

大跨度钢结构工业厂房施工难点与质量控制策略探析

赵 勇

中国建筑第八工程局有限公司东北分公司 辽宁 大连 116021

摘 要：大跨度钢结构因其自重轻、强度高、施工周期短等优势，已成为现代工业厂房的主流结构形式。然而，随着厂房跨度与高度的不断突破，构件吊装稳定性、焊接变形控制、高空拼装精度及冬季低温施工等环节的质量风险显著增大，对施工技术管理和质量控制体系提出了更高要求。本文系统梳理了大跨度钢结构工业厂房施工中的主要技术难点，深入分析其成因机制，进而从施工准备、构件制作与验收、现场拼装与焊接、变形监测与校正、冬季施工保障及安全防护体系等维度，提出全流程、系统化的质量控制策略。本文旨在为同类工程的质量管理提供理论参考与方法指引。

关键词：大跨度钢结构；工业厂房；施工难点；质量控制；焊接变形

引言

近年来，随着工业制造工艺的升级与生产规模的大型化，工业厂房正朝着大柱距、大跨度、大高度的方向发展。钢结构因其材料强度高、抗震性能优越、构件可工厂化预制、现场装配效率高等突出优点，在航空制造、汽车装配、仓储物流、电力能源等行业的大型厂房建设中占据了主导地位。跨度超过60米、甚至100米以上的超大型钢结构厂房已屡见不鲜，其结构形式涵盖门式刚架、网架结构、桁架结构及张弦梁结构等多种类型。然而，大跨度钢结构厂房的施工并非简单的构件拼装。跨度增大带来的结构柔性增加、构件尺寸与重量攀升、高空作业量激增等因素，使得施工过程中的质量控制难度呈指数级上升。焊接残余应力与变形、吊装过程中的结构稳定性、高空连接节点的定位精度、温度变化对安装线形的影响等问题，均可能对最终结构安全和使用功能产生不可逆的影响。实际工程中，因施工质量控制不力导致的构件变形超标、节点连接缺陷、整体安装偏差超限等质量事故时有发生，轻则影响设备安装与使用，重则埋下结构安全隐患。因此，深入认识大跨度钢结构厂房施工的技术难点，构建覆盖施工全过程的系统化质量控制策略，具有十分重要的工程实践意义。

1 大跨度钢结构工业厂房施工的主要技术难点

1.1 构件体量大，吊装与安装难度突出

大跨度钢结构厂房的主要受力构件（如屋面主桁架、大梁、格构柱等）通常具有截面尺寸大、单件质量重的特点。部分构件长度可达30至50米，单件质量超过50吨，对起重设备的选型和站位规划构成严峻考验。吊装作业中需同时考虑起重机的起重量、工作半径、臂长及场地地基承载力等多重约束，吊点位置的选择也必须

经过精确计算，以避免构件在起升过程中因应力集中而产生塑性变形。此外，大型构件在高空就位时的空中姿态调整极为困难，受风力、吊索弹性伸长等因素干扰，构件与已安装单元的对口精度难以保证，往往需要反复起落和微调，既降低了工效，也增加了安全风险。

1.2 焊接工程量大，焊接变形与残余应力控制困难

大跨度钢结构厂房的节点连接以焊接为主，尤其是刚接节点和厚板对接焊缝，焊脚尺寸大、填充金属量大、约束刚度强，属于典型的拘束度焊接。多层多道焊接过程中，不均匀的热输入和冷却速度差异会在焊缝区域产生显著的残余应力和角变形、横向收缩、纵向弯曲等焊接变形^[1]。对于大跨度屋面结构，若每一榀桁架的焊接变形不加有效控制，累积偏差将导致屋面坡度改变、檩条安装困难，严重时甚至改变结构受力线形。更值得关注的是，厚板焊接时的层状撕裂倾向和低温冲击韧性下降问题，对焊接工艺评定和焊工操作技能提出了严格要求。

1.3 安装精度要求高，累积误差控制严苛

大跨度钢结构的安装精度具有“根端决定顶端”的放大效应。柱脚锚固位置的偏差即便在毫米级别，传递至屋面檐口处也可能被放大为厘米级的位移偏差。预埋螺栓群的定位精度、首节柱的垂直度、各层框架的水平度逐层累积，若未在各环节实施主动纠偏，最终将导致屋面檩条系统无法安装、围护结构漏水、吊车轨距偏差超标等质量问题。尤其在大面积多跨连续厂房中，各跨间的温度缝设置和协同变形关系使精度控制更加复杂。高强螺栓连接的摩擦面抗滑移系数、终拧扭矩的准确性也是影响节点刚度和安装精度的关键变量。

