

福州开元寺铁佛铸造技术特征探讨

唐 电, 王 欣, 陈俊锋

(福州大学材料科学与工程学院, 福建福州 350216)

摘要: 福州开元寺铁佛是国内外现存最大的古代铁佛。论文中详细表征了这尊巨大铁佛的铸体结构、内表面色泽、芯撑及其影响区、网格条纹、化学成分和金相组织。观察表明, 在铁佛的主体构件中未见铸接缝存在的迹象。成分测算表明, 铁佛的碳当量为4.3%, 属于共晶成分。金相分析表明, 铁佛的表面为白口铁, 基材为麻口铁。论文尝试探讨所观察到的三个重要的技术特征的优势、成因及其所涉及的技术。

关键词: 福州开元寺; 铁佛; 铸造; 技术; 特征

福州开元寺始建于梁太清三年(549年), 寺中供奉着一尊唐宋年代的大铁佛(见图1a)。该铁佛(以下简称开元铁佛)是镇寺之宝。公告指出, 福州开元寺为福建省文物保护单位。现存文物: 五代后梁贞明四年(1086年)所铸的千年特大型铁佛——阿弥陀佛, 佛身高5.96 m、宽4 m、重5万kg以上。

开元铁佛重约52 t^[1], 是我国现存最大的古代铁佛, 也是世界上现存最大的古代铁佛^[2]。由于开元铁佛被泥塑+贴金层所覆盖, 隐藏了重要的信息和数据。尽管福建省有关部门组织过多次的研讨活动, 央视科教频道也组织制作了《铁佛之谜》的专题节目, 仍留下一些千年未解的谜团。习近平同志在《福州古厝序》中指出^[3], “大铁佛是我们的先人掌握高超的冶铸技术的证明。”先人究竟采用了怎样的高超技术, 值得研究。中国是“铸造之乡”, 在此领域, 我国的先民掌握着许多领先于国外的发明创造^[4-5]。英国学者考兰特^[6]赞誉, “中国是世界上最早铸造重大铁铸件的民族, 在制作这些大尺寸的铁器方面, 显示出伟大的技巧和能力”。凌业勤^[6]总结了我国古代特大铸件的主要工艺技术, 介绍了著名的各尊巨大铸像, 并以正定大铜佛为例详述了传统的铸造工艺。总览国内外文献可知, 被详细研究过的巨大铸件屈指可

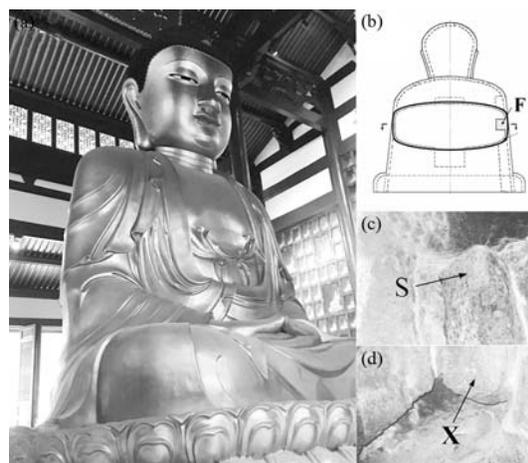
作者简介:

唐 电(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事材料学、热处理和技术史的研究工作。E-mail: tangdian@fzu.edu.cn

中图分类号: TG24; K878
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2023)07-0917-06

收稿日期:

2022-08-09 收到初稿,
2022-09-19 收到修订稿。



(a) 开元铁佛的照片; (b) 背视及剖面示意图; (c, d) 方柱(F)的上端(S)和下端(X)的图像

图1 开元铁佛

Fig. 1 Kaiyuan iron buddh

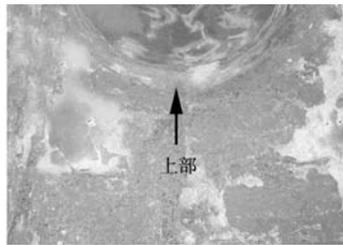
数，而巨大铁像铸造技术的报导仍属空白，因此，必然还存在一些高超的技术和伟大的技巧有待后人发掘。

