

# 浅析铸钢件在输电线路铁塔上的应用

周锋增, 施洪亮, 舒芳, 葛晓峰, 郑苗

(浙江盛达铁塔有限公司, 浙江杭州 311232)

**摘要:** 主要分析了输电铁塔的连接节点的特点, 结合两个案例浅析了应用于输电铁塔的铸钢件节点的结构特点、技术要求、热处理、焊接和镀锌工艺等。解决了繁杂部位焊接量大、难度高、应力集中等工程建设问题, 缩短了输电铁塔的建设周期。最后, 给出了输电铁塔铸钢件节点生产制造的质量控制措施。

**关键词:** 铸钢件; 输电铁塔; 质量

铸钢件是铸造成形工艺和钢材冶金相结合, 既具有其他成形工艺难以得到的复杂形状, 又能保持钢材所特有的各种性能, 从而确立了其在工程结构材料中的重要地位<sup>[1]</sup>。在船舶和车辆、建筑机械、工程机械、电站设备、矿山机械及冶金设备、航空航天设备等领域应用得尤为广泛。铸钢件的结构设计自由度大。设计人员对铸件的形状和尺寸有最大的设计选择自由, 可设计出形状复杂、中空断面、流线型外形的零件, 性能与美观兼顾。铸钢材料一般具有较高的强度、塑性和韧性, 可以通过不同的热处理工艺在较大的范围内调整力学性能和使用性能<sup>[1]</sup>。铸钢材料一般均具有较好的焊接性能, 因而可以用焊补的方法修复铸造缺陷, 获得更加完美、优良的铸件<sup>[2]</sup>。同时也方便与其他钢构件焊接连接。

铸钢件的上述特点及优点, 完全满足大型输电铁塔建设的工程应用。本文主要浅析了在输电铁塔的连接节点使用铸钢件的应用案例, 解决了繁杂部位焊接量大、难度高、应力集中等加工问题, 缩短了输电铁塔的建设周期, 提高了质量稳定性。

## 1 铸钢件在输电铁塔上的应用分析

根据输电铁塔的结构特点, 铸钢件可被用于钢管类铁塔结构中。钢管塔的主要线性构件为圆形钢管, 钢管与钢管之间的连接方式主要有插板连接和法兰连接两种, 从而形成两种钢管构件的连接节点, 即钢管外壁上焊接连接板的节点和带有法兰的相贯线节点<sup>[3]</sup>。如图1、图2所示。

作者简介:

周锋增(1988-), 男, 工程师, 主要从事电力钢结构制造方面的研究工作。  
电话: 15869003206, E-mail: luoyafengzeng@163.com

中图分类号: TG26  
文献标识码: B  
文章编号: 1001-4977(2023)06-0762-06

收稿日期:  
2023-06-01。

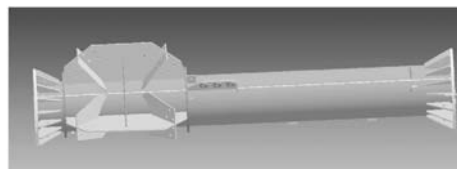


图1 输电铁塔连接板连接节点

Fig. 1 Connection node of connecting plate on the transmission tower

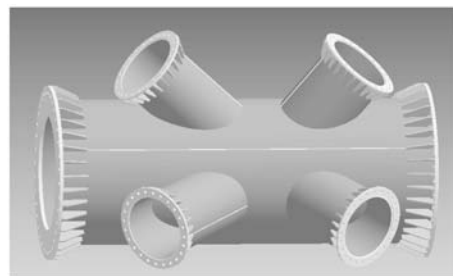


图2 输电铁塔相贯线连接节点

Fig. 2 Connection node of intersecting lines on the transmission tower

根据铸钢的结构特点及优点,在铁塔结构中,认为以下两个节点位置可应用铸钢件。

首先是横担与塔身连接处。这个位置的节点连接相位最多的可达十多个,如竖向的塔身主管,横向的塔身支管、横担主管,以及塔身及横担的其他方向支管等。图3给出了横担与塔身连接节点一个例子,该节点含有5个法兰连接点和4个插板连接点。在一些设计中,如上节点的连接全部经法兰连接,也就是将全部由钢管相贯连接的形式形成节点。这类节点全部以焊接形式完成制作,焊接量大,应力集中复杂,尺寸精度由于受焊接变形的影响控制困难。因此,认为可以使用铸钢件替代。

