

ICS 17.240

CCS A 58



团体标准

T/CEATEC XXX—2025

材料改性用电子束辐照性能评价通则

General principles for performance evaluation of electron beam irradiation
in material modification

2025-X-XX 发布

2025-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 评价原则	2
4.1 科学性原则	2
4.2 系统性原则	2
4.3 安全性原则	2
4.4 可重复性原则	2
4.5 实用性原则	2
5 评价指标	2
5.1 表面物理性能	2
5.2 表面化学性能	3
5.3 力学性能	3
5.4 功能性能	3
6 评价方法	4
6.1 试样制备	4
6.2 辐照实施	4
6.3 表面物理性能试验	4
6.4 表面化学性能试验	5
6.5 力学性能试验	5
6.6 功能性能试验	5
7 评价程序	6
7.1 采样与制样	6
7.2 测试环境	6
7.3 结果评定	6
7.4 评价报告	8
8 安全、健康与环保（HSE）要求	8
8.1 辐射安全	8
8.2 有害气体防护	8
8.3 废弃物处理	8

前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

材料改性用电子束辐照性能评价通则

1 范围

本文件规定了材料改性用电子束辐照性能评价的评价原则、评价指标、评价方法、评价程序、安全、健康与环保（HSE）要求。

本文件适用于金属材料、高分子材料、陶瓷材料及复合材料经电子束辐照表面改性后的性能评价与质量控制。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GBZ 2.1 工作场所有害因素职业接触限值 第1部分:化学有害因素
GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法
GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法
GB/T 1031 产品几何技术规范（GPS） 表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值
GB/T 2410 透明塑料透光率和雾度的测定
GB/T 2828.1 计数抽样检验程序 第1部分：按接收质量限（AQL）检索的逐批检验抽样计划
GB 3095 环境空气质量标准
GB/T 4340.1 金属材料 维氏硬度试验 第1部分：试验方法
GB 5172 粒子加速器辐射安全与防护规定
GB/T 5270 金属基体上的金属覆盖层 电沉积和化学沉积层 附着强度试验方法评述
GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定
GB/T 12444 金属材料 磨损试验方法 试环-试块滑动磨损试验
GB 18484 危险废物焚烧污染控制标准
GB 18599 一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准
GB 18871 电离辐射防护与辐射源安全基本标准
GB/T 27025 检测和校准实验室能力的通用要求
GB/T 30693 塑料薄膜与水接触角的测量
GB/T 31402 塑料 塑料表面抗菌性能试验方法
HJ 979 电子加速器辐照装置辐射安全和防护

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

电子束辐照 electron beam irradiation

利用电子加速器产生的高能电子束流对材料进行辐照处理，实现材料性能调控的技术过程。

3.2

吸收剂量 absorbed dose

单位质量物质吸收的电离辐射能量，单位为戈瑞（Gy）， $1\text{ Gy} = 1\text{ J/kg}$ 。

3.3

改性层 modification layer

材料表面经电子束辐照处理后性能发生变化的材料层。

3.4

表面改性 surface modification

通过电子束辐照作用于材料表面，在不改变材料基体整体性能的前提下，使材料表面物理、化学或力学性能发生预期变化的改性技术。

4 评价原则

4.1 科学性原则

评价应基于材料科学、辐射物理与化学的基本原理，确保试验设计合理、参数可控、数据可靠。

4.2 系统性原则

评价应覆盖材料改性前后的关键性能变化，包括力学、热学、电学、化学稳定性及微观结构等多维度指标，避免单一指标片面判断。

4.3 安全性原则

评价工作应遵循GB 18871的规定，确保辐射防护与安全。电子加速器辐照装置的设计和运行应符合HJ 979的要求，包括辐射屏蔽、安全联锁、通风系统等。

4.4 可重复性原则

评价过程应具备良好的重复性与再现性，符合GB/T 27025对检测实验室能力的要求。

4.5 实用性原则

评价指标和方法应便于实际操作，评价结果应对材料设计、工艺优化和应用推广具有指导意义。

5 评价指标

5.1 表面物理性能

表面物理性能评价指标及要求应符合表 1 的规定。

表 1 表面物理性能评价指标及要求

评价指标	指标要求			
	金属材料	高分子材料	陶瓷材料	复合材料
表面硬度提升率 (%)	≥ 10	≥ 15	≥ 8	≥ 12
磨损率 ($\text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$)	≤ 0.1	≤ 0.3	≤ 0.08	≤ 0.2
表面粗糙度 R_a (μm)	≤ 0.8	≤ 1.2	≤ 0.5	≤ 1.0

