

浙江省土木建筑学会团体标准

T/ZCEAS xxxx—2026

电弧增材制造钢材力学性能及试验方法标准

Mechanical property and test method standards of wire-arc
additively manufactured steel materials

(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

电弧增材制造钢材力学性能及试验方法标准

Mechanical property and test method standards of wire-arc additively
manufactured steel materials

T/ZCEAS xxxx—20xx

主编单位：绍兴大学

浙江省建筑设计研究院有限公司

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<电弧增材制造钢材力学性能及试验方法标准>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、力学性能与本构模型、电弧增材制造钢材标准试件制作、电弧增材制造钢材标准试件几何特性测量和电弧增材制造钢材物理力学性能试验。

本规程由浙江省土木建筑学会负责管理，绍兴大学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（主编单位地址），邮编：（主编单位地址），（主编单位邮箱）），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： 绍兴大学
浙江省建筑设计研究院有限公司

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	原材料性能要求	5
3.3	随炉试样要求	5
3.4	试验要求	5
3.5	钢材产品技术数据集	6
4	力学性能与本构模型	7
4.1	一般规定	7
4.2	力学性能指标	7
4.3	电弧增材制造不锈钢本构模型	8
4.4	电弧增材制造碳钢本构模型	9
5	电弧增材制造钢材标准试件制作	13
5.1	一般规定	13
5.2	标准试件取样试验	13
5.3	工艺参数选取	14
5.4	标准试件打印制作试验	15
5.5	标准试件后处理试验	15
6	电弧增材制造钢材标准试件几何特性测量	17
6.1	一般规定	17
6.2	几何形貌测定及验证试验	17
6.3	标准试件取样间距测定试验	18
6.4	标准试件基本几何参数测定	18
6.5	标准试件几何评估测定	19
7	电弧增材制造钢材物理力学性能试验	21
7.1	一般规定	21
7.2	应力-应变全曲线测定试验	21
7.3	力学性能参数指标及测定试验	24
7.4	断口显微特征试验	27
7.5	微观金相组织及扫描电镜试验	30
7.6	化学成分试验	33
7.7	光谱分析试验	36
	本规程用词说明	41
	引用标准名录	41

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	Raw Material Property Requirements	5
3.3	Furnace-Test Sample Requirements	5
3.4	Test Requirements	5
3.5	Technical Data Set for Steel Products	6
4	Mechanical Properties and Constitutive Models	7
4.1	General Requirements	7
4.2	Mechanical Performance Indicators	7
4.3	Constitutive Model for WAAM Stainless Steel	8
4.4	Constitutive Model for WAAM Carbon Steel	9
5	Production of Standard Steel Specimens by WAAM	13
5.1	General Requirements	13
5.2	Sampling Test of Standard Specimens	13
5.3	Selection of Process Parameters	14
5.4	Printing and Manufacturing Test of Standard Specimens	15
5.5	Post-processing Test of Standard Specimens	15
6	Geometric Characteristics Measurement of Standard Steel Specimens by WAAM	17
6.1	General Requirements	17
6.2	Determination and Verification of Geometric Morphology	17
6.3	Determination of Sampling Spacing for Standard Specimens	18
6.4	Determination of Basic Geometric Parameters of Standard Specimens	18
6.5	Determination of Geometric Evaluation of Standard Specimens	19
7	Physical and Mechanical Performance Tests of WAAM Steel	21
7.1	General Requirements	21
7.2	Stress-Strain Full Curve Measurement Test	21
7.3	Mechanical Performance Parameter Indicators and Measurement Test	24
7.4	Fracture Microscopic Characteristics Test	27
7.5	Microscopic Metallographic Structure and Scanning Electron Microscopy Test	30
7.6	Chemical Composition Test	33
7.7	Spectral Analysis Test	36
	Explanation of Wording in This Specification	41
	List of Quoted Standards	41

1 总 则

1.0.1 为在工程设计中合理应用电弧增材制造钢材的力学性能，规范电弧增材制造钢材的试验方法，做到安全适用、技术先进、经济合理、方便设计施工，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于各类工程中电弧增材制造成型的不锈钢、碳钢的材料力学性能指标和本构模型、标准试件制作、几何特性测量及物理力学性能试验。

1.0.3 电弧增材制造钢材的力学性能与试验方法，除应执行本标准外，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 arc additively manufacturing

利用电弧作为热源熔化金属丝材，并通过逐层堆积方式来实现金属零件的快速成型。

2.1.2 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。

2.1.3 各向异性 anisotropy

材料的物理、化学性质随方向改变呈现差异的特性，与各向同性相对。

2.1.4 单调拉伸 monotonic stretching

试样仅沿单一轴向施加持续增大的拉力，直至屈服、颈缩或断裂的过程。

2.1.5 倾斜屈服平台 inclined yield plateau

应力-应变曲线中出现塑性应变急剧增加而应力保持微小增幅的倾斜段。

2.1.6 不确定度 uncertainty

与测量结果相联系的定量说明测量结果质量的非负指标。

2.1.7 几何形貌 geometric morphology

试件表面的几何特征或空间形态。

2.1.8 工艺参数 process parameter

完成某项工艺过程中需要选用或控制的基础数据或变量。

2.1.9 机加工态 machined state

打印成形后表面采用机加工光滑处理状态。

2.1.10 成形态试件 as-built state

直接打印成形后表面未做光滑处理状态。

2.1.11 构建方向 build orientation

零件在打印平台上的空间摆放姿态。

2.2 符号

2.2.1 材料性能

f	应力
ε	应变
E	杨氏模量
f_y	屈服强度
ε_y	f_y 对应的应变值
$f_{0.2}$	0.2%规定塑性延伸强度
$\varepsilon_{0.2}$	$f_{0.2}$ 对应的应变值
f_u	抗拉强度
ε_u	f_u 对应的应变值
$E_{0.2}$	对应于 $\varepsilon_{0.2}$ 的切线模量
$f_{0.04}$	0.04%规定塑性延伸强度
θ	试件提取角度, 按弧度制
ε_{sh}	硬化起始应变
E_{sh}	对应于 ε_{sh} 的硬化模量
E_p	倾斜屈服平台的硬化模量
$P_{deposit}$	沉积方向测定的性能参数值
P_{scan}	扫描方向测定的性能参数值

2.2.2 几何参数

α	空间方位角
β	俯仰角
X_i	试件的测量尺寸
$\bar{X}$	试件测量尺寸的平均值
n	测量尺寸数量
X_0	试件的设计尺寸
Z_{peak}	某一个局部峰顶相对于参考平均面的高度
Z_{pit}	局部凹坑或谷底相对于参考平均面的深度的绝对值
n_1	测量范围所得数据量
Z_i	第 i 个采样点相对于参考平均面的高度
Δa	平均初始裂纹长度
a	平均最终裂纹长度
a_0	裂纹扩展量
$\Delta a_{SZW,L}$	第 L 个测量位置的伸长区宽度局部平均值

$\Delta a_{SZW,L,i}$ —— 第 L 个测量位置第 i 次测得的伸长区宽度
 Δa_{SZW} —— 各测量位置伸长区宽度的总体平均值，即平均临界伸长区宽度
 k —— 单个测量位置的测量次数
 n_0 —— 测量位置数量
 L —— 测量位置序号
 i —— 同一测量位置的测量序号

2.2.3 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
 C_1 —— 材料参数
 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 —— 应力-应变曲线系数
 SD —— 标准差
 SE —— 标准误差

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 电弧增材制造钢材结构设计应优化选择合适的结构体系、构件类别、节点形式、连接构造、材料、制作工艺、防火和耐腐蚀要求。

3.2 原材料性能要求

3.2.1 电弧增材制造钢材原材料的性能指标应包括其在原始态、增材态、热处理态和机加工态下的性能指标，并应注明各项性能指标对应材料的取样方向。

3.2.2 当电弧增材制造钢材服役于动态载荷、腐蚀、高温、高压等工况时，应补充定义疲劳、耐腐蚀、高温力学性能等针对性性能指标。

3.3 随炉试样要求

3.3.1 电弧增材制造零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。

3.3.2 电弧增材制造零件随炉试样制备工艺参数和热历程应与零件保持一致。试样的形状和尺寸应满足检测取样要求。

3.3.3 当电弧增材制造钢结构基材为零件一部分时，应在基板与零件熔合界面区设计随炉试样，并应进行熔合界面性能验证。

3.4 试验要求

3.4.1 电弧增材制造钢材的力学性能试验时，宜从按本标准第 3.3 节要求制备的随炉试样上截取试样进行试验。

3.4.2 当无法制备随炉试样时，可采用与零件同批次、同工艺参数、同后处理状态、同步制造的独立见证试样进行替代。

3.4.3 电弧增材制造钢材应根据工程需求进行室温拉伸试验、弯曲试验、夏比 V 型缺口冲击试验、硬度试验等，试验应满足本规程第 4 章的有关规定。

3.5 钢材产品技术数据集

3.5.1 电弧增材制造钢材产品技术数据集应对包含下列内容：

- 1** 零件三维模型和二维图纸，应包括尺寸、公差、粗糙度等要求；
- 2** 零件材料规格要求和性能值要求；
- 3** 电弧增材制造工艺；
- 4** 零件后处理要求，包括热处理方法、表面精加工方法和热加工方法等；
- 5** 检验要求，包括尺寸检验要求、性能检验要求、无损检验要求和表面检验要求等。

4 力学性能与本构模型

4.1 一般规定

4.1.1 电弧增材制造钢材的力学性能与本构模型应通过试件试验确定。试件的制作应满足本标准第 5 章的要求，几何尺寸应满足本标准第 6 章的要求，力学性能试验应满足本标准第 7 章的要求。

