DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.10.006

悬索桥主索鞍的关键铸造技术

甄玉杰[1],罗国龙[1],黄安明[2]

(1.中建三局集团有限公司西北公司,陕西 西安 710065;2. 德阳天元重工股份有限公司,四川 德阳 618099)

摘　要:西安市建材北路跨灞河桥为第十四届全运会重要交通通道,该桥主桥为主跨 300 m 钢塔钢箱梁空间自锚悬索桥。为了克服空间缆在塔顶处由主缆产生的水平分力对塔产生的附加应力,该桥主索鞍采用了一鞍双槽的设计理念。采用整体式索鞍,主索鞍设计两个对称鞍槽,增强了索鞍对水平分力的承载能力。该桥主索鞍的外形尺寸为 7.5 m×5.6 m×4.8 m,边跨鞍体鞍体重量达到 126 t,主跨鞍体重量为 119 t。针对该桥主索鞍重量和体积大、造型复杂的特点,研究主索鞍鞍体铸造方案、铸造工艺流程、机加工和试装配等关键技术工艺,对铸造过程的难点、重点进行分析。通过采取相应的工艺控制措施,取得了优良的产品质量。该桥主索鞍加工铸造后,各项技术指标均满足设计和规范要求。

关键词:空间自锚悬索桥;主索鞍;一鞍双槽;鞍头铸造;机械加工;试装配

中图分类号:TG269　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)10-0861-05

Key Casting Technology of Main Cable Saddle of Suspension Bridge

ZHEN Yujie[1], LUO Guolong[1], HUANG Anming[2]

(1. China Construction Third Bureau Group Co., Ltd., Northwest Company, Xi'an 710065, China; 2. Deyang Tengen Heavy Industry Co., Ltd., Deyang 618099, China)

Abstract: In order to overcome the additional stress on the tower caused by the horizontal component force generated by the main cable at the top of the tower, the main cable saddle of the bridge is designed with one saddle and two slots. An integral saddle is adopted, and two symmetrical saddle slots were designed for the main saddle to enhance the carrying capacity of the saddle to the horizontal component force. The shape size of the main cable saddle of the bridge is 7.5 m×5.6 m×4.8 m, the weight of the side span saddle body reaches 126 t, and the weight of the main span saddle is 119 t. The key technologies such as the casting scheme, casting process, machining and trial assembly of the saddle body of the main cable were studied. The difficulties and key points in the casting process were analyzed. By taking the corresponding process control measures, excellent product quality had been obtained. The results show that the main cable saddle of the bridge after casting, all technical indexes meet the design and specification requirements.

Key words: space self anchored suspension bridge; main cable saddle; one saddle and two grooves; saddle head casting; machining; trial assembly

西安市建材北路为第十四届全运会重要交通通道，其中跨灞河桥主桥采用双塔空间索面自锚式悬索桥，结构体系为半漂浮体系，桥型总体布置如图 1 所示。矢跨比为 1/4.02，跨径布置为(50+116+300+116+50) m,全长 632 m,加劲梁和桥塔均为钢结构,钢箱梁顶板宽 56 m,桥塔高 123 m。全桥共设两根主缆,空间线形布置,主梁锚固点处主缆横向间距为 47.9 m，桥塔处理论交点横桥向的中心间距为 0.5 m,中跨跨中主缆横向间距为 41.316 m。

主索鞍是支承主缆并使主缆线形平顺改变方向，同时将所承受的主缆竖向力传向主塔的大型构件[1-4]。建材北路灞河桥主索鞍共计两个,一鞍双槽,主索鞍的外形尺寸为长 7.5 m,宽 5.6 m,高 4.8 m,鞍槽在空间上形成向中心倾斜的弧线。主索鞍鞍体重量:边跨鞍体鞍体重量 126 t,主跨鞍体重量 119 t,两半鞍体组合后整体重量约 245 t。主索鞍构造如图 2 所示。