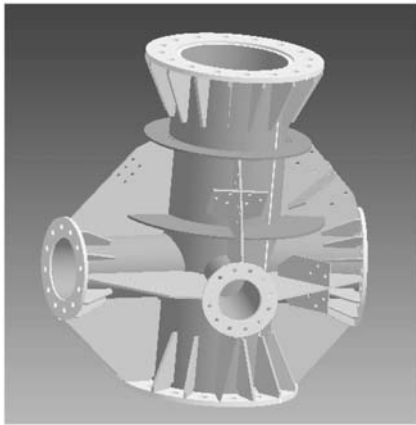


图3 输电铁塔横担与塔身连接节点

Fig. 3 Connection node of cross arm to tower body on the transmission tower

其次是横担上的挂线节点(图4),该节点是整个铁塔的关键位置,也是立塔的目的所在。相对于其他结构,挂线点使用的钢材厚度较大,焊缝质量要求高,结构紧凑,施焊不便,焊接后应力大且集中。认为可用铸钢件替代。

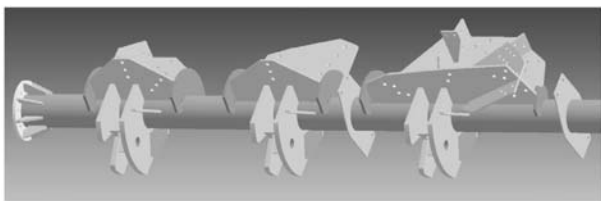


图4 输电铁塔挂线节点

Fig. 4 Connection node for suspension wire on the transmission tower

## 2 应用案例分析

### 2.1 世界最高输电铁塔的铸钢件

凤城-梅里500 kV输电线路工程长江大跨度高塔是我国电力建设史上规模最大、技术难度最高的输电铁

塔(图5),铁塔总高度为385 m,呼高342.5 m,位于江苏省江阴市。该高塔不仅再次刷新了世界最高输电铁塔纪录,而且在根开尺寸、电梯提升高度、组塔抱杆施工高度等7项建造数据中创下行业内世界第一。



图5 江阴长江大跨385 m高塔

Fig. 5 The 385-meter Yangtze River Crossing Tower in Jiangyin

其创新性在于横担与塔身连接处的多维复杂节点采用了低合金调质铸钢相贯节点。设计时通过开展数值分析、构造优化以及铸造工艺推演,最终实现了姿态优美、线条流畅、受力合理的铸造节点设计方案。如图6所示。

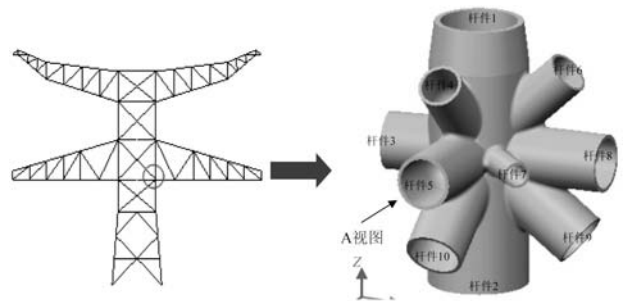


图6 凤城-梅里385铁塔铸钢节点

Fig. 6 Fengcheng-Meili 385 iron tower cast steel node

该铸钢节点的中心处为实体,向外以放射状贯10个支管,支管含空腔,壁厚为20~60 mm,最大支管外径为914 mm,节点单重约8 t。铸钢材质及其性能如表1、表2所示。

该牌号铸钢件拥有良好的力学性能和焊接性能。支管端将与刚性法兰T型焊接,法兰及筋板材质为Q355B。为保证焊缝全熔透且便于施焊,在坡口设计上,采用了内侧小坡口,外侧大坡口的形式。

由于该铸钢节点中心为实体,支管朝向多样化,不符合镀锌工艺的空气和锌液流通规则,所以无法进

表1 G20Mn5+QT铸钢件化学成分  
Table 1 Chemical composition of G20Mn5+QT steel castings

										$w_B/\%$
C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu	Mo	V	
0.17~0.23	≤0.60	1.00~1.60	≤0.020	≤0.020	≤0.80	≤0.30	≤0.30	≤0.12	≤0.03	