4.1.2 电弧增材制造钢材的力学性能指标应考虑电弧增材制造工艺的各向异性特征，并应注明试件的取样方向。

【条文说明】试样取样方向信息宜参照 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》编制。

4.1.3 电弧增材制造钢材的本构模型应适用于构件与节点的结构弹性分析、弹塑性分析和极限状态设计。

4.1.4 当采用数值模拟方法进行结构分析时，电弧增材制造钢材应选用合适的本构模型，模型输入参数应基于实测数据标定。

4.2 力学性能指标

4.2.1 电弧增材制造钢材的主要材料力学性能指标应按表 4.2.1 采用。

表 4.2.1 电弧增材制造钢材力学性能指标

类别	具体指标	单位	试验方法对应章节	参考规范
拉伸性能	抗拉强度	MPa	7.2	GB/T 228
	屈服强度	MPa		
	规定塑性延伸强度	MPa		
	规定总延伸强度	MPa		
	断后伸长率	%		
	断面收缩率	%		
刚度	杨氏模量	MPa	7.2	GB/T 22315
	弦线模量	MPa		
	切线模量	MPa		
	泊松比	—		
冲击性能	冲击吸收能量	J	7.3	GB/T 229

弯曲性能	抗弯强度	MPa	7.3	YB/T 5349
	挠度	mm		
	规定塑性弯曲应变	%		
疲劳性能	疲劳寿命	—	7.3	GB/T 3075
	疲劳强度	MPa		GB/T 26077
硬度	布氏硬度	—	7.3	GB/T 231.1
	洛氏硬度	—		GB/T 230.1
	维氏硬度	—		GB/T 4340.1

【条文说明】力学性能指标引自 GB/T 39254-2020《增材制造 金属制件机械性能评价通则》。

4.3 电弧增材制造不锈钢本构模型

4.3.1 室温单调拉伸条件下，电弧增材制造不锈钢的单调拉伸应力-应变曲线呈连续屈服特征，无明显屈服平台，本构模型宜采用两阶段 Ramberg-Osgood 模型，可按式（4.3.1）计算。

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{f}{E} + 0.002 \left(\frac{f}{f_y} \right)^n, & f \leq f_y \\ \frac{f-f_y}{E_{0.2}} + \left(\varepsilon_u - \varepsilon_{0.2} - \frac{f_u-f_y}{E_{0.2}} \right) \left(\frac{f-f_y}{f_u-f_y} \right)^m + \varepsilon_{0.2}, & f_y < f \leq f_u \end{cases} \quad (4.3.1)$$

式中：\$f\$ ——应力（Pa）；

\$\varepsilon\$ ——应变；

\$E\$ ——杨氏模量（Pa）；

\$f_y\$ ——屈服强度，此处取 0.2%规定塑性延伸强度\$f_{0.2}\$替代（Pa）；

\$\varepsilon_{0.2}\$ ——\$f_{0.2}\$对应的应变值；

\$f_u\$ ——抗拉强度（Pa）；

\$\varepsilon_u\$ ——\$f_u\$对应的应变值；

\$E_{0.2}\$ ——对应于\$\varepsilon_{0.2}\$的切线模量（Pa），定义为\$E_{0.2} = \frac{E}{1+0.002nE/f_y}\$；

\$n\$ ——第一阶段应变硬化指数；

\$m\$ ——第二阶段应变硬化指数。

4.3.2 已知 0.04%规定塑性延伸强度\$f_{0.04}\$时，本标准第 4.3.1 条中的 \$n\$ 可按式（4.3.2-1）计算，\$m\$ 可按式（4.3.2-2）计算。

$$n = \frac{\ln(5)}{\ln\left(\frac{f_y}{f_{0.04}}\right)} \quad (4.3.2-1)$$

$$m = 1 + 2.36 \frac{f_y}{f_u} \quad (4.3.2-2)$$

式中: $f_{0.04}$ —— 0.04%规定塑性延伸强度;

4.3.3 电弧增材制造不锈钢极限抗拉强度和极限拉应变 f_u, ε_u 可分别按式(4.3.3-1)、式(4.3.3-1)计算。

$$\frac{f_u}{f_y} = 1 + \left(\frac{273}{f_y}\right)^{1.94} \quad (4.3.3-1)$$

$$\varepsilon_u = \begin{cases} \left(0.804 + 0.015\theta - 5.333\frac{\theta^2}{\pi^2}\right)\left(1 - \frac{f_y}{f_u}\right) & , \quad \text{机加工态试件} \\ \left(0.655 + 0.015\theta - 5.712\frac{\theta^2}{\pi^2}\right)\left(1 - \frac{f_y}{f_u}\right) & , \quad \text{成形态试件} \end{cases} \quad (4.3.3-2)$$

式中: θ —— 试件提取角度, 按弧度制。

4.3.4 在缺乏实测数据时, 电弧增材制造不锈钢材料的屈服强度 f_y 、极限抗拉强度 f_u 、第一阶段应变硬化指数 n 、第二阶段应变硬化指数 m , 取值可按表4.3.4-1取用, 杨氏模量 E 的取值可按表4.3.4-2采用。

表 4.3.4-1 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				成形态试件			
	$f_y(MPa)$	$f_u(MPa)$	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 4.3.4-2 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	$E(GPa)$
$0^\circ, 90^\circ$	134
$30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$	198

【条文说明】该节引自发表论文《Stress-strain model for wire arc additively manufactured stainless steels》, 试件提取角度指试件提取方向与沉积方向之间的夹角。

4.4 电弧增材制造碳钢本构模型

4.4.1 屈服强度小于 500MPa 时, 电弧增材制造碳钢的应力-应变曲线呈不连

续屈服，本构模型采应用四线性模型或双线性和非线性硬化混合模型，并按下列公式计算：

1 机加工试件和提取角度为 0°的成形态试件

应力-应变曲线呈现平坦屈服平台，本构模型可按式(4.4.1-1)或式(4.4.1-2)计算。

1) 四线性模型

$$f = \begin{cases} E\varepsilon & , \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y & , \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh} \\ f_y + E_{sh}(\varepsilon - \varepsilon_{sh}) & , \varepsilon_{sh} < \varepsilon \leq C_1 \varepsilon_u \\ f_{C_1 \varepsilon_u} + \frac{f_u - f_{C_1 \varepsilon_u}}{\varepsilon_u - C_1 \varepsilon_u}(\varepsilon - C_1 \varepsilon_u) & , C_1 \varepsilon_u < \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (4.4.1-1)$$

式中： f_y ——屈服强度 (Pa)；

ε_y —— f_y 对应的应变值；

f_u ——抗拉强度 (Pa)，按式 (4.4.2-1) 计算；

ε_u —— f_u 对应的应变值，按式 (4.4.2-2) 计算；

ε_{sh} ——硬化起始应变，按式 (4.4.2-3) 计算；

E_{sh} ——对应于 ε_{sh} 的硬化模量 (Pa)，按式 (4.4.2-4) 计算；

C_1 ——材料参数，按式 (4.4.2-5) 计算。

2) 双线性和非线性硬化混合模型

$$f = \begin{cases} E\varepsilon & , \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y & , \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh} \\ f_y + (f_u - f_y) \times \left\{ K_1 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right) + \frac{K_2 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right)}{\left[1 + K_3 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right)^{K_4} \right]^{\frac{1}{K_4}}} \right\} & , \varepsilon_{sh} < \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (4.4.1-2)$$

式中： K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 —— 应力-应变曲线系数，可基于实测实际应力-应变曲线应变硬化 ε_{sh} 以外的数据，采用普通最小二乘法回归分析确定。

2 提取角度不为 0°的成形态试件

应力-应变曲线呈现倾斜屈服平台，本构模型可按式(4.4.1-3)或式(4.4.1-4)计算。

1) 四线性模型

$$f = \begin{cases} E\varepsilon & , \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y + E_p(\varepsilon - \varepsilon_y) & , \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh} \\ f_y + E_{sh}(\varepsilon - \varepsilon_{sh}) & , \varepsilon_{sh} < \varepsilon \leq C_1 \varepsilon_u \\ f_{C_1 \varepsilon_u} + \frac{f_u - f_{C_1 \varepsilon_u}}{\varepsilon_u - C_1 \varepsilon_u}(\varepsilon - C_1 \varepsilon_u) & , C_1 \varepsilon_u < \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (4.4.1-3)$$

2) 双线性和非线性硬化混合模型

$$f = \begin{cases} E\varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y + E_p(\varepsilon - \varepsilon_y), & \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh} \\ f_y + (f_u - f_y) \times \left\{ K_1 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right) + \frac{K_2 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right)}{\left[1 + K_3 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right)^{K_4} \right]^{\frac{1}{K_4}}} \right\}, & \varepsilon_{sh} < \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (4.4.1-4)$$

式中： E_p ——倾斜屈服平台的硬化模量（Pa），按式（4.4.3-6）计算。

4.4.2 电弧增材制造碳钢的极限抗拉强度 f_u ，极限拉应变 ε_u ，硬化起始应变 ε_{sh} ，材料参数 C_1 ，可按下列各式计算：

$$\frac{f_u}{f_y} = 1 + \left(\frac{150}{f_y} \right)^{1.3} \quad (4.4.2-1)$$

$$\varepsilon_u = \begin{cases} \left(0.75 - \frac{0.3\theta}{\pi} \right) \left(1 - \frac{f_y}{f_u} \right), & \text{机加工态试件} \\ \left(0.7 - \frac{0.5\theta}{\pi} \right) \left(1 - \frac{f_y}{f_u} \right), & \text{成型态试件} \end{cases} \quad (4.4.2-2)$$

$$\varepsilon_{sh} = \begin{cases} 0.1 \frac{f_y}{f_u} - 0.045, & \text{当 } 0.015 \leq \varepsilon_{sh} \leq 0.03, \text{ 机加工态试件} \\ 0.1 \frac{f_y}{f_u} - 0.051, & \text{当 } 0.015 \leq \varepsilon_{sh} \leq 0.03, \text{ 成型态试件} \end{cases} \quad (4.4.2-3)$$

$$E_{sh} = \begin{cases} \frac{f_u - f_y}{0.4(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}, & \text{平坦屈服平台} \\ \frac{f_u - f_y}{0.5(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}, & \text{倾斜屈服平台} \end{cases} \quad (4.4.2-4)$$

$$C_1 = \frac{\varepsilon_{sh} + 0.3(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}{\varepsilon_u} \quad (4.4.2-5)$$

$$E_p = \begin{cases} 0, & \text{平坦屈服平台} \\ 0.007E, & \text{倾斜屈服平台} \end{cases} \quad (4.4.2-6)$$

