

# 《天工开物》和佛山铸造技术的发展

佛山铸造厂工人、干部、技术人员三结合理论小组

明末（公元1637年）江西奉新县人宋应星所著的《天工开物》，在第八卷《冶铸》篇中详细论述了我国当时的铸造技术。从作者的自述及其著作内容来看，他是“滇南车马，纵贯辽阳；岭徼宦商，衡游湖北”中的人物，在写作本书前，作者进行了大量社会调查，而且很可能是到过广东佛山来考察的。作者的哥哥宋应升在1630年以后、这本书定稿之前，曾一度出任广州知府，他和他的哥哥曾是当时所称的“二宋”，关系很密切。那时佛山镇是全国四大镇之一，榨糖、酿酒、丝织、陶瓷、铸造都有上千年的历史，盛极一时。《冶铸》篇谈到了广东高州的青钱铸造，而由江西往高州，佛山是通衢要道。作者在介绍佛象的造型工艺中，提到铸型的浇注时认为“故写时为力甚易”，写同泻，指浇注金属液体，这又是佛山铸造行业几百年来沿用至今的浇注的通用术语。可见，这本书涉及的内容同佛山有着极为密切的关系。可以肯定的一点是，佛山今天的铸造技术是从这本书所记录的明代铸造技术的基础上发展过来的，所以我们对此感到十分亲切。《天工开物》这本书，虽然在儒家“奇技奇器以疑众，杀”的反动路线的摧残下，失传了近三百年，但是，佛山的铸造技术没有因此而被扼杀绝，在劳动人民师徒相继，口传身授，不断继承和总结前人经验的情况下，继续向前发展着。“沉舟侧畔千帆过。”历史上的反动路线虽然可以在某种程度上延缓历史的进程，然而，进步势力必然要冲破反动势力的束缚把社会推向前进。在科学技术的发展史上，情况也是这样。

对《天工开物》的总评价，我们是肯定的。

第一，它代表了当时先进的生产力，猛烈地抨击了束缚生产力发展的旧生产关系和上层建筑，为新生产力的成长鸣锣开道。在卷序这个总纲中，作者交代写作意图时就指出：“且夫王孙帝子，生长深宫，御厨玉粒正香，而欲观耒耜；尚宫锦衣方剪，而想象机丝。当斯时也，披图一观，如获重宝矣！”对那些“四体不勤，五谷不分”的孔老二的徒子徒孙们的丑恶形象着意刻画，力透纸背，极尽讽刺挖苦的能事，进行了深恶痛绝的批判。“且夫”二字，表示了作者对这些封建社会的寄生虫的无限蔑视。他对“耕也，馁在其中矣”的儒家说教，用“人不能久生，而五谷生之；五谷不能自生，而生人生之”的观点予以迎头痛击，很富战斗性。我们不认

为这本书是专写给当时的上层知识分子看的，也不同意那种以为这不是一本技术指导书的说法。作者非常明确地表示：“丐大业文人，弃掷案头，此书于功名进取，毫不相关也”，表示与那些鄙视生产的“劳心者”没有共同语言。书中对各种数量关系和比例数字所作的详细考究和介绍，也说明它是一本优秀的科学技术著作。

第二，它贯彻和宣传了法家路线，重耕战，讲集权，对耕战之事作了大篇幅的论述。书中把谷类生产放在首位，关于兵器的制作独立写了一卷，对与耕战相联系的科学技术在《五金》、《锤锻》、《冶铸》等篇都作了相应的叙述。它反对工商业者私铸钱币和反对当时藩镇割据以铁铸钱破坏经济统一。它主张打破封建行会的技术垄断，公布了工业生产上的先进操作法。这都在一定程度上反映了时代进步的要求，对当时中国资本主义因素的萌芽起了催生作用。有人认为“明代值得提出来说的飞跃和发展是没有的，中国的文化已发展到顶点”，这种武断的说法我们不能同意。正是在《天工开物》介绍采矿、冶铁、炼钢联合生产以后的六十年间，清朝人屈大均所著的《广东新语》（1700年刊行）就详细地叙述了明末清初的生铁商品生产，有的工场用四米高的高炉炼铁，由冬至春连续生产不停炉，雇佣劳动力三百户，组织近千人协作，投资过万金而盈利达百分之四十。那时佛山铸造业的从业人数达到三千人，以鸞岗为中心，每晚同时开九十九条炉化铁，火光映红了半边天。近几年来，我们发现佛山地下数公尺深仍然是铸造废弃的模泥，可见当时资本主义生产萌芽状态之一斑。马克思说，生产工具“不仅是人类劳动力发展的分度尺，并且也是劳动所在的社会关系的指示器”。所谓宋应星只关心衣食，这种企图贬低他的进步作用的说法，也是不符合事实的。