本桥主索鞍结构特点为：主桥主跨和边跨均采用空间缆的结构形式,同时主塔采用钢塔,桥面宽度达 56 m,是国内载荷最大的空间缆悬索桥,其主索鞍结构特殊；为了克服空间缆在塔顶处由主缆产生的水平分力对塔产生的附加应力，主索鞍采用了一鞍双槽的设计理念。采用整体式索鞍，主索鞍设计两个对称鞍槽,增强了索鞍对水平分力的承载能力。

根据结构特点，悬索桥主索鞍鞍体一般有全铸

收稿日期:2021-06-21

基金项目:中建三局集团有限公司科技研发课题(CSCEC3B-2019-7)

作者简介:甄玉杰(1983—),河北保定人,硕士,高工.主要从事大跨桥梁设计方面的工作.电话:15991727381,Email:zhenyujie@foxmail.com

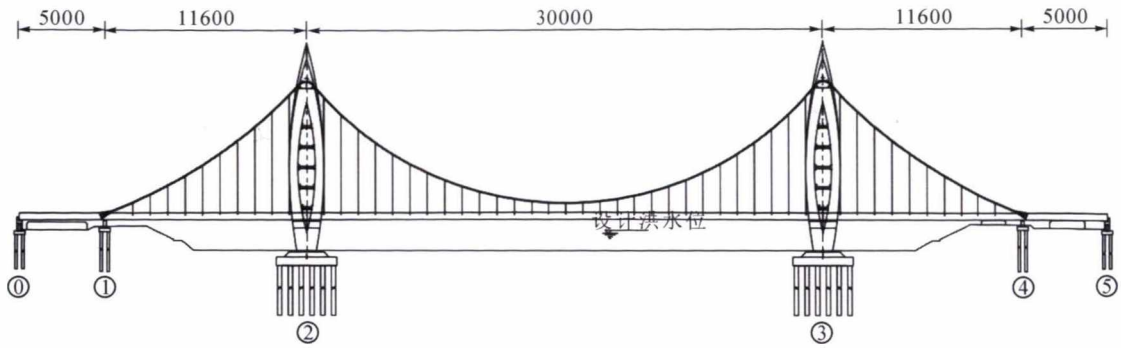
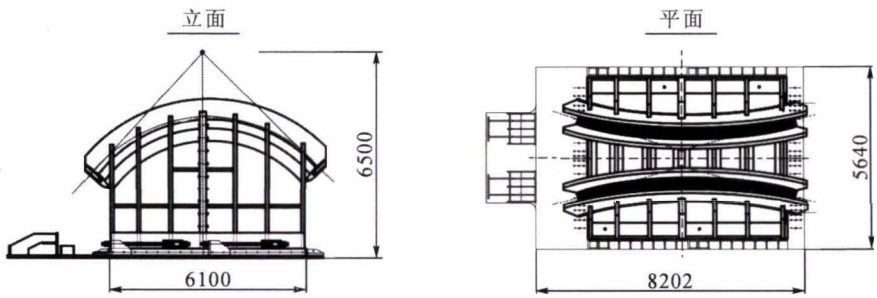


图 1 悬索桥总体布置示意图(单位:cm)
Fig.1 Schematic overall layout of the suspension bridge (unit cm)



(a)立面构造　　(b)平面构造

图 2 主索鞍结构示意图(单位:mm)
Fig.2 Schematic structure of the main cable saddle (unit mm)

式、全焊式、铸焊式 3 种结构形式。从制作难度及受力特点来说,采用铸焊式结构具有优势,国内特大悬索桥主索鞍鞍体一般采用铸焊式结构[5-6]。本桥主索鞍采用铸件和钢板组焊结构。为降低吊装运输重量,主索鞍需要分块制作,组拼件吊至塔顶后采用螺栓连接成为整体。鞍体下设不锈钢板-聚四氟乙烯板滑动副,以适应施工中的相对移动。主塔塔顶设有主索鞍下承板,下承板通过焊接与塔顶钢板连接牢固。为增加主缆与鞍槽间的摩阻力,并方便索股定位,鞍槽内设竖向隔板;在索股全部就位并调股后,在顶部用锌块填平,并进行封水处理,再将鞍槽侧壁用拉杆夹紧。