4.4.3 屈服强度大于 500MPa 时，电弧增材制造碳钢的应力-应变曲线呈连续屈服特征，无明显屈服平台，本构模型应采用两阶段 Ramberg-Osgood 模型，可按式（4.4.3）计算。

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{f}{E} + 0.002 \left(\frac{f}{f_y} \right)^n, & f \leq f_y \\ \frac{f - f_y}{E_{0.2}} + \left(\varepsilon_u - \varepsilon_{0.2} - \frac{f_u - f_y}{E_{0.2}} \right) \left(\frac{f - f_y}{f_u - f_y} \right)^m + \varepsilon_{0.2}, & f_y < f \leq f_u \end{cases} \quad (4.4.3)$$

式中： f_y ——屈服强度，此处取 0.2%规定塑性延伸强度 $f_{0.2}$ 替代（Pa）。

【条文说明】

电弧增材制造碳钢的单调拉伸应力-应变曲线在不同屈服强度范围、不同试件提取角度和不同表面加工状态下呈不同特征，使用本构模型时应按屈服强度选择相应的本构模型。

4.4.4 已知 0.04%规定塑性延伸强度 $f_{0.04}$ 时，第 4.4.3 条中的 n 可按式（4.4.4-1）

计算， m 可按式（4.4.4-2）计算。

$$n = \frac{\ln(5)}{\ln\left(\frac{f_y}{f_{0.04}}\right)} \quad (4.4.4-1)$$

$$m = \begin{cases} 1 + 1.4 \frac{f_y}{f_u} & , \text{机加工态试件} \\ 1 + 1.8 \frac{f_y}{f_u} & , \text{成形态试件} \end{cases} \quad (4.4.4-2)$$

4.4.5 在缺乏实测数据时，机加工态试件、成形态试件的屈服应力 f_y ，极限抗拉强度 f_u 的平均值、特征值的取值可按表 4.4.5-1 采用，样式模量 E ，第一阶段应变硬化指数 n 、第二阶段应变硬化指数 m 可按表 4.4.5-2 采用。

表 4.4.5-1 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（°）	机加工态试件				成形态试件			
		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 4.4.5-2 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
成形态	202	15.2	2.7
机加工态	192	14.9	2.3

【条文说明】该节引自发表论文《Tensile stress-strain models for wire and arc additive manufacturing of carbon steels》

5 电弧增材制造钢材标准试件制作

5.1 一般规定

5.1.1 打印制作及机加工提取标准试件的全过程，不应改变电弧增材制造钢材的固有力学性能与微观组织。

5.1.2 试件取样位置和试样制备的基本原则应符合现行国家标准《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》GB/T 2975 的有关规定。

5.1.3 电弧增材制造钢材的打印环境温度、湿度控制，以及焊丝（母材）和保护气体的状态应与实际工程构件的成形条件保持一致，并应建立完整的试件工艺台账。

5.2 标准试件取样试验

5.2.1 电弧增材制造钢材的力学性能取样应基于打印坐标系明确标记方向；可定义焊枪行进（扫描）方向为 X 向，成形高度（沉积）方向为 Z 向，垂直于 X 和 Z 向的横向为 Y 向（图 5.2.1）。

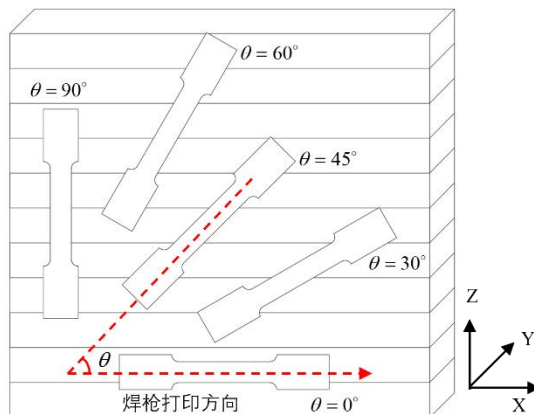


图 5.2.1 试样取样方向示意

5.2.2 电弧增材制造钢材拉伸及相关力学性能试件的取样角度（试件纵轴与焊枪行进方向 X 轴的夹角）应包含 0° ， 45° 和 90° 三个基础方向。

【条文说明】

为准确评估电弧增材制造钢材的力学各向异性特性，宜沿 0° 、 45° 、 90° 三个典型方向取样；在基础取样角度之外，为建立更为精确的材料各向异性屈服准则或理论本构模型，可增加 60° 和 75° 等辅助取样角度进行加密试验。工程应用中存在其他典型受力方向时，也可增设相应角度的试样。

5.2.3 当进行三维各向异性本构模型验证时，可采用空间斜向取样。试件的轴线方向应通过空间方位角 α 和俯仰角 β 两个维度进行定义； α 和 β 宜各取 0° ， 45° 和 90° 三个角度进行试样提取。

【条文说明】

方位角 α 是指试件轴线在 XY 平面内的投影与 X 轴的夹角；俯仰角 β 是指试件轴线与 XY 平面（基板平面）的夹角。

5.2.4 试件的有效平行长度（ L_c ）及标距段应避开打印起弧点、收弧点以及基板热影响区。试件取样底端距成形基板上表面的距离不宜小于 20 mm，边缘距成形体外侧面的距离不宜小于 5 mm。

5.2.5 电弧增材制造试件宜采用机械加工的圆形截面或矩形截面比例试样，试件的形状和尺寸应符合现行国家标准《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》GB/T 228.1 的有关规定。

【条文说明】

由于电弧增材制造试件通常由实体毛坯机械加工提取，推荐采用机械加工的圆形截面或矩形截面比例试样。

5.2.6 试件测试段的有效截面内至少包含 3~5 个完整的沉积层。实体毛坯厚度 $\geq 3\text{mm}$ 时，宜取加工厚度不小于 3 mm 的矩形比例试样，或直径不小于 5 mm 的圆柱形比例试样。

【条文说明】

考虑到电弧增材制造特有的周期性热循环和层带结构，试件测试段的特征尺寸（圆截面直径或矩形截面厚度/宽度）应足够大，以确保其有效截面内至少包含 3~5 个完整的沉积层，以消除单一局部组织的尺寸效应，真实反映材料宏观力学性能的体积平均响应。

5.3 工艺参数选取

5.3.1 试件打印工艺参数应能保证成形试件的微观组织稳定性与宏观致密度，且应与实际结构构件的打印参数严格一致。

5.3.2 试件打印工艺参数应包括焊接电流、电弧电压、送丝速度、焊枪行进速度、道间距以及单层沉积厚度等。

5.3.3 试件打印时应严格记录并规范综合热输入量及层间温度，并应设置最高与最低层间温度阈值。

【条文说明】

电弧增材逐层沉积过程伴随连续热循环。若层间温度过高，已沉积层冷却速率偏低，晶粒粗化；若层间温度过低，熔池冷却速率骤增，易形成淬硬组织。因此需限定层间温度上下阈值，使构件全高度范围内冷却速率保持稳定，抑制沿 Z 向产生明显组织突变。

5.4 标准试件打印制作试验

5.4.1 试件打印前应对试件毛坯的扫描路径进行规划。打印路径规划所选用的扫描方式应与零件应用场景保持一致，并应采用多角度取样反应不同路径对材料各向异性的影响。

5.4.2 打印试件毛坯设计时，应计入电弧增材制造成形结构表面波纹度对构件尺寸的影响。毛坯尺寸应大于机加工尺寸，单侧预留机加工余量应大于表面波谷的最大深度，且不宜小于 3mm~5mm。

【条文说明】

单侧预留的机械加工余量必须大于表面波谷的最大深度，以确保机加工后试件平行长度区内无打印原始凹陷缺陷。

5.4.3 打印试件取样前宜先对试件进行热处理。当在热处理之前取样时，应在报告中予以注明。

【条文说明】

试件的取样（粗加工）通常在热处理之后进行，以确保试件在与实际结构相同的残余应力场状态下经历热循环；若先切割后热处理，应在报告中特别说明，因其边界条件的改变可能导致组织性能与实际构件存在偏差。

5.5 标准试件后处理试验

5.5.1 试件应采用线切割、数控铣削等冷加工方式从成形毛坯上切取，加工过程应采取充分的冷却措施，并应控制加工进刀量。严禁采用火焰切割。

【条文说明】

加工进刀量过大导致试件表面产生二次热影响区及加工硬化。

5.5.2 试件应分别采用表面光滑与不光滑两种方式处理后进行拉伸试验。光滑处理试件的测试段及过渡圆弧应经精细磨平，彻底去除表面波纹及氧化皮；不光滑处理试件的表面粗糙度应满足试验规范要求。

【条文说明】

不光滑处理的试件，保留了成形工艺的原始表面状态。因此，需要对试件的

表面原始凹凸幅度进行控制，以确保原始横截面积测量的准确性；另一方面，需要排除深划痕、凹坑等异常缺陷，防止其引发非材料本征的早期应力集中断裂，确保试验结果有效。

5.5.3 试件经机加工去应力后出现微小弯曲变形、直线度偏差时，可采用机械冷加工方式进行精细找平；找平后试件夹持端与测试段的同轴度应符合试验规范的规定

【条文说明】

试件经机加工去应力后易产生微小弯曲变形，导致直线度偏差。本条限定采用机械冷加工方式精细找平，避免引入二次热影响区及加工硬化，保证材料本征性能；同时确保试件同轴度，防止拉伸试验偏心受力，保障试验结果准确。

5.5.4 试件在表面光滑处理及整体找平过程中，表面若显露微孔洞、未熔合等内部缺陷，严禁采用焊补、表面填缝等任何方式掩盖；整体找平后试件的截面尺寸应满足现行国家标准《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》GB/T 228.1 的有关要求，测试段截面尺寸应均匀一致。