表2 G20Mn5+QT铸钢件力学性能  
Table 2 Mechanical properties of G20Mn5+QT steel castings

铸钢件壁厚/mm	室温下			冲击功	
	屈服强度 $R_{p0.2}/MPa$	抗拉强度 $R_m/MPa$	断后伸长率 $\delta/\%$	温度/ $^{\circ}C$	冲击功/J
≤100	≥300	500~650	≥22	-40	34

行热浸镀锌防腐。经过工艺模拟分析,在征得设计及业主方的同意下,选择了热喷锌防腐形式。

该铸钢节点在铸造厂整体浇注成形,再经过热处理调质(图7),不仅组织均衡,性能稳定,而且基本不存在内应力。同时,避免了常规设计的多管相贯焊接节点焊接量大、应力集中复杂、施焊难度大、焊缝质量不稳定、节点尺寸精度控制难等问题,极大地提

高了加工效率和产品质量。

## 2.2 T-Pylon 输电铁塔的铸钢件

T-Pylon塔是英国国家电网投资建设的位于英国本地的400 kV输电线路工程的塔型结构,由丹麦设计师完成设计,融入了童话般的设计理念,结构独特新颖,造型美观。

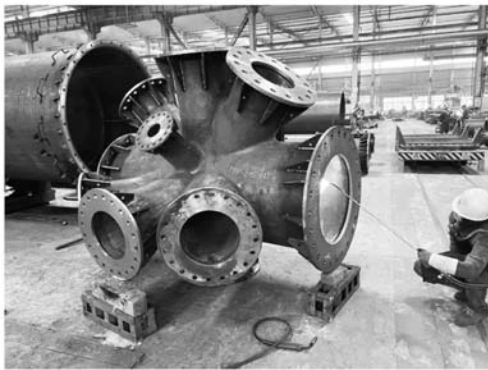


图7 385工程铸钢节点焊前预热

Fig. 7 Preheating before welding of cast steel nodes in the 385 project

杆塔所用材料涉及了结构钢、铸钢、铸铁、不锈钢等。导线挂点处结构件由铸钢件与结构钢厚壁无缝管全焊透对接焊而成,经销钉铰接连接后形成菱形空间立体结构。铸钢件作为连接件位于各杆件的端头位

置,如图8、图9、图10所示。

这些铸钢件均采用流线型设计,造型美观,受力清晰,适合多向连接。铸钢材质及其性能如表3、表4所示<sup>[4]</sup>。

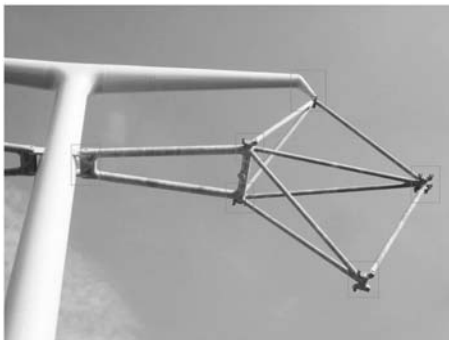


图8 铸钢节点位置图

Fig. 8 Location of steel casting nodes

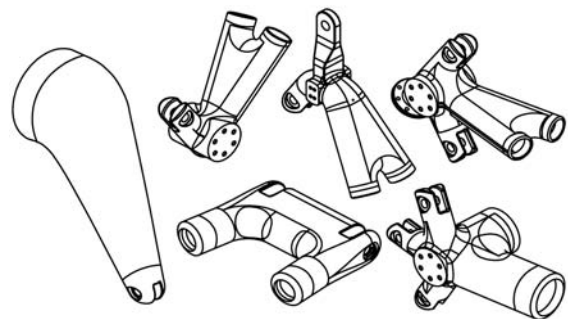


图9 铸钢件示意图

Fig. 9 Schematic diagram of steel casting



图10 铸钢件(空腔, 1.8 t)

Fig. 10 The steel castings(Internal cavity, 1.8 t)

与铸钢件相焊的无缝管材质为Q355J2H。相比之下,铸钢件强度较高,碳当量处于0.55%~0.60%之间,焊接性能相对较差。因此,根据铸钢件与结构钢的连接形式以及母材性能,在焊接工艺上做了大量的分析和试验,结合焊前预热和焊后保温等措施,形成了多种行之有效的焊接工艺组合,其中有氩弧焊+埋弧焊、氩弧焊+手工电弧焊、氩弧焊+药芯焊丝气保焊、氩弧焊+手工电弧焊+药芯焊丝气保焊等<sup>[5]</sup>,均被应用到了实际生产中。