1 主索鞍铸造技术要求

(1)主索鞍鞍体为铸件和钢板组焊件,主索鞍铸件材料牌号为 ZG270-480H, 其化学成分见表 1。钢板件材质为 Q345R,拉杆材料 40CrNiMoA,主索鞍上下承板钢材采用 Q235B。铸钢 ZG270-480H 技术标准应符合《焊接结构用碳素钢铸件》GB7659—2010 的规定。

(2)铸钢件的加工面经粗加工后,应进行探伤。判断标准为:①超声波:根据超声波探伤判定标准《铸钢件超声探伤及质量评级方法》(GB/T 7233-1987),二级合格,合格率 100%;②磁粉或渗透探伤按《铸钢件磁粉检测》(GB/T 9444-2007)及《铸钢件渗透检测》(GB/T 9443-2007),三级合格。

(3)铸造模样应采用整体模样,模样尺寸应考虑到铸件的收缩量。

(4)面砂、型砂采用优质砂,型腔表面刷锆英粉快干涂料, 以防粘砂, 所有圆角适当增加敷铬铁矿砂。硅砂应符合 GB/T 9442-2010《铸造用硅砂要求》,铬铁矿砂应符合 JB/T 6984-2013《铸造用铬铁矿砂要求》,涂料应符合 JB/T 9226-2008《砂型铸造用涂料》。

(5)钢液应充分精炼,尽量减少非金属夹杂物,保证钢液质量纯净。应从炉中取样进行化学成份分析。应使用高强度的耐火釉砖做浇口系统,防止浇注系统中的型砂剥落而产生夹砂。浇注完成的铸件应缓慢冷却, 避免由于铸造应力或局部冷却产生的热应力使铸件变形或开裂,打箱后应全面清砂,去除冒

表1 铸钢ZG270–480H化学成分 w(%)
Tab. 1 Chemical composition list of cast steel ZG270–480H

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Fe
0.17～0.25	≤0.60	0.80～1.20	≤0.025	≤0.025	≤0.35	≤0.40	≤0.15	≤0.40	≤0.05	余量

口飞翅附属物。

(6)铸件清砂后，按《铸件尺寸公差与机械加工余量》(GB/T 6414—2017)进行尺寸形状检查，尺寸应符合 CT13～CT15 级公差，保证有足够的加工裕量。对规定部位取样检验，初步确定铸造质量。

2　主索鞍鞍头铸造难点及对策

由于铸件外形结构尺寸大，鞍头底部铸造型腔水路厚大，使钢液难以实现顺序凝固。鞍头结构截面尺寸变化大，交叉节点较多。鞍槽结构属于 U 字型的开口结构(如图 3 所示)，鞍槽较长、深度尺寸和开口尺寸较大，开口容易出现铸造变形，同时筋板位置尺寸难以控制。鞍头的鞍槽、主筋板、侧筋板的壁厚变化大，主筋板和鞍槽、鞍槽和侧筋板的交接部位形成了带状热节，其补缩难以兼顾，顺序凝固控制困难，易出现疏松、缩孔、气孔、夹渣等铸造缺陷。