第三，它坚持了唯物论的反映论，认为自然界是客观存在的，而客观事物是可以认识的，根据自然界的固有规律，人们就可以利用自然财富。天工开物，重在一个“开”字，说自然界的物质经过人们开发便成为“有益生人”的东西。这是发扬了法家“明于天人之分”的战斗唯物主义思想。作者的宇宙观本质上是唯物的，认识论也基本是正确的，这在当时儒家的唯心主义天命论占统治地位的历史条件下，是十分难能可贵的。他在开卷就表明对那些搞唯心论的人，“好图鬼魅而恶犬马”的画工，十分蔑视，认为是没有什么了不起的（“岂足为烈哉？”）。

第四，它赞扬了劳动人民的作用，记下了大量无名英雄的创造，认为有聪明才智的人，也只不过是善于总结群众的经验，是广大群众所造就的罢了（“世有聪明博物者，稠人推焉”）。作者的着眼点不局限于生产技术，而涉及到当时社会的政治、经济、文化各个方面，从全书的思想来看，继承了法家进步的社会观。他不法古不修今，“此但存名为古物”、“唐虞以前不可考”，一句话就带了过去，而对于当时的社会现象和技术细节，却作了细致的考究，很明显，宋应星也属于厚今薄古一家，他是主张变革，主张前进的。

由于历史条件和作者所处的阶级地位的局限，这本书不可避免地存在着缺点和错误。明朝处在我国封建制度日趋没落、资本主义因素开始萌芽的历史阶段，作者

出身中小地主阶级而倾向新兴市民阶层，他一方面是“伤哉贫也”，“欲购奇考证，而乏洛下之资；欲招致同人，商略膺真，而缺陈思之馆”，这种比较低下的经济地位，使他要求按照事物本来的面目解释世界。另一方面他又脱离劳动人民，甚至“破产募死士”来保卫反动的封建地方政权，仍然按照地主阶级的利益来改造世界。（《南昌府志》：“崇禎间，邑贼李肃十等为乱，应星破产募死士，与司李胡时亨等讨平之。”）因此，他不可能是个彻底的唯物论者，也达不到新兴资产阶级的机械唯物论的水平，而保留着许多唯心论的思想杂质。加以当时生产规模狭小，限制了人们的眼界，而作为封建时代的知识分子，宋应星也不可能同劳动人民结合直接参加生产实践，对自然现象的认识很有局限。这都是造成这本著作里的缺陷和谬误的原因。虽然宋应星的学术研究，在当时的历史条件下未能得到进一步的发展。但是，作者毕竟还是做了大量工作，给我们遗留下许多经过整理的前人创造的有益的东西。

下面，我们着重谈谈《天工开物》中有关铸造技术及其在佛山的应用和发展的

问题。

《冶铸》篇全部是谈铸造技术，关于冶炼问题，作者是安排在第十五卷《五金》篇里集中论述的。但由于当时金属材料生产的技术水平所限，原材料含的杂质多，所以，熔化金属材料的过程也就带有再冶炼的性质，这种情况，在有色金属的熔化中更为明显，因此谈铸造技术的一卷名为《冶铸》篇，还是可以说得过去的。也许由于这个缘故，要获得高质量的铸件，就不能不从造型材料的优选和提高工艺水平来加以保证。《天工开物》对铸造技术的叙述是较为详细的，其中谈到的工艺操作不少是十分先进的，有些工艺技术同现代水平比较当然落后，但在一定条件下还有很大的参考价值，如群炉汇流，地坑造型等就是。由于不少工艺符合科学原理，因而这些技术的采用也是长期相对稳定的，许多工艺技术在民间广为流传，在佛山铸造业中一直沿用和改进着，它们在佛山铸造发展史上占有重要的地位。

