

工程施工 — 钢结构工程施工

一、理论基础与方法论

1.1 钢结构工程概述

钢结构是以钢材为主要材料，通过焊接、螺栓连接等方式组装而成的建筑结构。钢结构具有强度高、自重轻、施工速度快、可回收利用等优点，广泛应用于高层建筑、大跨度空间结构、工业厂房、桥梁等领域。

钢结构发展里程碑： - 1889年：埃菲尔铁塔（300m），标志钢结构进入高层时代 - 1931年：帝国大厦（381m），钢结构建设仅用41周 - 1970年代：高层建筑钢结构成熟 - 2000年代：超高层钢结构+混凝土混合结构 - 2020年代：装配式钢结构+智能建造

1.2 钢结构施工理论

钢结构施工的核心挑战： 1. 制作精度：工厂制作精度直接影响现场安装质量 2. 焊接质量：焊接是钢结构最薄弱的环节 3. 安装精度：累积误差控制 4. 防腐防火：钢材的耐久性依赖防护措施 5. 高空作业安全

二、核心知识点详解

2.1 焊接工艺

焊接方法分类：

方法	原理	适用	效率	质量
手工电弧焊（SMAW）	焊条电弧	现场全位置	低	依赖焊工技术
CO ₂ 气体保护焊（GMAW）	焊丝+CO ₂ 气	工厂/现场	高	较好
埋弧焊（SAW）	焊丝+焊剂层	工厂平焊	最高	最好
药芯焊丝焊（FCAW）	药芯焊丝	现场全位置	高	好
电渣焊（ESW）	熔渣电阻热	厚板立焊	中	好

焊接接头形式：

接头形式	适用	焊缝形式	强度
对接接头	板/管对接	全熔透/部分熔透	最高
T形接头	梁柱连接	角焊缝/全熔透	较高
搭接头	板搭接	角焊缝	中
角接头	转角连接	角焊缝/全熔透	较高

焊缝质量等级：

等级	检测方法	适用	要求
一级	100%超声+部分射线	受拉等强对接	最严格
二级	20%超声	一般受弯/受压	较严格
三级	外观检查	角焊缝/非重要	一般

2.2 高强螺栓连接

高强螺栓类型：

类型	原理	性能等级	适用
摩擦型	板面摩擦力传力	8.8级/10.9级	主要连接方式
承压型	螺栓杆承压+剪切	8.8级/10.9级	次要连接

高强螺栓施工要点：

工序	要求	控制标准
摩擦面处理	喷砂/抛丸	抗滑移系数≥0.45
初拧	预拉力的50%	扭矩法/转角法
复拧	同初拧	当天完成
终拧	设计预拉力	扭矩偏差±10%

2.3 涂装防腐

钢结构防腐体系：

涂层体系	底漆	中间漆	面漆	总厚度μm	寿命	造价元/㎡
普通型	环氧富锌	—	丙烯酸	120-150	5-8年	30-50
长效型	环氧富锌	环氧云铁	氟碳	200-250	15-20年	80-120
超长效	无机富锌	环氧云铁	氟碳/聚硅氧烷	250-350	25-30年	120-200
热喷锌/铝	—	封闭漆	面漆	150-200	20-30年	100-180

环境腐蚀等级（ISO 12944）：

等级	环境	典型场景	推荐体系
C1	极低	室内干燥	简单防护
C2	低	室内一般	普通型
C3	中	城市大气	长效型
C4	高	工业/沿海	长效型
C5	很高	海洋/化工	超长效
CX	极端	强腐蚀环境	特种体系

2.4 防火涂料

钢结构防火涂料分类：

类型	厚度mm	耐火极限h	外观	适用	造价元/㎡
超薄型（膨胀型）	≤3	≤2.0	光滑	外露钢结构	50-120
薄型（膨胀型）	3-7	≤2.5	较平整	外露/半外露	40-80
厚型（非膨胀型）	7-45	0.5-3.0	粗糙	隐蔽部位	30-60

2.5 安装精度控制

钢结构安装允许偏差（GB 50205）：

项目	允许偏差	检测方法
柱底偏移	≤5mm	全站仪
柱垂直度	≤H/1000且≤25mm	经纬仪
梁挠度	≤L/500	水准仪/拉线
总高度偏差	≤H/1000且≤30mm	全站仪
主体弯曲	≤L/1000且≤25mm	拉线
相邻柱间距	±5mm	钢尺

三、材质与工艺

3.1 钢材品种

钢种	牌号	屈服强度MPa	适用	参考价元/t
碳素结构钢	Q235B	235	一般结构	4000-4500
低合金高强度	Q355B	355	主流结构	4500-5200
高强度	Q390/Q420	390/420	重载/高层	5000-6000
特高强度	Q460/Q690	460/690	超高层/大跨	6000-8000
耐候钢	Q355NH	355	外露结构	5500-7000
耐火钢	Q345FR	345	防火要求	5500-7000

3.2 焊接材料

类型	型号	适用钢材	价格元/kg
焊条	E43/E50/E55	Q235/Q355/Q390	8-20
实心焊丝	ER50-6	Q235/Q355	8-15
药芯焊丝	E501T-1	Q235/Q355	12-20
埋弧焊丝+焊剂	H08MnA+SJ101	Q355/Q390	8-15

四、实践案例

案例1：北京国家体育场"鸟巢"

- 用钢量：4.2万吨
- 结构形式：编织式空间桁架
- 焊接难度：Q460特厚板焊接，为国内首次
- 亮点：自主创新Q460钢焊接工艺

案例2：上海中心大厦

- 钢结构用量：约7万吨
- 结构体系：巨型柱+核心筒+伸臂桁架
- 施工亮点：巨型钢柱吊装精度±2mm
- 创新：C70钢管混凝土柱

案例3：深圳平安金融中心

- 高度：599m
- 结构：8根巨型钢柱+核心筒
- 钢材：Q460高强度
- 焊接：全熔透焊缝100%超声检测

案例4-10:（涵盖大跨度体育场馆、机场航站楼、工业厂房、桥梁等案例）

五、施工/制作指导

5.1 钢结构施工全流程

深化设计 → 材料采购 → 工厂制作 → 工厂涂装 → 运输 → 现场安装
→ 焊接/栓接 → 验收检测 → 补漆 → 防火涂料 → 竣工验收

工厂制作流程：
放样→下料→切割→坡口加工→组对→焊接→矫正→钻孔→预拼装→除锈→涂装→验收

现场安装流程：
基础验收→构件进场→柱吊装→梁吊装→支撑安装→校正→焊接/栓接→验收

六、性能指标与评测

6.1 焊缝质量检测

方法	检测内容	适用	灵敏度
外观检查	表面缺陷	所有焊缝	低
超声检测（UT）	内部缺陷	对接焊缝	高
射线检测（RT）	内部缺陷	对接焊缝	最高
磁粉检测（MT）	表面/近表面	铁磁性材料	高
渗透检测（PT）	表面开口缺陷	所有材料	中

七-十一（略，详见完整版）

附录

核心标准

编号	名称
GB 50205	钢结构工程施工质量验收标准
GB 50661	钢结构焊接规范
GB/T 1228-1231	钢结构用高强度大六角头螺栓
GB 14907	钢结构防火涂料
GB/T 8923	涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级