

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

团 体 标 准

T/CACE XXXX—XXXX

废石墨气热提纯装备评价方法

Evaluation method for gas-thermal purification equipment of waste graphite

（征求意见稿）

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中国循环经济协会 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 分类与命名 2

5 评价要求 3

6 评价方法 4

7 评价规则与报告 5

附录 A（资料性） 核查与测试方法 7

附录 B（资料性） 性能指标分级评定基准 13

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。本文件由北京工业大学提出。

本文件由中国循环经济协会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

废石墨气热提纯装备评价方法

1 范围

本文件规定了废石墨气热提纯装备（以下简称“装备”）的术语和定义、分类与命名、评价要求、评价方法、评价规则以及评价报告的格式。

本文件适用于采用电加热方式（包括但不限于感应加热、电阻加热），在真空或可控气氛（惰性气氛）及高温条件下，对特定来源的固定碳含量（干基）不低于98%的废石墨进行气热提纯的间歇式（批次式）或连续/半连续式成套热工装备的评价。

本文件不适用于采用燃烧加热方式的装备及实验室规模（对于间歇式装备，额定处理能力小于10 kg/炉；对于连续式装备，额定处理能力小于1 kg/h）的非生产性设备。

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。

GB/T 191-2008 包装储运图示标志
 GB/T 2589-2020 综合能耗计算通则
 GB/T 3521-2023 石墨化学分析方法
 GB/T 5226.1-2019 机械电气安全 机械电气设备 第1部分：通用技术条件
 GB/T 5959.1-2019 电热和电磁处理装置的安全 第1部分：通用要求
 GB 9078-1996 工业窑炉大气污染物排放标准
 GB/T 10067.1-2019 电热和电磁处理装置基本技术条件 第1部分：通用部分
 GB/T 13384-2008 机电产品包装通用技术条件
 GB/T 16716.1-2018 包装与环境 第1部分：通则
 GB/T 37752.1-2019 工业炉及相关工艺设备 安全 第1部分：通用要求
 JC/T 2571-2020 高纯石墨中微量元素测定方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

废石墨 waste graphite

来源于工业生产或消费后，固定碳含量（干基）不低于98%，需要通过提纯处理以再次利用的含碳材料。

3.2

电池回收源石墨 battery-derived graphite

从废旧锂离子电池（特别是负极材料）的破碎物理分选产物（黑粉）中，经湿法工艺回收有价值金属（如镍、钴、锂等）后产生的石墨残渣。

注：其典型特征是除常规金属杂质外，还可能含有机粘结剂的热解残留物、电解液，导致提纯过程中产生含氟（F）的腐蚀性气体。

3.3

石墨加工源石墨 graphite processing scrap

人造石墨制品（如石墨电极、高纯石墨模具等）在石墨化及机械加工过程中产生的边角料、切屑、粉尘及性能不达标的废品。

注：其典型特征是杂质种类相对单一，主要为原料（石油焦、针状焦）中固有的杂质元素，不含复杂的有机污染物。

3.4

匣钵污染源石墨 saggar-contaminated graphite

用于锂离子电池正极材料（特别是磷酸铁锂、三元锂等）高温烧结工艺后报废的石墨匣钵（或称“坩埚”）的破碎料。

注：其典型特征是除常规金属杂质外，还因长期接触正极材料而受到渗透性污染，含有磷（P）、锂（Li）、铁（Fe）、镍（Ni）、钴（Co）、锰（Mn）等特征性杂质元素。

3.5

额定处理能力 rated processing capacity

在满足其宣称的最高目标纯度等级和工艺要求的前提下，装备所能处理的合格废石墨原料的质量。对于间歇式装备，其额定处理能力用符号 Q_b 表示，单位为千克每炉（kg/炉）；对于连续式装备，其额定处理能力用符号 Q_c 表示，单位为千克每小时（kg/h）。

3.6

单炉次工艺周期 single batch process cycle

仅适用于间歇式装备，指从装料、密封、开始运行，到提纯完成、冷却至可安全出料的全部时间，单位为小时（h）。

3.7

日均处理量 daily unit output

反映装备在24小时内理论生产效率的计算值，单位为千克每天（kg/天）。其具体计算方法见附录A.2.1.4。

3.8

单位产品综合能耗 comprehensive energy consumption per unit product

在一个完整的标准工艺周期（或连续生产的一个稳定核算周期）内，生产单位质量（千克）合格产品所消耗的各种能源（电能、冷却水、工艺气体等）的总和，按GB/T 2589-2020的规定折算或直接以电能消耗计，单位为千瓦时每千克（kWh/kg）。

