

浙江省土木建筑学会团体标准

T/ZCEAS xxxx—2026

电弧增材制造建筑钢结构技术规程

Technical specification for wire-arc additively manufactured
building steel structure

（征求意见稿）

20xx—00—00 发布

20xx—00—01 施行

浙江省土木建筑学会 发布

浙江省土木建筑学会团体标准

电弧增材制造建筑钢结构技术规程

Technical specification for wire-arc additively manufactured building steel
structure

T/ZCEAS xxxx—20xx

主编单位：浙江省建筑设计研究院有限公司
绍兴大学

批准部门：浙江省土木建筑学会

施行日期：20xx 年 xx 月 1 日

XXXXXX 出版社
20XX 北 京

前言

根据浙江省土木建筑学会《关于同意学会团体标准<电弧增材制造建筑钢结构技术规程>立项的通知》（浙土建学（XXXX）XX号）的要求，规程编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，结合浙江省的实际情况，参考有关国家标准、国内外先进经验，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分为7章。主要内容包括：总则、术语和符号、基本规定、设计、增材制造、安装、检测与验收。

本规程由浙江省土木建筑学会负责管理，浙江省建筑设计研究院有限公司负责具体技术内容的解释。在执行过程中如有意见或建议，请寄送浙江省建筑设计研究院有限公司（地址：浙江省杭州市滨江区共享路1号，邮编：310056，邮箱：ziad-scg@ziad.cn），以供修订时参考。

本规程主编单位、参编单位、主要起草人及主要审查人：

主 编 单 位： 浙江省建筑设计研究院有限公司
绍兴大学

参 编 单 位：

主要起草人：

主要审查人：

目 次

1	总 则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	2
3	基本规定	5
3.1	一般规定	5
3.2	材料和设计指标	6
4	设计	9
4.1	一般规定	9
4.2	构件	11
4.3	节点	16
4.4	连接	17
4.5	有限元分析	18
4.6	构造要求	19
5	增材制造	20
5.1	一般规定	20
5.2	增材制造	21
5.3	增材过程修正	22
5.4	后处理	22
6	安装	24
6.1	一般规定	24
6.2	组装	24
6.3	焊接	25
6.4	防腐防火	27
7	检测与验收	29
7.1	一般规定	29
7.2	检测	29
7.3	验收	31
	本规程用词说明	33
	引用标准名录	34

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	2
3	Basic Requirements	5
3.1	General Requirements	5
3.2	Materials and Design Indexs	6
4	Design	9
4.1	Basic Requirements	9
4.2	Member	11
4.3	Joint	16
4.4	Connection	17
4.5	Finite Element Analysis	18
4.6	Construction Requirements	19
5	Additive Manufacturing	20
5.1	Basic Requirements	20
5.2	Additive Manufacturing	21
5.3	Additive Process Correction	22
5.4	Post Treatment	22
6	Installation	24
6.1	Basic Requirements	24
6.2	Assembling	24
6.3	Welding	25
6.4	Corrosion Prevention and Fire Prevention	27
7	Inspection and Acceptance	29
7.1	Basic Requirements	29
7.2	Detection and Monitoring	29
7.3	Acceptance Inspection	31
	Explanation of Wording in This Specification	33
	List of Quoted Standards	34

1 总 则

1.0.1 为规范电弧增材制造钢结构技术的工程应用，做到安全适用、技术先进、经济合理、保证质量和保护环境，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于工业与民用建筑和一般构筑物的电弧增材制造钢结构的设计、制造、安装和验收。

1.0.3 电弧增材制造钢结构设计、增材制造、安装、检测和验收，除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 电弧增材制造 wire and arc additively manufacturing (WAAM)

以电弧为热源在惰性气体保护下熔化金属丝材，根据三维数字模型逐层沉积形成金属结构件。

2.1.2 电弧增材制造钢件

以金属丝材熔化而成的钢材通过电弧增材制造工艺形成的零件，可采用单件形式存在的结构构件或节点，或结构构件或节点的组合，是形成电弧增材制造钢结构的基本单元。

2.1.3 电弧增材制造钢结构

以金属丝材熔化形成的电弧增材制造钢材为主体结构制作的结构。

2.1.4 电弧增材制造钢材

采用电弧增材制造工艺打印而成的钢材。

2.1.5 电弧增材制造钢构件

采用电弧增材制造工艺制作而成的钢构件。

2.1.6 随炉试样 sample along with part

在零件或实物成形的同时，额外制备的同制造批次样坯或试样。

2.1.7 后处理 posttreatment

主流程结束后的附加操作环节。

2.1.8 增材过程修正 additive process correction

增材制造过程中，通过实时监测、检测和反馈，对工艺参数、打印路径或模型进行动态调整，以纠正尺寸偏差、变形、缺陷等质量问题的方法和技术。

2.2 符号

2.2.1 作用和作用效应设计值

S	——	承载能力极限状况下作用组合的效应设计值；
R	——	结构构件的承载力设计值；
R _w	——	电弧增材制造钢结构构件的承载力设计值；
R _k	——	结构构件的承载力标准值；

R_{wk}	——	电弧增材制造钢结构构件的承载力标准值;
N	——	轴心拉力或压力设计值
N_E	——	轴心受压构件的弹性稳定临界力
M_x 、 M_y	——	同一截面处绕 x 轴和 y 轴的弯矩 ($N \cdot m$), 对于具有强弱轴的构件: x 轴为强轴, y 轴为弱轴
M_{cr}	——	梁弯扭屈曲临界弯矩
V_{max}	——	计算截面沿腹板平面作用的剪力

2.2.2 计算指标

f	——	抗拉强度设计值
f_y	——	屈服强度
f_u	——	抗拉强度
f_v	——	抗剪强度设计值
E_0		初始弹性模量
E	——	弹性 (杨氏) 模量
σ	——	正应力
$\sigma_{0.2}$	——	塑性应变为 0.2% (不含弹性应变) 时的名义屈服强度
σ_u	——	极限应力
τ	——	剪应力
ε_y	——	屈服应变

2.2.3 几何参数

θ	——	时间提取角度
A	——	毛截面面积
A_n	——	电弧增材制造钢构件的最小净截面面积
A_{en}	——	电弧增材制造钢构件的有效净截面面积
A_e	——	电弧增材制造钢构件的有效截面面积
W_{enx} 、 W_{eny}	——	对截面主轴 x 轴和 y 轴较小的有效净截面模量
W_{ex} 、 W_{ey}	——	对截面主轴 x 轴和 y 轴的有效截面模量
W_x 、 W_y	——	对截面主轴 x 轴和 y 轴的毛截面模量
W_ω	——	毛截面扇形模量
I	——	毛截面惯性矩

I_o —— 毛截面的翘曲惯性矩

t_w —— 腹板厚度

2.2.4 计算系数及其他

n —— 第一阶段应变硬化指数；

m —— 第二阶段应变硬化指数；

γ_0 —— 结构的重要性系数；

γ_{RE} —— 承载力抗震调整系数；

η_1 —— 材料非均匀性折减系数；

η_2 —— 初始几何缺陷折减系数；

φ —— 轴心受压构件的稳定系数

φ_{bx} —— 绕强轴弯曲所确定的梁整体稳定系数

λ —— 轴心受压构件的长细比或换算长细比

$\bar{\lambda}$ —— 正则化长细比

$\bar{\lambda}_o$ —— 梁弯扭失稳的正则化长细比

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 电弧增材制造钢结构设计应选择合理的结构体系、构件类型、节点形式、连接构造、材料、制作工艺、防火和防腐蚀要求，并宜进行拓扑优化设计。

3.1.2 电弧增材制造钢结构设计应采用以概率理论为基础的极限状态设计法，并应采用分项系数设计表达式进行计算。

3.1.3 电弧增材制造钢结构的荷载取值，应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定采用。对于高层电弧增材制造钢结构，其荷载取值尚应满足现行行业标准《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ 99 的有关要求。

3.1.4 电弧增材制造钢结构设计，应包含设计使用年限、金属丝材牌号、连接材料的型号或钢号，以及电弧增材制造钢材力学性能、化学成分、金相组织的附加保证项目和电弧增材制造钢结构焊接质量要求。

