

深中通道沉管钢壳焊接质量控制

冯胜坤¹, 邵丹丹², 蒋巍²

1. 深中通道管理中心 广东中山 528400

2. 中船黄埔文冲船舶有限公司 广东广州 510715

摘要: 叙述了国家重大工程项目“深中通道”沉管隧道钢壳制造建造中钢结构焊接质量控制中采用的方法和措施, 实现了深中通道沉管隧道钢壳制造钢结构焊接质量的有效控制。

关键词: 深中通道; 沉管钢壳; 焊接; 质量控制

1 序言

深中通道是集“桥、岛、隧、水下互通”于一体的世界级跨海集群工程, 东起广深沿江高速公路互通立交, 在深圳机场南侧跨越珠江口, 西至中山横门互通立交, 主体工程全长24km, 沉管隧道全长5.035km。沉管隧道采用钢壳混凝土组合结构, 沉管隧道钢壳用钢量非常大, 每个标准管节的尺寸为长165m×宽46m×高10.6m, 非标管节长123.8m×宽度(46~55.49)m×高10.6m, 每个管节用钢量约1万t, 体量相当于一艘中型航空母舰船体; 共有32个管节和1个最终接头, 总用钢量超过了

32万t, 沉管如图1所示。深中通道作为举世瞩目的国家“十三五”重点工程之一, 如此大规模、大体量地使用钢壳沉管在国内乃至全世界尚属首例, 其施工质量和工期控制尤为重要。

沉管隧道管节钢壳的横断面采用两孔一管廊结构, 即左右侧为主行车孔, 中管廊道从上至下分别为排烟道、安全通道、管线通道。构造主要由外面板、内面板、横隔板、纵隔板、横肋及纵肋等构成, 管节横剖面如图2所示。钢壳结构内设置众多横隔板和纵隔板, 横隔板的纵向间距取3.0m, 纵隔板基本按3.5m一道设置, 纵横隔板联合形成3.5m(横

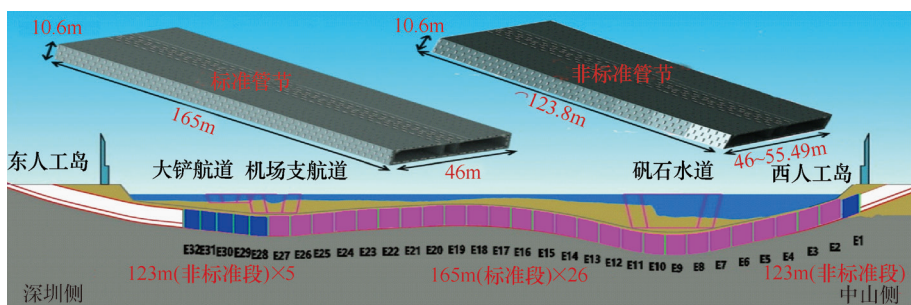


图1 沉管

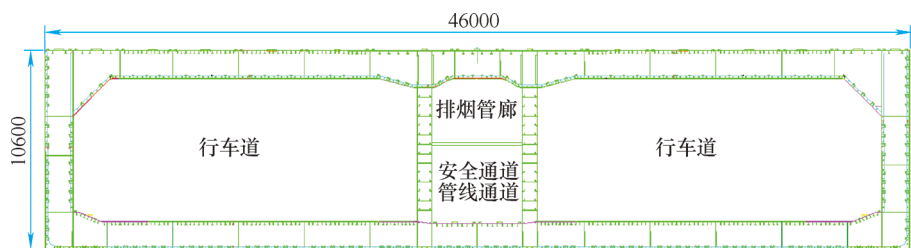


图2 横剖面

断面方向)×3.0m(纵轴线方向)的多个封闭的小隔舱,顶板、底板、侧墙厚度1.5m,钢壳基本构造如图3所示。

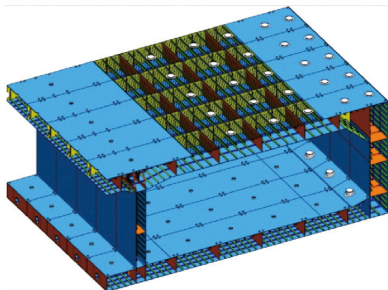


图3 钢壳基本构造

钢壳结构主要采用GB/T 1591—2008《低合金高强度结构钢》标准的Q420C、Q390C钢材,主体结构内外侧面板采用Q420C,横向隔板采用Q390C,其中内外面板因采用新技术工艺,供货状态为TMCP(热机械轧制),Q420C钢板最大厚度达40mm。

