

桥梁钢塔柱制造焊接技术

中铁宝桥集团有限公司 (陕西宝鸡 721006) 张剑峰 车平 孙立雄 裴雪峰

【摘要】 桥梁钢塔柱节段体积庞大, 所用钢板强度高、厚度大, 制造和安装精度高, 高强厚钢板的焊接及变形控制难度大。本文从结构特点入手, 介绍了钢塔柱的制作流程, 重点对厚板热切割、防裂、焊接变形控制和全位置焊接技术等方面进行了介绍, 这些技术对其他类似钢塔柱的制造与焊接具有借鉴作用。

近年来, 大跨度桥梁的索塔建设中钢塔柱因其自重轻、抗震性能好、工厂模块化加工、精度高、施工速度快及综合造价低等特点在国内发展迅速, 继南京长江第三大桥首次使用钢塔柱后, 泰州长江大桥和马鞍山长江大桥等大跨度桥梁中都采用了钢塔柱, 同时在一些矮塔或景观桥中应用也越来越多, 如郑州黄河公铁两用大桥、杭州之江大桥、鄂尔多斯苏扬2号桥、太谷步行景观大桥和铁岭凡河四桥等。塔柱节段采用工厂模块化制造, 现场整节段安装, 工厂制造采用焊接, 工地连接方式有栓接、焊接、栓焊结合、栓接并兼顾端面金属接触。塔柱与承台的连接多采用钢混结合埋入法和螺栓锚固法。其中, 螺栓锚固法通过承压板与承台顶面传递压力、螺栓锚固承担由截面弯矩引起的拉力, 塔柱与承压板采用焊接方式连接, 承压板厚度都很大, 泰州长江大桥和马鞍山长江大桥都用到了150mm厚。栓接和金属接触方式对节段的几何精度要求高, 如何保证厚板焊接的质量及焊接变形控制成为钢塔柱制造的关键技术之一。

1. 塔柱断面形式

钢塔柱多采用带加强筋的大型钢板组成大格室, 为了获得较大的截面惯性矩, 设计上将厚钢板布置四周, 高塔基于结构的涡振及驰振性能考虑, 一般将角部切角使其断面钝化, 国内典型钢塔柱断面如图1~图6所示。塔柱作为主要承压构件, 一般采用高强度厚钢板, 国内钢塔柱钢材的强度级别多为345~420MPa, 壁厚多采用30~60mm。

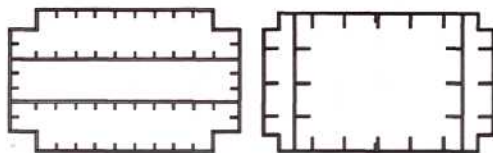


图1 南京长江第三大桥



图2 泰州长江大桥钢塔上塔柱

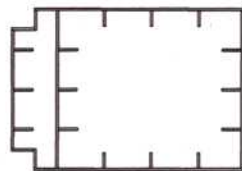


图3 泰州长江大桥钢塔下塔柱

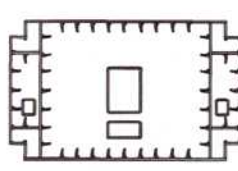


图4 马鞍山长江大桥



图5 鄂尔多斯苏扬2号桥



图6 郑州黄河公铁两用大桥钢塔柱

2. 塔柱节段制作流程

塔柱节段体积庞大, 在节段制作时一般都采用“板→零件→部件→整体”的模式进行, 在每一环节对焊接变形进行控制, 并矫正使其达到技术要求。以南京长江第三大桥钢塔柱为例, 其加工顺序为: 板单元件→块体→箱体。块体划分及箱体组装顺序如图7所示, 即先将壁板、腹板制作成板单元再对接成整体, 以胎架为外胎、边横隔板为内胎组装块体; 然后在专用胎架上, 依次按“块体1→中间横隔