3.1.5 电弧增材制造钢件的构造，应满足结构计算要求，传力可靠，并应减小应力集中程度；当构件在节点偏心相交时，尚应考虑附加弯矩的影响。

3.1.6 构造复杂的电弧增材制造钢件的承载力应采用有限元分析方法确定，并宜进行试验验证。

【条文说明】

改造复杂的制造钢件包括复杂节点、异形构件等。

3.1.7 电弧增材制造钢件应按照现行国家标准《增材制造设计要求、指南和建议》GB/T 37698 的相关内容进行几何模型设计。几何模型设计时，尚应设计随炉试样区域，并应注明取样位置、取样方向和取样数量。

3.1.8 电弧增材制造钢件应进行热应力处理。在增材制造过程中应控制沉积速度、冷却温度等工艺参数，增材工艺应保证电弧增材制造钢件内部组织致密、均匀。

3.1.9 焊接施工前，施工单位应以合格的焊接工艺评定结果为依据编制焊接工艺文件。

3.1.10 对于直接承受反复动力荷载作用的电弧增材钢结构，应对其疲劳强度进行专门研究。

3.2 材料和设计指标

3.2.1 电弧增材制造的原材料性能要求、随炉试样要求、力学性能试验要求、钢材力学性能设计指标和本构模型参数参考值应满足现行协会标准《电弧增材制造钢材力学性能及试验方法标准》T/ZCEAS xxxx 的相关要求。

3.2.2 电弧增材制造的原材料金属丝材宜选用下列牌号，金属丝材化学成分及力学性能应符合现行国家标准《熔化极气体保护电弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝》GB/T 8110 和《不锈钢焊丝和焊带》GB/T 29713 的相关规定：

- 1 碳钢 ER70S、ER80S、ER90S、ER110S、ER120S；
- 2 不锈钢 ER304、ER308、ER308L、ER316L、ER321、17-4、ER2209、ER2594；
- 3 当选用其他牌号的金属丝材时，应进行专门研究，并提供质量证明文件。

【条文说明】

气体保护电弧焊用碳钢焊丝与焊棒的化学成分及力学性能可参照美国焊接学会标准 AWS A5.18 Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding 确定。光面不锈钢焊接焊丝与焊棒的化学成分及力学性能可参照美国焊接学会标准 AWS A5.9/A5.9M Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods 确定。

3.2.3 电弧增材制造钢材应综合考虑结构的重要性、荷载特性、结构形式、应力状态、连接方法、钢材厚度、制作工艺、工作环境和造价等因素，选用合理的金属丝材牌号、工艺参数、热处理工艺和材料性能保证措施。

3.2.4 电弧增材制造钢材应具有屈服强度、抗拉强度、伸长率和碳、硅、锰、硫、磷、微量合金元素等含量的合格保证，对焊接电弧增材制造钢件还应有碳当量的合格保证；对直接承受动力荷载的电弧增材制造钢件应具有按其环境温度要求的冲击吸收能量合格保证。

3.2.5 电弧增材制造钢材的力学性能指标应计入电弧增材制造工艺各向异性特征的影响，注明试件的取样方向，试件的取样方向应满足现行国家标准《金属增材制造 成形件机械性能与其取样方向、位置的相关性》GB/T 46623 的相关要求。

3.2.6 电弧增材制造钢结构中的非电弧增材制造钢件的钢材牌号、材质及性能应与相关电弧增材钢件相匹配，并应符合国家现行标准《钢结构设计标准》GB 50017 和《不锈钢结构技术规程》CECS 410 的有关规定。

3.2.7 电弧增材制造钢结构所用焊接材料的品种与牌号,应根据电弧增材制造钢件的强度、厚度、碳当量指标、热处理条件等确定,并应满足相连接构件焊接要求。当电弧增材制造钢件的壁厚较厚或形状复杂时,焊接材料尚应根据焊接工艺评定结果确定。

3.2.8 焊接电弧增材制造钢结构用焊接材料应与主体钢材的力学性能及耐腐蚀性能相匹配,并应符合下列规定:

1 手工焊所用焊条,应符合现行国家标准《非合金钢及细晶粒钢焊条》GB/T5117、《热强钢焊条》GB/T 5118、《不锈钢焊条》GB/T 983 的规定;

2 自动或半自动焊所用焊丝及相应的焊剂应符合现行国家标准《熔化焊用钢丝》GB/T 14957、《气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝》GB/T 8110、《碳钢药芯焊丝》GB/T 10045、《低合金钢药芯焊丝》GB/T 17493 以及 GB/T 17853《不锈钢药芯焊丝》、GB/T 17854《埋弧焊用不锈钢焊丝和焊剂》的规定;

3 埋弧焊用焊丝和焊剂应符合现行国家标准《埋弧焊用碳素钢焊丝和焊剂》GB/T 5293 和《埋弧焊用低合金钢焊丝和焊剂》GB/T 12470 的规定;

4 当两种不同强度级别的同类不锈钢相焊接时,宜采用与主体金属强度较低一种钢材相适应的焊条或焊丝;

5 不宜将不同金相的不锈钢材料焊接。

3.2.9 对直接或间接承受动力荷载和以及低温环境下工作的电弧增材制造钢结构,焊接时宜采用低氢型焊条或焊丝。

3.2.10 电弧增材制造钢结构连接用普通螺栓、高强螺栓要求,宜符合国家现行标准《钢结构设计标准》GB50017 和《钢结构高强度螺栓连接技术规程》JGJ 82 的相关规定。

3.2.11 电弧增材制造钢材的力学性能设计指标宜根据材料性能试验获得,力学性能指标宜满足现行国家标准《增材制造金属制件机械性能评价通则》GB/T 39254 的规定。在缺乏实测数据时,可参照现行标准《电弧增材制造钢材力学性能及试验方法标准》T/ZCEAS xxxx 按表 3.2.11 采用。

1 碳钢

机加工态试件、成形态试件的材料常数 f_y 、 f_u 的平均值、特征值的取值可按表 3.2.11-1 采用,材料常数 E 、 n 、 m 的取值可按表 3.2.11-2 采用。其中, f_y 为屈服强度, f_u 为抗拉强度, E 为弹性模量, n 、 m 分别为第一、二阶段应变硬化指数。

表 3.2.11-1 电弧增材制造碳钢本构模型参数参考值（一）

原材料 丝材	试件提取 角度 θ (°)	机加工态试件				成型态试件			
		平均值(MPa)		特征值(MPa)		平均值(MPa)		特征值(MPa)	
		$f_{y,a}$	$f_{u,a}$	$f_{y,k}$	$f_{u,k}$	$f_{y,a}$	$f_{u,a}$	$f_{y,k}$	$f_{u,k}$
ER70S-6	所有	334	451	273	394	357	480	296	417
	0	356	469	293	411	361	489	301	421
	45	329	445	275	397	352	466	307	416
	90	323	443	271	393	357	483	288	417
ER110S-G	所有	623	714	537	644	669	774	596	695
	0	665	728	593	674	690	789	609	704
	45	620	716	552	660	646	745	596	696
	90	594	697	535	642	664	788	590	688

表 3.2.11-2 电弧增材制造碳钢本构模型参数参考值（二）

试件表面状态	$E(GPa)$	n	m
成型态	202	15.2	2.7
机加工态	192	14.9	2.3

2 不锈钢

机加工态试件、成型态试件的材料常数 f_y, f_u, n, m 的取值可按表 3.2.11-3 采用，材料常数 E 的取值可按表 3.2.11-4 采用。

表 3.2.11-3 电弧增材制造不锈钢本构模型参数参考值（一）

原材料丝材	机加工态试件				成型态试件			
	$f_y(MPa)$	$f_u(MPa)$	n	m	$f_y(MPa)$	$f_u(MPa)$	n	m
304	306.1	601.2	2.9	16.8	298.5	568.2	2.4	17.9
308	340.8	549.2	2.4	13.7	310.5	506.5	2.4	14.4
316	353.6	575.5	2.7	13.4	356.8	536.0	2.5	13.8
2209	560.2	740.0	3.4	18.6	526.4	714.0	3.6	19.6
2594	596.1	748.0	3.8	18.5	552.5	710.2	3.6	18.9

表 3.2.11-4 电弧增材制造不锈钢本构模型参数参考值（二）

试件提取角度 θ (°)	$E(GPa)$
0° , 90°	134
30° , 45° , 60°	198

4 设计

4.1 一般规定

4.1.1 电弧增材制造钢结构设计时，应根据结构破坏可能产生的后果的严重性，采用不同的安全等级。建筑物中各类结构构件的安全等级，宜与主体结构的安全等级相同。对其中部分结构构件的安全等级可进行调整，但不应低于三级，且不应低于主体结构。