## 一、铸 造 模 型

《天工开物》叙述的铸造模型（母模）有三种情况：

一是在造型材料上塑出的反模，也就是没有预先做好一个实体来翻印的无模铸造。这种造型方法，省掉了造实体模型的大量材料和工时，当时大量采用，它对制作技术水平的要求极高，所获得铸件的光洁度和准确性也是很好的。由于把这种造型方法应用于薄壳件的铸造上，就要求两半铸型的尺寸造得非常精确，“此塑匠最精，差之毫厘则无用”，说的是如果两半铸型贴合则没有铁水填充成铸件实体的余地而造不成铸件，如果配合的空腔过大或过小则造成的铸件厚薄不匀，如果铸的是铜钟，就大大损害了音响效果。佛山铸造历史上解决这个问题，除了使用车刀（刮板）造型之外，在三百多年前就使用了更为先进的利用铸型收缩留出形成铸型空腔的无模铸造的操作方法，发明了独成一格的“红模铸造”，用以制造薄壁铸件。这种工

艺,由于选用了特定的造型材料,就可以造成完全贴合的两半铸型,上留入水口,待自然干燥和高温脱水后,往通红的铸型里浇注成铸件。由于模型有较大的塑性和足够的透气性,在自然干燥和高温焙烧后收缩,就形成了十分均匀的铸型空腔,在炽红的模型里灌注铁水又随炉冷却,所以全部消除了足以产生孔眼、浇不足、冷隔、应力集中等致废因素,把浇注和热处理过程加在一起而造成完全没有水口、金相组织十分细结均匀和表面光洁度极高的铸件,成品率通常达到百分之百,铁水利用率达到了最高的程度。

二是采用金属实模造型,如用硬锡造钱模便是,这种模型较不易磨损和变形,经久耐用,属半永久性。

三是用牛油黄腊造的油腊铸型。

后面这两类母模的使用,在佛山铸造史上也有三百年以上的历史了。实体模型曾大量用于制造抗击英帝国主义者侵略的大炮,最重的达到每尊大炮为一万八千斤,油腊铸型的失腊铸造,普遍用于工艺美术品的制作上。

## 二、造 型 材 料

三百年前的造型材料不但广泛使用了各种泥、砂,特别重要的是普遍使用了木炭和石灰。《天工开物》在谈到铸型材料的选择时,介绍了铜钟内模用石灰三和土,外模用细土加木炭粉,铁钟和锅采用泥模,镜用糠灰加细砂,钱用细土和木炭粉(近似现在的煤粉砂)。这些材料的选用有两个特点,一是选择了很细的粒度,二是几乎都使用了干型,这都是使铸件表面有较高的光洁度、清晰的外廓和铸件内质细结以及避免孔眼等缺陷的重要手段。

关于造型粘土的选择,在佛山铸造史上是给予了高度注意的。一般采用的粘土有烟泥(褐色粘土)、白泥和红(黄)山泥三大类。烟泥多用于做模骨,白泥用于做铸型的表层,红山泥是红模与薄壳泥模的主要材料。

佛山铸造业有上千年的历史,它的存在和发展具备着有利条件,除了接近消费区、交通方便之外,基本的一条是接近原材料的产地。适用于铸造的粘土和原砂资源是十分丰足的。除红山泥外,烟泥和白泥其实是同一种粘土矿物,只不过烟泥含有较多的腐植质形成褐色或黑色的罢了。一个粘土矿的各个区间,粘土性质是不相同的,用途也不一样。例如用褐黑色粘土造小铸件模型,腐植质燃烧产生氧化碳气体,含有较多的CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O等易溶物,在铸件表面形成一层薄而均匀的易碎的外壳,就使铸件清理甚易而所得到的外表非常光洁,但用于做大型铸件就会产生截然不同的结果。在矿井现场鉴别这些粘土时,广大群众创造了不少简易可行的办法,由察色、品味、手感、搓滌等可以了解其性能,通过不同的处理程序又能够提高其效应。