板及锚箱→块体2→两侧壁板单元”的顺序组装节段箱体，根据焊接方案适时对节段进行90°或180°翻身焊接。

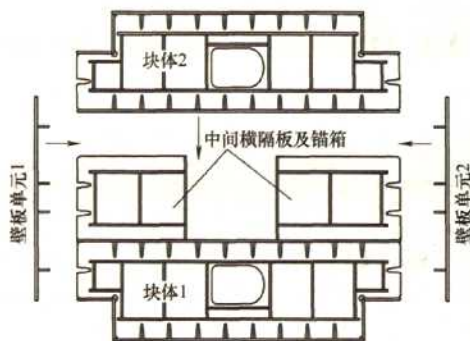


图7 南京长江第三大桥钢塔节段块体划分及整体组装顺序

3. 焊接主要技术难点

(1) 变形控制难度大 大型钢塔柱截面大，壁板（腹板）的宽度超出钢厂轧制最大宽度，一般都需要将壁板（腹板）分单元制作后再焊成整张壁板。在工艺上还需对节段进行分块制作成部件，再参与整个节段的组焊。节段尺寸超出公路运输限界时，还需要将节段分块制作，现场再焊接成整节段。为此在结构设计和制作工艺需要上都存在截面不对称的情况，针对塔柱制作工艺特点及安装精度要求高的特点，焊接变形控制是尤其重要的控制环节。

(2) 厚板热切割质量不易控制 钢塔柱设计中大量选用厚钢板，由于厚板淬硬倾向大，所以在工艺参数不当的情况下很容易造成切割面质量差，产生淬硬层（通常为马氏体组织），不去除淬硬层时，在焊接热循环的作用下淬硬层很容易产生龟裂（见图8），采用热切割后再刨边的方式，机加工量又很大。常规火焰切割一条割缝用一个割炬切割，现代数控火焰切割机配置了多个切割枪，通过不同的切割枪组合可以一次在钢板上切出X形、I形、单边V形及带钝边的单边V形坡口，如图9所示。通过调整割枪的位置及热输入对切割面硬度的控制更加方便，从而减少后续焊接坡口的加工量。

(3) 高强厚钢板焊接易产生裂纹 厚板的淬硬性大、焊接性差，在防止冷裂、热裂及层状撕裂上的难度也很大。预热是防止焊接裂纹和控制应力应变的有效措施，采用小热输入焊接时由于钢板厚、散热快，预热效果变差。目前推广使用的电加热方式使焊缝受热均匀，温度可控、效率高，具有明显

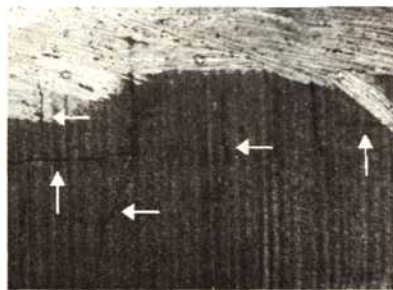


图8 厚板淬硬层龟裂

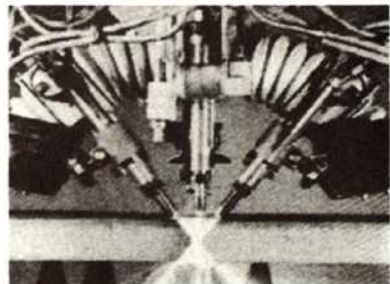


图9 数控X形坡口切割枪的布置

优势，特别在厚板冬季施工中具有不可替代的作用。

4. 塔柱制造主要焊接技术

(1) 板块对接焊缝 对于体积庞大的塔柱，壁板（腹板）需要划分成2~3个板块制作，再将板块采用埋弧焊对接起来。焊接时确保焊缝力学性能符合技术条件，同时控制焊缝的横向收缩及角变形。接头坡口设计上主要采用不对称坡口，根据所选用的焊接方法，在焊丝的可达性及焊缝成形系数适当的情况下尽量减小坡口截面积，在不对称量的设计上力求焊后钢板无角变形。

(2) 纵肋与壁板焊缝 纵肋与壁板之间为部分熔透坡口角焊缝，纵肋较薄时为角焊缝。传统的板块焊接为了控制角变形主要采用反变形，对刚度很大的塔柱厚壁板根本无法施加反变形，主要以刚性约束、小热输入及焊后加热矫正方式来控制角变形。对精度要求高的现场金属接触+栓接模式连接的塔柱，为了控制纵肋的垂直度和相对位置，将板块刚性固定在平台上采用药芯焊丝CO₂保护焊或实心焊丝富氩气体保护焊双面对称施焊。对称施焊采用图10a所示单小车模式时，由于支撑焊枪的支架高悬臂长，小车行走时因焊枪抖动导致电弧不稳定，所以一般采用图10b所示双小车模式进行对称焊接。

