧刃、双面斜刃等[25-26],进入东周之后,除了中原之地,云南个旧、广东广宁等地也出土了大批量的青铜刻刀[27-31],并且在绍兴、枣阳、临淄等地出土的青铜刻刀

中已有明显的单面斜刃刻刀[32-34]。可见，刻刀的普及范围越来越广，其形制也越来越实用，设计更趋合理，本文将参照云南个旧出土的刻刀形制进行实验设计，并开双面刃。其形制如图 4 所示。

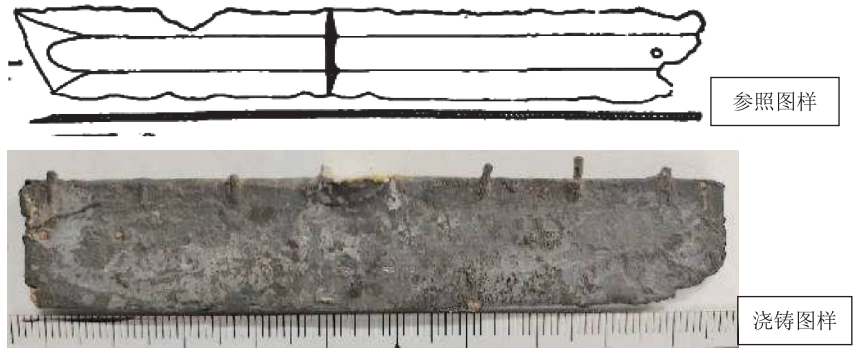


图 4　刻刀

关于青铜刻刀成分区间的选择，结合已有科学检测的资料，可整理出表 3。

表 3　青铜刻刀的选材参照

刻刀统计资料				实验需求	
年代	出土地	Sn%	Pb%	材质选择	刻刀规格(mm)
春秋	云南元江县洼打篙徒[35]	21.38%	0.47%	①Sn:12%； ②Sn:16%； ③Sn:20%； ④Sn:23%； ⑤Sn:26%； ⑥Sn:30%	长×宽×高： 100×19×2.5 公差(±1)
战国	湖北枣阳九连墩楚墓[36]	28.62%	无		
	湖北宜城跑马堤墓地[37]	26.4%	无		
	湖北荆门左塚楚墓[38]	15.72%—19.52%	3.13%、5.55%、6.49%		
	云南个旧市石榴坝[39]	30.1%	无		
秦汉	云南陆良县薛官堡[40]	11.6%	1%		

鉴于青铜板的锡含量为 12%，所以青铜刻刀的锡含量最低也应与青铜板保持同步才能施刻，再结合表 3 中已有刻刀最高锡含量高达 30%，因此实验用青铜刻刀的锡含量范围就设定在 12%—30%，共浇铸 6 把青铜刻刀，成分见表 3 中的材质选择。

2.4　刻刀实验结果

分别用 6 把不同锡含量的刻刀在青铜板上刻字，参照晋侯苏钟铭文“苏其万年无疆，子子孙孙永宝兹钟”中的“子子”字进行施刻。青铜刀一端磨成双刃面，另一端用布条缠裹成刀柄，施刻时用小锤敲击刀柄顶端进行錾刻，每笔的錾刻次数保持一致，力度尽量均匀，刻字的实验效果见图 5。

从实验中可以看到，不同锡含量的刻刀均可在青铜板上进行刻字，只是刻字的效果和刻刀的磨损情况有所不同。从刻字效果来看，含锡量在 16% 和 20% 的刻刀，其字体深度最大，也最为清晰，其余刻刀施刻的文字均较浅；从刻刀的磨损来看，只有含锡量 20% 的刻刀基本不受影响，低于此锡含量，刻刀出现卷刃，高于此锡含量，刻刀出现磨平和崩刃的现象。