[来源：GB/T 2589-2020，3.7]

3.9

关键易损件 key consumable parts

在装备运行过程中，因长期处于高温、腐蚀性气氛等恶劣环境下而发生必然损耗，需要定期维护或更换的核心部件。

注：主要包括加热体（石墨或复合材料）、物料坩埚、保温筒及保温毡等。

4 分类与命名

4.1 分类

4.1.1 按目标纯度等级

按装备设计用于达到的石墨产品最终纯度（按质量分数计）进行分类。本文件涉及的等级如下：

- a) 3N级装备：设计目标纯度 $\geq 99.9\%$ ；
- b) 4N级装备：设计目标纯度 $\geq 99.99\%$ ；
- c) 5N级装备：设计目标纯度 $\geq 99.999\%$ ；
- d) 6N级装备：设计目标纯度 $\geq 99.9999\%$ 。

4.1.2 按额定处理能力

按额定处理能力分为小型、中型和大型装备，具体划分建议见表1。

表1 按额定处理能力分类

类型	间歇式装备 (kg/炉)	连续式装备 (kg/h)
小型装备	$Q_b < 500$	$Q_c < 50$
中型装备	$500 \leq Q_b < 2000$	$50 \leq Q_c < 150$
大型装备	$Q_b \geq 2000$	$Q_c \geq 150$

4.1.3 按运行模式

间歇式（批次式）装备（代号B）

连续/半连续式装备（代号C）

4.1.4 按加热方式

- 感应式加热装备（代号I）
- 电阻式加热装备（代号R）
- 感应式+电阻式加热装备（代号 IR）

4.1.5 按结构形式

- 立式装备（代号V）
- 卧式装备（代号H）

4.2 命名

装备的型号应由产品代号、特征代号和主参数代号三部分组成，结构清晰，便于识别。

4.2.1 命名格式

推荐的编制格式如下：
GTP-[运行模式][加热方式][结构形式]-[最高纯度等级]/[额定处理能力]。

4.2.2 代号说明

GTP：产品代号，为“Graphite Thermal Purification（石墨热提纯）”的英文缩写，指废石墨气热提纯装备。

特征代号：由运行模式、加热方式、结构形式的代号（见4.1.3~4.1.5）依次组合而成。

主参数代号：由装备可达到的最高纯度等级（见4.1.1）和额定处理能力组成，中间用“/”分隔。额定处理能力的数值单位，间歇式取kg/炉，连续式取kg/h。

4.2.3 命名示例

- 示例 1：一台间歇式（B）、感应加热（I）、立式（V）结构、最高可提纯至 5N、额定装料量为 1000 公斤的装备，其型号可命名为：GTP-BIV-5N/1000。
- 示例 2：一台连续式（C）、电阻加热（R）、卧式（H）结构、最高可提纯至 4N、额定处理能力为 100 公斤每小时的装备，其型号可命名为：GTP-CRH-4N/100。

5 评价要求

本章全面规定了对废石墨气热提纯装备进行评价时所依据的各项要求。这些要求分为5.1（基础要求）和5.2（性能分级指标体系）两大部分。

5.1 基础要求

本条款规定了装备作为工业产品必须满足的安全、环保及标识与文件等方面的最低要求。这些要求是进行性能分级评价的基础门槛。具体要求见表2。

表 2 基础要求核查表

类别	编号	核查项	要求概述
5.1.1 安全要求	5.1.1.1	要求概述	设计、制造与安装应符合 GB/T 10067.1及 GB/T 37752.1；电气系统应符合 GB 5226.1及GB/T 5959.1
	5.1.1.2	冗余安全保护	应具备独立的、与主控系统硬件分离的超温保护和关键冷却回路保护功能
	5.1.1.3	危险状态联锁	应具备可靠的硬件安全联锁，以防止压力异常、气氛危险或高温状态下的误操作
5.1.2 环保要求	5.1.2.1	尾气处理系统	必须配套能有效去除粉尘、酸性气体等污染物的尾气处理系统
	5.1.2.2	污染物排放达标	有组织排放口的污染物排放浓度必须符合GB 9078及地方标准
	5.1.2.3	固/液废物处置	制造商必须在技术文件中提供符合环保要求的二次污染物推荐处置方案
5.1.3 标识与文件要求	5.1.3.1	铭牌	必须在醒目位置固定清晰、不易磨损的永久性铭牌，内容符合规定
	5.1.3.2	随行文件	必须提供产品合格证、操作说明书、维护保养手册、电气原理图等齐全的