沉管钢壳结构建造流程为:下料加工→零件制作→组件制作→块体制作→小节段制作→节段制作。

2 工程特点和焊接难点

(1) 高强度钢用量大 项目总用钢量超过了32万t,一个标准管节用钢量过万吨,其中Q420C钢板占近60%,最大厚度达40mm,Q390C钢板占近18%,最大厚度达30mm。大规模的高强钢厚板焊接,对施工部门的焊接技术水平和管理水平存在巨大的挑战,同时由于施工周期紧,对生产周期的控制存在风险。

(2) 焊接量大、施工难度大 不仅一个165m标准管节板对接焊缝近2万m,全焊透T形角接焊缝1.6万m。I级焊缝总量3.6万m,而且焊缝几乎均与Q420C钢板有关,焊接难度大。

节段个体巨大,在室外存在大量焊接工作,对Q420C等高强度厚钢板焊接质量管理存在很大的质量隐患。

(3) 作业空间受限制,施工难度大 钢壳结构内设置众多横隔板和纵隔板,纵横隔板联合组成3.5m×3.0m的多个小隔舱,形成了仅有1.5m高的密集封闭舱室,作业空间受限制,焊接施工难度大,安全隐患多。

(4) 适合标准化作业 管节钢壳结构形式单一,虽存在有线性的变宽管节,但通过合理的施工设计,可以实现大量焊接工作标准化、机械化,有利于提高焊接质量。

(5) 新技术新工艺应用多 深中通道项目对智能制造要求高,要求结合主体结构与生产管理特点,以智能制造为核心,贯彻“以设备促工艺、以工艺(工法)保质量”的原则。项目使用多种大热输入的机械化焊接新工艺,对诸如焊接裂纹的控制提出了更高的要求,焊接质量隐患多。

综上所述,该项目的焊接生产难点为:

①Q420C钢厚板大规模生产和大热输入工艺所带来焊接技术难题。②新投入的自动化、智能焊接设备对焊接质量稳定性的影响。

3 影响焊接质量的因素分析

通常影响焊接质量的主要因素有:材料、焊接方法、工艺措施、施焊环境、焊工技能及焊接设备等。这些因素相互影响、相互制约,无论哪一因素选用或操作不当,都会影响焊接质量。同时,深中通道提出了以智能制造为核心,贯彻“以设备促工艺、以工艺(工法)保质量”的原则,新设备的投入,其稳定运行、人员操作的熟练程度、工艺稳定性等对焊接质量存在较大的影响。结合深中通道的主体结构与管理特点,从材料、设备、焊工、焊接方法和工艺、施焊环境要求等进行分析。

3.1 原材料

(1) 钢材 深中通道大量应用Q420C钢,厚度达40mm,该钢种多为热轧、细晶、可焊接的高强度淬火回火钢,母材金属的化学成分、力学性能、均匀性、厚度等,都会对焊接金属的热裂、母材金属和焊缝金属的冷裂、脆性断裂、层状撕裂倾向产生影响。虽然该钢种焊接施工过程的质量控制措施也比较成熟,但由于深中通道用钢量巨大,生产周期紧,大规模的焊接生产,对工艺控制、环境控制、人员技能要求更高,焊接技术水平和水平存在巨大的挑战,因此这些高强钢厚板焊接冷裂纹的预防措施尤为重要和关键。