【条文说明】电弧增材制造钢结构的安全等级应符合现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 的相关规定，对于结构中特别重要的电弧增材制造钢构件宜将安全等级进行适当提高。

4.1.2 电弧增材制造钢结构应按下列承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计：

1 承载能力极限状态包括：构件、节点和连接的强度破坏和因过度变形而不适于继续承载，结构和构件丧失稳定或节点局部稳定破坏，结构转变为机动体系和结构倾覆；

2 正常使用极限状态包括：影响结构、构件、节点和非结构构件正常使用或外观的变形，影响正常使用的振动，影响正常使用或耐久性能的局部损坏。

4.1.3 电弧增材制造钢件设计应包括几何造型设计、工艺设计和连接设计等，并应符合下列规定：

1 电弧增材制造钢件的几何造型设计应满足结构的传力特点、沉积工艺、连接构造、交通运输、施工安装、缺陷检测、涂装防护和建筑美观的要求；

【条文说明】几何造型设计应满足连续沉积与分层制造要求，构件形态宜简洁连续，避免复杂中断路径；应保证各层沉积的可达性，不得设置封闭空腔及难以成形的内凹结构；构件外形宜采用自支撑形式，悬垂角不宜小于 45° ；设计时应尽量避免产生尖角造型的角度，以免造成应力集中；构件布置应有利于热量均匀传导与散失，防止局部热积累；关键尺寸应预留加工余量，配合面应通过后加工保证精度；设计应考虑材料各向异性影响，构件主受力方向宜与沉积路径方向一致；构件几何应与沉积路径相协调，减少路径交叉与复杂转折；大型构件宜采用分段制造并合理设置连接部位；构件表面质量及后处理方式应在设计阶段予以明确，其结构性能尚应符合现行有关标准的规

定。电弧增材制造钢构件的内部缺陷检测应采用无损检测方法为主，并结合过程监测与必要的破坏性检验进行综合评定；对构件内部气孔、夹渣等体积型缺陷，宜采用射线检测方法；对裂纹、未熔合及分层等平面型缺陷，应采用超声检测方法，必要时可采用相控阵超声等先进技术；对小尺寸或高精度构件，可采用工业计算机断层扫描进行三维检测；构件表面及近表面缺陷可采用磁粉检测或渗透检测；电弧增材制造过程宜实施在线监测，包括电弧参数、熔池形态及温度场监控，以辅助缺陷识别与质量控制；对关键构件或重要受力部位，必要时应进行金相检验及力学性能试验验证；检测方法及验收标准应符合现行相关标准的规定。当采用超声波检测电弧增材制造钢构件内部缺陷时，超声波的检测应有较好的反射面，过多尖角的造型将造成检测盲区，应尽可能改进铸电弧增材制造钢构件的构造，不可避免时，可采用磁粉探伤或渗透探伤进行检测。

2 电弧增材制造钢件工艺设计时，应根据几何造型设计进行受力分析，确定合理壁厚和倒圆角半径等尺寸，并制定工艺流程和检查项目；

【条文说明】工艺设计指与结构、构件和节点设计相关的设计内容。设计电弧增材制造钢结构时应尽量避免壁厚过小或过大以及打印的钢材壁厚度偏差较大。当设计的壁厚过薄时将造成偏差比例过大，对承载力造成较大影响；当壁厚设计过厚时与其他结构连接时质量难以保证，对承载力影响较大。电弧增材制造钢构件的截面尺寸及壁厚变化应平缓过渡，避免突变。因此，电弧增材制造钢壁厚的选择应综合考虑承载力、打印工艺、施工安装和造价经济的要求。另外，可通过合理设置加劲肋，满足受力要求，而不必过于加大壁厚。

3 电弧增材制造钢件之间和电弧增材制造钢件与其他结构的连接设计应计入超厚焊缝对结构的不利影响，并应采取相应的消除焊接应力的措施；设计时应考虑连接件之间的壁厚差和设置企口的要求。

4.1.5 电弧增材制造钢结构构件、连接及节点应采用下列承载能力极限状态设计表达式：

1 持久设计状况、短暂设计状况：

$$\gamma_0 S \leq R_w \quad (4.1.5-1)$$

$$R_w = R \eta_1 \eta_2 \quad (4.1.5-2)$$

2 地震设计状况：

多遇地震

$$S \leq R_W / \gamma_{RE} \quad (4.1.5-3)$$

设防地震

$$S \leq R_{Wk} \quad (4.1.5-4)$$

$$R_{Wk} = R_k \eta_1 \eta_2 \quad (4.1.5-5)$$

- 式中：—— 结构的重要性系数：对安全等级为一级的结构构件不应小于 1.1，对安全等级为二级的结构构件不应小于 1.0，对安全等级为三级的结构构件不应小于 0.9；
- γ_0
- S —— 承载力极限状况下作用组合的效应设计值：对持久或短暂设计状况应按作用的基本组合计算；对地震设计状况应按作用的地震组合计算；
- R —— 结构构件的承载力设计值；
- R_W —— 电弧增材制造钢结构构件的承载力设计值；
- R_k —— 结构构件的承载力标准值；
- R_{Wk} —— 电弧增材制造钢结构构件的承载力标准值；
- γ_{RE} —— 承载力抗震调整系数，应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定取值；
- η_1 —— 材料非均匀性折减系数（0.85~0.95）；
- η_2 —— 初始几何缺陷折减系数（0.85~0.95）；

4.1.6 电弧增材制造钢结构设计应考虑成型方向对力学性能的影响，受力方向宜与堆焊成型方向保持一致，当无法保持一致时，应对其各向异性修正系数进行专门研究。

4.1.7 电弧增材制造构件和节点各部分壁厚不宜大于 150mm，并不宜剧烈变化。当相互连接的板件壁厚不同时，板件厚度变化斜率不宜大于 1:5，并应通过圆弧平滑过渡。

4.2 构件

4.2.1 轴心受拉、压构件，其强度和受压构件稳定性应按下列公式计算：

1 轴心受拉构件的截面强度

$$\sigma = \frac{N}{A_n} \leq f \quad (4.2.1-1)$$

2 轴心受压构件的截面强度

$$\sigma = \frac{N}{A_{en}} \leq f \quad (4.2.1-2)$$

3 轴心受压构件的稳定性

$$\frac{N}{\varphi A_e} \leq f \quad (4.2.1-3)$$

$$\varphi = \frac{1}{\phi_c + \sqrt{\phi_c^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1.0 \quad (4.2.1-4)$$

$$\phi_c = 0.5[1 + \alpha_c(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_c) + \bar{\lambda}^2] \quad (4.2.1-5)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_{0.2}}{N_E}} \quad (4.2.1-6)$$

$$N_E = \frac{\pi^2 E_0 A}{\lambda^2} \quad (4.2.1-7)$$

式中: φ —— 轴心受压构件的稳定系数, 取截面两主轴稳定系数中的较小者;

σ —— 正应力 (MPa);

N —— 轴心拉力或压力设计值 (N);

A_n —— 电弧增材制造钢构件的最小净截面面积 (mm²);

A_{en} —— 电弧增材制造钢构件的有效净截面面积 (mm²);

A_e —— 电弧增材制造钢构件的有效截面面积 (mm²);

f —— 电弧增材制造钢材抗拉强度设计值 (MPa);

$\bar{\lambda}$ —— 轴心受压构件的正则化长细比;

A —— 毛截面面积 (mm²);

λ —— 轴心受压构件的长细比或换算长细比; 当采用不锈钢材质时, 可按现行中国工程建设标准化协会标准《不锈钢结构技术规程》CECS 410 的有关规定计算;

N_E —— 轴心受压构件的弹性稳定临界力;

E_0 —— 初始弹性模量;

α_c 、 $\bar{\lambda}_c$ —— 计算系数, 当采用不锈钢材质时, 计算系数可按表

4.2.1 取值;

表 4.2.1 计算系数 α_c 和 $\bar{\lambda}_c$ 的取值

材料	截面类型	α_c	$\bar{\lambda}_c$
奥氏体型、双向型	方矩管戴面、C 形戴面	0.6	0.56
	圆管及椭圆管	0.36	0.00
奥氏体型	H 形截面强轴失稳	0.66	0.24
	H 形截面弱轴失稳	0.89	0.26
双向型	H 形截面强轴失稳	0.51	0.37