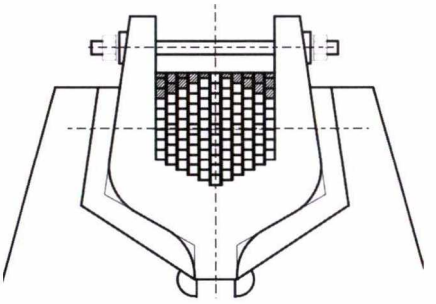


图 3　主索鞍鞍头结构示意图

Fig.3　Schematic structure of the saddle head of main cable saddle

铸造缺陷很大程度上是由于铸造工艺方案的不合理和不完善产生的，因此应注重从源头上严格进行控制，避免由于工艺方案的先天不足导致在铸造生产中出现问题。针对索鞍鞍头铸造难点，采取以下措施：

(1)采用铸造模拟软件，对索鞍鞍头毛坯铸造方案，进行钢液凝固及充型过程的计算机模拟，对可选铸造方案进行比较筛选。结合已有的悬索桥索鞍毛坯铸造经验，对铸造方案进一步完善，从而确定出合理的铸造方案。

(2)为了确保铸件的质量，采取将鞍槽口朝上的浇铸方案；采用组芯地坑造型、双层浇道系统浇注的铸造工艺方案。在鞍槽内设置大冒口[7]，对鞍头铸钢件进行补缩。在鞍槽 U 字开口处设置防变形拉筋。为防止鞍槽 U 型开口变形影响导致加工余量不足，可适当增加鞍槽内表面的加工余量进行补正。在 U 型槽口底部设置外冷铁使得钢液按照工艺控制意图形成顺序凝固。浇铸系统设计为底注或浇注，既减缓钢液流动速度，浇铸平稳，又逐步将型腔中的气体排出，夹杂物上浮至冒口，有利减少铸件中的气孔。

(3)调节冷铁的布置位置及数量以减小铸件各部分的温差。采用退让性好的型(芯)砂以减小钢液收缩的阻碍力，浇注后缓慢冷却以减小铸件各部分的温差。对于冷却凝固过程中产生的铸造应力，采用铸造后热处理的方法进行消除。

3　主索鞍制造

3.1　鞍头铸造工艺方案

铸造是索鞍构件制造中的关键工序，铸件的质量直接关系到后续焊接的质量[8]。根据本桥主索鞍设计结构形式分析，结合悬索桥索鞍铸件生产制作的经验与计算机模拟浇注生产分析，确定本桥主索鞍鞍头铸造时采用鞍槽朝上的铸造方案[9]。考虑铸件在凝固收缩过程中受铸型的机械阻碍和铸件自身结构影响，选择铸造收缩率为 1.8%。

为保证加工面精度和加工余量，确定鞍槽内单面加工余量为 20 mm，其它加工面的单面加工余量为 15 mm。铸钢件的工艺出品率保持在 60%～62%，主索鞍鞍头设计采用腰型冒口(如图 4 所示)，冒口根据比例法、钢液的凝固收缩值和冒口的补缩效率进行设计，即根据铸件热节的大小，以一定的比例确定出冒口的大小后，再用根据钢液的凝固收缩至冒口的补缩效率确认冒口内的金属液量是否大于冒口所补缩的区域的金属液量，然后再利用 CAE 进行凝固模拟验证确认。

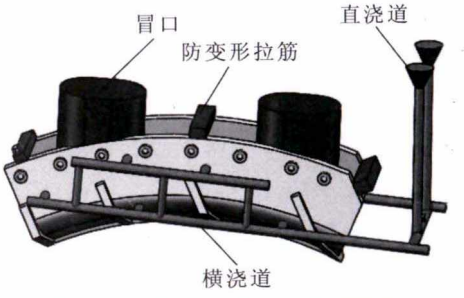


图 4　主索鞍鞍头铸造方案示意图

Fig.4　Schematic diagram of casting technique of the saddle head

铸造生产用原材料主要包括：硅砂、铬铁矿砂、水玻璃、固化剂、涂料、保温覆盖剂、金属和非金属炉料、木材、陶瓷浇口管等。面砂、型砂采用优质砂，型腔表面刷锆英粉快干涂料，以防粘砂，所有圆角适当增加敷铬铁矿砂。采用组芯地坑造型、双层浇道双浇口浇注系统的铸造工艺方案。采取索鞍鞍槽口朝上的浇注方式，浇注系统设计为底注浇注，钢液由浇口