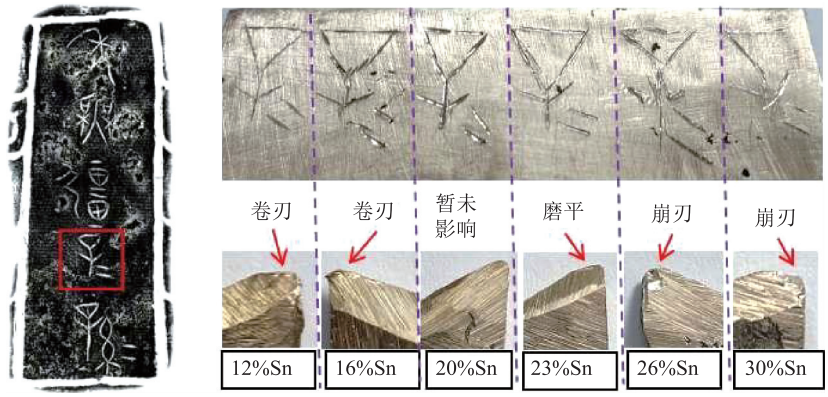


图 5 刻字效果及刀刃情况

3 结果讨论

3.1 从硬度值来讨论

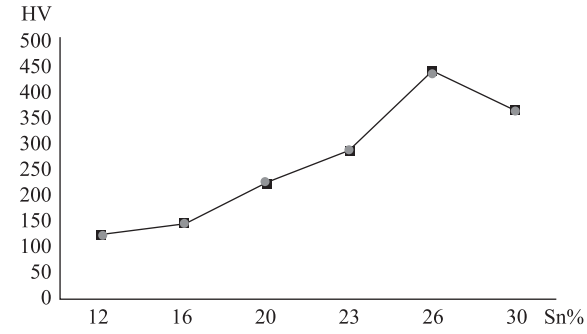
为了探寻为何性能最优的刻刀含锡量为 20%,需对上述实验结果和现象做进一步的分析。首先将 6 把刻刀的硬度做了检测,检测设备为显微硬度仪,载荷 0.98N(100gf),保荷时间 10s,数据如表 4,硬度和力学性能曲线图如图 6。

表 4 刻刀显微硬度值

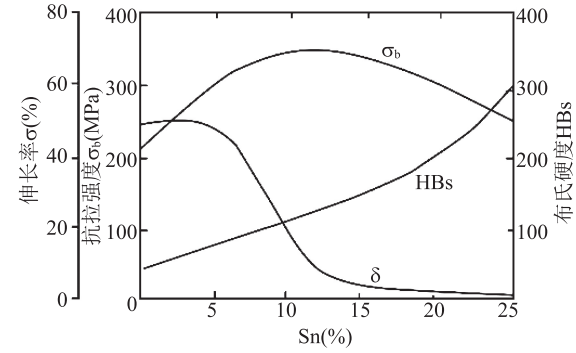
成分	硬度/HV					均值
Cu-12Sn	122	118	125	128	125	123.6
Cu-16Sn	163	142	145	132	149	146.2
Cu-20Sn	237	193	287	189	215	224.2
Cu-23Sn	314	295	283	287	260	287.8
Cu-26Sn	454	439	424	424	434	435
Cu-30Sn	369	369	354	365	362	363.8

图 6-a 是刻刀不同锡含量的硬度,可以看到,随着锡含量的增加,刻刀的显微硬度先增高后降低,并在含锡量为 26%附近达到最高值,之后随着锡含量的增高,硬度反而下降。总体来说,锡含量的增高使得刻刀的硬度均高于含锡 12%的青铜板。这说明,单从硬度来考虑,只要刻刀的锡含量大于等于青铜板即可实现刻字。

但根据图 5 的刻字效果和刀刃情况又可知,虽都可实现刻字的功能,含锡 12%和 16%的刻刀均出现了卷刃,且卷边未脱落。结合铸造手册中锡青铜的强度和延伸率曲线(如图 6-b)可知,含锡 12%和 16%的刻刀强度均良好,虽然延伸率有所下降,但也保持一定的塑性变形能力,因此在錾刻过程中,刻刀刃部由于硬度不足,产生了塑性变形,发生了卷刃未断的情况。若要继续刻字,需不断地剪磨刃边,从而使得刻刀的耐用度降低;而对于含锡 26%和 30% 的刻刀来讲,硬度值很高,本应更有利于刻字,但抗拉强度和延伸率却急剧下降,使得刻刀的崩刃现象非常严重,且从断口形貌来看,高锡刻刀塑性极差,基体很



a 刻刀硬度均值



b 锡青铜力学性能曲线[41]

图 6　不同锡含量的刻刀显微硬度及强度

脆,难以受力,尤其含锡 30%刻刀在錾刻时,还未刻划几笔,刀身直接脆裂为三段。只有含锡 20%和 23%的刻刀影响较小,其强度和延伸率虽也有下降,但硬度却大幅提高,使其综合力学性能最优,但含锡 23%的刃尖有磨平现象,錾刻的字体不如含锡 20%的刻刀清晰。

因此并非高锡青铜就一定适合做刻刀,只有高出一定的值,并且使得其硬度、强度和延伸率均处在一个合理的匹配下才适合做刻刀,否则不是过软,就是过脆,锡含量高出一点或高出太多均不利于錾刻的实施。就本实验而言,刻刀的合理成分区间应该在含锡 20%左右,这样既能保证刻字的明显效果,又能保证刻刀的持久耐用。