对这一具有标志意义的巨大铁佛，福州大学应邀组织团队，主持对其进行全面的研究^[7]，本文将聚焦于铸造工艺技术。鉴于有关巨大铁像的铸造技术研究报告的匮乏，加上该铁佛又属我国铸造领域的标志性文物，本研究尽可能记录重要的观测和实验数据，并尽量详细地加以分析与讨论，期望能为展示我国巨大铁像铸造的成就补充些许内容。十分令人遗憾，由于无法观察到铸件的外表面，无法全面揭示其铸造工艺，管窥所限，本文只能依据内表面的观测、材料成分和金相组织，结合文献史料，集中探讨所观察到的几个重要的技术特征。借一得之见，抛砖引玉。

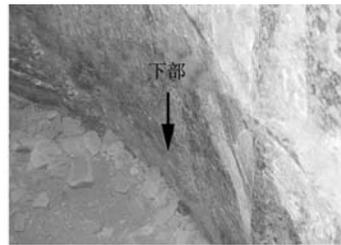
1 实验观测与分析

1.1 铸体结构

开元铁佛为中空铸件，外有泥塑涂层和贴金饰层。通过铁佛后背疏松处开启的小孔进行内窥观察，



(a) 上部



(b) 下部

图2 内壁表面的图像

Fig. 2 Pictures of the inner surfaces

水平方向的色泽基本一致，仅有右壁的方柱区域的色泽较暗。

纵向观察，铁佛大部分表面均未遭受明显腐蚀，这一情况与其同时代的巨大铸件，如沧州铁狮子^[8]相比，形成鲜明对照。在靠近上部的区域，铁红色区域表面完整，直至接近地面，表面才稍显粗糙（见图2a, b）。从横向观察，铁佛内铸面的粗糙情况基本相

可见铁佛顶部中心位置存在一圆孔，另于双肩大致的对称部位分布两圆孔，尺寸比顶部的略小，三孔均被砖块填堵，其各自的作用还尚待探讨。当时的工匠留存一个尺寸约为0.6 m × 1.2 m的门洞（图1d），以便观察和清理内腔。铁佛外观大致左右对称，内部结构却不对称（图1d）。经仔细观测，可见其右侧处存在一突出的方柱，见图1b。图1c, d为该方柱上下端的实际样貌。本团队^[7]曾对此方柱的设置原因进行了讨论，此不累述。

1.2 内铸面观测

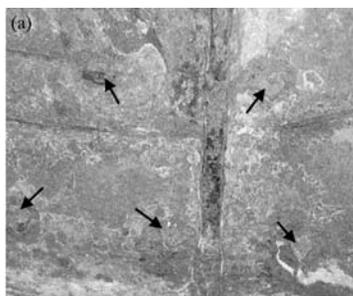
1.2.1 内铸面状况

纵向观察，铁佛内铸面的色泽从上至下大致有序过渡。头、肩部的大部分区域呈土灰色，是干泥浆的颜色。从肩部往下，干泥覆盖区域逐渐收缩，接近地面，干泥痕迹仍斑驳可见。干泥失落部分，可见氧化铁，呈棕红或红褐色，是所谓铁红的颜色（见图2a, b），从上到下，颜色稍暗。横向观察，铁佛内铸面沿

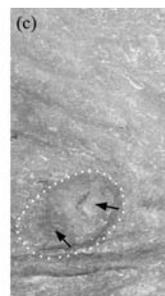
似，仅有右壁的方柱区域出现异常。即方柱与体围铸面色泽不同，表面腐蚀严重，且其上未见任何干泥痕迹。很明显，该方柱由废铁预先铸成，待主体结构浇注时与体围相铸接^[7]。