经浇道先进入铸件底部由底部向上平稳升高。

浇注系统设计原则如下：保证钢液在型腔内有适宜的上升速度；合理选择钢液进入铸型的位置和方向，有利于铸件的顺序凝固，避免铸件产生局部过热；保证钢液连续均匀的充满型腔，为排除气体和非金属夹杂物创造良好的条件；避免钢液直接冲击型壁和泥芯；不妨碍铸件的收缩；铸件均采用漏包进行浇注，故浇注系统的各部分的尺寸应和钢液包的包孔尺寸相适应，即和钢液的流量相适应，以保证浇注时不自浇口杯外溢；在造型的同时，开始钢液冶炼并进行钢液精炼，以尽量减少非金属夹杂物，炉前检验钢液化学成分合格后进行浇铸；在鞍槽内设置补缩冒口、在浇铸后期补浇冒口，浇铸过程中保证浇口始终充满，以达到对鞍槽部位补缩的目的，保证铸件内部组织致密，避免产生缩孔、缩松等铸造缺陷；浇铸完毕后，进行保温、冷却，然后开箱落砂，铸件退火后割除浇冒口并清理铸件，再进行正火处理+回火处理；铸件最终检验合格才能进入机械加工工序。

3.2 鞍头铸造工艺流程

主索鞍鞍头铸造工艺流程如图 5 所示。

(1)模型制作　模型要求结构合理、尺寸准确、表面光滑、防吸潮并保证足够的强度；铸造圆角在芯盒中做出；芯盒中标出浇口和冷铁位置。取模不便处，木模应尽量采用止口形式拉活并定位。实样起吊过程中应保证平稳，防止变形。

(2)造型　水玻璃面砂、背砂按工艺要求和操作规程使用，型、芯表面要保证紧实度和平整度。鞍槽内芯中间及筋板件填退让材料，热节处和厚大面用铬矿砂，并保证紧实度，确保表面质量；挂砂外冷铁保证挂砂量，挂砂厚度＜25 mm；组芯前用水平仪校准组芯平面，组芯时保证尺寸准确，砂芯与砂芯的组芯间隙用水玻璃面砂塞好、塞紧，并将表面处理干净、平整；按工艺要求摆放浇注系统和冒口，内浇道出口处要圆滑过渡；在铸件厚大、不加工位置按技术要求做出本体试棒，在试块端面铸出铸件号，原则上试块放在侧面，并保证尺寸与质量；在铸件非加工表面铸出炉次号及铸件号；型腔表面刷防渗透涂料 3 遍，打磨光滑平整。

(3)钢液冶炼　采用电弧炉进行钢液冶炼，钢液采取吹氩精炼，控制脱碳量，保证足够钢液沸腾时间；延长吹氩精炼时间，保证钢液质量及钢液化学成份满足技术要求，以减少非金属夹杂物；严格控制钢液中有害元素的含量，尽量降低钢中 S、P 含量；合金熔炼时充分脱氧。钢液在 1 600 ℃左右出钢并吹氩镇静。

(4)浇铸　出钢前钢包应进行烘烤，烘烤时间为 3~5 h。还应看清工艺对浇注的要求，检查砂箱紧固是否良好。在浇注地点附近要预备好冒口覆盖剂和引火材料，同时预备好铁锹及型砂。按工艺要求控制浇注温度，浇注温度为 1 540～1 590 ℃。浇注时先半开使钢液不能流得太猛以免过分冲刷浇注系统，此后全速浇注，浇至冒口后，应适当减小流量，最后按工艺要求点注冒口。浇注结束后冒口加足覆盖剂，做好冒口维护并进行登记。