3.2　从显微组织来讨论

硬度值和力学性能是材料的宏观表现,其差异是由微观组织决定的,因此将 6 把刻刀和青铜板分别做了金相分析,以探求其硬度值和力学性能变化的原因,腐蚀剂选用三氯化铁盐酸水溶液,如图 7。

从金相图中可以明显看到,随着锡含量的升高,青铜刻刀的物相变化较大,当锡含量在 12%、16%和 20%时,基体物相以 α 相为主,δ 相为辅,且随着含锡量的升高,δ 相所占比例越来越大,也因此导致了基体硬度逐步升高的现象,进而使得含锡 20%的刻刀之强度和硬度维持在一定高位,而含锡 12%和 16%的刻刀由于硬度不足,产生了卷刃现象。

当锡含量达到 23%时,α 相和 δ 相的比例接近 1∶1,并在部分区域出现了针状组织,

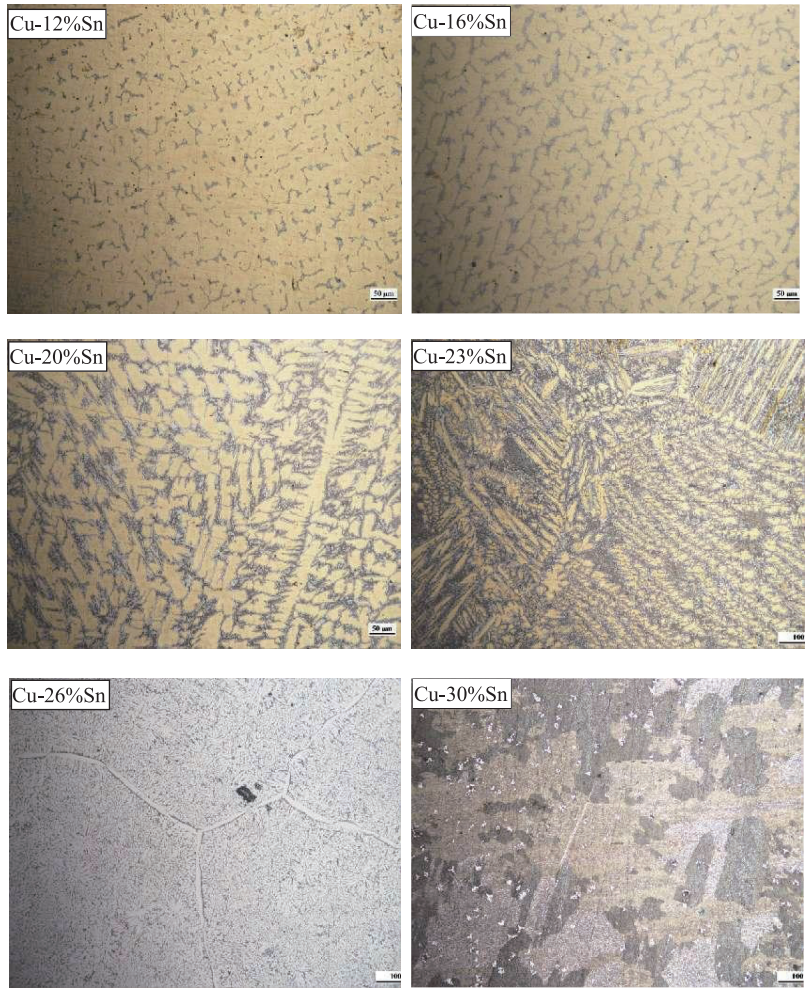


图 7 不同锡含量的金相组织 ×200

对基体产生了割裂影响。因此,虽然 δ 相的增多可以使得基体硬度再次提高,但 δ 相的针状形貌却使得基体强度降低,塑性变差,导致刻刀在刻字时出现了磨平现象,也就是刀刃的微区剥落。

当锡含量达到 26%时,基体组织以 δ 相为主,硬度极高,且形成了非常明显的晶界,不仅晶粒粗大,而且 α 相还被压缩在 δ 相间隙处,导致塑性极差,也因此使得刻刀出现了明显的崩刃现象。

当含锡量继续升高到 30%时,物相出现了大小不一的白色雪花斑点和斑块,形貌与之前的铸态组织完全不同,无法明确是否是 δ 相或 α 相,但从 Cu-Sn 相图看,其成分依然在 δ 相冷却至室温的区间。为了明确含锡量 30%的试样物相,对其做物相分析 XRD,结果如图 8。

经 XRD 分析,并比对了 PDF 卡片后,明确了含锡量 30%的试样物相为 α 和 δ 相,并没有出现新的物相。为了更清楚地分析白色雪花斑点或斑块与 α 和 δ 相的对应关系,将上述试样做了扫描电镜,以便从背散射图片中观察物相的分布,如图 9 所示。