《天工开物》中记载的铸型用砂都是细砂,提到的“绝细土”、“土末”、

“灰砂”，我们认为都是指肥砂。本来砂和粘土都由岩石风化而来，只是粘土的颗粒较小，所以才在沉积过程中分了出来。现在，广东的铸造就有用含泥达30%以上的140目的特肥砂造出单重为3—5吨、壁厚在100毫米以上的大铸件的事实。不过，这种原砂应该在离人们生活区较远的地方去选择，不宜采用混有生活废水沉淀物的不纯砂土，这种含有腐败杂质、煤灰和垃圾泥的砂土，对铸造是极为不利的。

“炭末”、“炭灰”的用语，在《天工开物》中没有详细的说明，在某些方面是指同一的东西，但又不能完全等同。我们认为，严格来说应该是指两种要求不同的木炭颗粒。一类是混入泥砂中作造型材料用的，是蒸馏过的木炭颗粒，作为耐火材料以起保温作用，即“以炭灰性暖以佐土使易化物也”。钟鼎模和熔铜坩埚用的属于这一类。这种木炭粒是经过特殊处理的，佛山所用的炭种，属于专窑制造的“松白”或是化铁炉的副产品即俗称“红炭仔”一类。佛山铸锅的模型中层就是用这种炭粒和白泥浆构筑的。第二类是作为分型的撒料用，要求附着性能好，易于复盖型腔表面。在铁水接触铸型时易于着火燃烧，造成氧化碳的气体，使铸型同铸件分离。所以，《天工开物》中就明确指出：“微洒杉木炭灰或柳木炭灰于其面上，或薰模则用松香与清油。”这不能多用，只可“微洒”就够了，洒得太厚就会被铁水冲聚一起而在铸件表面形成一层浮云状。

本书对石灰使用于造型的问题，只在钟鼎模中提及专用于制作内模，“埏泥作模骨用石灰三和土筑不使有丝毫隙拆”，这是符合科学道理的。内模承受铁水的冲刷和铸件凝固收紧的压力，要求有足够的强度，而透气性是次要的，熟石灰是氢氧化钙，化学成份稳定，这样，既可以避免粘砂的形成，又同时起了防止铁水的机械渗透和化学反应的作用。过去，佛山锅模的骨架制作是加入麻根皮以取得强度来防止干燥收缩时出现隙拆的，以后，改用了水泥钢筋的模骨来取得足够的强度防止模变，而在接触铁水的部分加设了两层材料，中层用炭粒白泥，表层刮全部灰化了的稻壳灰与白泥浆，即如《天工开物》所述铜钱的制模灰砂，起了很好的透气和耐火保温作用，这在用硬模做薄壳件上是理想的。这样做成的骨架，可以长久使用，而炭浆与灰浆层，一般可连续使用50—80次，属于一模多铸的半永久性铸型。

### 三、造 型 工 艺

《天工开物》中关于铸型的情况介绍了三大类，一是造钟鼎的失腊铸造和铸炮、佛象的塑模，采用一模一铸的泥型；二是造锅的一模多铸的泥模；三是铸钱、镜用的砂模。我们对当时在模型的组合和铸合上达到的技术水平给予很高的评价。盛铁水的熟铁柄的生铁勺，它的柄与勺身的连接是用熟铁与生铁铸合成的，要求连接得牢固并且保持合适的角度，否则用以盛铁水来浇注时就极其吃力而不安全。造仙佛象也是采取铸件同铸型逐一铸合的，要铸出有神态的仙佛象，铸合的组装尺寸必须极其精确，失之毫厘就完全不是设想的那种神态了。当然，我们通过对古文