(2) 焊材 不同焊材,其抗焊接裂纹的能力有较大差别,结合大量使用Q420C等高强钢厚板情况,充分考虑钢板的脆性倾向,特别是在应用FCB

焊、EGW焊等这些大热输入焊接方法上，焊材的选型尤为重要，合理选择焊接材料，能降低甚至防止焊接裂纹的产生。

3.2 焊接方法和工艺

为了贯彻“以设备促工艺、以工艺（工法）保质量”的建造原则，项目采用了FCB焊和EGW焊等高熔敷率、高效率、容易实现自动化焊接的大热输入焊接工艺，在大热输入下，焊接热影响区与焊缝的强度和韧性显著下降，容易产生冷裂纹，同时厚度达40mmQ420C钢板的应用，焊接冷裂纹敏感性又会进一步恶化。

在产品制造过程中，工艺参数对产品性能和质量的影响更为直接，产生的不利效果更难于恢复。随着热输入的增加，合金元素挥发加剧，对焊接显微组织、力学性能有显著的影响，出现冷裂纹的倾向恶化。

3.3 焊接环境

低合金高强度钢焊接产生的质量问题主要是冷裂纹，引起冷裂纹的主要因素是氢，焊接接头中含氢量越高，产生裂纹的倾向就越大，因此控制焊缝周围的水汽含量和有效保护熔池金属，减少氢在焊缝金属中的熔入，能有效地减少焊接裂纹的产生。

3.4 焊工技能

虽然钢壳焊接已具备自动化、智能化制造的前提，但焊工对设备操作的熟练程度影响了设备的运行效果，影响焊接质量的稳定性，同时焊工对钢种及其焊接工艺的熟悉程度，甚至是职业素养都将造成焊接质量控制失效。

3.5 焊接设备

焊接设备是焊接生产的物资保证条件之一，焊接设备处于良好的工作状态才能确保焊接的正常进行，深中通道投入了片体智能焊接机器人、块体智能焊接机器人、FCB焊等高效率焊接设备，智能焊接机器人控制技术为新开发产品，在行业没有应用先例，其焊接稳定性和焊接参数的有效性对产品质量有直接的影响。

4 焊接质量控制策划

针对以上不利因素，主要从焊前质量控制、焊接过程控制两方面对深中通道沉管隧道钢壳制造实施焊接质量控制进行策划。焊前质量控制注重焊接方案的正确性、工艺措施的准确性；焊接过程的控制重点在过程的确认、工艺执行的准确性，消除对产品性能和质量影响更为直接的因素。焊接质量主要控制点如图4所示。

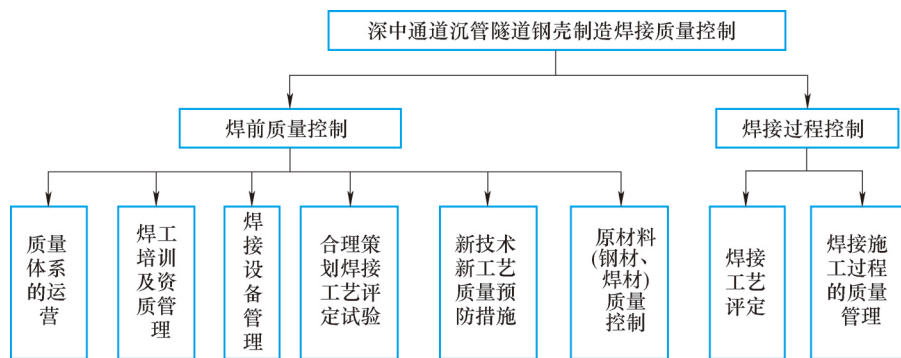


图4 焊接质量主要控制点

4.1 焊前质量控制

（1）质量体系有效运行 要求企业从自身实际出发，结合国家有关法律、法规，按照GB/T 19001—2008标准，建立、健全质量体系有效运行机制，符合相关第三方认证，有效开展质量管理活动；建立工程质量责任制、质检和工艺工程师巡查制度、施工责任人挂牌制、教育培训制度、奖惩制度等五项制度并组织实施，确保质量体系运行有

