

# 风电机组装配式混合塔筒中转接环正向施工技术

李伟文

中铁二十四局集团桥梁建设有限公司

**摘要:**转接环是风电装配式混合塔筒中连接钢塔段和混凝土塔段的过渡构件,其顶面放置锚板,通过贯穿转接环的长螺杆与上部钢塔相连;底面通过抗剪键与混凝土塔筒连接。在预应力荷载、塔筒自重荷载以及外部荷载的作用下,在钢塔筒和混凝土塔筒的连接区段将会产生巨大应力,局部受力相当复杂,因此转接环的生产施工质量对于整个风电塔筒都至关重要。目前,转接环采用的是钢筋混凝土结构形式,对于其施工而言,较为普遍的方法为反向施工,即将转接环倒置过来进行预制生产,这样的生产方式有一定难度。本文以140m装配式混合塔筒实际工程为背景,设计并应用了转接环正向施工技术,并针对其所存在的问题提出二次灌浆加工技术予以优化改进。通过在实际工程中的实践,可以知道转接环正向施工技术具有生产流程更为简单明确、安全性能高、质量有效保证等特点,在风电行业内较大的应用前景。

**关键词:**风电机组;混合塔筒;转接环;正向施工技术;二次灌浆

## 1 引言

随着我国能源策略的转化和升级,风力发电将在未来扮演更重要的角色,随之而来的是对低风速区风力发电的开发和利用。十三五规划中就提出目标:到2020年底,我国中东部和南方地区陆上风电新增并网装机容量4200万千瓦以上,累计并网装机容量达到7000万千瓦以上。

为了对低风速区风能进行合理的开发利用,增加风电机组的捕风能力,势必需要风轮直径进一步增大,风电机组塔筒高度进一步增加。传统的纯钢塔筒的经济高度在120m以下,因此,为获得更好的经济效益和安全性能,装配式预应力混合塔筒得到了广泛应用。预应力混合塔筒的组成部分可以简单分为:下部混凝土塔筒,上部钢塔筒以及转接环,如图1所示。其中转接环是连接钢塔段和混凝土塔筒段的过渡构件,其顶面放置锚板并通过百余根贯穿自身的长螺杆与上部钢塔紧紧相连,底部通过灌浆抗剪件和混凝土塔筒相连并,最后在转接环和基础之间张拉预应力筋,将转接环紧紧压在底部混凝土塔筒之上。

因此,转接环作为重要的过渡传力构件,在预应力荷载、塔筒自重以及外部荷载的共同作用下,内部将会产生巨大应力且局部受力相当复杂。目前转接环采用的是钢筋混凝土结构形式,为满足受力要求需要在内部配置相当多数量且形式不同的钢筋。对于转接环施工生产而言,有反向施工和正向施工两种方案,目前常用做法为反向施工,即将转接环倒置过来进行预制生产,其模具放置、钢筋绑扎、混凝土浇筑都是反向进行,反向浇筑转接环具有以下不足。

(1)转接环底部钢筋密而复杂,反向施工时,转接环底部钢筋为高空作用,施工难度大。

(2)混凝土浇筑完成后,混凝土骨料会有下沉,顶部有浮浆,加上转接环底部钢筋密,混凝土浇筑质量难以得到保证。

(3)转接环生产完成后,要先把转接环反转,具有一定的施工难度。综上,转接环的反向浇筑在实际生产中具有一定难度和危险性。因此,本文以140m预应力钢混组合塔筒实际工程为背景,为简化转接环生产流程和制作难度,提出转接环正向施工技术。