(5)开箱落砂切割浇冒口　铸件在浇注保温时间到期后进行开箱落砂，将铸件上的砂子清除干净，并清理浇口、披缝、毛刺，清砂过程中铸件不允许吹风、打水与撞击；铸件温度在 200～300 ℃时热割冒口，要求一次割完，切割本体试样，在试样一端留 10～20 mm 余量不割以保持试样与铸钢件本体仍然粘连；清理氧化渣，粗整外形，检查铸件表面质量。

(6)退火　采用整体退火方式进行去应力热处理，消除铸造应力。热处理保温时间不低于按

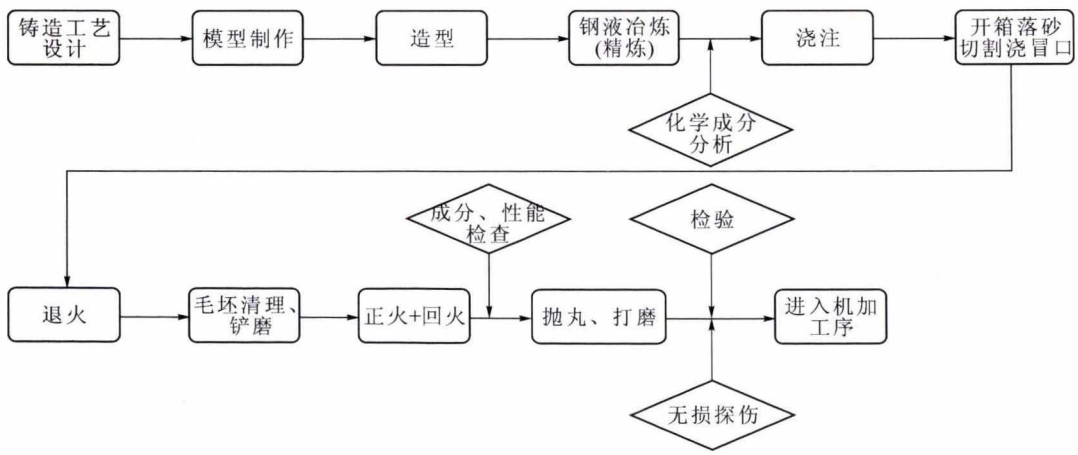


图 5 主索鞍鞍头铸造工艺流程

Fig.5 Schematic flow chart of casting technique of the saddle head

4 h/100 mm 进行控制。注意索鞍装炉时支垫平稳防止变形。严格控制同炉热处理的铸件之间距离。

(7)铲磨清理　对铸件表面进行铲磨和清理。

(8)正火+回火　采用正火+回火的热处理方式来进一步消除铸件的内应力，使组织进一步得到奥氏体，改善铸件的力学性能。热处理的保温时间按不低于 4 h/100 mm 进行控制。注意索鞍装炉时支垫平稳以防止变形。严格控制同炉热处理的铸件之间距离。

(9)精整打磨喷丸　去除毛坯表面的氧化皮，精整打磨表面。表面要求光滑平整，不允许有沟槽、凹坑。R 角和探伤部位打磨满足探伤要求。其余非加工面粗糙度满足设计图纸和标准的有关要求。非加工面出现小于 5 mm 的凹坑、气孔等缺陷可不补焊，但必须打磨平滑过渡。

3.3　主索鞍机械加工及试装配

在主索鞍机械加工前首先进行钢板间焊缝的焊接工艺评定，应保证焊缝的力学性能达到GB713-2014《锅炉和压力容器用钢板》的规定。铸钢件与钢板间焊缝的焊接工艺评定，应保证焊缝的力学性能达到 GB/T 7659-2010《焊接结构用碳素钢铸件》的规定。针对主索鞍体设计结构特点，为了确保双鞍槽空间结构鞍体的加工尺寸精度并完全满足两件鞍体(边跨鞍体+中跨鞍体)组合使用的需要，首先粗加工单件铸钢索鞍鞍头，然后鞍头进入组装焊接成为单件鞍体(分别为边跨鞍体和中跨鞍体)，之后单件鞍体进行半精加工，再将两件配对鞍体(边跨鞍体+中跨鞍体) 定位组装成为一个整体结构，最后对主索鞍组合体进行底平面以及鞍槽的整体精加工。