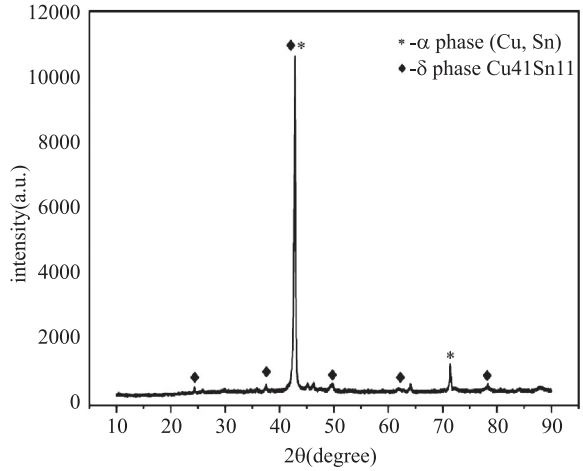


图 8　含锡 30%的试样物相标定

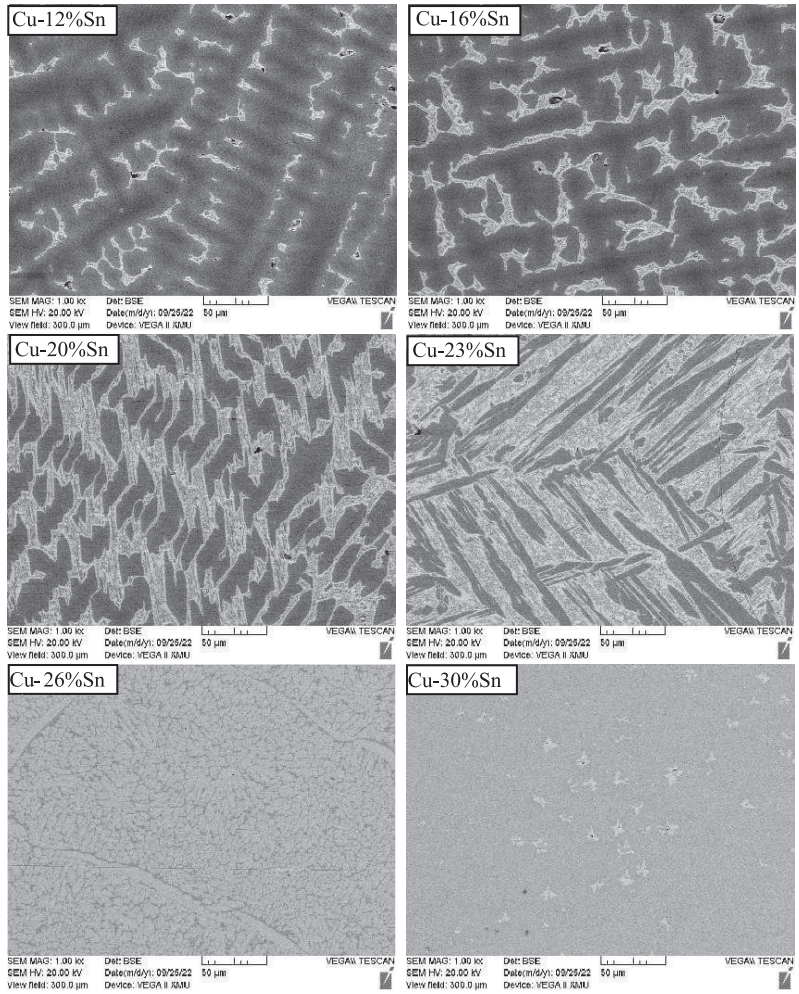


图 9　不同锡含量的 BSE 图片 ×1000

图 9 中可以看到和金相图中一样的现象,随着锡含量的增高,δ 相的分布和形貌一直在变化,在含锡量 12%时,α 相的偏析非常严重,直到 20%时,偏析现象才消除,这也对其硬度造成了一定的影响。含锡 20%刻刀的 α 相和 δ 相不仅分布均匀,而且比例协调,所以能保持较高的强度和硬度,刻字时刀刃保持完整性最好;在锡含量达到 23%时,α 相和 δ 相均出现了明显的针状组织;当锡继续升高至 26%时,基体大部分为 δ 相所覆盖,极为硬脆;当锡升到 30%时,基体组织已很难观察到 α 相,且 δ 相已连成一片,并出现大小不等的岛屿状组织,也即金相组织中观察到的白色雪花斑点,其尺寸大小不一,分布极不均匀。经对组织中灰色基体和岛屿状组织做能谱(EDS)检测,其成分与原子比如图 10。