效。

结合该工程实际情况，建立相应的质量管控体系，根据质量管理重点，制定并落实质量保障措施。落实“双标管理”和“品质工程”管理要求，提高工程施工标准化、智能化水平。

（2）焊工技能和焊工管理 对焊工这类特殊作业人员的培训及资质认证实施有效管理。

1) 技能满足要求：钢壳焊接已具备自动化、智

能化制造的前提,从事焊接生产的焊工和设备操作工都需针对该工程进行焊接专业理论知识和操作技能培训。首先,必须具有中国船级社或其他知名船级社的焊工资格认证,且在有效期内;然后,通过工程总监办的考试,取得相应的操作资质证书才允许进行焊接施工。焊接人员施工过程中应有明显标识的二维码信息,随时接受资质检查。

2) 重视职业道德教育:对施焊人员的培训,面向生产按需施教、除了学习技能之外,重视职业道德教育,管理中心结合施工单位开展的双非班组建设,以党员先锋模范作用,全面提高焊工队伍的素质,始终贯彻“百年深中、质量第一”“精品工程”“不可维护”的质量意识,推动工程质量稳定和持续进步,同时保证安全生产。

3) 加强业务知识专项教育:①上岗前进行业务知识、操作说明、质量标准、工艺技术交底。②每天班前会,对施工任务容易出现的质量风险点进行重点宣贯。③周会和月会组织员工质量工艺学习,对近期施工过程中出现的质量问题及下阶段存在的质量问题隐患等,进行有针对性的培训,做好质量预防和规范化建设工作。

4) 形成有效的监督机制:定期与不定期工艺巡检相结合,依托总监办和三检等工程师、施工单位质量师、工艺师进行巡检,对违反工艺纪律的情况予以通报,对重复违反工艺纪律和质量不满足工程要求的焊工予以清退。

5) 比武促技能提高:管理中心每半年组织焊接比武,对成绩符合要求的前三名(或班组)实行奖励,提高作业人员自觉提高技能、遵守工艺纪律,推进质量整体持续向好发展。

(3) 焊接设备管理 焊接设备是焊接生产的物资保证条件之一,焊接设备处于良好的工作状态才能确保焊接的正常进行,要求设备的投入要充分考虑钢壳结构特点,选择合适的智能、高效的制造设备,确保生产可靠和稳定的产品。

1) 确保设备受控:施工单位为了能按时按质按合同完成工程,投入了大量的高效、机械化和智能化的大型生产设备,如高精板材切割机、片体智能生产线、FCB焊、纵骨生产线、块体智能焊接机器人等设备。所有设备按照要求进行报备,形成设备管控二维码,确保设备稳定受控。

2) 专人保驾确保维护及时:施工单位项目组在各作业区配备专门的检修人员,定期对焊接设备进行检修和维护保养,保证设备电流、电压的准确性和设备的正常运转。

3) 高精、智能设备保证中间产品质量高标准:智能设备根据设备特点制定相应施工工艺,从钢材下料、片体及块体组件制造全部实现智能制造、中间产品精度等质量受控,满足过程质量控制点要求。

4) 智能焊接设备的焊接数据库中使用的参数,都必须符合并得到监理认可的焊接工艺规程的规定范围,并将每一种焊接工艺规程粘贴在设备的明显位置,确保焊接参数满足深中通道专用规范要求,质量稳定可靠。

(4) 合理策划焊接工艺评定试验 产品建造前开展工艺策划,根据工程的智能制造要求,开展设计和试验验证工作。对选用的钢材进行与焊接工艺规程有关的焊接性试验,开展焊接工艺评定试验等工作。