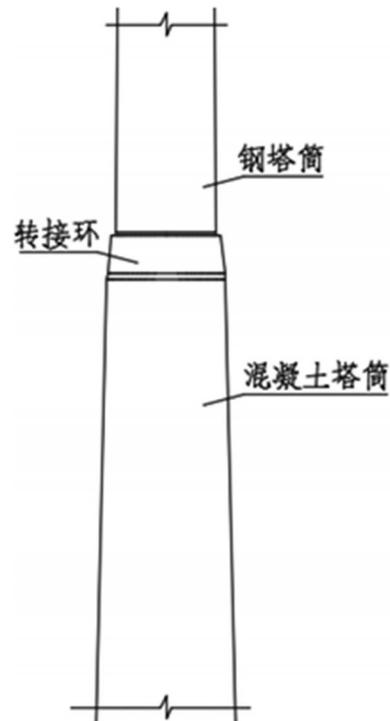


图1 转接环位置示意图

## 2 转接环正向施工技术及技术难点

### 2.1 转接环正向施工技术

目前预应力装配式混合塔筒中转接环采用的是钢筋混凝土结构形式,其生产是在预制工厂内进行,然后运输至现场进行吊装。本文结合实际工程中的140m装配式混合塔筒,设计并应用转接环正向施工技术,即是按转接环正向放置的方向进行施工生产,见图2。

其生产流程大致可分为:模具制作、钢筋下料及定位绑扎、模具拼装、混凝土浇筑、混凝土养护及拆模五个步骤,生产完成之后运输至现场进行吊装。和反向施工相比,正向施工技术具有以下优点。

(1)转接环钢筋绑扎方便,在底部钢筋密集而上部钢筋较疏

的情况下,从下而上的钢筋绑扎方式明显优于反向施工中的钢筋绑扎,难度上的减小也可以带来工期上的优势。

(2)上方钢筋较为稀疏,方便混凝土的浇筑和振捣,充分的振捣在一定程度上可以减小混凝土的离析,保证混凝土的浇筑质量。

(3)正向施工中,转接环模具也是正向放置的,拆模之后可以直接运输至现场,不需要反向施工中附加的翻转转接环这一道流程,操作更简便。因此,正向施工技术刚好可以克服反向施工中所呈现出的缺点,使得转接环的生产更简便更安全。



(a)模具放置图



(b)钢筋绑扎图

图2 转接环正向施工技术说明

## 2.2 正向施工技术难点及解决方案

但是,正向施工技术在实际生产中也存在一些不足之处,主要出现在转接环上锚板与转接环混凝土的接触位置,针对这一情况可以采用二次灌浆加工技术予以改进。在实际工程中,转接环与上部钢塔之间通过120根贯穿转接环的长螺杆进行连接,为减小螺杆预紧力作用下的局部压力,转接环顶部需要放置一块锚板使局部压力进行扩散。在正向施工技术中,我们可以看到转接环的生产在施工流程上得到了简化。但同时也发现正向

施工技术也有一些细节上的小问题,主要是以下两个方面:一是转接环上锚板平整度不满足要求;二是转接环上锚板底部与混凝土结合处出现蜂窝麻面及浮浆现象,如图3所示。



图3 转接环上锚板底部混凝土的表面缺陷

对于转接环上锚板平整度不满足要求这一情况。首先从转接环的生产过程进行分析,可以得知在转接环的预制过程中,上锚板的调平精度就没有达到要求;另一方面,转接环作为重要的受力构件,其内部配置了大量的受力钢筋,钢筋排布相当密集,为了保证灌注混凝土的密实性需要进行充分的振捣,从而引起定位工装以及模具的振动。其次,在运输过程中,锚板底部无锚固筋,易导致上锚板的脱落、变形。在几者共同作用的影响下,最终导致运输到现场的转接环上锚板有一定变形,平整度不达标。

而对于上锚板底部与转接环混凝土结合处存在蜂窝麻面及浮浆现象这一情况。主要原因在于在振捣过程中,上锚板未开通气孔导致大量气体上浮之后聚集于上锚板底部位置处无法排出,从而出现了混凝土表面蜂窝麻面的现象。再者是因为混凝土配制过程中,为了保证混凝土的流动性而加大了外加剂掺量,使得混凝土塌落度过大导致离析。