1.2.2 芯撑及其影响区

铁佛的内部有许多断面接近方型的芯撑，如图3a



(a) 芯撑（如箭头所示）



(b, c) 影响区（如虚线所示）

图3 芯撑及其影响区的图像

Fig. 3 Picture of the chaplets shown by arrow and affected zone indicated by dotted line

中的箭头所示。芯撑在铸面上的露头不规整，或为平面，或为单斜面，或为多斜面，应为斫断芯撑所留存的切面。可见芯撑材料较柔韧，材质应属低中碳钢，便于凿切加工。

仔细观察可见，每个芯撑的周边都存在大致环形的色泽不同的区域，本文将其称为芯撑影响区。从芯撑开始，色泽沿辐射方向变化，直至与周边的铸面一致。芯撑影响区的存在源于芯撑与周遭的成分的不同，加上浇注时的温度梯度，导致凝固后的组织和成分沿辐射方向变化，以至于最终影响了氧化腐蚀过

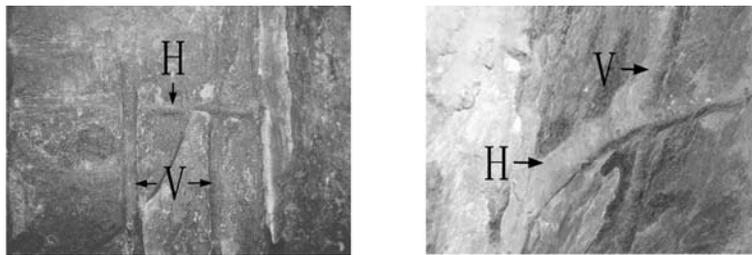


图4 网格条纹的图像，横纹（H）、纵纹（V）

Fig. 4 Pictures of the horizontal and vertical stripes indicated by H and V, respectively

程。不同芯撑的影响区大小并不固定，最小的和最大的直径相差超过一倍，如图3b所示。大小悬殊的影响区极有可能标志着在相应位置上铸肉厚度的不同。

芯撑影响区反映了氧化腐蚀对组织成分的敏感性，因此，可借助表面的色泽变化来判断组织成分的同异，协助查找出现组织成分迥异的部位，特别是用于识别芯撑，十分奏效。图3c中虚线标示的一个椭圆型的影响区，其中实际上有两个芯撑，位于右上方的芯撑明显可辨，但左下方的芯撑并不易辨认，正是由于椭圆型的过渡区才得以确认。借助与周边有明显色差的影响区，我们识别出许多个未明显露头的芯撑。

1.2.3 网格条纹

在铁佛的主体结构中可观察到纵横交错的网格条纹，如图4a, b所示。颈部有一道横纹，胸腹区计有六道横纹；从颈肩部发出的纵纹共十一道，前部有七道，后部有四道。这些网格条纹大致均匀排布。网格条纹本身宽2~5 cm左右，大部分网格条纹突出于铸面（见图4b），突出高度可达3 cm左右。网格条纹的存在可以提高铁佛的结构强度，因此不排除这些网格条纹是用作为加强筋的可能性。纵纹多于横纹，对支撑硕大的头颅明显有益。研究报导^[8]，沧州铁狮子为了支撑狮头的需要，专门设置了突出于铸面的加强筋。

对于特大铁铸件，传统上采用“数接为之”^[9]的方法。铸接工艺往往会招致铸接面未予熔接以及铸块间成分不均的缺陷，这也得到了考古的证实。如：沧

州铁狮子是分层铸接而成，狮身内外均有水平的冷隔线，其上可见熔渣和杂质^[8]。对于开元铁佛颈部的横纹，因其位置较高，如果是铸接缝，则必然存在更多的浮渣，我们仔细观察也未见到冷隔线或夹渣的痕迹。在铁佛体内仔细搜寻，也未见任何因铸接留下的裂隙或疤坑。所以我们只能注目于其他的横向网格条纹，十分注意寻找各类铸造缺陷。然而，经仔细观察可知，①除颈部的一道横纹以外，其他的横向网格条纹不但不水平排列，且大多都存在弯曲现象，不存在作为铸接缝的基本表象；②在网格条纹的狭窄宽度