根据深中通道钢壳工程实际情况,在焊接生产管理上提出了如下的要求。

1) 对内外壳板选用的大热输入钢,要根据焊接工艺评定规程进行大热输入焊接的焊接性试验,满足大热输入焊接的要求,形成钢板焊接性报告。

2) 编制的焊接工艺规程,必须满足合同文件和有关规范要求,通过总监办和深中通道管理中心总工办的审批。

3) 焊接工艺评定试验必须由总监办工程师见证,形成焊接施工记录,焊接工艺评定报告得到总监办工程师认可和总监办审核。

4) 焊接工艺评定报告必须由总监办主持、管理中心总工办等主要单位参与,外部专家评审,一致同意通过后,报管理中心批准才能实施。

5) 对于所有焊接工艺评定结果,必须在试验段得到工艺验证,质量符合要求,才能到正式管节应用。

6) 典型钢材焊接工艺评定策划。对于项目使用的特定钢材——Q420C钢,厚度40mm的大热输入钢板的性能指标与国标或行业标准的对比见表1,从表1中可以粗略地判断协议钢材的大热输入钢板焊接性能明显提高,抗裂性较好。

表1 钢材性能指标对比

指标	碳含量 (质量分 数, %)	碳当量 (%)	裂纹敏感系数 (%)	上屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断后伸长率 (%)	0℃冲击吸收能量 /J
国标钢材	≤0.16	≤0.45	≤0.20	≥400	≥520	≥19	≥34
中国船级社钢材	≤0.20	≤0.43	—	≥420	≥520	≥21	≥42
协议钢材 (实例)	0.09	0.33	0.17	490	633	24	≥250

针对钢材的化学成分、强度等级、碳当量水平、焊接热输入大小、焊缝金属含氢量水平及所采用的焊接方法等进行大量的试验工作，结合Q420C钢板的大规模生产，提出了免预热申请。在焊材选用集中在控制扩散氢含量和提高焊缝的韧性，选用了含氢量H5、冲击温度采用-40℃、甚至-60℃焊材匹配。参考JIS Z 3118—2007对预热温度的估算，在选定上述协议钢材Q420C钢的情况下，对不同厚度、不同焊材扩散氢含量进行预热温度估算。扩散氢含量与预热见表2。

表2 扩散氢含量与预热

扩散氢指标 /mL·(100g) ⁻¹	3	4	5	3	4	5
钢板厚度/mm	30			40		
预热温度/℃	<0	23	47	23	47	71

由表2可以看出，控制焊缝金属中扩散氢含量对预防冷裂纹的形成有重要意义，合理控制焊缝金属扩散氢含量，在焊接方法上采用大热输入焊接工艺，能减少甚至免预热。

(5) 做好新技术新工艺应用的质量预防措施 深中通道钢壳大量使用大热输入钢材，Q420C级的钢板，厚度达40mm，大规模的焊接生产质量控制难度大，特别是这些高强钢厚板焊接冷裂纹的预防措施尤为重要和关键。

1) 原材料的管理：大热输入钢材必须符合报管理中心批准的专用的“钢材技术协议”要求，入库复检应按认可的钢厂技术条件进行目标化学成分分析；焊接材料要求低氢型，必须按照焊接工艺评定的焊材级别，不得变更，特别是对冲击吸收能量的要求。

2) 新设备新工艺要求编制设备操作说明书、工艺规程指导焊接生产，工艺规程要明示焊接缺陷的类型和预防及处理措施。

3) 对Q420C高强钢焊接，焊工需要按照船级社要求或国标GB/T 15169—2003《钢熔化焊焊工技能评定》取证，不得越级焊接。

(6) 原材料（钢板、焊材）质量控制 钢板和焊材为甲控物资，因此必须严格执行甲控物资管控要求。

1) 钢材的选用和使用管理。钢材除了满足合同技术要求之外，大热输入钢必须符合经管理中心批准的施工单位与钢板生产厂家签订的“钢材技术协议”要求，入库检测应按认可的钢厂技术条件进行目标化学成分分析。