物的铸件研究，了解到当时还采用了焊铸工艺。三百多年前能达到这样高的水平，不但要解决铸铁问题，而且要解决有色合金的铸造问题，确是非常了不起的。当时佛山铸造总重为七吨的祖庙北帝铜象，就采用了铸件与铸型组合铸就的办法，而该庙的铁鼎是采用失腊铸造通过铸件焊铸的办法做出来的。解放后，我国供应香港地区食用淡水用的水表外壳，总重三吨半，就是佛山工人遵照“古为今用”的原则，采用类似古代钟鼎模的造型方法，用泥型造出来的。由此可见，只要坚持正确的路线，传统的古老技术就可以焕发出革命的青春。

除上述三种造型工艺外，佛山五百年来传统的铸造工艺上还有前面引用到的“红模铸造”和“薄壳泥模”精密铸造法。“薄壳泥模”就比《天工开物》中所列举的铸型前进了一大步。它采用选定的木屑和特定的热化学稳定性高的粘土细砂造型，来获得很高的湿强度和良好的造型性，由于木屑的作用，它又有很高的透气性，既改善了粘土的造型性及粘附性，减少泥型的收缩率，防止泥型在定型过程中产生裂纹，又提高了泥型的高温可让性和降低了泥模对铸件收缩的阻碍作用，特别是在浇注中产生了还原性气体，就可以防止铸件表面的粘砂和氧化，使铸件易于清理，并提高铸件光洁度。这种工艺可能是从我们的祖先在铸型材料中加入炭末演变为加入木屑，使它在成型过程中才炭化的一种创造，与此适应的是成型工艺更复杂了。目前我们用这种工艺造型，生产单重最小为七克最大达十五公斤的小铸件，铸件尺寸准确，光洁度可达 $\nabla 3$ — $\nabla 5$ ，用以制造一般机械上的小齿轮就可以无需切削加工。

这里要附带提到的是，《天工开物》中介绍的钟、鼎、锅的废铸型，是可以捣碎回用的，它的透气性和耐火度在复用中都极好，现在我们仍有把它发掘出来复用作半永久性铸型的，它还可以用来垒筑坚固耐用而保温隔音极好的墙，佛山不少过百年的建筑物，主墙都是用这些材料垒筑夯实成的。这种材料用于作晒场的地下透土层也是很理想的。

#### 四、大炉熔化及铸件修补

《天工开物》在《冶铸》篇中介绍的都是小土炉，炉膛成釜状或箕状，釜状炉膛的炉子一般是固定的，打开出水口取水，取毕用泥塞住再鼓风熔化，箕状炉膛的炉子是能够移动的，可以抬起来将铁水从箕口泻出。这种炉子易造、灵活，但炉内还原气氛弱，要有较高的熔化技术。由于炉膛有效容积小，温度不高而又不稳定，金属炉料块度过大，一经熔化便直落炉膛底部，也就没有足够的渗炭时间，所以，往往杂质多，铁水氧化成了白口，一经出现铁水变质，就要花很长时期试调才能纠正过来，这就是《冶铸》篇中说的所谓“铁质未熟”，对这种炉子的控制，除了由始至终要保持三个稳定，即送风稳定、炉料质量配比及每批投炉量与投炉时间稳定、炉前操作规范稳定以外，保持炉膛每处有相应的加热条件，每次出水前把渣除净，

将炉膛掏通,把炉口石放置好使炉膛没有较大的温差区,都是十分重要的。要保持炉内熔化条件正常,它采取的是中心送风,用一个可以调节的风咀伸到炉中给氧。这种小炉易出白口铁,所以《天工开物》介绍“唯废破釜铁鎔铸则无复隙漏”,即采用经过一度提炼而含碳量较高、质量较为稳定的再生铁投炉以防止,并延长其渗碳时间,这都是很有道理的。

关于本卷所述熔铜坩埚的制作,有三种情况,一是泥粉搓炭粒,二是以打碎的干土砖即我们现在所用的“熟料”混和高岭土(生料)加炭粒,三是京炉加牛蹄甲,即在第二种的配料中加入焙干的牛蹄甲研成的粉末,这种角质粉末受高温熔成胶状在坩埚壁内不与氧接触烧成炭,既是一种保温性好的活性炭素,又起了熔结坩埚材料的作用,使坩埚更耐高温又更结实。