6 电弧增材制造钢材标准试件几何特性测量

6.1 一般规定

6.1.1 电弧增材制造钢材标准试件的沉积态下的几何特性测量应满足本章要求。

6.1.2 电弧增材制造钢材标准试件测量前应清除试件表面附着物，但不应用改变原始形貌的处理方式。

6.1.3 电弧增材制造钢材试件宜采用非接触式测量方法，并应在有效检定期内。

6.2 几何形貌测定及验证试验

6.2.1 成形态试件的几何测量应满足下列要求：

- 1 测试件应在冷却至室温后、未经任何后处理前进行测量；
- 2 测量前，应清除其表面残留的浮尘及焊渣；
- 3 若测试件与成形平台相连，宜先完成测量再将其分离；如确需先移除后测量，应在报告中注明分离操作及其对结果的可能影响；
- 4 若测试件需进行后处理，应详细记录每一道工序，并分别测量后处理前后的测试件，将两组数据一并存档。

6.2.2 成形态试件的几何测量方案应满足下列要求：

- 1 测量方案应综合考虑测量装置、被测特征、测点数量及分布等因素；
- 2 粗糙度测量应确定取样长度等相关参数；
- 3 应针对不同零件及被测特征选用适宜的测量方案；
- 4 测量方案应选用测量不确定度最小的方案。

6.2.3 成形态试件的几何测量仪器的分辨率应不低于 0.02 mm；宜采用非接触式三维激光扫描技术对试件表面轮廓进行扫描，获取三维点云数据并经处理后重构试件实际几何形貌；也可采用其他满足测量精度要求的测量工具。

6.2.4 当采用三维激光扫描进行试件几何测量时，应满足下列要求：

- 1 测定前应清除试件表面浮尘及疏松氧化层；
- 2 将试件固定于工作台，确保扫描过程中无位移且不遮挡被测表面；
- 3 测量过程中应从多个不同视角扫描试件，确保表面全覆盖；
- 4 应对扫描获取的模型进行修复处理，包括检测网格缺陷、修补孔洞、去除尖刺、优化自交及重复网格等，得到与试件实际几何形貌相符的三维模

型。

6.2.5 试件几何形貌测定后，宜采用质量密度法试验获取试件的实际体积，验证三维扫描所得体积的准确度。

6.3 标准试件取样间距测定试验

6.3.1 试件平行长度区域的取样间距及分布应满足几何参数准确提取的要求。

【条文说明】

取样间距过大或分布不均时，无法准确表征波峰与波谷之间的真实轮廓变化，应对试件平行长度区域进行取样间距测定，以确保几何参数提取的准确性。

6.3.2 取样位置应选择在试件平行长度段区域。

6.3.3 取样间距应根据试件的尺寸及表面波纹的特征设定，取样间距宜小于表面波纹的单层层厚。

6.3.4 取样间距敏感性分析应以最小取样间距对应的测量参数为基准值，对不同取样间距下的测量参数进行归一化处理，并计入测量精度与测量效率的影响，确定最佳测定参数。

6.4 标准试件基本几何参数测定

6.4.1 几何参数测定前应按下列要求进行试件准备：

- 1 清除试件表面的松散氧化皮、飞溅颗粒及油污，可采用压缩空气吹扫或无水乙醇擦拭；
- 2 不应采用打磨、抛光等可能改变原始几何形貌的处理方式；
- 3 若试件表面存在明显未熔合或裂纹，应记录位置并判定为无效试件。

6.4.2 原始截面面积测定应满足下列要求：

- 1 试样原始截面面积宜在平行长度中心区域测定，测量范围应满足测定要求，并按取样间距采集数据；
- 2 原始横截面积 A_0 应取平均横截面积，并应根据几何测量尺寸计算得到。

6.4.3 原始厚度测定应满足下列要求：

- 1 试样原始厚度宜在平行长度中心区域测定，测量范围应满足测定要求，并按取样间距采集数据。
- 2 原始横截面厚度 t_0 应取平均横截面厚度，并应根据几何测量尺寸计算

得到。

6.4.4 原始直径测定应满足下列要求：

- 1 试样原始直径宜在平行长度中心区域测定，测量范围应满足测定要求，并按取样间距采集数据。
- 2 原始横截面直径 d_0 应取平均横截面直径，应根据几何测量尺寸计算得到。

6.5 标准试件几何评估测定

6.5.1 标准试件误差分布图统计应满足下列要求：

- 1 误差统计样本应包含同一制造批次试件的全部测量值与设计计算值的偏差值；
- 2 可采用误差分布图来反映试件实际测量尺寸的离散程度。误差分析图应以偏差值为横坐标，以频次数为纵坐标。

6.5.2 标准误差分析应满足下列要求：

- 1 根据几何测量尺寸，标准差可按式（6.5.2-1）计算，标准误差可按式（6.5.2-2）计算。

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (6.5.2-1)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_0)^2}{n}} \quad (6.5.2-2)$$

式中：SD ——标准差（mm）；

X_i ——试件的测量尺寸（mm）；

$\bar{X}$ ——试件测量尺寸的平均值（mm）；

n——测量尺寸数量（mm）；

SE——标准误差（mm）；

X_0 试件的设计尺寸（mm）。

- 2 试件球径尺寸一致性应采用标准差评定，标准差与尺寸一致性呈负相关；试件实测尺寸与设计尺寸的符合程度应采用标准误差评定，标准误差与成形精度呈负相关。

6.5.3 标准试件表面粗糙度测定时，可采用定义区域内的最大峰高值 S_p （式 6.5.3-1）、最大峰谷值 S_v （式 6.5.3-2）、算数平均值 S_a （式 6.5.3-3）和均方

根高度 S_q （式 6.5.3-4）进行评估。

定义区域内最大的峰高值 S_p

$$S_p = \max[Z_{peak}] \quad (6.5.3-1)$$

定义区域内最大的谷深值 S_v

$$S_v = \max[Z_{pit}] \quad (6.5.3-2)$$

算术平均值 S_a

$$S_a = \frac{\sum_{i=0}^{n_1} Z_i}{n_1} \quad (6.5.3-3)$$

尺度表面的均方根高度 S_q

$$S_q = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=0}^{n_1} Z_i^2}{n_1} \right)} \quad (6.5.3-4)$$

式中： Z_{peak} —— 某一个局部峰顶相对于参考平均面的高度；

Z_{pit} —— 局部凹坑或谷底相对于参考平均面的深度的绝对值；

n_1 —— 测量范围所得数据量；

Z_i —— 第 i 个采样点相对于参考平均面的高度。

7 电弧增材制造钢材物理力学性能试验

7.1 一般规定

7.1.1 电弧增材制造不锈钢和碳钢材料物理力学性能试验应符合本章的规定。

7.1.2 电弧增材制造不锈钢和碳钢材料的室温拉伸试验和显微组织检验尚应满足国家现行标准《金属材料 拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》GB/T 228.1 和《金属显微组织检验方法》GB/T 13298 的有关要求。

7.1.3 试样和检验面应能代表电弧增材制造材料多层逐道沉积、循环热输入及后处理条件下形成的组织与性能特征。

7.1.4 试样的取样部位、取样方向和取样数量应根据检验目的确定；检验钢件各向异性时，应按构建方向、沉积路径方向及层间界面相关规定取样；进行钢件性能对比时，试样应取样方向应保持一致，并应对不同方向的结果进行分别标识。

7.1.5 分析构建高度影响时，宜在不同构建高度取样；进行数据组合或性能比较时，应采用相同或相近构建位置试样。

【条文说明】

进行构建高度的影响分析时，一般取样数不少于 3 个，取样部位一般包括底部、中部和顶部。

7.1.6 试样按所处状态可分为成形态、机加工态或后处理状态，试验结果应与试样状态对应。

7.1.7 试样制备和检验过程应避免过热、塑性变形、污染和表面损伤对结果的影响，断口试样不应进行改变原始断裂形貌的机械加工、抛光或腐蚀处理。

7.1.8 试验结果应与材料牌号、设备、原材料、保护气体、主要工艺参数、构建方向、取样位置、取样方向、试样状态和后处理工艺等信息对应，并应保证结果可追溯。

7.1.9 采用不同取样位置、不同取样方向或不同试样状态的数据进行比较时，应分别说明其差异，不应混合评价。

7.2 应力-应变全曲线测定试验

7.2.1 应力—应变全曲线测定试验应连续施加轴向拉伸载荷，并应采用高响应数据采集系统记录试样自受力起始，经弹性变形、屈服、强化至断裂全过

程的力与变形数据。

7.2.2 试验所采用的拉伸试验机、引伸计、数据采集系统等试验设备的准确度、校准及试验速率控制方法、试验所采用过的试验温度应符合现行国家标准《金属材料 拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》GB/T 228.1 的规定。

7.2.3 接触式电子引伸计的准确度级别、标距设置及安装方式符合现行国家标准《金属材料 单轴试验用引伸计系统的标定》GB/T 12160 的有关要求；引伸计应安装于试样平行长度中心区域，并应夹持牢固。

【条文说明】

接触式电子引伸计常用于弹性模量、最大力延伸率、断后伸长率等指标的精确测量。测定屈服强度、规定塑性延伸强度时，仪器准确度不低于 1 级；测定延伸率、断面收缩率时，仪器准确度不低于 2 级；标距根据测定参数选取，屈服阶段性能测定用标距不小于原始标距的 1/2，最大力及后续性能测定用标距等于或近似等于原始标距。引伸计在测定过程中应夹持牢固，防止滑移及偏位产生符合内力。

7.2.4 非接触式视频引伸计及 DIC 系统的图像采集精度、标定方法、应变计算方法应符合现行国家标准《金属材料 单轴试验用引伸计系统的标定》GB/T 12160 的有关要求；试样平行长度区域应制备均匀、高对比度的随机散斑图案，散斑制备不应影响材料的力学性能。