经过以上对正向施工技术中所出现的两个问题的分析,说明这两个问题在一定程度上是由于正向施工的施工工艺以及施

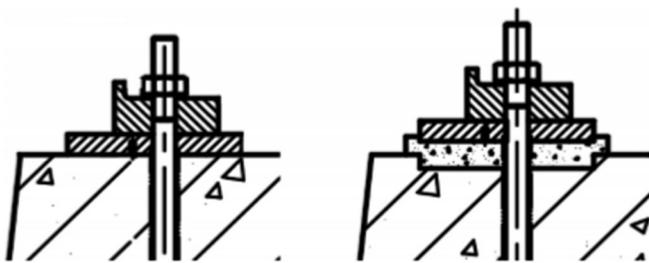
工流程所带来的。那么在正向施工技术现有生产流程固定的前提下,本文提出一种二次灌浆加工方案对以上的两个问题进行优化和解决。

### 3 转接环二次灌浆加工方案及施工步骤

#### 3.1 二次灌浆加工方案

由于转接环采用的是钢筋混凝土结构形式,其内部配置有大量钢筋,其在正向施工技术中的生产流程和生产方式相对固定。为了解决转接环正向施工技术的不足之处,进一步保证组合塔筒的安全性,提出采用二次灌浆加工技术进行优化加强。目前二次灌浆技术在风电行业也已经有了大量成熟运用经验,灌浆料采用自流平微膨胀高强灌浆料。在此基础上,本文针对转接环正向施工技术中所出现的两个具体问题,设计相应的二次灌浆加工施工步骤以及制定相应的施工工艺要求。通过在实际工程中的应用,发现此加工方案能够较好控制转接环上锚板的平整度,并通过二次浇注完全解决了上锚板与混凝土接触处的表面缺陷问题。

二次灌浆加工方案可见图4,二次灌浆的位置就是原始方案中转接环顶面与上锚板接触的地方。简而言之,就是用灌浆料进行二次浇筑来替代该位置处的混凝土,并通过相应的施工工艺来调整并保证上锚板的平整度。如图5所示,即是经过二次灌浆处理之后的转接环,可以明显看到转接环顶面与上锚板接触位置的灌浆料成型质量良好,表面平整,完全解决了原始方案中该位置处的混凝土表面缺陷问题。放置上锚板之后,由于灌浆料表面光滑平整,在相应施工工艺要求的保证下,上锚板的平整度可以较好地控制在工程要求之内。



(a)原始方案 (b)二次灌浆加工方案

图4 转接环二次灌浆前后方案对比图

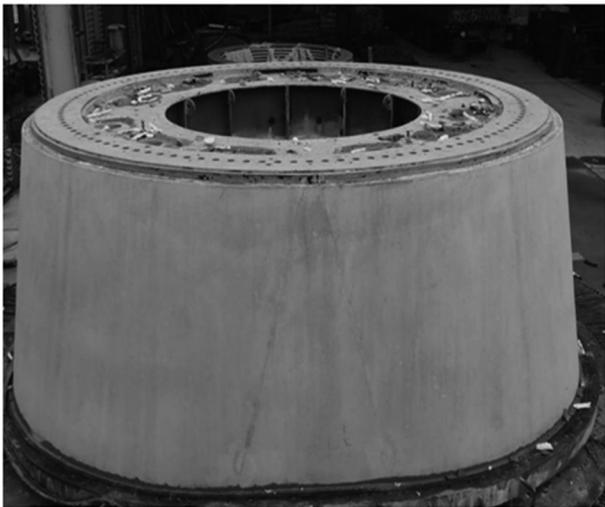


图5 二次灌浆处理后

#### 3.2 二次灌浆施工步骤

转接环二次灌浆加工方案施工步骤如下。

基面处理及转接环调平——转接环上表面凿毛及清理——上锚板安装及调平——灌浆预处理及灌浆——试样制作及养护。

##### 3.2.1 基面处理

地面用片石或建筑垃圾换填并平整,之后放置钢垫板或预拼拼装进行粗调平,最后使用激光水平仪+ABS调平垫板将转接环调整至底部水平。

##### 3.2.2 转接环上表面凿毛及清理

如图6所示,用电镐沿上锚板位置内外圈开凿二次灌浆槽。清除已剥落、损坏以及低强度的混凝土并进行凿毛处理,凿毛的判断标准为:开凿到露出混凝土内粗骨料。最后用手持式吹风机清除灌浆基面——即凿毛表面的浮渣、浮尘。