	H 形截面弱轴失稳	0.69	0.37
奥氏体型、双向型	其他截面	0.89	0.26

4.2.2 双向受弯实腹式构件，其截面抗弯强度、抗剪强度和整体稳定性应按下列公式计算

1 截面抗弯强度

$$\frac{M_x}{W_{enx}} + \frac{M_y}{W_{eny}} \leq f \quad (4.2.2-1)$$

2 截面抗剪强度

$$\tau = \frac{V_{max} S}{I_w} \leq f_v \quad (4.2.2-2)$$

3 整体稳定性

$$\frac{M_x}{\phi_{bx} W_{ex}} + \frac{M_y}{W_{ey}} + \frac{B}{W_w} \leq f \quad (4.2.2-3)$$

$$\phi_{bx} = \frac{1}{\phi_b + \sqrt{\phi_b^2 - \bar{\lambda}_\omega^2}} \leq 1.0 \quad (4.2.2-4)$$

$$\phi_b = 0.5[1 + 0.65(\bar{\lambda}_c - 0.41) + \bar{\lambda}_\omega^2] \quad (4.2.2-5)$$

$$\bar{\lambda}_\omega = \sqrt{\frac{W_{xf0.2}}{M_{cr}}} \quad (4.2.2-6)$$

$$W_w = I_w / \omega_n \quad (4.2.2-7)$$

式中： M_x 、 M_y — 同一截面处绕 x 轴和 y 轴的弯矩（N·m），对于具有强弱轴的构件：x 轴为强轴，y 轴为弱轴；

W_{enx} 、 W_{eny} — 对截面主轴 x 轴和 y 轴较小的有效净截面模量（m³）；

W_{ex} 、 W_{ey} — 对截面主轴 x 轴和 y 轴的有效截面模量（m³），当采用不锈钢材质时，可按现行中国工程建设标准化协会标准《不锈钢结构技术规程》CECS 410 的有关规定计算；

W_x 、 W_y — 对 x 轴和 y 轴的毛截面模量（m³）。

$\bar{\lambda}_\omega$ — 梁弯扭失稳的正则化长细比；

M_{cr} — 梁弯扭屈曲临界弯矩（N·m），当采用不锈钢材质时，可按现行中国工程建设标准化协会标准《不锈钢结构技术规程》CECS 410 的有关规定计算；

τ — 剪应力（Pa）

$V_{\max}$	—	计算截面沿腹板平面作用的剪力 (N) ;
S	—	计算剪应力处以上毛截面对中和轴的面积矩 (m ²)
I	—	毛截面惯性矩 (m ⁴)
t_w	—	腹板厚度 (m)
f_v	—	抗剪强度设计值 (Pa)
φ_{bx}	—	绕强轴弯曲所确定的梁整体稳定系数
W_{ω}	—	对 x 轴和 y 轴的毛截面模量 (m ³)
I_{ω}	—	构件的毛截面的翘曲惯性矩 (m ⁴) ;
ω_n	—	验算点的主扇性坐标。

4.2.3 拉弯、压弯实腹式构件的截面强度和稳定性应按下列公式计算:

1 双向拉弯构件截面强度

$$\frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{W_{nx}} \pm \frac{M_y}{W_{ny}} \leq f \quad (4.2.3-1)$$

2 双向压弯构件截面强度

$$\frac{N}{A_{en}} \pm \frac{M_x}{W_{enx}} \pm \frac{M_y}{W_{eny}} \leq f \quad (4.2.3-2)$$

3 当采用不锈钢材质时, 尚应按现行中国工程建设标准化协会标准《不锈钢结构技术规程》CECS 410 的有关规定验算稳定性。

4.2.4 方形空心截面短柱轴心抗压极限承载力可按下列公式计算:

1 公称壁厚为 7mm 的短柱抗压极限承载力

$$N_u = \begin{cases} 1.07 \times \sigma_{0.2} A & \tilde{\lambda} \leq 0.54 \\ (1.186 - 0.23 \times \tilde{\lambda})^{\frac{1}{0.8513}} \sigma_{0.2} A & \tilde{\lambda} > 0.54 \end{cases} \quad (4.2.4-1)$$

2 公称壁厚为 3mm 的短柱抗压极限承载力

$$N_u = \begin{cases} 0.92 \times \sigma_{0.2} A & \tilde{\lambda} \leq 0.56 \\ (1.0267 - 0.096 \times \tilde{\lambda})^{\frac{1}{0.3386}} \sigma_{0.2} A & \tilde{\lambda} > 0.56 \end{cases} \quad (4.2.4-2)$$

$$\tilde{\lambda} = \lambda \sqrt{\sigma_{0.2} / E} \quad (4.2.4-3)$$

式中: $\sigma_{0.2}$ — 塑性应变为 0.2% (不含弹性应变) 时的名义屈服强度 (MPa)

E — 弹性模量 (MPa);

λ — 长细比, $\lambda=L/i$, L 为柱高 (mm), i 为回转半径 (mm)。

4.2.5 方形空心截面长柱轴心抗压极限承载力可按下列公式计算:

$$N_u = \begin{cases} 0.8 \times \sigma_{0.2} A & \bar{\lambda} < 0.50 \\ (1.037 - 0.272 \times \bar{\lambda})^{\frac{1}{0.467}} \sigma_{0.2} A & \bar{\lambda} \geq 0.50 \end{cases} \quad (4.2.5-1)$$

式中: $\sigma_{0.2}$ — 塑性应变为 0.2% (不含弹性应变) 时的名义屈服强度 (MPa)

E — 弹性模量 (MPa);

λ — 长细比, $\lambda=L/i$, L 为柱高 (mm), i 为回转半径 (mm)。

4.2.6 圆形空心截面短柱轴心抗压极限承载力可按下列公式计算:

$$N_{csm} = \begin{cases} f_{csm} A & \bar{\lambda}_c \leq 0.3 \\ (\varepsilon_{csm} / \varepsilon_y) \sigma_{0.2} A & 0.3 < \bar{\lambda}_c \leq 0.6 \end{cases} \quad (4.2.6-1)$$

$$f_{csm} = \begin{cases} \sigma_{0.2} + E_{sh} \varepsilon_y (\varepsilon_{csm} / \varepsilon_y - 1) & \varepsilon_{csm} / \varepsilon_y \geq 1 \\ E \varepsilon_{csm} & \varepsilon_{csm} / \varepsilon_y < 1 \end{cases} \quad (4.2.6-2)$$

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \begin{cases} \frac{4.44 \times 10^3}{\bar{\lambda}_c^{4.5}} - 0.905 & \bar{\lambda}_c \leq 0.26 \text{ and } \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \leq \min \left(15, 0.1 \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} \right) \\ \frac{1}{(26.7 \bar{\lambda}_c - 6.00)^{0.0758}} & 0.26 < \bar{\lambda}_c \leq 0.6 \end{cases} \quad (4.2.6-3)$$

$$E_{sh} = (\sigma_u - \sigma_{0.2}) / (0.16 \varepsilon_u - \varepsilon_y) \quad (4.2.6-4)$$

$$\varepsilon_u = 1 - \sigma_{0.2} / \sigma_u \quad (4.2.6-5)$$

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\sigma_{0.2} / \sigma_{cr}} \quad (4.2.6-6)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{2t}{D} \quad (4.2.6-7)$$

式 — 泊松比;

中: ν —

E — 弹性模量 (MPa);

D	—	公称直径 (mm) ;
t	—	圆钢管壁厚 (mm) ;
$\sigma_{0.2}$	—	塑性应变为 0.2% (不含弹性应变) 时的名义屈服强度 (MPa) ;
σ_u	—	极限应力 (MPa) ;
ε_y	—	屈服应变。

【条文说明】4.2.1~4.2.3 由于当前电弧增材制造钢结构构件实验材料大部分为不锈钢材质，本规范提供的计算公式也仅针对不锈钢。轴心受压构件的稳定系数应根据构件的长细比、材料屈服强度按 b 类受压构件确定。电弧增材制造钢结构构件的承载力设计值均应符合 4.1.5 条的要求。4.2.4~4.2.6 为根据实验及有限元模拟分析得到的特定条件下的构件极限承载力拟合公式，可作为极限承载力的复核验算依据。

4.3 节点

4.3.1 电弧增材制造钢结构节点设计应计入节点的几何形态、受力路径、材料性能及制造工艺等因素的影响。

4.3.2 电弧增材制造钢结构节点宜采用优化设计方法，其几何形态应符合下列规定：

- 1 节点内部应力传递路径应连续、平滑，避免突变截面及尖角构造；
- 2 宜采用曲面过渡或渐变截面形式等降低应力集中的构造，局部应力集中区域应进行强化设计或优化处理；
- 3 宜采用拓扑优化或形状优化等减少冗余、材料降低自重的措施；
- 4 节点设计应结合节点连接方式，设置相应的连接区域；
- 5 对受力复杂或多向受力节点，应进行数值分析验证其受力性能。