中，未找到冷隔线或夹渣物的痕迹；③各道横纹相邻的裸露铸面，跨越条纹色泽连贯过渡，说明相邻铸面的组织成分并无明显不同。

1.3 金相组织与化学成分

在铁佛的后背门洞处切取样品，一个近表层，另一个近心部，取样位置和制样过程可参见前文^[10]。利用金相显微镜观察分析。图5为近表层样品的金相图像，其中可见白色的连续或呈网络状分布的渗碳体区，以及散布于其间的暗黑色的点状和条状的奥氏体转变区，具有共晶莱氏体形态的鲜明特征。图6为近心部样品的金相图像，照片中除了白色的共晶渗碳体、奥氏体转变区外，还存在一些片状的石墨。所以可确认，开元铁佛的材质总体上属于麻口铁，只是在表面存在着一层白口层，与本团队^[10]XPS分析的结果

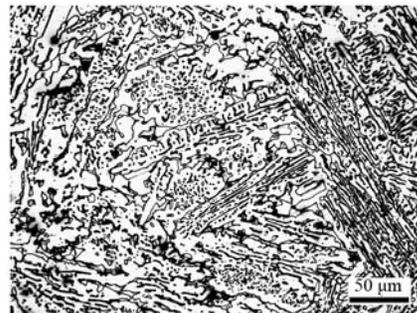


图5 近表层区域的金相图像

Fig. 5 Metallographic photo from the region near surface

相一致。在两幅金相图像上，还分别存在未被磨削掉的散布氧化腐蚀坑（图5）和连续的氧化物腐蚀带（图6）。

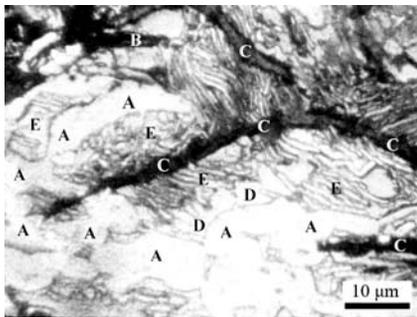


图6 近心部区域的金相图像

Fig. 6 Metallographic photo from the region near core

对近表层的样品进行成分分析，其含铁95.54%、碳4.20%、硅0.03%、锰0.03%、磷0.18%、硫0.02%。开元铁佛的含碳量略偏离共晶点，金相观察却为典型的共晶莱氏体组织。因生铁中还有其他元素，要了解其合金成分偏离共晶点的程度，必须计算碳当量。采用美国金属学会推荐的碳当量的计算公式（ $[C]=\%C+(\%Si+\%P)/3$ ），计算得出，碳当量为4.3%。所以，开元铁佛的碳当量恰好是共晶成分，与共晶莱氏体组织完全对应。大量研究表明^[11]，样品中硅的含量低，说明该生铁的熔炼温度很低。锰的含量低也是熔炼温度低所致。生铁中含磷略高，主要是矿石中带入的。生铁中硫含量低，说明当时采用的燃料是木炭。

2 讨论

通过仔细观测和分析，对比有关巨大铸件的同类研究，我们吃惊地注意到，该铁佛存在一些同类研究未报导的实验现象及不同的技术特征。为此，我们重点集中分析所观测到的这些技术特征，讨论它们的优势、成因、相关的技术背景，以及偶然所得的可能性。

2.1 无铸接缝的主体构件

众所周知，重量大于10 t的古代铸铁件为特大铸件^[12]。考古学界常用“巨”来表示更大的铸件，40 t以上规模的铸铁件属于巨大铸件。值得注意的是，开元铁佛的主体结构体量大于45 t（如果包括头部，其体量甚至接近50 t），属于巨大铁铸件。国内外被详细研究的古代巨大铸件，它们的铸造基本上都采用“数接为之”^[9]方式。这种方式铸造相对容易，我国古代特大铸件通常采用这种方式铸造^[6]。其实，日本的奈良大铜佛^[13]和镰仓大铜佛^[13]也如是，因其内壁均可见明显的