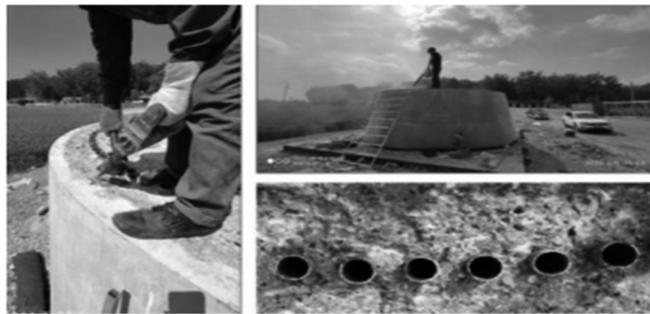


图6 转接环上表面预处理

##### 3.2.3 上锚板安装及调平

如图7所示,上锚板内外圈各安装8个M24×40mm调平螺栓(带螺母),螺栓顶面用激光水平仪+直角钢尺调平至设计标高(预留3mm左右的调平高度)。完成之后安装上锚板并用8根M48螺栓定位,并使用激光水平仪+直角钢尺+调平螺栓将上锚板上表面平面度调整至2mm以内。复穿其余112根M48螺栓,确保全部顺利通过。



图7 锚板安装及调平

##### 3.2.4 灌浆预处理及灌浆

抽出后插入的112根M48螺栓,插入防漏浆Φ50PVC管,并用玻璃胶密封接口。用8根Φ48钢管置换M48定位螺栓,钢管上涂隔离脱模剂。按要求用万能胶将橡胶条粘贴在转接环上锚板内外侧,橡胶条必须与混凝土表面密贴以防漏浆,完成之后复测上锚板上表面平面度,控制在2mm以内。

在施工砂浆前24小时,需预先湿润施工表面,在灌浆施工前1小时应清除积水。判断标准为:施工面必须完全吸水潮湿,表面颜色较暗,并且混凝土表面潮湿、无反光、无明水。

采用西卡或巴斯夫疲劳认证的陆上风机精密灌浆材料(28d抗压强度大于70MPa),根据灌浆料产品要求进行施工浇注。

### 3.2.5 试样制作及养护

为了复核灌浆料的强度,制作灌浆同条件试件2组,28天试件3组。浆体终凝后拆除定位钢管和防漏浆PVC管,浆体表面覆盖养护毯并保持湿润,养护时间不少于7天,用薄膜包裹转接环防雨并保温保湿,保证灌浆后日均环境温度不应低于5℃。

## 4 施工工艺要求

为了保证二次灌浆方案的质量,使其能够在实际操作中真正解决正向施工技术中存在的问题,必须制定贯穿二次灌浆方案全流程的施工工艺要求。

### 4.1 总体要求

首先要保证在二次灌浆前上锚板平整度不超过2mm,灌浆后平整度不超过3mm,预应力筋张拉前平整度不超过4mm,灌浆总深度不小于50mm。上锚板与转接环混凝土结合面的气泡应分布均匀,直径不小于15mm的所有气泡总面积不大于上锚板面积的5%,且脱空率不大于15%。

### 4.2 具体要求

为了保证灌浆料与已转接环混凝土之间的整体性,转接环上锚板底部混凝土处需要凿毛处理,凿毛深度为30mm,凿毛深度误差不超过±5mm。凿毛宽度应比上锚板宽度每边增大30mm,在转接环顶面预应力锚垫板附近凿毛时,可凿毛至距离预应力锚垫板边缘10mm。