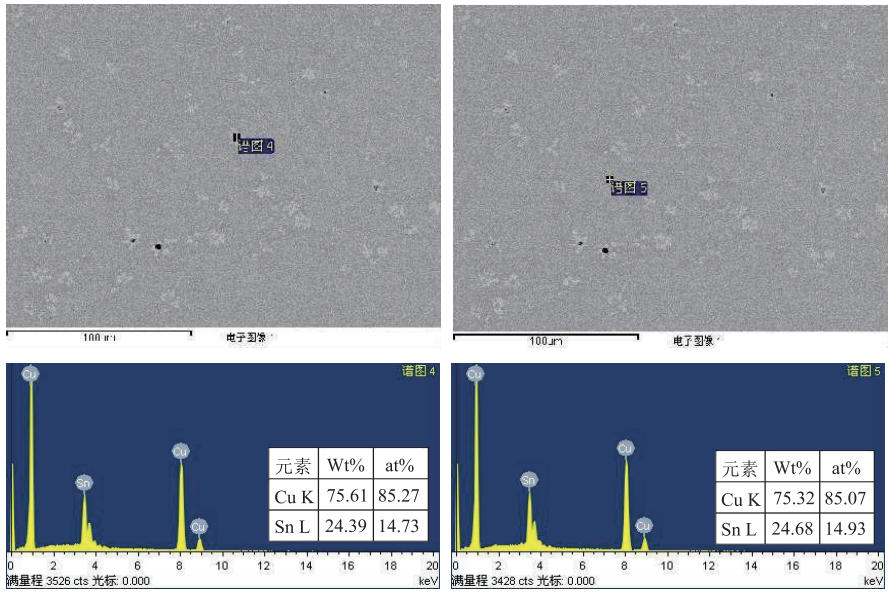


图 10 含锡 30%刻刀的 EDS 分析

从能谱(EDS)分析中可以看到,灰色基体组织的原子比与岛屿状组织非常接近,两者物相应该一致,但其比值却偏离了 δ 相($Cu_{41}Sn_{11}$),说明灰色基体组织和岛屿状组织均受到 α 相的干扰,为 δ 相和 α 相的混合物,这与 XRD 的结果相符合。至于是何原因导致基体组织形貌差别如此之大尚不得知,或许与成分接近共析点,在非平衡态下共析点左移后,δ 相向 ε 相分解受到抑制有关,从而导致 δ 相的生长畸变,并与少量的 α 相随机结合成大小不等的岛屿组织。也正是因为这样的形态,使得基体组织极不均匀,组织结构粗大,从而降低了刻刀的硬度,这与通常认为的含锡量越高,硬度越高的说法并不相称,而是含锡量高于一定值后,硬度反而会因内部组织的不均匀导致下降。

3.3 铅对青铜基体的影响

关于铅对青铜基体的影响,国内学者已有一定的研究,叶学贤在讨论不同成分、组织对编钟音频的影响时,认为铅的独立相对金属基体造成了割裂,对声音的传递起到了阻尼作用,加速钟声衰减。[42] 杨欢在研究弗利尔馆藏商代铜器的含铅量时,引用 Rutherrord John Gettens 关于铅可降低金属基体硬度的结论,提到了中国古代工匠可能利用此性能进行铸后加工的问题。[43] 为此,从实验的完整性来讲,还需要补充考虑青铜板中引入铅的影

响，因为青铜编钟在铸造过程中会或多或少加入铅，如表 2 中所示。因此，实验又设计了在 Cu-12%Sn 的基础上浇铸了含铅量在 5%和 10%的青铜板。三块青铜板的显微硬度如表 5 所示。

表 5　不同 Pb 含量青铜板的显微硬度

成分	硬度/HV					均值
Cu-12%Sn	122	118	125	128	125	123. 6
Cu-12%Sn-5%Pb	99	103	105	101	104	102. 4
Cu-12%Sn-10%Pb	114	107	108	111	119	111. 8

从表 5 中得知，青铜合金加入铅时会降低合金的硬度，且高铅青铜比低铅青铜的硬度值要高。这说明，在对含铅的青铜编钟进行錾刻时，同等锡含量的青铜刻刀硬度要大于编钟基体，甚至可以用低于编钟基体锡含量的刻刀来对青铜编钟进行錾刻。图 11 为不同铅含量青铜板的金相及物相分析。