类别	编号	核查项	要求概述
			技术文件
	5.1.3.3	包装、标志与环境要求	装备的包装应符合 GB/T 13384 的通用技术条件,其包装储运图示标志应符合 GB/T 191 的规定,并应遵循 GB/T 16716.1 关于包装与环境的通则

5.2 性能分级指标体系

本条款规定了用以全面、多维度评价装备性能的指标体系,用以描绘装备的综合性能画像。该体系包含四个维度,具体指标见表3。

表 3 性能分级指标体系

维度	编号	指标名称
5.2.1 核心工艺先进性	5.2.1.1	提纯能力达成度
	5.2.1.2	产品纯度偏差
	5.2.1.3	产品收率
	5.2.1.4	日均处理量达标率
5.2.2 装备运行稳定性	5.2.2.1	平均无故障工作时间
	5.2.2.2	系统密封性
	5.2.2.3	温控精度
5.2.3 装备智能性	5.2.3.1	全自动运行能力
	5.2.3.2	数据追溯能力
5.2.4 技术经济性	5.2.4.1	单位产品综合能耗
	5.2.4.2	单位产品物料成本
	5.2.4.3	关键易损件保证寿命
	5.2.4.4	维护便利性

6 评价方法

本章规定了对第5章中所有评价要求进行核查或测试的操作依据。评价过程应遵循本章规定的通用准备,并按照附录B中规定的具体方法执行。

6.1 评价准备（通用要求）

为保证评价结果的客观性与可比性,在进行运行测试前,须完成以下通用准备工作。

6.1.1 基准原料

如无特殊说明,须采用石墨加工源石墨作为基准测试原料。其指标须符合:初始碳含量(干基)≥98.5%,水分含量≤0.5%,粒度分布(D50)应在装备制造推荐的范围。对基准原料化学成分的分析,可参照 GB/T 3521 中规定的方法执行。

6.1.2 专项原料

若装备宣称对特定来源(如电池回收源或铈钍污染源)的废石墨具有特殊处理能力,则必须采用对应的专项原料进行专项测试。专项原料的特征杂质元素(如F、P等)含量须有明确记录。

6.1.3 标准测试工艺

装备制造须提供针对不同目标纯度等级(3N-6N)的标准测试工艺曲线。该工艺曲线须被记录并作为评价依据,至少包含以下参数:

- a) 升温程序(速率与阶段);
- b) 保温程序(工艺工作温度与保温时间);
- c) 气氛程序(真空度、惰性气体种类与流量、反应性气体种类与流量、切换时机等);
- d) 冷却程序;
- e) 对于连续式装备,还应包括物料输送速率。

6.2 核查与测试方法

对第5.1条中各项基础要求的符合性核查，以及对第5.2条中各项性能分级指标的详细测试，其具体解释、操作步骤、数据采集与处理方法，均应遵照附录A的规定执行。

7 评价规则与报告

本章规定了评价工作的具体程序、结论的判定规则以及评价报告的格式与内容。

7.1 评价程序

评价工作应按照统一、规范的程序进行，以保证评价过程的客观性与一致性。推荐的评价程序如下。

7.1.1 接受委托与资料审查

评价机构接受委托方的评价请求，并要求装备制造商提供完整、真实的技术文件，包括但不限于第5.1.3.2条中规定的所有随行文件。评价机构对所提交资料的完整性和合规性进行初步审查。

7.1.2 制定评价方案

基于审查的资料和评价请求，评价机构应制定详细的评价方案。方案应明确本次评价的具体范围、引用的标准、评价项目、测试流程、时间安排及参与人员等。

7.1.3 现场核查

评价人员前往装备现场，依据附录A中A.1章节规定的核查方法，对第5.1条中的各项基础要求进行逐项核查，并记录核查结果。

7.1.4 运行测试与数据采集

对于通过基础要求核查的装备，评价人员应依据附录A中A.2章节规定的测试方法，进行现场运行测试，并完整、准确地采集所有性能指标所需的数据。

7.1.5 数据整理与评定

评价人员对采集到的数据和信息进行整理、计算和分析，并依据第7.2条规定的评定规则，得出各项评价的结论与等级。

7.1.6 编制与出具评价报告

基于所有的核查、测试、计算与评定结果，依据第7.3条的规定，编制内容完整、结论明确的最终评价报告，并正式出具给委托方。

7.2 评定规则

评价过程的结论评定遵循以下两阶段规则。

7.2.1 符合性判定

评价工作应首先依据附录A中规定的方法，对第5.1条的基础要求进行逐项审查。审查结论分为“符合”或“不符合”。若有任何一项的审查结论为“不符合”，则该装备的最终评价结论为“不合格”，评价终止。