4.3.3 电弧增材制造钢构件的节点设计应考虑残余应力释放，可通过设置应力释放槽、优化坡口形式、分层增材等方式降低残余应力。

4.3.4 电弧增材制造钢结构节点设计应实现结构设计与制造工艺的协同优化，并应符合下列规定：

- 1 节点几何形态及截面变化应与逐层增材特征相协调，保证成形过程稳

定、连续。

2 节点应减少不利于增材的结构形式，不应形成过多的大悬垂结构、封闭空间或难以实施沉积的区域。对不可避免的复杂部位，应对成形工艺进行专门研究；

3 节点设计应与增材路径相协调，主要受力区域的几何布置宜与增材路径方向相适应；

4 应结合节点连接方式及精度要求，合理保留必要的连接区域及连接条件。连接界面、安装空间及加工余量，是否进行机加工等精细化后处理，以保证连接精度及受力性能以满足连接可靠性及施工安装要求等应在设计阶段统筹考虑。

【条文说明】

节点几何形态局部突变、构造不连续或尺寸不合理可能引起成形不稳定或中断，因此在设计时应保证截面与逐层增材特征相协调。节点设计时应充分考虑增材路径，减少路径中断及急剧转向，保证增材过程的连续性与均匀性；对于主要受力区域，需要避免因频繁启停或路径突变引起热输入不均及成形缺陷。

4.4 连接

4.4.1 电弧增材制造钢构件的连接形式应根据受力特点、制造工艺及施工条件选用，可采用焊接连接、螺栓连接或混合连接形式。

4.4.2 电弧增材制造钢结构采用焊接连接时，焊缝金属应与主体金属相适应。当不同强度的钢材连接时，焊接材料宜根据低强度钢材选取。焊接坡口形式应根据构件厚度、焊接方法及工艺要求确定，并应符合现行国家标准《钢结构焊接规范》GB 50661 的规定。

【条文说明】

电弧增材制造钢结构与传统轧制或铸造构件连接时，应考虑材料性能差异及界面过渡，保证连接区域的力学性能协调。

4.4.3 电弧增材制造钢结构采用螺栓连接时，螺栓连接的承载力计算、构造要求应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB50017 的有关规定。

【条文说明】

螺栓连接节点宜采用 T 形螺纹。

4.4.4 电弧增材制造钢结构销轴连接节点时，销轴孔及螺栓连接节点的螺栓

孔宜采用机械加工方法。当采用电弧增材制造直接成孔时，设计应计入加工余量。

【条文说明】

孔径小于 100mm 的非销轴和螺栓开孔,孔不经过机械加工处理且孔内穿构件时，开孔宜增加 5mm；孔径不小于 100mm 的非销轴和螺栓开孔，孔不经过机械加工处理且孔内穿构件时，开孔宜增加 5mm~10mm。

4.5 有限元分析

4.5.1 电弧增材制造钢结构的有限元模型应根据分析目的和精度要求，采用不同形式的建模方法：

- 1 可采用按名义尺寸建立的理想化模型；
- 2 可采用基于实测或三维扫描获得的实际几何模型进行分析；
- 3 对存在明显表面粗糙度的构件，可采用基于平均厚度的等效光滑模型。

4.5.2 电弧增材制造钢结构的有限元分析所采用的材料本构关系应与几何模型类型相匹配。

4.5.3 电弧增材制造钢结构的有限元分析时，所采用的有限元分析方法应与所采用的网格密度、几何复杂程度以及求解方法相适应。

4.5.4 电弧增材制造钢结构有限元分析时，宜采用实体单元。在构件截面突变处、节点连接处、内外表面拐角等易产生应力集中的部位，实体单元的最大边长不应大于该处最薄壁厚；其余部位的单元尺寸可适当增大，但单元尺寸变化应平缓。

4.5.5 电弧增材制造钢结构有限元分析时，径厚比不小于 10 的部位可采用板壳单元。

4.5.6 电弧增材制造钢结构的有限元分析中，应根据结构的具体约束形式确定与实际情况相似的边界条件。

4.5.7 电弧增材制造钢结构的有限元分析中，作用在结构上的外荷载和约束力的平衡条件应与设计内力一致。

4.5.8 电弧增材制造钢结构的承载力设计值不应大于极限值的 1/3，承载力设计值和极限值可根据荷载-位移全过程曲线确定。

4.5.9 电弧增材制造钢结构的有限元分析宜进行不同单元类型、不同单元尺寸的分析模型的对比计算，以保证计算精度。

4.5.10 电弧增材制造钢结构有限元分析中，应考虑初始几何缺陷对结构承载

性能的影响。当具有扫描模型的实测数据时，宜采用实测初始几何缺陷进行分析。

4.5.11 电弧增材制造钢结构有限元分析中，应考虑增材制造工艺引入的初始残余应力对结构性能的影响。残余应力的分布特征应与增材制造扫描路径、热输入参数及约束条件相一致。

4.5.12 电弧增材制造钢结构有限元分析中，当结构变形相对于构件尺寸不可忽略时，有限元分析应计入几何非线性效应，采用大变形理论进行计算。

4.6 构造要求

4.6.1 电弧增材制造钢构件宜在设计阶段明确沉积方向及分段制造方案，减少支撑结构。分段加工时，分段位置应选择在受力较小的部位，并应考虑施工安装时的起重能力和运输要求。

4.6.2 电弧增材制造钢构件内部薄壁部位肋板和加劲板的壁厚宜小于外部薄壁部位的壁厚。

4.6.3 电弧增材制造钢构件焊接面与地面或柱顶的距离有条件时宜为800mm~1000mm，不应小于200mm。

5 增材制造

5.1 一般规定

5.1.1 电弧增材制造钢结构的增材制造工艺过程除应符合本标准相关要求外，尚应满足现行国家标准《增材制造 金属材料定向能量沉积工艺规范》GB/T 39253 和《增材制造 金属制件热处理工艺规范》GB/T 39247 的相关规定。

5.1.2 电弧增材制造钢结构增材制造的操作者在操作设备前应接受培训，培训内容包括电弧增材制造设备和辅助设备的操作、维护、校准、软件使用、安全防护、原材料处理、后处理、数据处理、异常情况处理等，培训应由设备厂商或已接受培训并合格的人员来实施。

5.1.3 电弧增材制造钢结构增材制造的设备主要由能量源、沉积头、原材料输送系统、气体保护系统、运动控制系统、除尘系统、过程监控系统等部分组成。设备的检验、验收应符合设备厂商和相关标准的规定，且各项技术指标参数符合工艺相关要求。

【条文说明】

设备应提供相应的合格证书和说明文件，注明设备定期检查的项目、周期和标准。

5.1.4 电弧增材制造钢结构增材制造金属丝材的主要性能指标包括丝材直径、圆度、化学成分、表面质量、力学性能、氧含量等。

【条文说明】

原材料供应商应拥有符合材料标准或同等标准认证的质量管理体系（QMS），并确保原材料产品质量稳定和可追溯。原材料的存储应遵守使用说明，并确保原材料处于保质期内。金属丝材应对相关指标进行检验，检验方法可参照现行国家标准《熔化极气体保护电弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝》GB/T 8110 和《不锈钢焊丝和焊带》GB/T 8110 的有关规定执行。

5.1.5 电弧增材制造钢结构基材应采用与原材料同牌号或冶金相容性较好的材料；如基材部分或整体将作为最终零件的一部分，基材应采用与原材料同牌号材料。

【条文说明】

基材的来源和成分必须是已知的；如果基材是最终零件的组成部分，则应记录其化学成分、供应条件和产地。

5.1.6 电弧增材制造钢结构增材制造的环境应满足下列要求：

- 1 电弧增材制造设备的工作环境温度宜为 5℃-35℃，湿度宜≤75%；
 - 2 安装设备的场地应具有良好的通风和照明条件，并应满足现行国家标准《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50019 的有关要求。
- 5.1.7** 电弧增材制造设备的安全防护应符合现行国家规范《焊接与切割安全》GB 9448 的规定。
- 5.1.8** 建筑工程领域的电弧增材制造钢结构，增材成形完成后应根据工程需要对表面纹理进行处理。