该工程铸钢件都是与直径较小的圆管对接,仅能

表3 G24Mn6+QT2铸钢件化学成分  
Table 3 Chemical composition of G24Mn6+QT2 steel castings

										$w_B / \%$
C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu	Mo	V	
0.20~0.25	≤0.60	1.50~1.80	≤0.015	≤0.020	≤0.40	≤0.30	≤0.30	≤0.15	≤0.05	

表4 G24Mn6+QT2铸钢件力学性能  
Table 4 Mechanical properties of G24Mn6+QT2 steel castings

室温下			冲击功	
屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	断后伸长率 $\delta/\%$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	冲击功/ $\text{J}$
≥500	650~800	≥18	-30	27

从外侧单面施焊,要求单面焊双面成形,焊缝质量达到一级要求。另外,由于构件为V型或O型,不易旋转或翻身,部分接头需要全位置焊接<sup>[6]</sup>。

在防腐工艺上,由于焊接后的完整构件为含内腔的封闭构件,在浓稠的锌液池中无法自由浸没,而且其结构细长容易在高温下发生变形,变形后不易矫正,所以最终选择了热喷锌防腐。

### 3 节点铸钢件质量控制

经过两个工程的铸钢节点的实际应用和研究,吸取大量的加工经验,为保证铸钢节点质量,满足输电线路铁塔的技术要求,需要在以下几个方面对铸钢件做好质量控制。

#### 3.1 内部质量控制

为保证铸钢件质量,铸件在浇注前,必须采用专业软件进行浇注工艺模拟(图11、图12),明确热节点及容易产生缺陷的区域等,为车间浇注及质量检测提供理论依据,降低铸件内部缺陷率,避免重大缺陷。

在焊接端口部位,务必确保铸造质量。首先,在内部缺陷探伤等级方面,宜选择铸件探伤标准最高

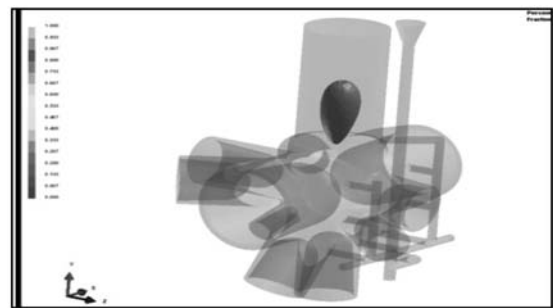


图11 浇注模拟

Fig. 11 Pouring simulation

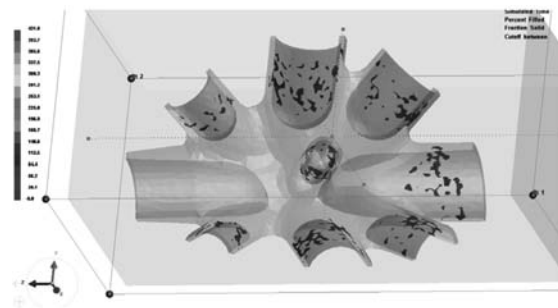


图12 铸造缺陷模拟

Fig. 12 Simulation of casting defects

级,如标准EN 12680-1严重等级1<sup>[7]</sup>、标准GB/T 7233.1质量等级1<sup>[8]</sup>。其次,若该焊接端将焊接一级、二级焊缝,宜考虑焊缝探伤要求与铸件探伤要求的区别。若焊缝探伤要求高于铸件本体,则建议在征得铸造厂的同意下,铸件焊接端一定范围的质量按焊缝的探伤等级要求执行。如上处理,不仅可以避免在焊缝质量检测时受铸件母体缺陷的影响,同时可以防止在相对较低的铸件本体探伤要求下允许存在的细小缺陷,因焊接应力的作用而被放大为不合格的缺陷。

### 3.2 外观质量控制

铸件的外观质量主要表现为结构尺寸、流线型、局部凹凸、粗糙度等。在结构上应符合图纸样式,具有流线型曲线;局部的凹凸不得超出标准尺寸允许偏差要求,也不得过于突兀,应圆滑过渡,尤其是焊接端附近的表面,应进行机械加工或打磨(图13),保持平整,满足无损检测操作的要求;粗糙度及表面处理除达到铸造标准要求外,也要符合防腐工艺的要求<sup>[9]</sup>。