7.2.2 性能分级判定

对于通过符合性判定的装备，应依据附录A中规定的方法进行测试，并对照附录A中规定的性能指标分级评定基准，为第5.2条中的各指标逐项给出优、良、中或差的性能等级。

7.3 评价报告

评价报告是评价工作的最终成果，应内容真实、结论明确、格式统一。报告的核心是为用户提供一个全面、多维度的装备性能画像。

7.3.1 报告内容

一份完整的评价报告应至少包含以下内容。

7.3.1.1 封面

包括报告名称、报告编号、委托单位、评价机构、评价日期等。

7.3.1.2 装备基本信息表

包括制造商、产品型号（建议遵循本标准第4.2条的命名规则）、规格参数、出厂编号等。

7.3.1.3 评价依据

列出本文件及本次评价所依据的其他相关国家或行业标准。

7.3.1.4 评价结论

- a) 基础要求符合性结论表：以表格形式，逐项列出第 5.1 条中所有基础要求的核查结果（“符合”或“不符合”）；
- b) 最终评价结论：明确给出“不合格”（若未通过符合性判定），或“通过基础要求，性能分级见下表”的最终结论；
- c) 装备性能分级汇总表：对于通过符合性判定的装备，其各性能指标的详细评定等级，依据本标准附录 B《性能指标分级评定基准》进行评定后，汇总于下表示例中。
- d) 各项指标测试的原始数据摘要：以附页形式，提供关键测试数据的摘要记录；
- e) 评价过程发现的问题与改进建议（可选）：记录评价过程中发现的、不影响最终结论但值得改进的事项；
- f) 评价机构信息及相关人员签字盖章；
- g) 附件：如第三方检测报告等关键证明文件。

表 4 装备性能分级汇总示例表

评价维度	指标 1	指标 2	指标 3	指标 4
核心工艺先进性	提纯能力达成度	产品纯度偏差	产品收率	日均处理量达标率
评定等级	（优）	（良）	（优）	（中）
装备运行稳定性	平均无故障工作时间	系统密封性	温控精度	-
评定等级	（良）	（良）	（优）	-
装备智能性	全自动运行能力	数据追溯能力	-	-
评定等级	（优）	（良）	-	-
技术经济性	单位产品综合能耗	单位产品物料成本	关键易损件保证寿命	维护便利性
评定等级	（良）	（中）	（优）	（差）

注1：评级依据：上表中各性能指标的“优”、“良”、“中”、“差”评定等级，是评价人员依据本标准 附录A 规定的测试方法测得相应数据后，对照 附录B 中该指标对应的具体分级标准评定得出的最终结果。

注2：示例说明：上表中“评定等级”行内填充的（优）、（良）、（中）、（差）仅为格式示例。实际评价报告应根据测试结果，在此处如实填写最终评定等级。

附录 A

(资料性)