【条文说明】

非接触视频引伸计及 DIC 系统适用于全场变形、局部颈缩、层间变形、不均匀变形及特殊环境下的变形测量，可作为引伸计的比对或替代方法。

7.2.5 常规力学性能试验宜采用接触式应变测量；全场变形、局部应变及层间结合行为分析宜采用非接触式应变测量。数据采集频率、滤波处理、原点修正及应变计算应满足现行国家标准《金属材料 拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》GB/T 228.1 的有关要求。

【条文说明】

两种测量方法同时使用时，测量结果应相互比对，偏差应在允许范围内。

7.2.6 试样的形状、尺寸、制备、原始标距标记及原始横截面积的测定应符合现行国家标准《金属材料 拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》GB/T 228.1 及《钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备》GB/T 2975 的规定；试样的取样方向应符合本标准第 5.2 节的规定。

7.2.7 应力-应变全曲线测定试验应按下列布置进行操作：

1 试验前应检查设备状态与校准有效期,制备并测量试样原始尺寸与标距,设定试验温度并确认环境符合要求。

2 试样安装与力零点设定应满足现行国家标准《金属材料 拉伸试验第1部分:室温试验方法》GB/T 228.1的有关规定;可施加不超过试件预期屈服强度的5%的预拉力使试件对中,但应修正预拉力其对延伸的影响。

3 引伸计应牢固安装于试样平行长度处,标距符合第7.2.2条规定。

4 试验速率宜采用应变速率控制,不具备条件时可采用应力速率控制。

5 试验过程中应按阶段控制速率,监视力-延伸曲线;出现打滑、弯曲、过早断裂等异常时,应停止试验并查明原因,必要时重新试验。

6 试样断裂后停止数据采集;断后伸长率、断面收缩率的测量应符合现行国家标准《金属材料 拉伸试验第1部分:室温试验方法》GB/T 228.1的规定。

7 应保存原始试验数据与应力-应变曲线,记录试验条件、试样信息及异常情况,并按本规程第7.3节计算力学性能参数。

【条文说明】

屈服阶段测定时,对有明显屈服的材料应测定下屈服强度和屈服点延伸率,必要时可在上屈服强度之后延伸率0.25%范围内取最低应力值;不连续屈服期间不得采用基于引伸计反馈的应变速率控制,应改用恒定横梁位移速率或恒定应变速率。屈服后至最大力阶段的速率切换应平滑,避免应力-应变曲线出现不连续;试样出现明显缩颈且引伸计控制失效时,应切换至横梁位移速率控制。测定断后伸长率与断面收缩率时,应将断裂试样两部分紧密对接、保证轴线共线后再进行测量。试验记录应涵盖试验方法、速率、温度、引伸计标距等试验条件,以及试样标识、尺寸、原始横截面积等试样信息。

7.2.8 应力-应变全曲线测定试验数据处理曲线绘制应满足下列要求:

1 应力-应变全曲线绘制时宜采用名义应力和名义应变;当仅测试试件颈缩前的应力-应变曲线时,也可以采用真实应力与真实应变。名义应力、名义应变、真实应力、真实应变应按现行国家标准《金属材料 拉伸试验第1部分:室温试验方法》GB/T 228.1的有关规定进行换算。

2 应力-应变曲线上应明确标注弹性段、屈服点或规定塑性延伸强度对应点、最大力点及断裂点。

3 可采用平行于滞后环所确定直线的平行线与力-延伸曲线相切的方法修正曲线原点,该平行线与延伸轴的交点即为修正原点;采用逐步逼近法测

定规定塑性延伸强度时，应自曲线原点起截取，必要时可先进行原点修正。

7.3 力学性能参数指标及测定试验

7.3.1 电弧增材制造钢材的力学性能参数测定应包括强度指标、塑性指标、弹性指标、硬度指标及韧性指标，各项性能参数的测定方法应符合现行国家标准《金属材料 拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》GB/T 228.1、《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》GB/T 229、《金属材料 布氏硬度试验 第 1 部分：试验方法》GB/T 231.1 的有关规定，并且在测定时应考虑材料的各向异性和可能的内部缺陷。

7.3.2 试件的上屈服强度 R_{eH} 测定时，应按规定的速率控制方法加载，记录发生屈服首次下降前的最大力 F_{eH} ，并应按式 7.3.2 计算上屈服强度。

$$R_{eH}=F_{eH}/S_0 \quad (7.3.2)$$

式中： S_0 ——试样原始横截面积。

7.3.3 试件的下屈服强度 R_{eL} 测定时，应在加载至出现屈服后继续按规定速率加载，记录屈服期间不计初始瞬时效应时的最小力 F_{eL} ，并应按式 7.3.3 计算下屈服强度。

$$R_{eL}=F_{eL}/S_0 \quad (7.3.3)$$

7.3.4 屈服期间不计初始瞬时效应时的最小力 F_{eL} 取值应满足下列要求：

- 1 当出现多个下降谷时，应取除第一个下降谷外的最小谷值；当仅一个下降谷时，应取该下降谷的谷值；
- 2 当出现屈服平台时，应取第一个平台对应的值；
- 3 当数据不足时，可取 R_{eH} 后延伸率 0.25%范围内的最低值。

7.3.5 试件的规定塑性延伸强度表征值 R_p 可取规定塑性延伸率 0.2%时的强度值 $R_{p0.2}$ ， $R_{p0.2}$ 可按式 7.3.4 计算。

$$R_{p0.2}=F_{p0.2}/S_0 \quad (7.3.5)$$

式中： $F_{p0.2}$ ——试件塑性延伸率达到 0.2%时的强度值。

【条文说明】

试件塑性延伸率达到 0.2%时的强度值可采用作图法获得。在力-延伸曲线上，作与弹性直线段平行的直线，该直线在延伸轴上与弹性段的距离等效于 0.2%塑性延伸率，读取直线与曲线交点对应的力 $F_{p0.2}$ 。当弹性段不明确时，可先加载超过预期 $R_{p0.2}$ ，卸力至约 10% $F_{p0.2}$ ，再重新加载，过滞后环两端点作直线，修正曲线原点，再作平行线并读取交点力 $F_{p0.2}$ 。对于无明显弹性

段材料，也可按照现行国家标准《金属材料 拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》GB/T 228.1 的有关要求，逐步逼近直至得到稳定的 $F_{p0.2}$ 。

7.3.6 试件的规定总延伸强度 R_t 测定时，应按规定速率加载，记录规定总延伸率对应的试件强度值 F_t ，并按式 7.3.6 计算总延伸强度。

$$R_t = F_t / S_0 \quad (7.3.6)$$

【条文说明】

在力-延伸曲线图上，作一条平行于力轴并与该轴的距离等效于规定总延伸率的平行线，读取平行线与曲线交点对应的力，即为规定总延伸率对应的试件强度值 F_t 。

7.3.7 试件规定残余延伸强度 R_r 测定时，应施加相应于规定残余延伸强度的力，持荷时长不应小于 10s~12s，并按现行国家标准《金属材料 拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》GB/T 228.1 的有关规定计算规定残余延伸力 F_r 。规定残余延伸强度 R_r 应按式 7.3.7 计算。

$$R_r = F_r / S_0 \quad (7.3.7)$$

7.3.8 试件抗拉强度 R_m 测定时，应加载至试样断裂，并记录试验过程中的最大力 F_m 。对于无明显屈服材料，应读取全全程最大力；对于不连续屈服材料，应读取加工硬化开始后的最大力。试件抗拉强度 R_m 应按式 7.3.8 计算。

$$R_m = F_m / S_0 \quad (7.3.8)$$

7.3.9 试件屈服点延伸率 A_e 测定时，应按规定速率加载，记录均匀加工硬化开始时刻至达到上屈服强度 R_{eH} 时刻的延伸量 L_s ，并按式 7.3.9 计算试件屈服点延伸率 A_e 。

$$A_e = L_s / L_e \times 100\% \quad (7.3.9)$$

式中： L_e ——引伸计标距。

7.3.10 试件最大力塑性延伸率 A_g 测定时，应根据力-延伸曲线读取最大力下的总延伸 ΔL_m ，并按式 7.3.10 计算试件屈服点延伸率 A_g 。当材料在最大力阶段出现平台段，最大力塑性延伸率 A_g 取平台中点的最大力对应的塑性延伸率。

$$A_g = \left(\frac{\Delta L_m}{L_e} - \frac{R_m}{m_E} \right) \times 100\% \quad (7.3.10)$$

式中： m_E ——应力-延伸率曲线弹性部分的斜率。

7.3.11 试件最大力塑性延伸率 A_{gt} 测定时，应根据力-延伸曲线读取最大力下的总延伸 ΔL_m ，并按式 7.3.11 计算试件屈服点延伸率 A_{gt} 。当材料在最大力

阶段出现平台段，最大力塑性延伸率 A_{gt} 取平台中点的最大力对应的总延伸率。

$$A_{gt} = \frac{\Delta L_m}{L_e} \times 100\% \quad (7.3.11)$$

7.3.12 试件断后伸长率 A 测定时，应加载至试样断裂，并记录断裂总延伸 ΔL_f ，并按式 7.3.12 计算试件屈服点延伸率 A_t 。

$$A_t = \frac{\Delta L_f}{L_e} \times 100\% \quad (7.3.12)$$

7.3.13 试件断后伸长率 A 的测定可采用常规法或引伸计法。

7.3.14 当采用常规法测定断后伸长率 A 时，应将断裂后的两部分紧密对接，保证轴线与其共线，测量断后标距 L_u ，并按式 7.3.14 计算断后伸长率 A

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (7.3.14)$$

7.3.15 当采用常规法测定断后伸长率 A 时，应对试验结果进行有效性判定。当断裂处与最接近标距标记的距离 $\geq L_0/3$ ，或当所测断后伸长率满足规定限值要求时，试验结构应判定为有效。当不满足时，应按现行国家标准《金属材料 拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》GB/T 228.1 的移位法的有关要求重新测定。