图13 铸钢件焊端打磨

Fig. 13 Grinding the welding ends of tower steel castings

### 3.3 焊接工艺控制

相较于普通的结构钢材,铸钢件一般强度高,体积和厚度大,刚度和拘束度大,焊接应力无法自由释放,容易产生裂纹<sup>[10]</sup>。需要做好防裂纹措施和消应力处理,以提高和改善焊接构件的服役性能,延长使用寿命,主要有以下几种方法。

(1) 焊前预热。焊前预热宜采用陶瓷片电加热,小管可采用火焰加热进行,注意加热应均匀有效。

(2) 合理的焊接顺序。焊缝金属填充需多层多道持续施焊完成,焊接工作量大,若焊接顺序不当将会造成焊接残余应力较大。

(3) 消氢处理。为使焊缝和热影响区中的扩散氢迅速逸出,焊后应及时进行后热消氢处理,根据母材类型、结构形式确定加热及保温工艺。

(4) 锤击消应力。层间锤击消应力可风镐进行层间锤击,风镐锤头形状不要过于尖锐,除底层和盖面层焊道不锤击外,其余各层在清渣后均需进行锤击,各焊道焊完后立即锤击,应先锤击焊道中部,后锤击焊道两侧,锤痕应紧凑整齐,避免重复。

(5) 振动消应力。部分铸钢件具有一定的高温回火脆性,不宜采用热处理消除应力。为减小焊接残余应力,可采用振动时效法消应力。在较大的焊接拉应力区,采用振动时效处理后,经测试残余应力可减小30%以上,由此减小和均化焊接残余应力峰值,使铸钢件和焊缝的残余应力低于钢材的屈服强度,保证了结构的使用安全。

(6) 焊接变形控制。个别情况下,铸件壁厚会比较薄,容易导致焊接变形,由于其结构的特殊性,非常不易矫正。因此在焊接前需做好防止焊接变形的措施。

## 4 结语

在全球能源建设加速发展,中国经济由高速增长转向高质量发展的背景下,输电铁塔的设计和制造必将向高质量、高效率、绿色环保方向发展。铸钢件以其优异的结构性能、优美的外观造型等优点,将被广泛地应用到输电线路铁塔上,解决繁杂部位焊接量大、难度高、应力集中等制造问题,缩短输电铁塔的建设周期,提高产品质量稳定性。铸钢件在输电铁塔上的应用,应从铸钢件质量、焊接工艺、质量检验等方面作为把控点,切实做好工艺技术改进,加强新材料、新工艺的应用研究,使铸钢件与结构钢完美结合,制造优异的铁塔产品。

**参考文献:**

- [1] 姜延春. 铸造手册第2卷: 铸钢 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 1-8.
- [2] 沈猛, 铁金艳, 章舟. 铸钢生产实用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 1-2.
- [3] 杨建平. 架空输电线路钢管塔结构 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 98-136.
- [4] European Committee for Standardization. DIN EN 10025-2-2019 Steel castings for structural uses-Part 2: Technical delivery conditions [S]. German: Foundry Practice Standards Committee, 2019.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50661-2011 中国标准书号 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [6] 郑苗, 舒芳, 周东浩, 等. 大型铸钢节点G24Mn6+QT2与无缝钢管焊接技术 [J]. 焊接技术, 2022, 51 (4): 36-40.
- [7] European Committee for Standardization. DIN EN 12608-1-2003 Founding-Ultrasonic examination-Part 1: Steel casting for general purposes [S]. German: Foundry Practice Standards Committee, 2003.
- [8] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 7233.1—2009 中国标准书号 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [9] 黄志光. 铸钢件内在缺陷分析与防止 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 15-20.
- [10] 沈阳晨, 魏建军. 铸钢件焊接及缺陷修复 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 22-23.

---

## Brief Analysis on the Application of Steel Castings in Transmission Line Tower

ZHOU Feng-zeng, SHI Hong-liang, SHU Fang, GE Xiao-feng, ZHENG Miao  
(Zhejiang Shengda Steel Tower Co., Ltd., Hangzhou 311232, Zhejiang, China)

**Abstract:**

This article mainly analyzes the characteristics of the connection nodes of transmission towers, and analyzes the structural characteristics, technical requirements, heat treatment, welding and galvanizing processes of the cast steel joints used in the transmission tower combined with two cases. Engineering construction problems such as large welding volume were solved, high difficulty, and stress concentration in complex parts, and the construction cycle of transmission towers was shortened. Finally, the quality control measures for the production of cast steel joints of transmission tower are given.

**Key words:**

steel casting; transmission tower; quality

---