1.4 施工环境影响因素复杂

大跨度钢结构厂房施工多为露天作业,受气象条件和季节变化影响显著。温度应力是极易被忽视的隐形质量威胁:钢结构线膨胀系数约为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,一榀百米长的桁架在 30°C 温差下的自由伸缩量可达36毫米,若合龙温度与设计基准温度偏差过大,将产生巨大的温度附加应力。风荷载对高空拼装作业的干扰同样不可小觑,当风力超过5级时,大型薄壁构件的摆动幅度明显增大,严重影响测量放线和连接对位精度。冬季低温环境下,钢材脆性转变温度效应显现,Q345级钢材在 -10°C 以下焊接时冷裂纹敏感性急剧升高,若不采取预热、保温等工艺措施,焊缝热影响区易产生氢致裂纹。

1.5 高空作业风险与交叉作业干扰

大跨度钢结构厂房的作业面多位于10米以上高空,安装人员需在临边、洞口、悬空等危险环境中进行测量、焊接、拧紧等操作。高空作业不仅带来人身安全隐患,也制约了质量检查的频次和手段——某些部位的焊缝无法近距离目视检查,超声波探伤探头难以到达所有检测面^[2]。与此同时,土建基础施工、钢结构安装、屋面围护施工、机电管线预埋等多专业在同一区域交叉进行,作业面相互干扰,构件堆放与运输通道受限,进一步增大了工序衔接中的质量保护难度。

2 大跨度钢结构厂房施工质量控制策略

2.1 施工准备阶段的质量预控

质量控制的起点在施工之前。首先,应针对工程特点编制专项施工方案,内容须涵盖吊装方案(包括起重机选型与站位、吊点设计、构件翻身方法)、焊接工艺规程(包括预热温度、层间温度、后热消氢处理及焊后保温措施)、测量与校正方案(包括基准点设置、观测周期、纠偏阈值)等。专项方案应组织专家论证,确保技术路线的合理性和安全性。其次,做好深化设计与详图转化工作,对复杂节点进行三维放样,提前发现设计冲突或构造不合理之处,避免将问题带入现场。第三,对进场的钢材、焊接材料、高强螺栓连接副、涂装材料进行严格复验,尤其应重视厚板($\geq 40\text{mm}$)的Z向性能检验和焊接材料扩散氢含量的测定。第四,完成焊接工艺评定,覆盖所有接头形式和板厚组合,据此编制焊工资格项目清单,确保每位焊工具备对应项目的有效资质。

2.2 构件制作与出厂验收质量控制

工厂制作阶段的质量直接决定现场安装的顺畅程度。构件制作应严格执行尺寸精度标准,关键控制项包括:翼缘板和腹板的平面度、H型钢的截面尺寸偏差、端部铣平的垂直度、螺栓孔群的孔距偏差。对于大型桁架或分段制作的超长构件,应在工厂进行预拼装,检查相

邻段的接口匹配情况,实测并记录预拼装状态下的整体尺寸,作为现场拼装的调整基准。出厂前应逐件进行外观质量检查、焊缝无损检测(超声波或磁粉探伤)及防腐涂层厚度检测。同时,构件交付时须附带清晰的标识和安装方向标记,防止现场错用或反装。出厂资料应完整包含材质证明文件、焊缝检测报告、预拼装记录等质量可追溯文件。

2.3 现场拼装与安装过程质量控制

现场质量控制的核心在于“控制节点、追踪线形”。在基础阶段,应重点控制地脚螺栓群的定位精度,采用定型模板固定螺栓组,在混凝土浇筑前、浇筑中、浇筑后三个阶段分别校核坐标和标高,允许偏差应控制在 ± 2 毫米以内。首节柱安装后应立即进行垂直度双向校正,校正合格后方可进行柱脚二次灌浆^[3]。各层框架安装应遵循“先主后次、先下后上、先内后外”的原则,每完成一个独立单元(如一个柱间区段)即进行闭合测量,校核该单元的几何尺寸和标高,发现偏差在本单元内消化,避免向下一单元传递。高强螺栓连接须严格控制摩擦面处理和终拧时机:摩擦面不得沾染油污、油漆或雨水;初拧和终拧应在同一工作日内完成,终拧扭矩需经扭矩扳手实测检验,并按照节点总数的5%进行抽检。

2.4 焊接质量控制的系统化措施

焊接是钢结构质量控制的“重中之重”。在焊前环节,应依据焊接工艺规程严格执行预热制度,预热温度通常不应低于 100°C (视板厚和材质确定),预热范围应扩展至焊缝两侧各100毫米,采用电加热或火焰加热并用测温笔或红外测温仪监测。焊接过程中,应控制层间温度不超过工艺上限(通常为 250°C),采用多层多道错层施焊,每道焊缝厚度不宜大于5毫米,以细化晶粒并释放部分应力。对于刚性约束大的厚板对接接头,可采取对称焊、跳焊、分段退焊等顺序控制技术,减少热量集中。焊后立即进行后热消氢处理(加热至 $200 \sim 250^{\circ}\text{C}$ 保温2小时),并覆盖保温棉缓冷,这是防止冷裂纹的关键工序。焊接质量检测应实行“自检+专检+第三方抽检”三级体系,一级焊缝须100%超声波探伤,二级焊缝抽检比例不低于20%,检测应在焊后24小时后进行,以排除延迟裂纹的影响。