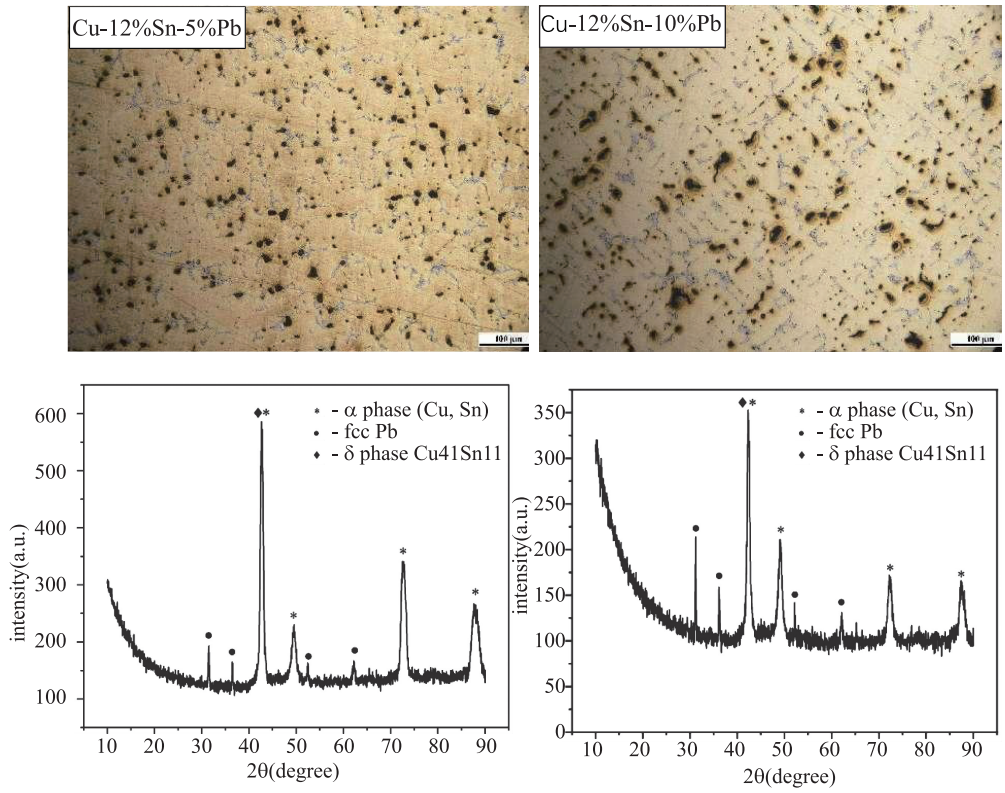


图 11　不同锡含量的青铜板金相(×200)及 XRD

从图中可以看到，铅大部分以面心立方(fcc)的独立相存在，正因如此，铅打破了 α 相和 δ 相的连续性，才造成了含铅青铜板的硬度降低。并且高铅青铜板的 δ 相比低铅的分布更为密集和明显，导致了高铅青铜板的硬度要大于低铅青铜板。

4 总结与思考

从不同锡含量的青铜刻刀(12%、16%、20%、23%、26%、30%)在青铜板(含锡 12%)上的刻铭试验可知,含锡 20%的刻刀最持久耐用,刻铭效果也最好。针对此现象,本文对青铜刻刀的宏观力学性能和微观组织形貌进行了科学分析,发现含锡 20%刻刀的 α 相和 δ 相不仅分布均匀,而且比例协调,进而可保持较高的强度和硬度,使得其力学性能较为均衡。

通过刻铭实验还可进一步得出,青铜器上的刻铭并非一定需要铁质刻刀才能实现,只要锡含量大于等于青铜基体的刻刀均可实现刻铭,只不过含锡量低容易卷刃,含锡量高容易崩刃,錾刻过程比较费刀而已,只有强度和硬度相匹配的刻刀才持久耐用,而且含锡量高于一定的值后,硬度反而会因内部组织不均而下降,其力学性能与微观组织密不可分。对于含铅的青铜器,其硬度值更低,刻铭应更容易。因此,从技术角度讲,青铜时代初期的刻铭并不难实现。这一结论对工具技术史的研究也有一定意义,既往研究一提到三代彝器的刻铭,讨论重点就转向了铁质工具,少有探讨青铜工具的可行性,这是因为缺乏对青铜工具的实验数据而导致的,本文的研究正好填补了这一空白。金属器的发展和认识是需要一个过程的,譬如铁器等新事物的出现,并不意味着人们一开始就掌握了铁器的性能,并认为铁器比青铜优越。现在学者不断地挖掘铁器出现的时间上限,是十分有益的,但不能与铁质工具出现的时间线强行并合并以此来解释当时的现象(如刻铭、三星堆青铜面具出现的钻孔等)。只有更加客观地看待金属工具的性能与发展,才能避免对当时生产力和技术水平的误判。