采用气体保护焊双面对称施焊时，板块的纵、

横向收缩,角变形及弯曲变形均比采用埋弧焊时小,保证了纵肋的垂直度。板块角变形一般采用门式多嘴头火焰矫正机进行热矫,矫形效果好,施工效率高。

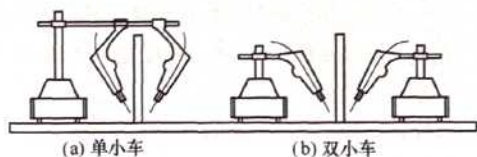


图10 纵肋角焊缝对称施焊

(3) 塔柱棱角焊缝 壁板间的棱角焊缝,壁板与腹板间角焊缝是连接成箱体的主要焊缝,在截面上成对称或非对称布置。棱角焊缝箱内侧采用半自动气体保护焊,箱外侧在平位以埋弧焊为主。由于塔柱节段庞大,焊接量大、持续时间长,另外从翻身安全考虑,在节段组装定位后将纵向焊缝的两侧都采用气保焊打底,这样既防止了根部锈蚀又保证了翻身时焊缝具有足够的强度。纵向焊缝的焊接顺序和焊接方向对箱体的弯曲和扭曲变形影响很大,是变形控制的重点。

(4) 底节段承压板对接 底部承压板厚度都较大,一般都在100~200mm,面积也很大,需要纵横向多次钢板对接才能拼成。厚板出厂时带有较大残余应力,平面度差,进场后无法使用机械矫正,只能使用火焰热矫,热矫后板内应力更加复杂。切边加工坡口时内应力重新分配,从而引起新的变形,刨边进刀量过大时坡口的直线度差,两板对到一起后有较大间隙,需打底后方能进行埋弧焊,为此加工坡口时宜采用小进刀量的方式。厚板对接填充量大,为了控制焊接变形常设计非对称坡口,焊接过程中加强监控,适时调整焊接顺序达到控制角变形的目的。

5. 接头细节优化

焊接结构细节设计时,合理的焊缝形状和大小很重要,在满足受力要求的情况下,焊接量越小,产生的残余应力和不合格的变形或层状撕裂就减少。故在各国的标准中都规定在满足受力的前提下减小焊缝尺寸。为了满足几何精度要求,变形控制很重要,其中接头设计是变形控制的源头。

(1) 棱角接头 塔柱棱角焊缝的主应力通常为纵向剪力,在焊缝设计时采用角焊缝或部分熔透的

坡口角焊缝,在柱端连接部位或节点域焊缝适当加强。箱形柱棱角焊缝的大小在国内外相关规范中都有指导性的条文规定,美国和日本焊接规范中要求采用部分熔透坡口,焊缝的计算厚度 $h_e \geq \sqrt{2}t$,日本多座桥梁钢塔柱实例均按 $h_e = 2\sqrt{2} + 3$ 设计;《钢结构设计规范》GB 50017—2003中采用部分熔透棱角焊缝, $h_e \geq 1.5\sqrt{t}$;在《高层建民民用钢结构技术规程》JGJ 99—1998中箱型柱棱角焊缝计算厚度不应 $< 1/3$ 板厚,在节点域为熔透焊缝。

以泰州长江大桥钢塔柱为例,最初的棱角焊缝设计如图11所示,其填充量很大将引起较大的焊接变形,这种变形由于结构刚度大,矫正的难度很大。为此,在已建成的南京长江第三大桥及日本类似工程实例的基础上,同设计、咨询方沟通复核后对棱角焊缝进行如图12所示的优化,焊缝填充量大大减小,使变形从源头上得到了控制。

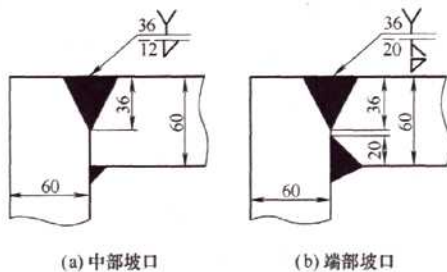


图11 棱角焊缝初步设计

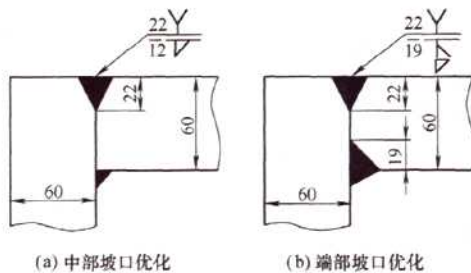


图12 棱角焊缝设计优化

(2) 塔柱根部接头优化 承压板将来自塔柱的压力传递到承台或下塔柱,其水平方向的对接焊缝为联系焊缝,非主要受力焊缝。在马鞍山长江大桥钢塔承压板对接时,同设计方沟通复核后对承压板的材质由Q370qD改成Q345qD,对接由全熔透改成中间留1/3板厚钝边的部分熔透焊缝。钢材强度降低不影响承压,降低了钢板热矫形难度,改成部分