5.2 表面化学性能

5.2.1 特征元素含量

电子束辐照引入的改性元素含量与目标值的偏差应 $\leq 5\%$ 。

5.2.2 水接触角和表面能

应符合表 2 的规定。

表 2 表面化学性能评价指标及要求

评价指标	指标要求	
	疏水材料	亲水材料
水接触角 ($^\circ$)	≥ 100	≤ 30
表面能 (mN/m)	≤ 30	≥ 50

5.3 力学性能

力学性能评价指标及要求应符合表 3 的规定。

表 3 力学性能评价指标及要求

评价指标	指标要求			
	金属材料	高分子材料	陶瓷材料	复合材料
涂层结合强度 (临界载荷, N)	≥ 50	≥ 30	≥ 60	≥ 40
抗拉强度提升率 (%)	≥ 5	≥ 8	≥ 3	≥ 6
冲击强度提升率 (%)	≥ 10	≥ 15	≥ 5	≥ 12

5.4 功能性能

功能性能评价指标及要求应符合表 4 的规定 (仅适用于有对应功能需求的材料)。

表 4 功能性能评价指标及要求

评价指标	指标要求
抗菌率 (%)	≥ 99 (以大肠杆菌为试验菌株)
透光率 (%)	≥ 85 (波长 550nm)
雾度 (%)	≤ 5

6 评价方法

6.1 试样制备

应按照以下方法进行：

a) 取样：试样应从同一批次、同一工艺条件下处理的材料中随机抽取，根据GB/T 2828.1确定抽样数量，批量≤100件时取样≥5个，批量>100件时取样≥8个，确保样本代表性；

b) 尺寸与状态：试样尺寸和形状应符合相关测试标准要求。测试面应保持原始状态，经标准清洁程序（如超声清洗）去除油污、灰尘等污染物；

c) 状态调节：试样应在标准实验室环境（温度23±2℃，相对湿度50±5%）下调节不少于24 h后进行测试；

d) 试样标识：每个试样应标注生产批号、辐照剂量、测试面朝向，确保全流程可追溯。

6.2 辐照实施

应按照以下方法进行：

a) 辐照前应对电子束装置进行预热与稳定性测试；

b) 使用标准剂量计对辐照场进行标定，确保剂量准确；

c) 试样应平铺或固定于传送带上，避免堆叠导致剂量屏蔽；

d) 记录辐照时环境温湿度、气氛组成及设备运行参数。

6.3 表面物理性能试验

6.3.1 表面硬度

按照 GB/T 4340.1 的规定执行。其中金属材料试验力 1000g，保荷时间 15s；高分子材料试验力 500g，保荷时间 10s；陶瓷材料试验力 1500g，保荷时间 20s。每个试样测试 5 个点，取平均值。硬度提升率按公式（1）计算：

$$\eta_H = \frac{H_1 - H_0}{H_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

η_H ——表面硬度提升率，%；

H_1 ——辐照后表面硬度，HV；

H_0 ——辐照前表面硬度，HV。

6.3.2 磨损率

按照GB/T 12444的规定执行。采用球-盘摩擦磨损试验机，试验球为GCr15钢球，直径5mm，载荷5N，转速500r/min，试验时间30min。磨损率按公式（2）计算：

$$W = \frac{V}{F \times L} \quad (2)$$

式中：

W ——磨损率， $\text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ ；

V ——磨损体积， mm^3 ；

F ——试验载荷，N；

L ——摩擦行程，m。

6.3.3 表面粗糙度

按照GB/T 1031的规定执行。采用触针式粗糙度仪，取样长度0.8mm，评定长度4mm，每个试样测试5个位置，取平均值。

6.4 表面化学性能试验

6.4.1 特征元素含量

采用X射线荧光光谱仪测定特征元素含量，测试条件：电压50kV，电流50mA，测试时间60s。元素含量偏差按公式（3）计算：

$$\Delta C = \frac{|C_1 - C_0|}{C_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