同时,还需要关注的是,既然用青铜刻刀刻铭容易实现,为何留存的刻铭器如此之少,甚至在相当长的一段时间内并不流行刻铭。或许从技术角度很难得到完美的解答,得综合考虑当时的社会背景,阶级审美等因素。例如,刻铭笔画僵硬,线条毛糙,美观程度不如铸铭,是否符合贵族的审美需求?再如为了便于操作,常刻于器表明显处或留白处,而移至器壁内或隐蔽处则无法施刻,但转用铸铭就巧妙避开了上述问题;还有涉及操作经验和失误的情况,当錾刻力度掌握不好,笔画容易出线、过长以造成错字,且无法修改,这是最致命的。当然了,真实的原因还有待于后续研究,正如技术难度低的青铜器阳文远不如技术难度高的阴文流行一样,其背后原因或与刻铭存在共通点。

致 谢 感谢评审专家提供的宝贵建议。

参 考 文 献

[1] 岳占伟, 岳洪彬, 刘煜. 殷墟青铜器铭文的制作方法[J]. 中原文物, 2012(4):62-67.
[2] 中国青铜器全集编辑文员会. 中国青铜器全集:第 4 卷 [M]. 北京:文物出版社, 1988:图版一六五.
[3] 容庚. 商周彝器通考[M]. 上海:上海人民出版社, 2008: 67-70.
[4] 林已奈夫. 神与兽的纹样学——中国古代诸神[M]. 北京:生活·读书·新知三联书店, 2016: 160.
[5] 杨欢, 杨戬. 商周青铜器铸后制铭工艺考证[J]. 汉江考古, 2020(3):100-106.

[6] GETTENS R J. *The Freer Chinese Bronzes*[M]. Technical Studies: Volume Ⅱ. Washington: Smithsonian Publication, 1969: 104.
[7] 武汉大学中国高校哲学社会科学发展与研究中心, 主编. 海外人文社会科学发展年度报告(2011)[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2011: 822-841.
[8] 马承源. 晋侯苏编钟[M]//上海博物馆集刊编辑委员会. 上海博物馆集刊(7). 上海:上海书画出版社, 1996: 1-17.
[9] 李朝远. 晋侯苏钟铭文的刻制与西周用铁问题[M]//四川联合大学历史系. 徐中舒先生百年诞辰纪念文集. 成都:巴蜀书社, 1998: 116-121.
[10] 关晓武, 廉海萍, 白荣金, 等. 晋侯苏钟刻铭成因试探[M]//上海博物馆. 晋侯墓地出土青铜器国际学术研讨会论文集. 上海:上海书画出版社, 2022: 331-345.
[11] 史本恒, 宋爱平, 张冲, 等. 山东郯国故城新莽铜度量衡器铭文的制作方式[J]. 四川文物, 2022(4):77-87.
[12] 陈建立, 毛瑞林, 王辉, 等. 甘肃临潭磨沟寺洼文化墓葬出土铁器与中国冶铁技术起源[J]. 文物, 2012(8): 45-53.
[13] 李众. 关于藁城商代铜钺铁刃的分析[J]. 考古学报, 1976(2):17-34.
[14] 张先得, 张先禄. 北京平谷刘家河商代铜钺铁刃的分析鉴定[J]. 文物, 1990(7):66-71.
[15] 马仁杰, 崔剑锋, 黄文新, 等. 宜昌万福垴遗址青铜器的科技分析及相关考古学问题[J]. 汉江考古, 2019(5): 121-130.
[16] 孙淑云. 博罗横岭山:商周时期墓地 2000 年发掘报告[M]. 北京:科学出版社, 2005.
[17] 张吉, 崔本信, 陈建立. 南阳夏晌铺墓地出土青铜器的检测分析及相关问题研究[J]. 华夏考古, 2020(5): 35-45.
[18] 吕良波. 广州增城庙岭出土四件先秦铜器的科学分析[J]. 南方文物, 2018(3):187-195.
[19] 李洋, 后加升, 樊志威, 等. 随州文峰塔 M1、M2 出土金属器的科学分析[J]. 汉江考古, 2014(4):91-108.
[20] 韩炳华, 崔剑锋. 山西长治分水岭东周墓地出土青铜器的科学分析[J]. 考古, 2009(7):80-88.
[21] 华觉明. 曾侯乙编钟复制研究中的科学技术工作[J]. 文物, 1983(8):55-60.
[22] 何毓灵. 殷墟时期巫卜器具初探[J]. 考古学报, 2018(2):165-181.
[23] 赵铨, 钟少林, 白荣金. 甲骨文字契刻初探[J], 考古, 1982(1):85-91.
[24] 马强. 宁夏彭阳县姚河塬遗址铸铜作坊区 2017— 2018 年发掘简报[J]. 考古, 2020(10):30-52.
[25] 黄凤春, 王龙明, 唐斑, 等. 湖北随州叶家山 M111 发掘简报[J]. 汉江考古, 2020(2):3-86.
[26] 曾令斌, 黄玉洪, 余乐, 等. 湖北随州叶家山 M28 发掘报告[J]. 汉江考古, 2013(4):3-57.
[27] 蒋志龙, 杨薇, 杨新鹏. 昆明市晋宁区金砂山墓地 2015 年发掘简报[J]. 考古, 2021(3):18-34.
[28] 万杨, 杨帆, 黄磊, 等. 云南个旧市石榴坝墓地第二次发掘报告[J]. 南方民族考古, 2018(1):1-40.
[29] 刘成基, 吴海贵. 广东广宁县龙嘴岗战国墓[J]. 考古, 1998(7):45-59.
[30] 王会田. 山东淄博市临淄区国家村战国墓[J]. 考古, 2007(8):11-21.
[31] 黄德荣, 戴宗品. 云南个旧石榴坝青铜时代墓葬[J]. 考古, 1992(2):131-137.
[32] 刘侃. 绍兴西施山遗址出土文物研究[J]. 东方博物, 2009(2):6-22.
[33] 王先福, 王红星, 胡雅丽, 等. 湖北枣阳九连墩 M2 发掘简报[J]. 汉江考古, 2018(6):3-55.
[34] 牟永抗. 绍兴 306 号战国墓发掘简报[J]. 文物, 1984(1):10-26.
[35] 王大道, 杨帆, 马勇昌. 云南元江县洼垭打篙陡青铜时代墓地[J]. 文物, 1992(7):38-54.
[36] 廖灵敏, 黄宗玉, 潘春旭, 等. 湖北枣阳市九连墩楚墓青铜器的材料学特征研究[J]. 考古, 2008(8):68-75.
[37] 刘建宇, 肖梦雅, 王璐, 等. 湖北宜城跑马堤墓地出土铜器的科学分析研究[J]. 文物保护与考古科学, 2018(3):114-125.
[38] 罗武干, 秦颖, 黄凤春, 等. 湖北荆门左冢楚墓群出土金属器研究[J]. 汉江考古, 2006(4):73-81.
[39] 孙淑云. 云南个旧石榴坝青铜时代墓葬出土的铜刻刀分析鉴定报告[J]. 考古, 1992(2):182-183.
[40] 崔剑锋, 杨勇, 朱忠华. 云南陆良县薛官堡墓地出土铜器的金属学分析及相关研究[J]. 南方民族考古,(17): 115-127.