熔透后填充量大大减小,角变形得到更好的控制。

塔柱与承台采用螺栓锚固法连接时,塔柱根部与承压板主要承受压力,在接头设计上采用根部与承压板磨光顶紧加角焊缝的形式,在受力上和施工难度上都比采用熔透角焊缝要好,在实际制作时对顶紧不符合要求的部位采用配磨方法可达到技术标准。

6. 全位置焊接技术

从理论和实践上来说,采用平位或横位焊接质量稳定,施工速度快,采用仰焊对焊工的操作水平和体力提出了较高要求。但是对于像塔柱节段这样体积和重量都很大的构件,采用翻身来实现平位或横位焊接,对起重设备提出了很高的要求,同时频繁翻身需要占用较多时间,在实际施工中根据起重设备的能力或从工期考虑采用全位置焊接是不可避免的。随着逆变电源和数字控制弧焊电源性能的改善,短渣系焊条和药芯焊丝质量提高,完全可以满足仰焊技术需要。焊工培训和技能鉴定工作的成熟,全位置焊接技术逐渐被越来越多的焊工掌握。采用全位置焊接方便焊工布置,且在焊接顺序上可实现同步对称施焊,有利于变形控制。

7. 变形控制

只要有焊接就有应力和变形,变形是客观存在的,如何控制焊接变形是焊接加工的主要内容之一,在变形的控制上应从结构设计和工艺措施两大方面进行考虑。

在结构设计上主要有:①增加结构的刚性,刚性大抵抗变形的能力强。②避免焊缝密集,尽量将焊缝布置在中性线附近,或对称布置。③合理的焊缝尺寸,在满足受力的情况下减小焊缝尺寸。

在工艺措施上主要有:①选择合适的焊接方法,一般小热输入的焊接方法变形较小。②坡口设计尽量减少填充量,设置对称或不对称坡口。③合理的焊接顺序,包括不同焊缝间的焊接顺序,同一焊缝的施焊顺序及方向。④选择合适的装配顺序,考虑部件制作将变形分步矫正消除。⑤设置合适的反变形量或预留收缩量。⑥使用刚性约束措施。

以上措施在南京长江第三大桥、泰州长江大桥、马鞍山长江大桥和鄂尔多斯苏扬2号桥等多个项目的钢塔柱焊接生产中均使用,变形控制实施效果明显。

8. 结语

(1) 通过对国内现有钢塔柱制造的技术难点和工艺流程的分析,展开钢塔柱制造焊接技术的研究,充分说明了采用的焊接技术是可行的和成功的。

(2) 根据钢塔柱的结构特点和制造安装精度要求,通过采取接头优化、全位置焊接技术及焊接变形控制措施的实施,使钢塔柱制作几何精度和焊接质量在生产过程中均处于受控状态,达到了设计和规范的要求。

(3) 钢塔柱以其显著特点在国内迅速发展,并将会逐渐增加。通过本文的研究和实践,为后续此类钢塔柱的设计、制造提供一些经验。

MW (20110313)

《金属加工(冷加工)》 2011年第10期要目

双夹头车削凸轮轴颈技术

大型齿轮加工方法

深孔活塞杆加工工艺

巧改工艺提高效率

提高一面两销定位精度

磨削加工精度分析及提高方法

节能环保延长乳化液使用寿命

金刚石铰刀精加工液压件阀孔

12工位转台式数控组合机床设计

混合机筒体设计优化及工艺改进

车床中心孔磨头装置设计

卡爪专用增力扳手设计

激光与电解加工机的新发展

电极罩多工位级进模设计

发动机连杆平行度和垂直度综合检具设计

齿轮用K卡图设计及应用

角度精度的激光测量法

数控系统如何度过夏天

瑞士STUDER S40数控万能磨床B轴结构和原理剖析

数控电火花成形机床伺服特性及伺服系统设计

机械手刀库换刀宏程序的开发及调试

Pro/E中evalgraph函数的应用

V形盛油槽模具的CAD/CAM设计

借助摘要快速了解UG软件零件信息