铸接或铆接痕迹。沧州铁狮子的内腔可见冷隔线和夹杂物，颈部的各种缺陷更多，腐蚀严重并导致断裂的主要部位在于铸接缝^[7]。在本研究中，未能在主体构件中查找到任何的铸接痕迹，“数接为之”的铸造方式可以排除。显然，规避铸接缝，对于提升铸件的抗腐蚀性和机械稳定性均有益，尤其对于有搬迁需求的铸件（如开元铁佛）更显必要。

要规避铸接缝，古文献中提及了“疾继”的浇注工艺。《天工开物》^[9]列举钟鼎的铸造，筑砌三台洪炉，洪炉熔化后，“甲炉即倾，乙炉疾继之，丙炉又疾继之。其中自然黏合。若相承过缓，则先入之质欲冻，后者不黏，罅（注：缝隙）所由生也。”《天工开物》的上述描绘是针对较小（千斤以内）的铸件。对巨大铸铁件，涉及炉数众多，如要规避铸接缝，是否还能采用逐炉依次“疾继”的浇注工艺，委实不敢臆断。经查，宋代的《三山志》关于开元铁佛的记载，有^[14]：“后梁贞明四年，闽王以梦故，谏□□□万斤，以橐籥七十所于城东。故□□□□万三丈有七尺，创以金，置太平寺。”其中“橐籥七十所”的表述提示我们，在开元铁佛的铸造过程中工匠很可能应用了异常复杂的熔铸系统，该系统必然涉及为数众多的熔炉，因《三山志》中缺文，无法知道具体的熔炉数目。其后，我们查到清代徐景熹编纂的《乾隆福州府志》，其中有^[15]：“据《三山志》，谓王审知于城西南，张炉冶十三所，备铜蜡三万斛，铸释迦弥勒像。”此表述弥补了《三山志》相应处的缺文。

综合实测与史料分析，我们做出推测：当时的工匠极有可能为了规避铸接缝，不采用“数接为之”^[9]的传统技术，而是筑砌了十三台熔炉，每台熔炉配备了大约6组的橐籥，通过主、次槽道，构建了一个异常复杂的熔铸系统，再通过逐炉依次“疾继”的熔铸工艺，最终实现了无铸接缝主体结构的巨大铁佛的铸造。

2.2 共晶成分的碳当量

巨大铸件的成分配方决定了铸件的工艺特性与技术性能。潘锦华^[16]曾披露了香港天坛大铜佛的成分配方，引起多方关注。对于国内外现存的这尊最大的古代铁佛，其成分配方也是本团队的主要研究内容。上述分析表明，开元铁佛的碳当量恰好属于共晶成分，是科学的配方。根据材料成形原理^[17]，如果选择共晶成分，结晶温度间隔最小，合金流动性最优，铸造性能最好。选择共晶成分，还有益于各炉成分配方的对标。由于共晶合金的熔点最低，可以大量节约燃料，这对于一次成形的巨大铁佛的铸造无疑具有极大的优

势。

古人不知材料学原理，又没有检测设备，如何将成分精准控制至共晶点，确实匪夷所思。为此，我们参阅了国内外相关的考古文献。可知，我国汉代的工匠已经掌握了共晶成分生铁的熔铸技术。华觉明^[11]曾统计了汉魏时期的铁锭和积铁的化学成分，总结得出，早期生铁的含碳量大多在共晶点（4.3%）附近。田长浒^[18]也认为白口铁是古代使用最广泛的铸铁种类，多用于农具、手工业工具、生活用具等。邱亮辉^[19]对河南汉代铁器进行的金相普查表明，河南巩县铁生沟汉代冶铁遗址中出土的大约70件白口铁，其中共晶白口铁占约一半。它们的绝大部分被用于制作镰、铲、锄、犁铧等农具，对其中4件汉代铁铲和铁板进行了成分分析，其碳含量在3.80%~4.12%。另有郑州古荥镇的汉代冶铁遗址，出土的188件铁器，共晶白口铁占约29%，分析的三件铁板的平均碳含量为4.0%^[19]。如果考虑还有Si和P的成分，铁生沟和古荥镇的汉代生铁的碳当量应该都接近共晶成分。