7.3.16 当采用引伸计法测定断后伸长率 A 时，应将引伸计标距范围内测定断裂总延伸扣除弹性延伸后的残余延伸，并换算得到断后伸长率 A。

7.3.17 当材料规定最小断后伸长率 $<5\%$ 时，可按现行国家标准《金属材料 拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》的有关要求测定断后伸长率 A，测量准确度不宜大于 $\pm 0.02\text{mm}$ 。

7.3.18 试件断面收缩率 Z 测定时，应将断裂后的两部分紧密对接，保证轴线与其共线，测量断后最小横截面积 S_u ，并按式 7.3.18 计算断面收缩率 Z，测量准确度不宜大于 $\pm 2\%$ 。

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad (7.3.18)$$

式中： S_0 ——原始横截面积。

7.3.19 试件试验性能测定结果应按对应产品标准的规定进行数值修约；产品标准无专门规定时，应符合下列要求：

- 1 强度性能值修约至 1MPa；
- 2 屈服点延伸率修约至 0.1%，其他延伸率和断后伸长率修约至 0.5%；
- 3 断面收缩率修约至 1%。

7.3.20 试验结果判定应包括各向异性评定、工艺稳定性评定、缺陷敏感性检

验及层间结合性能评定，并应符合下列规定：

1 各向异性评定应分别测定沉积方向与扫描方向的各项力学性能参数，各向异性系数 η 应按下列式计算：

$$\eta = P_{\text{deposit}} / P_{\text{scan}} \quad (7.3.20)$$

式中： P_{deposit} —— 沉积方向测定的性能参数值；

P_{scan} —— 扫描方向测定的性能参数值。

2 工艺稳定性评定时，同一工艺条件、同一取样方向的有效试件数量不应少于 5 个，并应按有效试件计算性能参数的变异系数 CV；强度指标的变异系数不应大于 5%，塑性指标的变异系数不应大于 10%。

3 缺陷敏感性检验应记录断裂试件的断口形貌，注明是否存在未熔合缺陷、气孔及层间缺陷；当断口存在影响力学性能判定的缺陷时，应在试验报告中注明缺陷的类型、尺寸及所在位置。

4 层间结合性能评定时，除常规拉伸试样外，尚应制备缺口设于层间结合面的冲击试样；拉伸试验中应观察并记录断裂位置是否处于层间结合区，当断裂发生于层间结合面时，应进行记录并在试验报告中予以说明。

7.3.21 试验记录及试验报告应载明试验依据标准、试验条件、试样信息、试验结果、试验异常情况、试件的取样方向及位置、电弧增材制造的工艺参数及后处理状态、各向异性系数、断口缺陷记录、试验日期等，并应由试验人员及审核人员签字确认。

【条文说明】

试验条件主要包括控制方法及速率、试验温度、引伸计准确度等级；试样信息主要包括编号、材料名称/牌号、试样类型、取样方向/位置、原始尺寸及 S_0 、 L_0 ；试验主要结果包括各测定指标的原始数据及修约后数值，若使用简捷法、移位法等特殊方法需注明；试验结果主要包括各测定指标的原始数据及修约后数值，若使用简捷法、移位法等特殊方法需注明；试验异常情况主要包括试样变形、断口位置、设备故障等对结果有影响的情况；试件的取样方向及位置应注明是沉积方向、扫描方向或横向方向；电弧增材制造的工艺参数主要包括打印路径、层厚、热输入等。

7.4 断口显微特征试验

7.4.1 断口显微特征试验可用于分析裂纹起始位置、扩展路径及断裂特征。进行断口分析时，应保持试样原始断裂形貌，不得进行机械加工、抛光或腐

蚀处理。

7.4.2 试样选取与处理应满足下列要求：

- 1 断口试样应在发生断裂或开始失效的部位截取，并宜覆盖裂纹起始区、稳定扩展区和瞬断区；
- 2 当材料存在明显各向异性时，应按不同取样方向选取试样，宜包括平行沉积路径方向和垂直构建方向，必要时可增加其他取向；
- 3 试样宜包含层间界面、沉积道边界、典型缺陷区及不同构建高度区域；
- 4 试样截取过程中应避免过热、塑性变形和机械损伤对断口形貌的影响；断口表面不得进行机械加工、抛光或腐蚀处理；必要时仅可采用不影响断口特征的方式进行轻微清洁；
- 5 试样应标识取样位置、取样方向、构建高度、沉积路径方向和裂纹平面取向。

7.4.3 宏观断口观察可用于识别断口整体形貌、裂纹起始位置、裂纹扩展路径以及稳定扩展区和瞬断区的分布。宏观断口观察应满足下列要求：

- 1 宏观断口观察应在低倍条件下进行；
- 2 宏观断口观察分析应包括裂纹起始位置与层间界面、沉积道结构、典型缺陷和不同构建高度区域的关系；
- 3 宏观断口观察应识别裂纹沿沉积层扩展或跨层扩展的行为特征，并分析层状结构对裂纹扩展路径的引导作用；
- 4 宏观断口观察应包括存在气孔、未熔合和夹杂等缺陷的区域，并应分析其空间分布特征及其对裂纹起始和扩展的影响；
- 5 应在不同构建高度区域分别进行断口形貌观察。

7.4.4 微观断口分析应满足下列要求：

- 1 断口微观特征宜采用扫描电子显微镜进行观察，并应由低倍至高倍逐级分析；
- 2 断口微观分析应识别裂纹起始区、稳定扩展区和瞬断区；对预制裂纹试样，尚应区分疲劳预裂纹末端、伸长区和稳定裂纹扩展区；
- 3 裂纹起始区应识别裂纹萌生位置，并分析其与层间界面、沉积道边界、局部组织和缺陷分布之间的关系；
- 4 稳定扩展区应识别韧窝、撕裂棱等塑性断裂特征，并分析其与层状沉积结构和构建方向之间的关系；
- 5 瞬断区应识别解理断裂、准解理断裂或其他脆性断裂特征，并分析其

与局部组织状态、构建高度变化和缺陷分布之间的关系；

6 应分析裂纹扩展路径与层状沉积结构之间的关系，包括裂纹沿层扩展或跨层扩展行为，以及柱状晶、等轴晶和再热区对裂纹扩展路径的影响；

7 应识别未熔合界面、气孔和夹杂等缺陷在断口中的分布特征，并应分析其在裂纹起始和扩展过程中的作用；

8 当采用断口伸长区宽度法进行裂纹起始特征定量判定时，应能清晰区分伸长区与稳定裂纹扩展区。

7.4.5 裂纹扩展形式的判定应符合下列规定：

1 应结合载荷—位移、应力—应变及其他试验记录，与断口形貌综合判定裂纹扩展形式；

2 稳定扩展应表现为裂纹随载荷或位移逐渐增长；不稳定扩展应表现为裂纹突发扩展、突跳或瞬断；

3 当断口同时存在稳定扩展和不稳定扩展特征时，应分别说明各区域特征及其对应关系。

7.4.6 裂纹长度与伸长区宽度测量应满足下列要求：

1 裂纹长度应在断口上沿厚度方向多个位置进行测量，裂纹扩展量可按式（7.4.6-1）计算。

$$\Delta a = a - a_0 \quad (7.4.6-1)$$

式中： Δa ——平均初始裂纹长度（mm）；

a ——平均最终裂纹长度（mm）；

a_0 ——裂纹扩展量（mm）。

2 采用伸长区宽度法时，应在多个位置测量伸长区宽度，其局部平均值和总体平均值可分别按式（7.4.6-2）和式（7.4.6-3）计算。

$$\Delta a_{SZW,L} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta a_{SZW,L,i} \quad (7.4.6-2)$$

$$\Delta a_{SZW} = \frac{1}{n_0} \sum_{L=1}^{n_0} \Delta a_{SZW,L} \quad (7.4.6-3)$$

式中： $\Delta a_{SZW,L}$ ——第 L 个测量位置的伸长区宽度局部平均值（mm）；

$\Delta a_{SZW,L,i}$ ——第 L 个测量位置第 i 次测得的伸长区宽度（mm）；

Δa_{SZW} ——各测量位置伸长区宽度的总体平均值，即平均临界伸长区宽度（mm）；

k ——单个测量位置的测量次数；

n_0 ——测量位置数量；

- L ——— 测量位置序号；
i ——— 同一测量位置的测量序号。

3 用于裂纹起始特征判定的有效数据点数量不应少于 3 个，且数据应满足式（7.4.6-4）的要求。

$$\Delta a > \Delta a_{SZW} + 0.2mm \quad (7.4.6-4)$$

7.4.7 断口图像的采集、分析及数据有效性判定应符合下列规定：

- 1 断口图像应系统采集并统一编号，图像应标注比例尺和放大倍数，并应记录观察位置、构建高度、沉积方向和取样方向；
- 2 图像可进行适度亮度 and 对比度调整，但不应改变断口真实形貌；
- 3 断口分析应结合裂纹扩展路径、组织特征和缺陷分布，对断裂模式和断裂行为进行综合评定；
- 4 当断口受到污染或损伤、关键断裂特征无法识别、裂纹起始位置或扩展路径无法判定、图像质量不满足要求，或伸长区不能与稳定裂纹扩展区区分时，试验结果不应作为有效数据。

7.5 微观金相组织及扫描电镜试验

7.5.1 微观金相组织及扫描电镜试验的样准备、显微组织显示、显微组织检验、图像采集和图像分析、常用浸蚀剂的选用除满足本节规定外，尚应满足现行国家标准《金属显微组织检验方法》GB/T 13298 的有关要求；必要时，可采用扫描电子显微镜对组织细节、相界和微缺陷进行观察。

7.5.2 试样的选取与制备应能反映电弧增材制造材料多层逐道沉积及循环热输入形成的组织特征，并应符合下列规定：

- 1 取样部位、方向及数量应根据检验目的确定，宜覆盖不同构建高度、不同取向，包含层间界面、再热区及典型缺陷区，缺陷部宜优先取样。；
- 2 检验面应按分析目的选用横截面或纵截面，必要时可选取多个截面对比分析；试样尺寸及形状应符合现行国家标准《金属显微组织检验方法》GB/T 13298 的规定；
- 3 试样可采用砂轮切割、电火花线切割或机械加工方法截取，截取过程应避免局部过热、塑性变形及污染；必要时应采取冷却措施，并去除受影响层；
- 4 试样截取后应在非检验面标识取样位置、构建高度及取样方向，镶嵌后仍应保证标识可追溯；试样表面的油污、冷却液及妨碍组织显示的覆盖层，