灌浆前,应将灌浆料接触的混凝土表面清理干净,不得有松动的碎石、浮浆、油污、蜡质等。采用16颗调平螺栓放置于法兰垫板下面,如图8所示,保证法兰平整度误差不大于2mm(最大测量高差),上锚板底部比转接环顶部混凝土标高抬高20mm,同时也不得大于25mm。灌浆前24h,灌浆区域混凝土表面应充分湿润。灌浆前1h,应清理积水。



图8 4.8级调平螺栓

灌浆时,日平均温度不应低于5℃,二次灌浆时,应从一侧灌浆,直至从另一侧溢出为止,不得从相对两侧同时灌浆。灌浆应连续进行,宜缩短灌浆时间,在灌浆过程中严禁振捣,可采用灌浆助推器沿浆体流动方向的底部推动灌浆材料,严禁从灌浆层的中、上部推动。

灌浆完毕后裸露部分应及时覆盖塑料薄膜或加盖湿草袋保持湿润,灌浆料养护应处于湿润,养护时间不得少于7d。灌浆后,应保证灌浆料与法兰垫板无明显气泡,法兰垫板和灌浆料界面应保证充分贴合,不得出现整体脱开,平整度要求小于3mm。

吊装前灌浆料强度大于C70时,预应力筋张拉前应保证法

兰垫板平整度误差不大于4mm。

## 5 结束语

在全球能源危机的背景下,清洁能源的开发利用是我国发展规划的重点,为风电行业的发展带来契机。本文结合140m预应力混合塔筒实际工程,针对塔筒中转接环的生产方式进行了探讨。通过对转接环反向施工技术中的缺点进行分析,提出并应用了正向施工技术生产转接环。通过实际的应用,发现正向施工技术在施工流程以及安全性上都有一定的优势,并针对正向施工技术中出现的问题,设计并应用了二次灌浆加工技术对目前钢筋混凝土结构形式转接环的正向施工技术进行补充优化。并且结合实际情况,对转接环二次灌浆加工技术进行了详细的施工步骤设计,制定了严谨的施工工艺要求。

通过在实际工程中验证之后发现,本文所提出的结合二次灌浆加工的转接环正向施工技术相比与传统的反向施工技术来说,生产更加简便和安全,在装配式混合塔筒的工程建设中有较大的应用价值可为我国广阔的风电事业添砖加瓦。

## 参考文献:

- [1] 李慧. 桥梁支座灌浆料工作性能试验研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(8):21~24+63.
- [2] 许斌, 李泽宇, 陈洪兵. 预应力混凝土-钢组合风电塔架塔段优化研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016(7):25~31.
- [3] 绿色理念成未来5年发展主基调——“十三五”规划纲要全文发布[J]. 中华环境, 2016(4):11.
- [4] 程群, 程鹏. 浅谈钢管混凝土巨柱柱脚与筏板混凝土基础连接节点二次灌浆质量控制[J]. 施工技术, 2014(S2):372~375.
- [5] 李宗阳. 装配式建筑灌浆材料的研究[D]. 沈阳建筑大学, 2013.
- [6] 孟冉. 预应力混凝土风电塔架优化设计研究[D]. 上海交通大学, 2013.
- [7] 罗业凤, 凌忠, 韩玉. 钢管混凝土拱桥局部脱空二次灌浆技术[J]. 公路, 2013(7):75~78.
- [8] 罗承先. 世界风力发电现状与前景预测[J]. 中外能源, 2012(3):24~31.
- [9] 鲁进亮, 张羿, 任敏. 海上风电重力式基础结构灌浆工艺[J]. 电力建设, 2012(7):95~98.
- [10] 单蕾. 风力机塔架结构选型与受力性能研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2009.
- [11] 顾富斌. 风电机组用钢-混凝土组合塔架研究[D]. 新疆农业大学, 2009.
- [12] GB/T50448—2008 水泥基础灌浆材料应用技术规范[S].