2.5 安装变形监测与线形主动控制

大跨度钢结构施工应建立“测量—分析—校正”的闭环控制机制。在施工全过程中,设置稳定的基准点网和高程控制网,关键观测点包括柱顶位移、主桁架跨中挠度、悬挑端部标高、合龙段接口间距等。每个施工阶段完成后的测量数据应与理论预调值进行对比分析。对

于预应力张拉或整体提升的施工方法,应实施全过程动态监测,实时读取关键点的应力和位移数据,一旦实测值超出预警阈值,立即暂停施工并分析原因。主动控制的核心手段是“预调反变形”:根据仿真计算结果,在安装过程中预设反向偏差(如桁架起拱),使结构在自重和后续荷载作用下逐步趋近设计线形。

2.6 冬雨季施工的质量保障措施

针对低温施工环境,应采取综合性质量保障措施。当环境温度低于 0°C 时,焊接作业区应搭设保温棚,维持棚内温度不低于 5°C ,焊前预热温度应比常温工艺提高 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 。雨雪天气严禁露天焊接作业,已焊部位应采取防水防潮覆盖。对于高强螺栓连接,应特别注意摩擦面的干燥清洁,雨雪后需用热风机干燥处理后方可安装。冬季涂装作业应选用低温固化型涂料,在湿度高于85%或构件表面有结露时不得施工。

2.7 质量检验与验收的体系化运作

质量检验应贯穿施工全过程,而非只依赖最终验收。过程检验设置停工待检点(H点)和现场见证点(W点),前者如地脚螺栓隐蔽验收、首节柱垂直度校验、一级焊缝探伤等,未经检验合格不得进入下一工序。最终验收除常规的实体质量检查外,还应安装偏差的测量记录、焊缝检测报告、高强螺栓施工记录、设计变更及处理记录等进行归档整理,形成完整质量可追溯文件包^[4]。验收标准应严格执行《钢结构工程施工质量验收标准》(GB50205)及设计文件要求,偏差超限项须有设计单位书面确认的处理意见。

3 质量保障的组织与管理支撑

技术策略的有效执行离不开组织与管理的强力支撑。在项目部层面,应建立由项目经理挂帅、技术负责人主抓、专职质量员巡查的三级质量管理组织,明确各岗位质量职责,实行质量责任终身制。在分包管理方面,对劳务分包单位的资质、业绩、人员持证情况进行

严格准入审查,分包队伍进场前须进行技术交底和标准培训,统一操作工艺和质量认知。此外,建立质量例会与专项检查制度,每周召开质量分析会,通报检查发现的问题、分析原因并限期整改闭合,形成“发现—整改—复查—归档”的闭环流程。激励机制方面,可设立质量专项奖励基金,对焊接一次合格率高、安装精度控制突出的班组给予奖励,营造全员关注质量的施工氛围。

4 结语

大跨度钢结构工业厂房的施工质量控制是一项涉及深化设计、构件制作、现场拼装、焊接作业、测量监控、环境应对及组织管理等多环节的系统工程。本文系统剖析了该类结构施工中的主要技术难点,包括大型构件吊装定位困难、焊接变形与残余应力控制复杂、安装累积误差严苛、环境影响因素显著及高空交叉作业风险大等,并据此构建了从施工准备到最终验收的全流程质量控制策略体系。核心认识在于:大跨度钢结构的质量不是“检出来的”,而是“过程造出来的”,关键在于将控制关口前移、将标准细化落地、将监测手段与主动纠偏结合。随着钢结构制造装配化、测量数字化、焊接自动化水平的持续提升,未来大跨度钢结构施工的质量控制将向着更精准、更智能的方向迈进,但对工艺细节的敬畏和对标准规范的坚守,始终是质量管理的永恒基石。

参考文献

- [1]郭志强,王洪涛.大跨度空间钢结构施工力学问题及控制技术研究进展[J].建筑结构学报,2022,43(8):1-12.
- [2]刘晓明,赵岩,陈文斌.超厚板钢结构焊接变形预测与控制方法综述[J].焊接学报,2023,44(5):78-85.
- [3]张永胜,李国华,王建勋.大跨度钢结构安装精度控制中的温度效应分析[J].施工技术,2024,53(2):34-40.
- [4]陈海波,周明华.冬季低温环境下钢结构焊接工艺保障措施研究[J].建筑技术,2023,54(7):802-807.