应在磨抛前清除；

5 尺寸较小、形状不规则、易碎或需观察边缘组织的试样，应进行镶嵌；镶嵌时应保证检验面朝向正确，不得形成空隙；

6 试样研磨应由粗到细逐级进行，每更换一道磨料应完全消除前道磨痕；抛光可采用机械、电解、化学或振动抛光方式，应控制工艺参数避免损伤组织，抛光后应及时清洗并干燥。

【条文说明】

本条针对电弧增材制造材料组织层状分布、区域差异显著、具有明显各向异性的特点，对显微试样的取样原则与制备全过程作出规定。

要求试样反映多层沉积与循环热输入形成的组织特征，是为了保证试样的代表性，确保显微检验结果能够真实反映材料的组织演化规律。按检验目的确定取样方案，并覆盖不同构建高度、取向及典型特征区域，是因为电弧增材制造不同位置的热历史存在差异，组织形态与缺陷分布各不相同，全面取样可系统表征材料的整体组织状态；缺陷部位优先取样则便于重点研究缺陷特征与形成机制。

横截面与纵截面对应不同的观察维度，分别适用于展现构建高度方向的层状结构与沉积路径方向的组织连续性，根据分析目的选用可提高检验的针对性；规定试样尺寸符合 GB/T 13298，是为了与通用金属显微检验标准衔接，保证制样与观察的规范性。

截取试样时避免过热、塑性变形与污染，是因为局部过热会引发组织演变，塑性变形会产生形变组织，污染会引入杂质，均会干扰原始组织的观察与判定；必要时采取冷却措施并去除受影响层，可消除切割过程对试样组织的干扰，保证观察结果的真实性。

在非检验面标识取样信息并保证镶嵌后可追溯，是为了避免试样混淆，确保检验结果与取样位置一一对应，保障数据的可追溯性。磨抛前清除表面污染物与覆盖层，是为了避免杂质影响后续磨抛质量与组织显示效果。

对小尺寸、不规则试样进行镶嵌，是为了便于后续磨抛操作与观察；保证检验面朝向准确、无空隙，可避免磨抛倾斜、边缘缺损等问题，保障试样制备质量。

研磨由粗到细逐级进行并完全消除前道磨痕，是为了逐步获得平整的试样表面，避免残留磨痕干扰组织观察；控制抛光参数防止组织损伤，是为了获得真实的组织表面，避免边缘倒圆、变形层等制样缺陷影响检验结果的准确性。

7.5.3 显微组织显示方法应根据材料特性、组织类型及分析目的选用，并应符合下列规定：

- 1 电弧增材制造试样的组织显示应清晰反映层间界面、沉积道边界、晶粒分布、再热区特征、析出相及典型缺陷；
- 2 抛光后的试样可直接观察，也可采用物理或化学方法提高组织衬度；不同区域腐蚀响应差异明显时，应通过预试验确定适宜的显示条件；
- 3 采用浸蚀类方法时，工艺参数应根据材料特性及显示目的确定；浸蚀应均匀适度，组织清晰显现后应立即终止，并及时清洗干燥；
- 4 采用成膜类方法时，可通过表面成膜增强组织对比度，用于组织鉴别与差异分析；
- 5 采用热蚀、热染法时，应在受控气氛与温度条件下进行，避免试样组织发生变化。

【条文说明】

电弧增材制造材料因多层逐道沉积与循环热输入作用，组织具有显著的区域差异性与各向异性，显微组织显示的效果直接影响组织分析与缺陷识别的准确性，本条基于不同方法的原理与适用场景作出规定。要求组织显示清晰反映层间界面、沉积道边界等关键特征，是为了适配电弧增材制造的组织特点，保障后续分析的针对性与有效性。抛光后直接观察操作简便，适用于组织衬度较好的情形；采用物理或化学处理可提升不同组织间的区分度，由于不同构建高度、不同再热区域的组织状态存在差异，腐蚀响应不尽相同，故规定应通过预试验确定显示参数，避免出现显示不清或过度腐蚀的情况。

浸蚀法是显微组织显示的常规手段，参数控制不当易产生过腐蚀、虚假组织等问题，因此对浸蚀的均匀性、终止时机与后处理作出要求。成膜类方法利用光学干涉效应增强对比度，适用于组织差异较小、需进行相鉴别的场景。热蚀与热染法通过热作用实现组织显示，加热温度或气氛控制不当会引发组织演变，改变原始组织状态，因此要求严格控制加热条件，保证观察结果的真实性。

7.5.4 显微组织检验应按先低倍后高倍的顺序进行，结合取样位置、构建高度及取样方向进行对比分析，并应符合下列规定：

- 1 可根据组织特征与检验要求选用明场、暗场、偏振光等照明方式；对层间界面、微缺陷等细部特征，宜采用扫描电子显微镜观察记录；
- 2 应重点观察晶粒形态与尺寸分布、晶型转变特征、层间界面与再热区

特征、析出相分布及气孔、未熔合等典型缺陷。

3 图像采集前应标定系统比例，采集后应标注比例尺、放大倍数及取样相关信息；图像可进行适度光学校正，但不应改变组织真实特征；

4 定性分析应涵盖组织类型、晶粒形态、层间组织连续性、再热区特征及缺陷分布等内容；定量分析应基于准确标定的图像，按体视学原理测定相关组织参数；

5 检验记录应包含试样信息、制样与显示方法、观察条件、图像资料及检验结果。

【条文说明】

本条针对电弧增材制造材料组织具有区域差异性和各向异性的特点，对显微组织检验的流程、内容、方法及记录作出规定。

规定先低倍后高倍的观察顺序，可保证先从宏观层面把握组织整体分布规律与区域特征，再逐步放大观察细部细节，避免直接高倍观察遗漏整体组织形貌与缺陷分布。结合取样位置、构建高度及取样方向开展对比分析，是为了系统反映电弧增材制造不同区域的组织差异，体现其工艺带来的组织演变规律。

不同照明方式及扫描电子显微镜的选用，可适配不同层次的观察需求：常规光学照明适用于整体组织形貌观察，扫描电子显微镜适用于层间界面、微缺陷等精细结构的高分辨表征，保障检验的全面性与精度。明确重点观察内容，是基于电弧增材制造多层逐道沉积、循环热输入的工艺特性。晶粒演化、层间结合状态、再热作用及缺陷情况直接决定材料的力学性能，将上述内容作为检验重点，可有效表征材料的组织特征与质量水平。对图像标定与校正作出规定，旨在保证图像的尺度准确性与结果可追溯性。适度的光学校正可提升观察清晰度，但严格禁止改变组织真实特征，避免对检验结果造成误判。定性分析用于整体组织特征的描述与判断，定量分析用于组织参数的量化表征。要求定量分析基于准确标定并遵循体视学原理，是为了减少测量误差，保障定量结果的科学性与可比性。

完整的检验记录是试验可追溯性的重要保障，便于后续结果复核、数据对比与质量分析。

7.6 化学成分试验

7.6.1 化学成分试验可用于测定丝材和打印件沉积金属的化学成分，并可用

于评价材料成分符合性及沉积金属成分稳定性。

7.6.2 化学成分分析应符合下列规定：

- 1 丝材与沉积金属的化学成分，应分别按其各自状态进行分析；
- 2 取样部位、方式及数量应根据检验目的确定；验收检验取样应具有代表性，研究基板稀释、保护气体及构建高度等影响时，应分别取样并分别报告结果；
- 3 试样制备过程中应避免污染、过热及混入非分析部位材料，保证分析结果准确；
- 4 试验结果应与材料牌号、工艺参数及取样信息相对应，确保可追溯。

【条文说明】

本条针对电弧增材制造的工艺特点，对化学成分分析的通用要求作出规定。丝材经电弧熔化、逐层沉积后，存在元素烧损、基板元素稀释等现象，沉积金属的化学成分与原始丝材存在差异，因此需分别按丝材状态和沉积金属状态进行分析，以准确反映原材料与成形构件各自的实际成分水平。

不同检验目的对应不同的取样要求：材料验收需代表整批制件的整体质量水平，故要求取样具有代表性；当研究基板稀释、保护气体、构建高度等因素对成分的影响规律时，分别取样、分别报告可明确各因素的独立影响，避免相互干扰。

化学成分分析对试样纯度要求较高，制备过程中的污染、过热氧化或混入非目标部位材料，会直接造成分析结果偏差，因此需对制样过程作出严格规定。试验结果与材料牌号、工艺参数及取样信息一一对应，是试验可追溯性的基本要求，便于后续结果复核、质量问题定位与工艺优化分析。

7.6.3 丝材化学成分分析试样应采用实心丝材。分析镀层中所含元素时，应保留镀层进行测定；分析非镀层元素且镀层对分析结果有影响时，应先去除镀层。

【条文说明】

本条对丝材化学成分分析的试样要求、镀层处理原则及结果判定作出规定。实心丝材成分均匀，以此作为分析试样可保证试样具有代表性，避免因丝材形态、截面成分不均导致分析结果出现偏差。

丝材镀层主要用于改善送丝性能与电弧稳定性，其元素组成与基体金属存在差异。当分析镀层所含元素时，保留镀层可准确测定镀层元素的实际含量；当分析基体非镀层元素时，镀层的存在会对测定结果产生干扰，因此规定应