ΔC ——元素含量偏差，%；

C_1 ——实测元素含量，%；

C_0 ——目标元素含量，%。

6.4.2 水接触角

按照GB/T 30693的规定执行。采用接触角测量仪，液滴为去离子水，体积5 μ L，每个试样测试5个点，取平均值。

6.4.3 表面能

基于水接触角测试结果，采用Owens-Wendt法计算材料表面能。

6.5 力学性能试验

6.5.1 涂层结合强度

按照GB/T 5270的规定执行。采用划痕试验仪，金刚石压头半径0.2mm，加载速率50N/min，划痕长度5mm。临界载荷判定依据为涂层出现剥落时的载荷值，每个试样测试3次，取平均值。

6.5.2 抗拉强度

按照GB/T 228.1的规定执行。采用电子万能试验机，拉伸速率2mm/min，每个批次测试5个试样，取平均值。抗拉强度提升率按公式（4）计算：

$$\eta_{\sigma} = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\sigma_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

η_{σ} ——抗拉强度提升率，%；

σ_1 ——辐照后抗拉强度，MPa；

σ_0 ——辐照前抗拉强度，MPa。

6.5.3 冲击强度

按照GB/T 229的规定执行。采用夏比摆锤冲击试验机，试样尺寸10mm×10mm×55mm，V型缺口深度2mm，每个批次测试5个试样，取平均值。冲击强度提升率按公式（5）计算：

$$\eta_a = \frac{a_1 - a_0}{a_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

η_a ——冲击强度提升率，%；

a_1 ——辐照后冲击强度，J/cm²；

a_0 ——辐照前冲击强度，J/cm²。

6.6 功能性能试验

6.6.1 抗菌率

按照GB/T 31402的规定执行。以大肠杆菌（ATCC 25922）为试验菌株，培养温度37℃，培养时间24h。抗菌率按公式（6）计算：

$$R=\frac{N_0-N_1}{N_0}\times100\% \tag{6}$$

式中：

- R——抗菌率，%；
- N₀——空白试样的菌落数，CFU；
- N₁——改性试样的菌落数，CFU。

6.6.2 透光率和雾度

按照GB/T 2410的规定执行。采用分光光度计，测试波长550nm，每个试样测试3次，取平均值。

7 评价程序

7.1 采样与制样

- a) 采样方案：根据批量大小，按照GB/T 2828.1或双方商定的抽样方案随机抽取代表性样品。样品应有清晰、唯一的标识，确保可追溯至原始生产批次和工艺参数。
- b) 制样保护：制样过程（如切割、镶嵌、抛光）必须避免对待测表面造成热影响、机械损伤或污染。

7.2 测试环境

所有测试应在受控的标准实验室环境下进行：温度23±2℃，相对湿度50±5%。对环境振动、电磁干扰有特殊要求的测试，应在相应条件下进行。测试设备需定期由有资质的计量机构校准，并在有效期内使用。

7.3 结果评定

7.3.1 原始数据记录

测试过程中应详细、准确地记录所有原始数据，包括但不限于：试样信息、测试日期、环境条件、设备型号及编号、测试参数、观测现象及原始测试值。原始记录不得随意涂改，如需更改，应采用划改方式并由修改人签名。

7.3.2 数据处理

每个性能指标通常应至少对5个有效试样进行测试，计算其算术平均值和标准偏差。根据需要，可计算变异系数或给出95%置信区间。数据修约应符合GB/T 8170的规定。

7.3.3 综合评价方法

采用加权评分法进行综合评价。各项性能指标根据其在实际应用中的重要性赋予权重，见表5。综合得分计算公式：总分=Σ(单项得分×权重系数)。

表5 性能评价权重与评分表示例

性能类别	评价指标	权重（%）	适用材料类型	达标值	最优值
表面物理性能	表面硬度提升率（%）	10	金属材料	≥10	≥12
			高分子材料	≥15	≥18
			陶瓷材料	≥8	≥9.6
			复合材料	≥12	≥14.4