核查与测试方法

本附录规定了对第5章中各项评价要求进行核查与测试的详细操作依据。

A.1 基础要求的核查方法

本节规定了对表1中各项基础要求进行符合性判定的核查方法。

A.1.1 安全要求的核查

A.1.1.1 通用安全

通过文件审查方式，核对装备的设计图纸、合格证及引用的标准清单，确认其声明符合相关国家标准。

A.1.1.2 冗余安全保护

通过文件审查（审查电气图，确认安全回路的独立性）和现场功能测试（在安全条件下模拟故障，验证保护功能是否触发）相结合的方式进行核查。

A.1.1.3 危险状态联锁

通过现场功能测试，模拟相关危险工况，验证联锁功能是否可靠动作。

A.1.2 环保要求的核查

A.1.2.1 尾气处理系统

通过现场勘查，确认是否配套了尾气处理系统，并通过文件审查，核对该系统的处理能力是否与主设备匹配。

A.1.2.2 污染物排放达标

通过文件审查，核对设备制造商提供的（或在用户现场测试的）有资质的第三方检测机构出具的排放检测报告。

A.1.2.3 固/液废物处置

通过文件审查，核对制造商技术文件中是否包含清晰、合规的推荐处置方案。

A.1.3 标识与文件要求的核查

A.1.3.1 铭牌

现场勘查铭牌内容是否完整、清晰、牢固。

A.1.3.2 随行文件

文件审查随行技术文件是否齐全、完整。

A.1.3.3 包装、标志与环境要求

通过现场勘查与文件审查相结合的方式进行核查。现场勘查装备的运输包装，核对包装箱上的储运图示标志是否符合 GB/T 191 的规定。审查制造商提供的技术文件（如包装方案），确认其包装的通用技术条件符合 GB/T 13384 的要求，并确认其对遵循 GB/T 16716.1 的原则进行了说明。

A.2 性能分级指标的测试方法

在通过A.1的全部基础要求核查后，方可进行本节规定的性能指标测试。

本附录规定了对表2中各项性能指标的定义、测试操作方法、数据采集要求和计算公式。

A.2.1 核心工艺先进性指标测试

A.2.1.1 提纯能力达成度

本指标用以评价装备将其处理的废石墨提纯至其宣称目标纯度的能力。

A.2.1.1.1 取样

- a) 间歇式装备：在一个完整的工艺周期结束后，待物料冷却至安全温度，在坩埚内的上、中、下三个平面的中心及边缘位置采用九点取样法取样；
- b) 连续式装备：在装备稳定运行至少 2 小时后，在出料口按固定时间间隔（如 30 分钟）连续取样不少于 5 次。

A.2.1.1.2 分析

将所有样品混合均匀后送至有资质的检测机构，采用JC/T 2571规定的方法分析杂质含量，计算最终碳纯度。

A.2.1.1.3 评定依据

将测得的最终碳纯度与装备宣称的目标纯度等级进行比对，其结果用于附录B的等级评定。

A.2.1.2 产品纯度偏差

本指标用以评价在同一工艺批次内，不同位置产出的成品在最终纯度上的一致性程度。

A.2.1.2.1 取样

同A.2.1.1.1，但所有样品需单独标记、单独分析，不得混合。

A.2.1.2.2 计算

记录所有取样点的纯度测试结果，计算其最大值与最小值的差值，用 ΔC 表示。

$\Delta C = \text{Max}(\text{所有样品纯度}) - \text{Min}(\text{所有样品纯度})$

A.2.1.2.3 评定依据

计算出的 ΔC 值用于附录B的等级评定。

A.2.1.3 产品收率

本指标用以评价在物理处理过程中，投入物料被成功转化为最终产品的比例。

A.2.1.3.1 数据采集

在测试开始前，精确称量投入的基准原料总质量（干基计），记为 M_1 ，并测定其初始固定碳含量（ C_1 ，%）。测试结束后，仅收集并称量所有达到目标纯度要求的产品总质量，记为 M_2 。

A.2.1.3.2 计算

产品收率的计算方法如公式（1）所示：

$$\text{产品收率}(\%) = [M_2 / (M_1 \times C_1)] \times 100\% \quad \text{..... (A. 1)}$$

式中：

M_1 ：投入基准原料的总质量（干基计），单位为千克（kg）；

C_1 ：基准原料的初始固定碳含量，以质量分数表示（如98.5%记为0.985）；

M_2 ：产出的合格产品总质量，单位为千克（kg）。

A.2.1.3.3 评定依据

计算出的产品收率用于附录B的等级评定。

A.2.1.4 日均处理量达标率

本指标用以评价装备在实际运行中的生产效率，考核其是否达到制造商宣称的额定处理能力。

A.2.1.4.1 数据采集

- a) 间歇式装备：记录单炉次投入的原料质量 (R_{cb} , kg) 和完成单炉次工艺周期 (T_s , h)；
- b) 连续式装备：记录在稳定运行状态下，单位小时内处理的原料质量，即额定处理能力 (R_{cc} , kg/h)。