美国著名学者傅美尔^[20]用很大篇幅论述了中国先民控制共晶生铁并铸成实用器件的重要创造。如果需要，也许开元铁佛正是一个极具说服力的例证。巨大的开元铁佛能精确地达到共晶成分的事实至少告诉我们，唐宋工匠已经比汉代工匠更清楚共晶生铁的性质，并更娴熟地掌握了它的熔铸技术。

2.3 表面白口、心部麻口的金相组织

对铁佛采样时，我们观察到，近表层区域的腐蚀远小于近心部区域，铁佛的裸露大部分区域的情况都类似于前者，后者仅分布在门洞内测。有表面白口组织的防护，是开元铁佛的显著特征。在留存有氧化腐蚀带的金相图片中，很容易观察到，呈连续或网络状分布的渗碳体对氧化腐蚀带的扩展有明显的阻滞作用。如图6所示，中部偏左处的氧化物腐蚀带（C）在珠光体内较宽，而在渗碳体内较窄，且腐蚀带最终止步于渗碳体。另可见，半包围分布的渗碳体（A）对其间的珠光体区（E）有防护的作用，如它阻止了右下方的腐蚀带（C）的侵入。表层中大量的连续或网络状的渗碳体是抗腐蚀的优势组织。

开元铁佛的不锈之谜是研讨会专家和民众热议的话题，XPS的分析已经初步表明^[10]，表面白口、心部麻口的金相组织对开元铁佛的腐蚀防护起了不容忽视的作用。上述金相组织的分析进一步证明了这一点。可以认为，这种混合组织在制作艺术类铸件上特别有优势，我国千年不锈的文物多有报导，也许它们中的很

大部分也拥有这一混合组织，我们期待见到其他文物的研究报导。纵观考古文献报导，我们注意到还有另一例，即河南淮渎庙的铁狮^[18]，它也具备这种混合组织，它的年代晚于开元铁佛。

我们揣测，表面白口、心部麻口的这一相结构的产生与开元铁佛所采用的共晶合金有关，也与模具的吸热性能等有关。共晶合金拥有最低的熔点，铁佛的成分表明其熔化温度略高于共晶点，在浇注后，模具只要吸走了有限的热量，处于表层区域的熔体就可能迅速固化，形成白口组织。而处于心部区域，因铁佛壁厚总体较厚，散热慢，部分白口组织产生了类似炉冷的退火效应，渗碳体转变成石墨。前文^[10]的计算表明，表层区域的渗碳体石墨转化率仅为5.45%左右，而心部区域却为21.7%，佐证了上述揣测。

要说这一表面白口、心部麻口的组织是工匠刻意制造的，有强词夺理之嫌。但是，由于白口组织靠肉眼不难判断，所以，有经验的工匠不可能对白口组织的耐腐蚀性和强硬性毫不知晓，他们若有意在铸件表面保留白口组织，必不难办到。因为考古资料已经表明^[18]，早在汉代，具有表面白口、心部麻口的组织的工具和农具已经用于生产。

3 结语

中国被详细研究的巨大铁铸件屈指可数，中国先民所采用伟大的技巧和高超的技术未被充分认识。本团队观测了开元铁佛的铸体结构、内表面色泽、芯撑及其影响区、网格条纹、化学成分和金相组织，收集了国内外这一巨大的铁铸件的有关数据信息。对比巨大铸件铸造的同类研究，我们注意到这尊铁佛存在三个重要的技术特征，它们包括：无铸接缝的主体构件、共晶成分的碳当量，以及表面白口、心部麻口的组织，本文讨论了这些技术特征的优势、成因、相关的技术背景，以及偶然所得的可能性。三个技术特征提示我们：