第一，钢材生产厂家必须确保用成熟和稳定的生产工艺生产大热输入钢板，生产工艺和生产线由第三方认证。

第二，每件钢板必须有唯一编号，生产信息接入深中通道BIM管理系统，提供查询功能。

第三，每件钢板套料信息、使用部位信息接入深中通道BIM系统，做到材料可追踪。

第四，施工现场对不同材质的钢板，必须有明显的颜色加以区分，一目了然地辨认出来，预防用错。

2) 焊材选用。为确保焊接质量，结合大量使用Q420C等高强钢厚板情况，要求施工方在综合考虑项目所用钢板的碳当量、力学性能、板厚、供货状态下，充分考虑钢板的脆性倾向，对焊接冷裂纹有预防措施，特别是在应用FCB焊、EGW焊等这些大热输入焊接方法上，应合理选择焊接材料。

第一，焊接材料要求低氢型：必须按照焊接工

艺评定的焊材级别,不得变更,特别是对冲击吸收能量的要求,任何变更都必须重做焊接工艺评定试验。焊材入库检验时,扩散氢含量为必检项,在材质证明书上明示扩散氢含量。

第二,焊材制造商必须是知名度高的大型厂家,质量稳定可靠:生产产家和供应商需报深中通道管理中心批复,供应的牌号必须符合焊接工艺评定中使用的焊材牌号。

第三,焊接材料的入库检验,严格执行合同文件和相关国家或行业标准,检测项和性能指标符合要求。

3) 焊材管理。设立专用焊材仓库,建立采购、检验、使用等全过程台账管理:为方便焊材管理和保证焊材的正确使用,设置深中通道项目专用焊材库房,用于该项目焊材存放,避免与其他项目焊材混淆,并预防未检先用等现象。

焊材管理除执行有关行业标准外,焊材的管理应做到具有可追溯性,能追溯到任一批号的厂家、牌号、规格、重量、入库时间、取样时间、试验时间、试验结果、领用时间、领用人及使用部位等信息。

4.2 焊接施工过程控制

深中通道沉管钢壳的主要用钢是Q420C和Q390C,最大厚度40mm,对于这些常规材料,焊接生产中可能出现的焊接质量问题,在业界都有共识,焊接施工过程的质量控制措施也比较成熟。然而,由于深中通道用钢量巨大,生产周期紧,施工方借鉴船舶建造经验,采用了大热输入钢板,采用相对于钢结构生产的新技术、新工艺方案,这给焊接生产带来了新问题,增加了不确定因素,也存在质量隐患。对于高强钢或特定钢种,产品制造过程中工艺参数对产品性能和质量的影响更为直接,产生的不利效果更难于恢复,同时也是用常规无损检测方法无法检测到的,因此确认过程检验和方法的正确性是保证产品质量的重要手段。

对于项目使用的Q420C、厚度40mm的大热输入钢板,以及低氢型焊材的匹配使用,焊接性能明显提高,抗裂性很好。因此,对焊接质量的控制注重设置焊接质量控制点、落实保障措施、实施监督。

(1) 焊接工艺应用

1) 焊材必须与WPS指定型号一致,不得代

替。

2) 焊接参数在规定范围内,热输入控制符合要求。

3) 焊接环境控制符合要求,特别是潮湿、防风、焊材保管。

4) 必须在焊接施工部位能查到相应的工艺卡。

5) 在焊接设备的明显位置,粘贴焊接参数卡,焊工不得随意变更焊接参数,同时方便焊工检索和第三方监督。

(2) 焊接施工过程的控制措施 在施工中主要采取以下控制措施。

1) 焊接施工控制强调了过程检验的重要性,对过程检验的程序和内容进行了确定,根据施工流程,设置焊接停止点,确保前道工序满足要求。

2) 重视焊后无法通过常规检验或检测的产品性能或是条件难以恢复的影响因素确认工作,如对施工环境的符合性及其保护措施、焊接预热要求、焊材的符合性、焊接参数的准确性等,进行全面的自查、互检、监督检验。

3) 设置特殊岗位人员,对焊接施工过程中焊接参数和道间欠缺处理等进行检查监督。例如,检测焊接电流、电弧电压、焊道宽度和厚度、层间温度、焊层和焊道的布置(含起/熄弧点)、焊接顺序;检查焊接环境(如潮湿、大风)变化的影响及其采取措施的正确性。全方位地消除焊接过程中对产品性能和质量直接产生不利效果的隐患,保证产品质量。