[41] 中国机械工程学会铸造专业学会. 铸造手册:第 3 卷铸造非铁合金[M]. 北京:机械工业出版社, 1993.
[42] 叶学贤, 贾云福, 周孙录, 等. 化学成份、组织、热处理对编钟声学特性的影响[J]. 江汉考古, 1981(S1):26-36.
[43] 杨欢. 美国佛利尔艺术馆藏商代青铜器含铅量分析研究[J]. 江汉考古, 2017(3):130-136.

A Feasibility Study on Cutting Inscriptions on Bronzes with Bronze Engravers

ZHANG Kai
(*Shanghai Museum, Shanghai* 200003, *China*)

Abstract This article analyzes tests made using bronze engraving knives with different Sn content (Sn: 12%, 16%, 20%, 23%, 26%, 30%) on bronze plates (Sn: 12%), and finds that they can be successfully engraved. Differences are noted in the effectiveness of the engraving and wear on the engraving knives. The 20% Sn knife was durable and had clear engraving effectiveness. Knives below this value had curled edges, while those above this value had flattened or broken edges, and the engraving effect was not ideal. With the increase of Sn content, the hardness of bronze increases first and then decreases, and with the addition of Pb, the hardness generally decreases, providing suitable conditions for carving. By examining the macroscopic mechanical properties and the microscopic metallographic structure, this article also analyzes the reasons for the above-mentioned experimental phenomena, and with the cooperation of scanning electron microscopy and XRD, further discusses the mechanism of the hardness first rising and then falling. Finally, from the technical point of view, inscriptions done during the early Bronze Age were not difficult to achieve, and there was no need for the use of iron tools. This research thus provides an experimental and theoretical basis for the Western Zhou Dynasty Jinhou Su Bell and earlier Shang Dynasty inscriptions.

Keywords casting inscriptions; engraving inscriptions; bronze carving knife; Jinhou Su Bell; cutting knife experiment