5.2 增材制造

- 5.2.1** 电弧增材制造的工艺过程应包括模型设计、模型切片、成形准备、参数设定、成形过程、清理残渣、初步检验、后处理、质量检验、交付。
- 5.2.2** 电弧增材制造前应对设备热源、原材料输送、运动控制、冷却等各系统状态和水、电、气等设备和场地状态进行确认。
- 5.2.3** 电弧增材制造前应对基材进行清理，表面不应有油污、油漆、氧化物、外来夹杂等影响成形质量的污染物质。基材应平稳放至设备成形平台合适位置，并应安装固定。
- 5.2.4** 电弧增材制造过程中更换丝材时，应核对丝材质量说明书，对丝材牌号、批号及相关检测指标的检测结果；并应采用目视等方法检验丝材表面，丝材表面应无杂质且光滑，无毛刺、划痕、凹坑等缺陷。
- 5.2.5** 电弧增材制造前应设置设备工作原点，并应运行加工程序进行空程检查，确保第一层或前数层运行轨迹落在基材幅面范围。
- 5.2.6** 电弧增材制造前，应根据材料和零件结构性能要求设置电流、电压、送丝速度、扫描速度、沉积道宽度、沉积层高度、搭接率等相应工艺参数。

【条文说明】

当无工程经验时，可参考设备制造商提供的工艺参数包。

- 5.2.7** 电弧增材制造成形过程中如出现中断，应对中断状态进行记录和评估，并应根据评估结果进行处置。
- 5.2.8** 对于有特殊要求的零件，可在电弧增材制造成形过程中设定中断点，进行去应力退火。
- 5.2.9** 电弧增材制造钢结构节点的过程中应合理控制热输入，宜采用分区或对称增材方式，以降低残余应力及变形。对尺寸较大或构造复杂的节点，应结合增材顺序及热循环特征进行综合控制。

5.3 增材过程修正

5.3.1 电弧增材制造成形完成后，应采用三维扫描或其他检测手段对外观缺陷、外形尺寸等进行检测验证。对局部零件瑕疵，可采用局部修补、变形矫正、机械加工等措施进行过程修正，并应保留过程修正记录。

【条文说明】

过程修正是指对增材制造过程中因分段施工等原因造成的局部零件瑕疵进行修正。节点成形后，常见的过程修正包括对表面质量不满足要求的部位应进行打磨、修整等后处理，以提高表面质量并减少应力集中；必要时宜采用喷砂、抛丸等表面处理工艺，以去除氧化层、飞溅物及附着杂质，并改善表面粗糙度和外观质量。

5.3.2 电弧增材制造零件过程修正不应改变增材制造材料的冶金特性、物理条件和力学性能。

5.3.3 电弧增材制造零件过程修正之前，应对零件修复部位进行面清洁，去除氧化物和油污等处理；表面粗糙时宜采用角磨机将待修复位置打磨至光滑并采用相同工艺进行修补。

5.3.4 电弧增材制造零件过程修正之前，应评估电弧增材过程修正的可行性；对于关键重要零件，应采取预留试样性能测试等措施进行过程修正可行性评估。

5.3.5 电弧增材过程修正的当前层应通过测试试样进行专门评估。

5.4 后处理

5.4.1 电弧增材制造零件成形后，宜根据工程需求进行去应力退火处理或采用其他改善组织性能的热处理措施。零件的热处理应符合现行国家标准《增材制造 金属制件热处理工艺规范》GB/T 39247 的相关规定，并应将预留试样与零件同炉热处理。

【条文说明】

电弧增材制造零件成形后宜先进行热处理后进行零件移除，以减小零件支撑约束被切断后残余应力瞬间释放引起的局部板件翘曲或变形。

5.4.2 电弧增材制造零件从基材上移除时，应根据零件受力特征与现场条件选用电火花切割、机械加工、手工去除等不对零件和零件力学性能造成不利影响的措施。

5.4.3 电弧增材制造零件应根据表观要求采取喷砂、打磨、抛光、精磨、机械

加工、电化学腐蚀等表面处理措施。当对零件进行打磨处理时，应根据零件力学性能和壁厚要求控制打磨量。

【条文说明】

打磨主要用于去除打印件的起始/收尾瘤、表面飞溅、未熔合、微小不平整，以及为后续连接或涂装准备表面。

5.4.4 对有高精度配合要求的连接面、安装面或异形复杂轮廓，应采用数控机床等设备进行机加工。机加工前应绘制设计图纸，并应预留加工余量，加工基准应与设计基准、测量基准统一。机加工后应按照图纸对成形件的尺寸、形状、位置公差及表面粗糙度进行检验。

【条文说明】

增材打印的零件存在成形误差、表面粗糙、热处理变形，后续需要机加工（铣、磨等）获得最终尺寸与表面质量，因此机加工余量必须在工艺设计、打印路径规划阶段预留，不能打印完成后再临时考虑。

6 安装

6.1 一般规定

6.1.1 电弧增材制造钢结构施工前，应编制专项施工方案，并应经施工单位技术负责人审批和监理工程师批准。

6.1.2 电弧增材制造钢件进场时，应查验产品合格证。吊装前应清除表面杂物，并应做好安装基准标记。

6.1.3 电弧增材制造钢结构的安装方法应根据结构特点，在确保质量、安全的前提下，结合进度、经济及施工现场技术条件综合确定。

6.1.8 电弧增材制造钢结构的吊装要求，可参照现行国家行业标准 JGJ/T 395《铸钢结构技术规程》的相关规定。

6.2 组装

6.2.1 电弧增材制造钢结构组装方式应根据结构特点、设计要求和现场吊装能力等因素确定。

【条文说明】

电弧增材制造钢结构组装前，组装人员应熟悉设计图、设计深化图、加工详图、安装详图和技术文件，检查电弧增材制造钢件和相连构件的规格、尺寸、数量、外观等应符合设计要求。

6.2.2 高空组装时宜设置支撑架、千斤顶和倒链等装置，准确调整标高和轴线位置。

6.2.3 电弧增材制造钢结构组装时应预留焊接收缩量，焊接收缩量宜通过工艺试验确定。

6.2.4 电弧增材制造钢件采用螺栓、销轴连接组装时，应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的相关规定。

6.2.5 电弧增材制造钢结构组装的尺寸偏差应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 和设计文件的规定。

6.2.6 组装前应对基础与支承面进行验收，验收合格后方可开展安装作业。

6.2.7 组装过程应重点控制构件组装精度、节点连接质量，每完成一个分项工序，应及时进行验收，验收合格后方可进行下一道工序。

6.3 焊接

6.3.1 焊接所需的焊丝、焊条和焊剂等应储存在干燥、通风良好的地方，并应由专人保管。焊丝及导丝管应无油污、锈蚀。

【条文说明】

焊条、焊剂使用前应按产品说明书的要求进行烘干，低氢型焊条烘干温度应为 $350^{\circ}\text{C}\sim 380^{\circ}\text{C}$ ，保温时间应为 1.5h~2h，烘干后应缓冷放置于 $110^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$ 的保温箱；使用时应置于保温筒中；烘干后的低氢型焊条在大气中放置时间超过 4h 应重新烘干；重复烘干次数不宜超过 2 次；受潮焊条严禁使用。焊条、焊剂烘干装置及保温装置的加热、测温、控温性能应符合使用要求；CO₂ 气体保护电弧焊使用的 CO₂ 气瓶必须装有预热干燥器；CO₂ 气体纯度不应小于 99.99%

6.3.2 待焊电弧增材制造钢件表面质量表面和两侧应均匀、光洁，且应无毛刺、裂纹和其他对焊缝质量有影响的缺陷。焊缝坡口加工可采用机械加工、热切割等方法。

【条文说明】

待焊接的表面和两侧应均匀、光洁，且应无毛刺、裂纹和其他对焊缝质量有影响的缺陷。待焊接的表面及距其边缘位置 30mm~50mm 内不得有影响正常焊接和焊缝质量的氧化皮、锈蚀、油脂和水等杂质。焊缝坡口加工可采用机械加工、热切割、碳弧气刨、铲凿或打磨等方法。当采用热切割时，切割面质量应符合现行行业标准《热切割气割质量和尺寸偏差》JB/T 10045.3 的规定：缺棱为 1mm~3mm 时，应修磨平整；超过 3mm 时，应用直径不超过 3.2mm 的低氢型焊条补焊，并应修磨平整。当采用机械加工方法时，加工表面不应有台阶。施焊前，应检查焊接部位的组装和表面清理的质量，不符合要求时，应修磨补焊合格后方能施焊。坡口组装间隙超过较薄板厚度的 2 倍或大于 20mm 时，不应采用堆焊方法增加构件长度或减小组装间隙。严禁在接头坡口间隙处填塞焊条头、钢筋和铁块等杂物。待焊表面切割缺陷进行焊接修补时，应制定修补焊接工艺，并应记录存档。