主索鞍各零部件(包括鞍体、上下承板等)制作完成后，进行厂内试装配和索鞍顶推试验。在车间装配平台上，支垫调整主索鞍下承板上平面水平，装入定位销；将安装板安装到下承板上，吊装上承板，然后将单件索鞍鞍体按边跨和中跨位置吊装放在上承板面上，结合面贴拢，装入定位销，用工艺螺栓连接两件索鞍；检查鞍体、承板的相互位置关系和尺寸关系[10]，然后试装拉杆螺栓。装配检查合格后进行索鞍的顶推试验，检测索鞍摩擦副的滑移系数，为索鞍现场安装顶推提供参考数据。

4　结语

为了克服空间缆在塔顶处由主缆产生的水平分力对塔产生的附加应力，西安市建材北路跨灞河桥主索鞍采用了一鞍双槽的设计理念。由于该桥主索鞍重量及体积大，其制造过程中涉及铸造、焊接、热处理、机加工、吊装、装配等多个环节。通过对主索鞍铸造过程的重难点进行分析并采取相应对策，以及对主索鞍鞍体铸造方案、、铸造流程、机加工和试装配等关键技术工艺的研究，采取了相应的工艺控制措施，解决了大型索鞍铸造、机加工和试装配等技术控制难点。索鞍加工制造后经试验检测可知，索鞍各项技术指标均满足设计和规范要求。

参考文献：

[1] ZHONG C J, SHEN R L, WANG H. et al. Research on ultimate bearing capacity state and structure optimization of main cable saddle. [J]. Structures. 2021, 33(4): 28-40.

[2] WANG L, SHEN R L, MA N J, et al. Discrete analytical model for lateral mechanical behavior of cable-saddle system in suspension bridges. [J]. Engineering Structures .2020, 20(7): 1-13.

[3] 钱冬生，陈仁福. 大跨悬索桥的设计与施工[M]. 成都：西南交通大学出版社，1999.

[4] 张日亮，罗志恭，彭春阳，等. 天津富民桥主索鞍与散索套的制作[J]. 桥梁建设，2008(5)：39-41.

[5] 常志军，张克. 西堠门大桥主索鞍座设计 [J]. 公路，2009(1)：81-85.

[6] 董小亮，叶觉明. 特大悬索桥主索鞍鞍体制作工艺研究[J]. 钢结构，2013(6)：57-60.

[7] 朱作鑫，徐亚东. 钢锭冒口高度优化模拟研究 [J]. 铸造技术，2020(10)：978-981.

[8] 陈连生. 焊接生产形状与焊接技术的发展研究 [J]. 有色金属文摘，2015(2)：46-48.

[9] 郑建斌，蓝敏俐，陈忠士. 大型悬索桥梁主索鞍底座铸造工艺设计与实践[J]. 铸造设备及工艺，2018(2)：19-21.

[10] 许兆斌，董小亮. 虎门二桥坭洲水道桥索鞍制造技术[J]. 桥梁建设，2017(6)：111-115.

杭州文特机电有限公司

热处理炉、加热炉、工业自动化工程、环保节能工程、机电设备的设计、制造、加工、安装、技术开发、技术咨询、技术服务。工业自动化设备、仪器仪表、工业炉窑配件、计算机等的生产、批发、零售。

地址：杭州市西湖区万塘路 262 号 6 号楼 5-65 室
厂址：长兴县林城镇午山岗开发区
联系人：丁为兵
电话：15088362822
传真：0572-6087688
邮箱：dwb150@163.com