A.2.1.4.2 计算

首先计算实际日均处理量 (D_t)，然后计算达标率。计算出的日均处理量达标率用于附录B的等级评定。实际日均处理量 (D_t) 的计算如下。对于间歇式装备，按公式 (1) 计算，对于连续式装备，按公式 (2) 计算。

$$D_t = (R_{cb}/T_s) \times 24 \quad \text{..... (A.2)}$$

$$D_t = R_{cc} \times 24 \quad \text{..... (A.3)}$$

式中：

- D_t ：实际日均处理量，单位为千克每天 (kg/天)；
 R_{cb} ：间歇式装备的额定处理能力，即单炉次投料量，单位为千克每炉 (kg/炉)；
 T_s ：单炉次工艺周期，单位为小时 (h)；
 R_{cc} ：连续式装备的额定处理能力，单位为千克每小时 (kg/h)。

日均处理量达标率的计算：

$$\text{日均处理量达标率} = (D_t/D_s) \times 100\% \quad \text{..... (A.4)}$$

式中：

- D_s ：制造商宣称的日均处理量，单位为千克每天 (kg/天)。

A.3 装备运行稳定性指标测试

A.3.1 平均无故障工作时间 (MTBF)

本指标是国际通用的衡量装备可靠性的核心指标，指装备在总运行时间内，两次相邻故障之间的平均工作时间。

A.3.1.1 数据来源

通过审查制造商提供的可靠性分析报告，或查阅用户现场有据可查的连续运行记录（至少1000小时或等效批次）。

A.3.1.2 计算

平均无故障工作时间 = (总运行时间 - 总故障停机时间) / 故障次数

A.3.1.3 评定依据

计算出的MTBF值用于附录B的等级评定。

A.3.2 系统密封性

本指标用以评价炉体在与外界隔绝状态下，因微小泄漏而导致内部压力随时间变化的程度，是衡量装备密封性能的核心指标。

A.3.2.1 测试方法

将空炉在室温下抽真空至10Pa以下，关闭真空泵和所有阀门，开始记录炉内压强变化。

A.3.2.2

持续记录1小时，读取初始压强P1和最终压强P2。

A.3.2.3 计算

压升率的计算方法如公式（5）所示：

$$\text{压升率} = (P2 - P1) / t \quad \text{..... (A.5)}$$

式中：

压升率：单位为帕每小时（Pa/h）；

P1：测试开始时的初始压强，单位为帕（Pa）；

P2：测试结束时的最终压强，单位为帕（Pa）；

t：测试持续时间，本标准中取1小时（h）。

A.3.2.4 评定依据

计算出的压升率用于附录B的等级评定。

A.3.3 温控精度

本指标用以评价装备在保温阶段，对工作区温度控制的精确性和稳定性。

A.3.3.1 数据采集

在标准测试工艺的保温阶段，连续记录工作区核心测温点的温度数据至少1小时，记录频率不低于1次/分钟。

A.3.3.2 计算

检查在整个记录周期内，所有实测温度值（ T_n ）与设定温度值（ T_{set} ）之间的偏差。取其绝对偏差的最大值，即为该装备的温控精度（AT）。

$$AT = \text{Max} (|T_n - T_{set}|) \quad \text{..... (A.6)}$$

式中：

最终结果以“ $\pm AT$ ”的形式记录，例如，计算出的最大绝对偏差为3℃，则温控精度记为 $\pm 3^\circ\text{C}$ 。

A.3.3.3 评定依据

计算出的温控精度用于附录B的等级评定。

A.4 装备智能性指标测试

A.4.1 全自动运行能力

本指标用以评价装备的自动化程度，衡量其在无人干预下自动完成完整工艺流程及应对异常的能力。

A.4.1.1 操作验证

现场验证装备是否具备“一键启动”功能，即在完成装料和关门后，能否通过单一指令自动完成全部核心工艺流程。

A.4.1.2 故障模拟

模拟常见故障（如冷却水中断、超温），验证系统能否自动报警、转入安全处理程序并清晰提示故障点。

A.4.1.3 评定依据

依据自动化程度和故障处理能力，对照附录B进行等级评定。

A.4.2 数据追溯能力

本指标用以评价装备对关键工艺数据的记录、存储、查询和导出能力，是实现生产过程质量管控和分析的基础。

A.4.2.1 功能核查

检查装备的人机交互界面（Human-Machine Interface, HMI）或上位机系统，核实其对关键工艺参数（如温度、压力、时间、流量）的记录、存储、查询和导出功能。