6.3.3 从事电弧增材制造钢结构焊接作业人员的有关规定应按照现行国家标准《钢结构焊接规范》GB 50661 执行。

6.3.4 有条件时，电弧增材制造钢结构的焊接宜进行预热，预热温度 60~120℃。

6.3.5 增材结构焊接环境应符合下列规定：

1 焊条电弧焊和自保护药芯焊丝电弧焊，其焊接作业区最大风速不宜超过 8m/s，气体保护电弧焊不宜超过 2m/s，当超过上述范围时，应采取有效保护措施；

2 当焊接作业区的相对湿度大于 90%，焊件表面潮湿或暴露于雨、冰、雪中或存在其他不符合现行国家标准《焊接与切割安全》GB9448 的有关规定的情况，不应进行焊接操作。

3 焊接环境温度低于 0℃但不低于-10℃时，应采取加热或防护措施，应确保接头焊接处各方向不小于 2 倍板厚且不小于 100mm 内的母材温度不低于 20℃和最低预热温度中二者的较高值，且在焊接过程中不应低于这一温度；

4 焊接环境温度低于-10℃时，必须进行相应环境下的焊接工艺评定试验，并应在评定合格后再进行焊接。

6.3.6 对首次采用的电弧增材制造钢结构、焊接材料、焊接方法、接头形式、焊接位置、焊后热处理制度以及焊接工艺参数、预热和后热措施等，应在施工之前进行焊接工艺评定，并应符合现行国家标准《钢结构焊接规范》GB 50661 的规定。

6.3.7 电弧增材制造钢结构的焊接宜采用低热输入的焊接方法。

6.3.8 增材结构焊接不应产生冷裂纹。焊接用增材结构当其屈服强度小于 300N/mm²，且环境温度大于 0℃时，其最低预热温度应符合表 6.3.8 的规定。当施焊处温度低于 0℃时，应根据焊接作业环境、板厚等具体情况将表中预热温度提高，且应在焊接过程中保持最低层间温度。

表 6.3.8 焊接用增材结构预热温度

接头部位最厚板厚 t(mm)	预热温度(℃)
t≤20	-
20<t≤40	20
40<t≤60	60
60<t≤80	80
t>80	100

注：1 当采用非低氢型焊接材料或焊接方法焊接时，预热温度应比表中规定的温度提高 20℃；

2 焊接接头板厚或壁厚不同时，应按接头中较厚板或较厚壁选择最低预热温度；

3 焊接接头材质不同时，应按接头中较高强度、较高碳当量的钢材选择最低预热温度；

4 “-”表示焊接环境温度在 0℃以上时，可不采取预热措施。

6.3.9 增材件多层焊接应符合下列规定：

1 多层焊接时应连续施焊，每一焊道完成后应及时清理焊渣及表面飞溅物，发现影响焊接质量的缺陷时，应清除后方可再焊。连续焊接时，焊接道间温度应符合工艺文件要求。中断施焊时，应采取保温措施，保温效果不好时应进行后热处理，再次焊接时重新预热温度应高于初始预热温度；

2 坡口底层焊道采用焊条电弧焊时宜使用直径不大于 4mm 的焊条或采用气体保护焊，底层根部焊道的最小尺寸应适宜，但最大厚度不宜超过 6mm。

6.3.10 增材结构定位焊接应符合下列规定：

1 定位焊焊接材料的力学性能应达到正式焊缝的要求；

2 定位焊焊缝与正式焊缝应具有相同的焊接工艺和焊接质量要求；

3 定位焊焊缝厚度不应小于 3mm，且不宜超过设计焊缝厚度的 2/3，定位焊焊缝长度不应小于 40mm，间距宜为 300mm~600mm，并应填满弧坑；

4 定位焊焊接时，预热温度宜高于正式施焊预热温度 20℃~50℃。定位焊焊缝存在裂纹、气孔和夹渣等缺陷时，应完全清除。

6.3.11 焊缝表面或内部缺陷处理，应满足现行国家标准《钢结构焊接规范》GB 50661 的有关要求。

6.3.12 电弧增材制造钢件焊接时，焊接工艺和焊接顺序应使钢件的变形和收缩最小；有对称连接钢件的节点宜对称于节点轴线同时对称焊接；无对称连接钢件的节点，应先焊收缩量较大的接头，后焊收缩量较小的接头。

6.3.13 电弧增材制造钢件焊缝缺陷的返修应符合下列规定：

1 焊缝金属和母材的缺陷超过相应的质量验收标准时，可采用砂轮打磨、碳弧气刨、铲凿或机械加工等方法彻底清除；

2 经无损检测确定焊缝内部存在超标缺陷时应进行返修，返修应符合现行国家标准《钢结构焊接规范》GB50661 的规定；

3 焊缝返修的预热温度应比相同条件下正常焊接的预热温度提高 30℃~50℃，并应采用低氢型焊接材料进行焊接。同一部位 2 次返修后仍不合格时，应重新制定返修方案。

6.4 防腐防火

6.4.1 电弧增材制造钢结构在进行防腐防火之前可保留外观沉积纹理；当有特殊要求时，可通过机加工处理光滑。

6.4.2 电弧增材制造钢结构的防腐涂料和防火涂料涂装应在电弧增材制造钢件加工质量验收合格后进行。

6.4.3 电弧增材制造钢结构的防腐涂料和防火涂料涂装种类、涂装遍数和涂层厚度应满足设计要求。涂层应均匀，无明显皱皮、流坠、针眼和气泡等，不应误涂、漏涂、脱皮和返锈。

6.4.4 电弧增材制造钢结构的防腐涂料和防火涂料涂层修补应按涂装工艺分层进行，修补后的涂层应完整一致，色泽均匀，附着力良好。

6.4.5 电弧增材制造钢结构的表面处理完成到涂底漆的时间间隔不宜超过4h，在此期间表面应保持洁净，严禁沾水和油污等。

6.4.6 电弧增材制造钢件表面底漆和中间漆的漆膜不宜少于3道，且总厚度不宜小于100 μm 。

6.4.7 对于防腐要求高的电弧增材制造铸钢结构，可采用热镀锌工艺处理后，再涂刷防锈底漆。

6.4.8 对处于严重腐蚀的使用环境且涂装难以有效保护的主要承重电弧增材制造钢结构构件，可采用外包混凝土等防护方式。

6.4.9 电弧增材制造钢结构的防火可采用外敷不燃材料或喷涂防火涂料的方式。

6.4.10 电弧增材制造钢件的耐火等级和耐火极限不应低于主体结构。电弧增材制造钢结构的防火设计除满足本规程的有关要求外，尚应符合现行国家标准《建筑设计防火规范》GB50016的规定；

7 检测与验收

7.1 一般规定

7.1.1 电弧增材制造钢结构的质量验收应包括过程质量验收与成品质量验收。采用在线监测时，应对制造过程进行可视化与信息化管理。

7.1.2 当电弧增材制造钢结构遇到下列情况之一时，应对其成品或特定批次进行专项质量验收：

- 1 首件、首批或应用于重要受力部位的零件及关键节点；
- 2 零件制造过程中出现工艺参数重大偏差、设备异常或材料变更。

7.1.3 电弧增材制造结构应成批提交验收，组批规则应符合本规范的有关规定。

7.1.4 电弧增材制造交付成品应符合本规范相关技术规定，并应提交完整的制造过程记录与检验数据。

7.1.5 验收项目应包括外部质量、内部质量及力学性能。外部质量应涵盖尺寸精度、表面粗糙度及成形缺陷；内部质量应包括化学成分、显微组织、致密度及内部缺陷；力学性能应包括各向异性的力学特征。试样的取样方向、部位及方法应符合本规程有关规定。

7.2 检测监测

7.2.1 电弧增材制造过程中，应对工艺参数进行监测和记录，并应根据工程需求对工艺参数进行适当调整。

【条文说明】

电弧增材制造成形过程一般由计算机辅助完成，但在实际工程中仍允许通过手动控制或反馈控制对工艺参数进行适当调整，调整方案需由参建各方协调确认。监测的工艺参数根据实际工程需求确定，一般情况下包括电流、电压、送丝速度等电弧特性参数；增材速度、层高等运动参数；熔池形貌、层间温度、基板预热温度等热过程参数。