（1）当时工匠可能构建了一个异常复杂的熔铸系统，并采用了逐炉依次“疾继”的熔铸工艺，实现了无铸接缝主体结构的铸造。

（2）选择共晶成分，容易统一各炉生铁成分，也意味着当时的工匠比汉代工匠更清楚共晶生铁的性质，并更娴熟地掌握了它的熔铸技术。

（3）表面白口、心部麻口的混合组织对氧化腐蚀有明显的阻滞作用，开元铁佛的千年不锈，这一混合组织的腐蚀防护作用至关重要。

参考文献:

- [1] 徐心希. 福州开元寺志略 [M]. 北京: 宗教文化出版社, 2010: 261.
- [2] 王福淳. 古代大铁佛像 [J]. 铸造设备研究, 2006 (4): 40-45.
- [3] 曾意丹. 福州古厝 [M]. 福州: 福建人民出版社, 2019.
- [4] 华觉明. 中国古代铸造技术的八大成就 (上) [J]. 铸造, 1984 (4): 4-11.
- [5] 华觉明. 中国古代铸造技术的八大成就 (下) [J]. 铸造, 1984 (5): 4-10.
- [6] 凌业勤. 中国古代传统铸造技术 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1987: 427-473.
- [7] 唐电, 王欣, 魏喆良. 古代福建冶金瑰宝——大铁佛内部异常结构与丈六金身碑 [J]. 福建冶金, 2020 (2): 37-39.
- [8] 吴坤仪, 李京华, 王敏之. 沧州铁狮的铸造工艺 [J]. 文物, 1984 (6): 81-85.
- [9] (明) 宋应星. 天工开物 [M]. 扬州: 江苏广陵古籍刻印社, 1997: 238-246.
- [10] 唐电, 王欣, 陈孔发. 福州开元寺铁佛的XPS研究 [J]. 铸造, 2023 (5): 529-535.
- [11] 华觉明. 中国古代金属技术 [M]. 郑州: 大象出版社, 1999.
- [12] 王福淳. 我国古代大型铸铁文物 [C]//第九届中国铸造协会年会论文集. 2010: 517-524.
- [13] 石野亨. 铸造の源流と技术历史 [M]. 东京: 产业技术センター, 1978: 114-136.
- [14] 梁克家. 三山志 [M]. 中国台湾: 商务印书馆, 1986: 482.
- [15] 徐景熹. 乾隆福州府志 [M]. 上海: 上海书店出版社, 2000: 381.
- [16] 潘锦华. 大佛用锡青铜铸造性能的研究 [J]. 铸造, 1991 (7): 1-8.
- [17] 李洪波, 庄明辉. 工程材料及成形技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2019: 5-7.
- [18] 田长浒. 中国铸造技术史 (古代卷) [M]. 北京: 航空工业出版社, 1995: 119-125.
- [19] 邱亮辉. 河南汉代铁器的金相普查 [J]. 北京钢铁学院学报, 1980 (4): 132-143.
- [20] FUMMEL R E. Understanding materials science [M]. New York: Springer-Verlag Inc, 1998: 123-149.

Design and Optimization of Casting Process for JG4247 Alloy

TANG Dian, WANG Xin, CHEN Jun-feng

(College of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350001, Fujian, China)

Abstract:

The iron Buddha in Fuzhou Kaiyuan Temple is one of the biggest ancient ones, existing both at home and abroad. In this paper, the construction of cast object, the state of inner surface, the chaplets with their affected zones, the gridding stripes, the metallographic structure, and the chemical composition were exhaustively characterized. The observation illustrated that there was no any sign of cold steam existed in the main structure of the iron Buddha. The chemical calculation exhibited that the carbon equivalent is 4.3%, falls into eutectic composition. The metallographic analysis displayed that there is white cast iron on the surface, but mottled cast iron in the substrate. We try to discuss the advantages, causes and related technologies of the three important technological characteristics observed.

Key words:

Fuzhou Kaiyuan Temple; iron Buddha; cast; technology; characteristics