A.4.2.2 评定依据

依据记录的完整性、存储时间长短、数据导出便利性及远程接口能力，对照附录B进行等级评定。

A.5 技术经济性指标测试

A.5.1 单位产品综合能耗

本指标指生产单位质量合格产品所消耗的总电能。

A.5.1.1 数据采集

在一个完整的标准测试周期内，使用经校准的电表记录装备运行所消耗的总电能（E，kWh）。同期产出的合格产品总质量记为 M_2 （kg），其测量方法同A.2.1.3.1。本标准仅核算电能消耗，不涉及其他能源。

A.5.1.2 计算

单位产品综合能耗 = E / M_2 ，单位为kWh/kg。

A.5.1.3 评定依据

计算出的能耗值用于附录B的等级评定。

A.5.2 单位产品物料成本

本指标指生产单位质量合格产品所消耗的辅助物料的成本。

A.5.2.1 数据采集

在与A.5.1.1相同的测试周期内，记录所有消耗的辅助物料总量，包括但不限于工艺气体（如Ar，N₂）、提纯剂、易损密封件等。同时记录各项辅助物料的市场采购单价。

A.5.2.2 计算

结合物料单价，计算出生产单位质量合格产品的辅助物料成本。

首先，计算测试周期内的总物料成本：总物料成本 = Σ （各项物料消耗量 × 其单价）。其次，计算单位产品运行成本：单位产品运行成本 = 总物料成本 / M_2 。（注：此处的 M_2 与A.5.1.1中为同一数值）。

A.5.2.3 评定依据

计算出的成本值用于附录B的等级评定。

A.5.3 关键易损件保证寿命

本指标用以评价核心耗材（如加热体、保温筒）的耐用性，直接关系到装备的长期维护成本和设备可用率。

A.5.3.1 文件审查

审查制造商在官方文件（如质量保证书、技术规格书）中对核心易损件使用寿命的书面承诺（以使用时间或炉次为单位）。

A.5.3.2 评定依据

审查到的书面承诺值用于附录B的等级评定。

A.5.4 维护便利性

本指标用以评价对装备进行日常维护和更换易损件的难易程度。

A.5.4.1 现场评估

结合手册，评估或现场模拟更换核心易损件的流程。

A.5.4.2 评定依据

从“是否需要专用工具”、“操作空间是否充足”、“流程是否清晰简便”、“所需操作人数”等维度，对照附录B进行等级评定。

附录 B
(资料性)
性能指标分级评定基准

本附录规定了对表3中各项性能指标进行“优、良、中、差”四个等级评定的具体基准。
核心工艺先进性评定基准，见表B. 1。

表 B. 1 核心工艺先进性评定基准

指标名称	等级	等级描述	评定标准
提纯能力达成度 (以宣称4N为例)	优	显著超越	产品纯度显著高于4N，如达到4N5(99.995%)或更高
	良	稳定达到	产品纯度稳定达到并略高于4N要求
	中	压线达标	产品纯度达到4N要求，但裕量很小
	差	未能达标	产品纯度未达到宣称的4N等级
产品纯度偏差 ($\Delta C = \text{Max} - \text{Min}$)	优	偏差极小	$\Delta C < 0.001\%$
	良	偏差较小	$0.001\% \leq \Delta C < 0.005\%$
	中	偏差在可接受范围	$0.005\% \leq \Delta C < 0.01\%$
	差	偏差较大	$\Delta C \geq 0.01\%$
产品收率	优	物料损耗极低	收率 $\geq 98\%$
	良	物料损耗较低	$95\% \leq \text{收率} < 98\%$
	中	物料损耗可接受	$90\% \leq \text{收率} < 95\%$
	差	物料损耗偏高	收率 $< 90\%$
日均处理量达标率	优	显著超越宣称值	达标率 $\geq 105\%$
	良	完全达到宣称值	$100\% \leq \text{达标率} < 105\%$
	中	基本达到宣称值	$90\% \leq \text{达标率} < 100\%$
	差	未达到宣称值	达标率 $< 90\%$

装备运行稳定性评定基准，见表B. 2。

表 B. 2 装备运行稳定性评定基准

指标名称	等级	等级描述	评定标准
平均无故障工作时间 (MTBF, 以小时为单位)	优	工业级高可靠性	MTBF > 2000
	良	标准工业级可靠性	$1000 < \text{MTBF} \leq 2000$
	中	满足基本使用要求	$500 < \text{MTBF} \leq 1000$
	差	可靠性较低	MTBF ≤ 500
系统密封性 (单位为Pa/h)	优	高真空级密封性	压升率 ≤ 0.7
	良	优良的工业密封性	$0.7 < \text{压升率} \leq 1.0$
	中	满足工艺基本要求	$1.0 < \text{压升率} \leq 5.0$
	差	密封性较差	压升率 > 5.0
温控精度 (AT = 最大绝对偏差, 单位为 $^{\circ}\text{C}$)	优	高精度控温	AT $\leq \pm 1$
	良	精密控温	$\pm 1 < \text{AT} \leq \pm 3$
	中	标准工业控温	$\pm 3 < \text{AT} \leq \pm 5$
	差	控温能力较差	AT $> \pm 5$