4) 生成焊接记录,完善焊接可追溯文件,焊接记录包含:产品编号和零部件图号、焊接日期和时段、焊工工号、WPS编号、焊接材料的牌号和批号、焊接方法、实际预热温度、自检结果等信息。焊接施工记录追溯表见表3。

5) 大量采用自动化和智能化焊接设备,保证焊接质量稳定、可靠:加筋肋与隔板的焊接采用片体智能机器人、拼装阶段拼板对接缝的焊接采用FCB焊、敞开式块体的焊缝焊接大量采用机器人焊接、长角焊缝采用自动焊接小车等机械化焊接、外场对接焊缝优先使用埋弧焊等。对这类自动化、智能化焊接质量管理,主要体现在建立健全焊接数据库、控制安装间隙符合施工标准、焊接施工人员的操作

表3 焊缝施工记录追溯表

管节号	块体/小节段/管节	焊缝编号	焊缝级别	焊接方法	焊接工艺规程编号	焊接材料(批号)	湿度(%)	温度/℃	设备编号	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min ⁻¹	预热温度/℃	焊工编号	施焊日期

技能培训措施的落实。

5 工艺示例

以上述协议钢板（大热输入钢）为例说明焊接过程的质量控制措施和效果。

（1）母材和焊材 母材采用Q420C大热输入钢，厚度40mm；焊接方法采用三丝FCB焊，焊丝采用JIS Z3351—2012标准，前丝YS-M1， ϕ 4.8mm，中丝YS-S6， ϕ 6.4mm、后丝YS-S6， ϕ 4.8mm，正面焊剂采用JIS Z3352—2017标准的SACG-II。

（2）坡口设计和焊接位置 焊接采用FCB焊专用单面焊双面成形工艺，焊接坡口为普通Y形45°坡口，钝边6mm，安装间隙<1mm。

（3）焊接设备 使用日本神钢FCB成套焊接设备，焊接电源为OTC焊机，其型号为KRUMC-1500和KRUMC-1000，焊接参数调节范围符合焊接工艺要求。

（4）质量控制点 ①坡口形状公差、坡口边直线度严格执行精度控制标准。②安装间隙、焊接面打磨符合要求。③产品试板、引熄弧板按照工艺要求安装和焊接。④按照板厚范围铺设背面焊剂高度。⑤焊接参数按照板厚输入，由系统自动生成焊接参数。

（5）焊接工艺与焊接参数 焊接采用单面单道焊双面成形，反面为铜衬垫和背面成形焊剂。不需进行焊后热处理。

具体焊接参数：第一电极焊接参数为焊接电流1450A，电弧电压35V；第二电极焊接参数为焊接电流1300A，电弧电压40V；第三电极焊接参数为焊接电流1300A，电弧电压46V，焊接速度为36cm/min。

按照该焊接工艺进行了产品焊接，焊缝长度>15m，焊后48h和168h分别对焊缝进行100%MT+100%UT检测，对与其连接的产品试板进行无损检测和力学性能试验，焊缝内外部没有发现超标缺陷，特别是熄弧端没有发现终端裂纹，力学性能指标合格，焊接完全符合深中通道设计技术要求。

6 结束语

钢结构焊接在“深中通道”沉管隧道钢壳制造中属于基础程序，其焊接质量关系到工程的总体质量。本项目根据项目特点和生产环节，采取了多种方法和措施，从焊前、焊中对焊接质量进行控制并取得了良好的效果，既提升了工程品质，又避免了盲目高成本、高投入，为创造世界一流跨海通道的建设目标打下了基础。同时，对于Q420C大热输入钢的焊接，通过合理选择焊接材料、控制焊接区域氢含量、控制好焊接参数，能有效地减少氢溶入焊缝，减少合金元素的烧损，提高抗裂性，为实现低合金钢免预热工艺提供参考。

MW 20210616