7.2.2 电弧增材制造过程中应进行质量检测与监测，宜对关键部位实施无损检测或过程监测，。

【条文说明】

电弧增材制造过程中应采用信息化手段实时监测钢结构的质量，以确保及时发现并控制内部缺陷。

7.2.3 电弧增材制造成形完成后，应对零件的外观缺陷、外形尺寸等进行检测验证。检测验证应满足下列要求：

- 1 应对增材制造零件的塌陷、断弧、严重飞溅等外观缺陷进行检测；
- 2 应对零件的外形尺寸、形状与位置公差、表面状态等几何形貌进行检验；
- 3 宜采用三维激光扫描、摄影测量等测量技术对零件进行几何检测，并将实测数据与设计三维模型进行比对，生成检验报告。

【条文说明】

零件的外形尺寸检测一般包括零件的总长、总宽、总高、截面轮廓尺寸等；形状与位置公差检测一般包括零件的直线度、平面度、圆度、垂直度等；表面状态检测一般包括表面波纹、未熔合等。

7.2.4 电弧增材制造零件的质量检测应分为表面质量验收和内部质量验收。外部质量验收应包括整体尺寸公差、表面质量、成形一致性等；内部质量验收应包括内部缺陷检测及残余应力评估等。

【条文说明】

表面质量重点检查表面波纹度、层间台阶效应、焊道搭接处的凹陷凸起、偶然性缺陷（如飞溅粘附、弧坑），并目视或借助样板检查是否存在影响后续装配或疲劳性能的尖锐凸起或深沟。

成形一致性重点检查壁厚的均匀性、直壁的垂直度、悬垂结构的塌陷或变形；检测时应在多个截面进行壁厚测量，检查对称结构的对称性。

内部缺陷检测重点检测最为常见的气孔、层间或道间未熔合、夹渣、冷裂或热裂产生的裂纹；检测可采用针对内部未熔合、夹渣等面状缺陷的超声检测，针对气孔、夹渣等体积型缺陷敏感的射线检测，可获得内部缺陷的三维形貌、位置和尺寸的工业 CT 等方法。验收时需基于电弧增材制造钢件的受力分析、缺陷统计数据和疲劳试验，制定适用于增材制造的专用缺陷验收等级。通常对未熔合和裂纹要求零容忍，对分散性气孔的尺寸和密度有一定允许范围。

残余应力评估重点对电弧增材制造过程高热输入和快速冷却会产生巨大的残余应力进行评估，这是导致变形甚至延迟裂纹的根本原因。评估可采用破坏性的钻孔法、半破坏性的盲孔法、无损的 X 射线衍射法和中子衍射等方法。

7.2.5 当采用无损检测手段进行零件质量检测时，可采用磁粉或渗透进行表面质量检测，可采用超声波检测或射线检测进行内部质量检测。

7.2.6 电弧增材制造零件应进行化学成分检测，检测应满足下列要求：

1 化学分析取样方法和化学成分允许偏差应按现行国家标准《钢和铁化学成分测定用试样的取样和制样方法》GB/T 20066 和《钢的成品化学成分允许偏差》GB/T 222 执行；

2 化学分析方法应按现行国家标准《钢铁及合金化学分析方法》GB/T223 系列标准或《碳素钢和中低合金钢多元素含量的测定火花放电原子发射光谱法》GB/T 4336 执行。

7.2.7 电弧增材制造钢件的机械性能检测应符合现行国家标准《增材制造 金属制件机械性能评价通则》GB/T 39254 的规定：

7.2.8 电弧增材制造钢件的主要特性和测试方法尚应符合现行国家标准《增材制造 主要特性和测试方法 零件和粉末原材料》GB/T 35022 的规定。

7.3 验收

7.3.1 电弧增材制造钢结构的验收应符合现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB50300 及相关标准的规定。当国家现行标准对工程中的验收项目未作具体规定时，应由建设单位组织设计、施工、监理等相关单位制定验收要求。

7.3.2 同一厂家生产的同批材料、电弧增材制造零，用于同期施工且属于同一工程项目的多个单位工程，可合并进行进场验收。

7.3.3 电弧增材制造钢件应符合国家现行有关标准的规定，并应具有产品标准、出厂检验合格证、质量保证书和使用说明文件书。

【条文说明】

电弧增材制造钢件的验收材料一般包括原材料产品质量证明书、结构试验报告、设计和深化图、材料性能报告、熔池状态报告、超声检测报告、X射线无损探伤报告、随炉试样块探伤检测报告、三维扫描报告、热应力处理报告（合格证）、焊接工艺检测（性能试验）报告、化学成分报告、金相检测报告、产品合格证等；有特殊要求时，可包含冲击性能试验报告、疲劳性能试验报告等。

7.3.4 电弧增材制造钢件的出厂验收，应由增材制造厂家按技术质量监督部门的要求进行。

7.3.5 电弧增材制造钢件安装前对基础与支承面的验收应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的规定。

【条文说明】

基础与支承面的验收一般包括基础定位轴线、标高、支承面尺寸及地脚螺栓位置、精度。

7.3.6 电弧增材制造钢件现场安装精度验收应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的规定。

【条文说明】

钢件现场安装精度验收一般包括钢柱、钢梁、钢桁架安装精度及整体结构安装精度。

7.3.7 钢结构隐蔽工程应在覆盖前组织验收，并应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的有关规定。电弧增材钢件与基础的连接节点、现场拼接焊缝的背面清根和补焊部位、高强螺栓连接节点的摩擦面、构件涂装前的表面处理部位等隐蔽部位，应在后续加工、涂装覆盖前完成验收。

7.3.8 电弧增材制造钢件现场安装全部完成后，应随机抽检节点连接质量，包括焊接节点焊缝质量、高强螺栓安装质量，抽检比例不应低于节点总数的 5%，且不少于 3 个节点，每个抽检节点的焊缝外观质量、螺栓拧紧质量应符合《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的规定，抽检不合格时，应扩大抽检比例至 20%，仍有不合格的，应全数检查并整改。

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 GB/T 222 钢的成品化学成分允许偏差
- 2 GB/T 223 钢铁及合金化学分析方法
- 3 JGJ/T 395 铸钢结构技术规程
- 4 GB/T 983 不锈钢焊条
- 5 GB/T 13452.2 色漆和清漆 漆膜厚度的测定
- 6 GB/T 4336 碳素钢和中低合金钢多元素含量的测定火花放电原子发射光谱法
- 7 GB/T 5117 非合金钢及细晶粒钢焊条
- 8 GB/T 5118 热强钢焊条
- 9 GB/T 5293 埋弧焊用碳素钢焊丝和焊剂
- 10 GB/T 8110 熔化极气体保护电弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝
- 11 GB 9448 焊接与切割安全
- 12 GB/T 10045 碳钢药芯焊丝
- 13 GB/T 12470 埋弧焊用低合金钢焊丝和焊剂
- 14 GB/T 14957 熔化焊用钢丝
- 15 GB/T 17493 热强钢药芯焊丝
- 16 GB/T 17853 不锈钢药芯焊丝
- 17 GB/T 17854 埋弧焊用不锈钢焊丝和焊剂
- 18 GB/T 20066 钢和铁化学成分测定用试样的取样和制样方法
- 19 GB/T 29713 不锈钢焊丝和焊带
- 20 GB/T 35022 增材制造 主要特性和测试方法 零件和粉末原材料
- 21 GB/T 35351 增材制造 术语
- 22 GB/T 37698 增材制造 设计 要求、指南和建议
- 23 GB/T 39253 增材制造 金属材料定向能量沉积工艺规范
- 24 GB/T 39254 增材制造金属制件机械性能评价通则
- 25 GB/T 39247 增材制造 金属制件热处理工艺规范
- 26 GB/T 46623 金属增材制造 成形件机械性能与其取样方向、位置的相关性
- 27 GB 50016 建筑设计防火规范

- 28 GB 50017 钢结构设计标准
- 29 GB 50019 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范
- 30 GB 50205 钢结构工程施工质量验收规范
- 31 GB 50661 钢结构焊接规范
- 32 GB 55006 钢结构通用规范
- 33 CECS 410 不锈钢结构技术规程
- 34 T/ZCEAS xxxx 电弧增材制造钢材力学性能及试验方法标准