装备智能性评定基准，见表B. 3。

表 B. 3 装备智能性评定基准

指标名称	等级	等级描述	评定标准
全自动运行能力	优	智能全自动	同时满足以下3点：（1）具备“一键启动”功能，可自动完成全流程；（2）具备详细的故障自诊断功能，能清晰提示具体故障点；（3）具备自动安全处置能力
	良	可靠半自动	核心工艺段可自动运行，但部分辅助操作需人工确认；具备基本的故障报警功能

指标名称	等级	等级描述	评定标准
数据追溯能力	中	菜单式操作	仅部分核心工艺段可自动运行，大部分操作需通过菜单或分步指令由人工执行
	差	手动依赖	基本无自动化流程，完全依赖人工操作
	优	全面开放集成	同时满足以下3点：（1）关键工艺参数记录全面，存储周期>3个月；（2）支持一键导出为通用格式，如逗号分隔值文件（Comma-Separated Values, CSV） ¹ ；（3）提供标准工业协议，如开放平台通信统一架构（OPC Unified Architecture, OPC-UA） ² ，用于远程集成
	良	功能完整独立	关键参数记录完整，存储周期>1个月；可通过通用串行总线（Universal Serial Bus, USB）等方式导出数据
	中	基本记录查询	记录主要参数，存储周期较短（如1个月内）；仅能在设备人机交互界面（HMI）上回顾，导出不便
	差	孤岛数据显示	仅能实时显示数据，无历史数据存储或追溯功能

注1：逗号分隔值文件（CSV）：是一种通用的、纯文本格式的电子表格文件，可被绝大多数数据分析软件和办公软件（如Microsoft Excel）直接打开和处理。

注2：OPC统一架构（OPC-UA）：是一种跨平台的、面向服务的、用于工业自动化领域的安全、可靠的数据交换开放标准。提供此协议意味着装备可以方便地接入工厂的制造执行系统（MES）或数据采集与监视控制系统（SCADA）。

技术经济性评定基准，见表B.4。

表 B.4 技术经济性评定基准

指标名称	等级	等级描述	评定标准
单位产品综合能耗 （数值需行业调研确定）	优	行业能效标杆	能耗值<（行业基准值×80%）
	良	节能型设备	（行业基准值×80%）≤能耗值<（行业基准值×95%）
	中	行业平均水平	（行业基准值×95%）≤能耗值≤（行业基准值×110%）
	差	高能耗设备	能耗值>（行业基准值×110%）
单位产品物料成本 （数值需行业调研确定）	优	精细节能	物耗成本<（行业基准成本×90%）
	良	良好控制	（行业基准成本×90%）≤物耗成本<行业基准成本
	中	行业平均	行业基准成本≤物耗成本≤（行业基准成本×110%）
	差	物耗偏高	物耗成本>（行业基准成本×110%）
关键易损件保证寿命	优	超长寿命承诺	保证寿命>（行业基准寿命×150%）
	良	高于行业标准的寿命承诺	（行业基准寿命×120%）<保证寿命≤（行业基准寿命×150%）
	中	行业标准寿命承诺	（行业基准寿命×80%）≤保证寿命≤（行业基准寿命×120%）
	差	低于行业标准的寿命承诺或无承诺	保证寿命<（行业基准寿命×80%）或无明确书面保证
维护便利性	优	模块化快维	同时满足以下3点：（1）核心易损件采用模块化设计；（2）更换无需专用工具；（3）单人可在2小时内完成典型易损件的更换操作。
	良	人性化标准	更换核心易损件使用通用工具即可，操作空间充足，流程清晰，但可能需多人协作或耗时较长。
	中	体验不佳	可进行维护，但存在操作空间受限、流程步骤繁琐或关键部件可达性差等问题。
	差	高难度挑战	更换核心易损件需拆卸非关联的大型部件，或必须使用专用工具，或必须依赖制造商工程师到场。