至于铸锅出现浇不足时用铁水趁铸件未冷而注补。我们认为这不是最好的办法。因锅模打开以后,铁锅的温度最高亦只能是在七、八百度之间,已经凝固了,补注的铁水是不能与原物熔融一体的,特别是铁锅受冷一收缩,就同锅模离得很开,即使勉强注补了铁水,使用面也是无法按得平的,只能是经过打磨掩人耳目,经锈结后不再漏水而已,但对于油,还是渗漏的。对于这种不受压薄壁件的修补,百年来佛山铸造业沿用的土办法还是可行的:一是对付针眼微孔,用豆酱或盐水涂刷,经数日后使它锈结;二是对付针孔大的小孔,用生猪肝、大米饭各半和入生铁粉锤炼成泥状物抵结实,利用生物血红蛋白凝固和铁粉的锈结作用把孔堵住,大米饭的作用是将前二物暂时胶结混和以便操作;三是对付指头大的气孔,可以用破锅铁焙烧成含碳量较高的具有一定塑性的铁片,按不同弧面和厚度选片鑿成同穿孔相同几何形状的小块,钉补上去,用小锤将其边缘挤迫牢贴再抿上猪肝饭砂。当然,如果孔眼太大太多或在锅底重要部位,就不能再修了。

至于当时的浇注技术,著者没有详谈,但可以认为,已达到相当水平,就拿钟鼎釜锅的浇注来说,决不是见孔便可灌水的简单的事。

总之,《天工开物》的《冶铸》篇所述,很多都是劳动人民同自然界作斗争的宝贵经验总结,是符合自然界客观规律要求的。某些配方的比例,直到今天我们仍然认为是恰当的,如62黄铜的配方就与目前国际上普遍采用的配方非常接近。即使有些象是信手拈来的介绍,其中也有不少科学道理,例如关于铸钟的地坑造型,要“在其上高蔽抵晴雨”,这一句话下还有注解:“夏月不可为,油不冻结”,其实还有更重要的是夏日空气湿度大,气压低,铁水出炉后降温特别快,也易吸收空气中的有害气体,流动性差,对浇注大面积而又要求有丝发细纹图案的薄件如钟鼎来说是不适宜的。所以佛山铸造业中有“秋风起,铁水钻路”的说法。书中提及以牛油涂模,用油烟薰模,使其附着性好和渗透力高,这都是很好的涂料。

历史上这许多科学技术上的伟大成就,都是劳动人民血汗的结晶,以浇注铁锅为例,一勺铁水浇一只口径为二尺厚二分的锅,这勺铁水连盛器的重量就超过六十市斤,两个人抬起一条炉来倾注铁水,劳动人民在高温下从事这样沉重的体力劳动,

而生产成果却为不劳动的剥削阶级所占有。整本《天工开物》，既是一本祖国工农业生产的发展史、科学技术的发明史，同时也是一本劳动人民受压迫受剥削和反压迫要解放的阶级斗争史。在末卷《珠玉》篇的插图里，我们看得非常清楚，劳动人民光裸着全身，潜到漩涡深水里，“无命者或葬鱼腹”。他们被迫冒着生命的危险去采集珍珠以供统治者和剥削者装饰丑恶的形骸。一方面是荒淫无耻，一方面是饥寒交迫。解放前，同全国劳动人民一样，佛山铸造工人也过着受压迫、受剥削的悲惨生活。今天，我们佛山铸造工人当了国家的主人，管理自己的工厂，主宰着大自然，发挥着无穷无尽智慧和力量，在继承和发扬祖国科学技术成就的道路上阔步前进。我们工厂已建立自动流水作业线来生产各种铸件了，但这只是技术革新道路上万里长征的第一步。我们要努力作战，攀登世界工业技术高峰，尽快赶上和超过世界先进水平。折戟沉沙是前朝，望大江东去，数风流人物，还看今朝！