性能类别	评价指标	权重 (%)	适用材料类型	达标值	最优值
	磨损率 ($\text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$)	10	金属材料	≤ 0.10	≤ 0.08
			高分子材料	≤ 0.30	≤ 0.24
			陶瓷材料	≤ 0.08	≤ 0.064
			复合材料	≤ 0.20	≤ 0.16
	表面粗糙度 ($R_a, \mu\text{m}$)	10	金属材料	≤ 0.8	≤ 0.64
			高分子材料	≤ 1.2	≤ 0.96
			陶瓷材料	≤ 0.5	≤ 0.4
			复合材料	≤ 1.0	≤ 0.8
表面化学性能	特征元素含量偏差 (%)	5	所有材料	≤ 5	≤ 3
	水接触角 ($^\circ$)	8	疏水材料	≥ 100	≥ 120
			亲水材料	≤ 30	≤ 24
	表面能 (mN/m)	7	疏水材料	≤ 30	≤ 24
			亲水材料	≥ 50	≥ 60
力学性能	涂层结合强度(临界载荷, N)	10	金属材料	≥ 50	≥ 60
			高分子材料	≥ 30	≥ 36
			陶瓷材料	≥ 60	≥ 72
			复合材料	≥ 40	≥ 48
	抗拉强度提升率 (%)	10	金属材料	≥ 5	≥ 6
			高分子材料	≥ 8	≥ 9.6
			陶瓷材料	≥ 3	≥ 3.6
			复合材料	≥ 6	≥ 7.2
	冲击强度提升率 (%)	10	金属材料	≥ 10	≥ 12
			高分子材料	≥ 15	≥ 18
			陶瓷材料	≥ 5	≥ 6
			复合材料	≥ 12	≥ 14.4
功能性能	抗菌率 (如适用, %)	5	医疗、食品接触类材料等	≥ 99	≥ 99.9
	透光率 (如适用, %)	8	透明材料(如高分子、陶瓷)	≥ 85	≥ 90
	雾度 (如适用, %)	7	透明材料(如高分子、陶瓷)	≤ 5	≤ 3
注: 若功能性能不适用, 则该项指标按满分计算。					

7.3.4 单项得分计算

基于表5的达标值(合格基准)与最优值(优质基准), 单项得分按以下规则计算:

- 若测试值未达到达标值: 该项得0分(单项指标不合格);
- 若测试值达到达标值但未达到最优值: 该项得60分;
- 若测试值达到或优于最优值: 该项得100分(单项指标满分)。

7.3.5 合格判定

综合评价得分(S)是判定该批次材料电子束辐照改性效果的主要依据:

- a) 优秀：综合评价得分 $S \geq 90$ 分，且无单项指标得0分；
- b) 合格：综合评价得分 $S \geq 60$ 分，且无单项指标得0分；
- c) 不合格：综合评价得分 $S < 60$ 分，或存在单项指标得0分；
- d) 具体的合格判据可根据产品规格书或供需双方协议进行调整。

7.4 评价报告

评价报告是质量判定和追溯的重要文件，应至少包括：

- a) 任务来源与基本信息（委托单位、样品描述、评价依据）；
- b) 测试条件概述（环境、设备）；
- c) 详细的测试结果与数据（最好以表格、图表形式呈现）；
- d) 根据7.3条进行质量评定后的明确结论（优秀/合格/不合格，或等级）；
- e) 报告应由检测人、审核人、批准人三级签字，并加盖检测专用章。

8 安全、健康与环保（HSE）要求

8.1 辐射安全

电子束辐照装置及操作必须严格遵守GB 18871、GB 5172和HJ 979的规定：

- a) 防护原则：贯彻“纵深防御”理念，采取多层次防护与安全措施。装置设计需考虑冗余性（如人员出入口设3道及以上联锁）和多元性（采用不同原理的联锁）；
- b) 区域划分：工作场所应明确划分为控制区（如主机室、辐照室）和监督区（如控制室），并设置醒目的警告标志；
- c) 个人防护与监测：工作人员必须配备个人剂量计和报警仪，定期接受辐射安全培训，年有效剂量不得超过HJ 979规定限值（通常职业照射约束值为5mSv/年，公众为0.1mSv/年）；
- d) 应急准备：制定详细的辐射事故应急预案，并定期组织演练。

8.2 有害气体防护

电子束辐照空气会产生臭氧（O₃）等有害气体，防护要求如下：

- a) 通风要求：主机室和辐照室必须设置强制通风系统，并在加速器停机后联锁运行一定时间，确保室内臭氧浓度低于GBZ 2.1规定的职业接触限值；
- b) 排放控制：有害气体排放浓度应符合GB 3095环境空气质量标准的要求。

8.3 废弃物处理

辐照过程本身一般不直接产生放射性废物。但清洗设备、更换部件等常规操作可能产生沾有污染物的废弃物，应按GB 18484、GB 18599的相关规定进行分类处理。若涉及特殊材料可能产生特定有害物质，需专门处理。