预先去除镀层，保障基体成分分析的准确性。

丝材化学成分是电弧增材制造原材料质量控制的核心指标，其结果符合产品标准或供需双方约定要求，是原材料验收的基本依据，也是保证沉积成形材料性能稳定可控的前提。

7.6.4 打印件沉积金属化学成分分析应符合下列规定：

1 分析试样可取自打印件本体、分析试块或力学试样的有效沉积部位；结果有争议时，应以分析试块为仲裁试样。；

2 试样应采用与打印件一致的材料及工艺参数制备，有效沉积层数不应少于 4 层，取样位置距基板表面不应小于 9.5mm；应去除试样顶层表面及熔渣，避开引弧区、收弧区、基板稀释显著区及明显缺陷集中区；

3 研究构建高度影响时，宜在不同高度分别取样并单独报告；保护气体不同或基板稀释影响明显时，结果应分别说明，不得混合评价；

【条文说明】

本条针对电弧增材制造沉积金属受基板稀释、工艺波动影响显著的特点，对打印件化学成分分析的试样来源、制备要求、取样原则及结果判定作出规定。试样可取自多种部位，旨在充分利用现有试样、降低试验成本；专门制备的分析试块工艺参数可控、成分均匀稳定，代表性更强，因此明确其作为争议情况下的仲裁依据，保证判定结果的统一性与权威性。

规定有效沉积层数不少于 4 层、取样距基板表面不小于 9.5mm，核心目的是消除基板元素的稀释作用。沉积初期前几层金属与基板充分熔合，元素相互扩散，成分明显偏离本体沉积金属；随沉积高度增加，基板稀释作用逐渐减弱，成分趋于稳定，以此高度取样可准确反映沉积金属的真实化学成分。要求去除顶层熔渣与氧化层、避开工艺不稳定区域及缺陷集中区，是为了避免表面杂质、局部成分波动及缺陷对分析结果的干扰，保障试样的代表性与分析结果的准确性。

针对构建高度、保护气体、基板稀释等因素分别取样并单独报告，是基于逐层沉积的工艺特性：不同构建高度的热循环存在差异，会导致元素烧损程度不同；保护气体种类直接影响元素氧化损失；基板稀释区域存在明显成分梯度。分别评价可清晰反映各因素对成分的影响规律，避免混合评价造成结果偏差。

化学成分是材料质量控制的核心指标，其限值符合产品技术条件或供需约定，是打印件质量验收与性能稳定可控的基本前提。

7.6.5 任一元素分析结果不符合要求时，应对该元素重复试验两次，两次结果均符合要求方可判定为合格；重复试验仍不符合要求的，应判定该材料不符合相应要求。制样、取样或试验程序未按规定执行时，原结果应判为无效，并应按规定重新制样试验。

【条文说明】

本条对化学成分分析的复试规则与结果有效性判定作出规定。

仅针对不合格元素开展复试，而非全元素重复分析，可在保证检验严谨性的前提下提高试验效率，减少不必要的试验工作量。规定两次重复试验均合格方可判定合格，是为了抵消试验操作的偶然误差，兼顾质量控制的严格性与结果的可靠性。明确制样、取样或试验程序违规时原结果无效，是因为不规范的操作会导致试样失去代表性、试验结果偏离真实水平，不具备结果判定的有效性基础。按正确程序重新试验不属于复试范畴，不适用复试的合格判定规则，以此保障检验工作的规范性与判定结果的公正性。

7.7 光谱分析试验

7.7.1 化学成分检验采用光谱法时，应根据材料类型、试样形状和检验目的选择适用分析方法。

7.7.2 化学成分分析方法应按下列规定选用：

- 1** 应采用经认可的分析方法；结果有争议时，应采用相关材料标准规定的仲裁方法，标准未作规定的可由供需双方约定；
- 2** 除气体元素外的常规元素分析，宜采用火花直读原子发射光谱法；试样尺寸不满足直读分析要求时，可制备成适用试样或采用其他经验证的分析方法；
- 3** 手持式 X 射线荧光光谱法可用于材料牌号初筛或区域快速识别，不宜作为化学成分验收或仲裁的唯一方法。

【条文说明】

本条对化学成分分析方法的选用原则、推荐方法及适用边界作出规定。

规定采用经认可的分析方法，并明确争议情形下的仲裁依据，是为了保证分析结果的准确性与可比性，统一判定尺度，减少结果分歧；标准未作规定时允许供需双方约定，可兼顾不同应用场景的实际需求。

火花直读原子发射光谱法分析速度快、准确度高，适用于金属材料常规元素的批量检测，因此推荐作为常规元素分析的首选方法。当丝材尺寸、形状不

满足直读光谱的试样要求时，通过机械制样或改用其他经验证的方法，可保证分析工作的可操作性与结果可靠性。

手持式 X 射线荧光光谱法属于快速无损检测方法，操作简便但检测精度相对有限，因此仅适用于牌号初筛与快速识别；规定其不宜作为验收或仲裁的唯一方法，是为了避免因检测精度不足造成质量误判，保障化学成分验收与仲裁结果的严谨性。

7.7.3 丝材光谱分析应符合下列规定：

- 1 测定镀层元素时应保留镀层；测定非镀层元素且镀层影响测定时，应先去除镀层；
- 2 分析面应清洁干燥，无油污及明显氧化层；试样装夹应稳定、导电良好；
- 3 采用火花直读原子发射光谱法时，宜在同一试样上取多个有效测点的平均值作为分析结果；异常测点应查明原因后补测。

【条文说明】

本条针对丝材的形态特征与镀层特性，对光谱分析的试样处理、表面状态要求及测定规则作出规定。

镀层元素组成与基体金属存在差异，测定镀层元素时保留镀层，可准确反映镀层的实际元素含量；测定基体非镀层元素时，镀层的存在会干扰光谱激发过程、偏离基体成分的真实水平，因此应预先去除镀层以保证测定准确性。光谱分析依靠试样表面的火花激发产生元素特征信号，分析面的油污、氧化层会阻碍正常激发并引入杂质干扰，装夹不稳定、导电不良会导致放电状态波动，均会造成分析结果偏差，因此对分析面状态与装夹要求作出明确规定。丝材可能存在轻微成分偏析或表面不均匀性，单点测定的偶然性较大，采用多点测定取平均值的方式，可提高分析结果的代表性与可靠性；异常测点通常由试样表面缺陷、操作误差等因素导致，查明原因后补测可排除干扰，保证结果真实有效。

7.7.4 打印件及分析试块的光谱分析应符合下列规定：

- 1 分析前应根据分析目的确定取样部位与分析面位置。采用分析试块时，应切除顶层表面，在距基板表面不小于 9.5mm 的沉积金属上制备分析面；
- 2 分析面应采用机械加工或磨削方式制备，去除熔渣、飞溅、氧化层及污染层；测点应布置在具有代表性的沉积金属区域；
- 3 考虑构建高度影响时，宜按底部、中部、顶部分别测定并分别报告结

果；采用打印件本体分析时，分析部位宜与力学性能试样、组织检验试样的取样区域相对应。

【条文说明】

本条针对电弧增材制造沉积金属成分存在区域差异的特点，对打印件与分析试块光谱分析的取样原则、试样制备、测点布置及结果报告作出规定。

根据分析目的确定取样部位与分析面位置，可保证取样的针对性，适配不同检验与研究需求。规定分析试块在距基板表面不小于 9.5mm 处制备分析面，是为了规避基板元素的稀释作用：沉积初期前几层金属与基板充分熔合、元素相互扩散，成分明显偏离本体沉积金属；随沉积高度增加，基板稀释影响逐渐减弱，成分趋于稳定，以此高度取样可准确反映沉积金属的真实化学成分。切除顶层表面，是为了去除表面氧化层、熔渣及成形不稳定区域，避免表层状态干扰分析结果。

光谱分析依靠试样表面的激发过程产生元素特征信号，表面的熔渣、飞溅、氧化层及污染物会阻碍正常激发、引入杂质误差，因此要求采用机械加工或磨削制备分析面并去除上述不利层，保障分析面平整洁净，提高测定结果的准确性与稳定性。测点布置于具有代表性的沉积金属区域，可避免局部成分波动导致结果偏差。

电弧增材制造逐层沉积的工艺特性，使得不同构建高度的热循环次数与热输入存在差异，元素烧损程度不尽相同，成分沿高度方向存在一定梯度。按底部、中部、顶部分别测定并单独报告，可清晰反映化学成分的分布规律。采用打印件本体分析时，要求分析部位与力学性能、组织检验试样的取样区域对应，便于将化学成分与组织特征、力学性能进行关联分析，保障试验数据的可比性与研究价值。

7.7.5 光谱分析报告应载明材料牌号、工艺参数、取样信息、分析方法及判定结果。不同取样位置、构建高度或试样状态的分析数据应分别说明，不得混合评价。

【条文说明】

本条对光谱分析的报告内容与数据评价原则作出规定。

报告载明完整的材料、工艺、取样及分析相关信息，是为了保证分析结果的可追溯性，便于后续结果复核、质量问题排查及不同批次数据对比。

电弧增材制造沉积金属的化学成分受取样位置、构建高度、试样状态等因素影响存在区域差异，分别说明各条件下的结果差异，可清晰反映成分分布规

律，避免混合评价造成结果误读，保障数据评价的准确性与客观性。

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 228 金属材料 拉伸试验
- 2 GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法
- 3 GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法
- 4 GB/T 230.1 金属材料 洛氏硬度试验 第1部分：试验方法
- 5 GB/T 231.1 金属材料 布氏硬度试验 第1部分：试验方法
- 6 GB/T 2975 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备
- 7 GB/T 3075 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法
- 8 GB/T 4340.1 金属材料 维氏硬度试验 第1部分：试验方法
- 9 GB/T 12160 金属材料 单轴试验用引伸计系统的标定
- 10 GB/T 13298 金属显微组织检验方法
- 11 GB/T 22315 金属材料 弹性模量和泊松比试验方法
- 12 GB/T 26077 金属材料 疲劳试验 轴向应变控制方法
- 13 GB/T 35351 增材制造 术语
- 14 GB/T 37698 增材制造 设计 要求、指南和建议
- 15 GB/T 39254 增材制造金属制件机械性能评价通则
- 16 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
- 17 YB/T 5349 金属材料 弯曲力学性能试验方法