



真空气雾化及非真空气雾化设备 技术白皮书

版本号:HNSL-1.0(2024)

发布日期:2026 年 10 月

株洲双菱科技有限公司

“公开发布” 网址: www.hnsl.net

第一部分：执行摘要

本白皮书系统阐述株洲双菱科技有限公司在金属粉末气雾化制备领域的两大核心技术路线——真空气雾化（VIGA）与非真空气雾化（GA）的工艺原理、技术特性、产品性能指标及应用场景。

- 1.1. 真空气雾化技术采用真空感应熔炼与惰性气体超音速雾化耦合工艺，在真空或高纯惰性气氛下完成熔炼与雾化全过程，制备的粉末具有低氧含量、高球形度、窄粒径分布等特征，适用于高温合金、铁镍合金、铝合金等对氧含量敏感的高端合金粉末制备。
- 1.2. 非真空气雾化技术采用大气环境下惰性气体保护熔炼与高压气体雾化工艺，具有生产效率高、设备投资低、运行成本可控等优势，适用于铁基合金、不锈钢、铜基合金等大批量工业化粉末生产。
- 1.3. 株洲双菱科技有限公司同时具备两条技术路线的规模化生产能力，可根据客户材料体系和性能要求灵活选择最优工艺方案。
- 1.4. 核心技术指标一览：

指标	真空气雾化（VIGA）	非真空气雾化（GA）
适用材料体系	高温合金、铁镍合金、铝合金、钴基合金	铁基合金、不锈钢、铜基合金
氧增量（高温合金）	≤200ppm	≤600ppm
D50 粒径范围	25-50 μm	25-50μm
球形度	≥90	≥90

第二部分：技术背景与行业需求

2.1. 金属粉末气雾化技术概述

气雾化法是目前增材制造用金属粉末的主流制备技术，据不完全统计，全球采用气雾化法制取的增材制造用金属粉末占总产量的 50%~60%。气雾化技术按熔炼环境可分为两大类：

- ◆ 真空气雾化（VIGA）：在真空或高纯惰性气氛下完成熔炼和雾化，适用于活性金属及对氧含量敏感的高端合金。
- ◆ 非真空气雾化（GA）：在大气环境下充入惰性保护气体完成熔炼和雾化，适用于常规铁基、镍基、铜基等合金的大批量生产。

2.2. 行业核心需求

- ◆ 当前增材制造（SLM/EBM）、热喷涂、激光熔覆、粉末冶金（MIM/PM）等应用领域对金属粉末提出以下核心要求：
- ◆ 低氧含量：过高的氧含量会在打印中局部生成气眼等缺陷，影响工件致密性及力学性能。
- ◆ 窄粒径分布：保证铺粉均匀性和打印一致性。
- ◆ 高球形度：高球形度粉末流动性更佳，铺粉更均匀。
- ◆ 高松装密度：关系到粉末的流动性和填充性能。

株洲双菱科技有限公司通过真空气雾化与非真空气雾化双技术路线，全面覆盖上述需求。

第三部分：真空气雾化（VIGA）技术详解

3.1. 技术原理

真空气雾化（Vacuum Induction Melting Inert Gas Atomization, VIGA）是在真空条件下，将金属原料在感应坩埚中熔化成液态，熔融金属经中间包底部导管

流至雾化喷嘴处，被高压惰性气体（氩气或氮气）超音速气流冲击破碎，雾化成微米级细小熔滴，熔滴在雾化塔内球化并凝固成球形粉末。

核心工艺环节包括：

- ◆ 真空熔炼：采用机械泵、罗茨泵、扩散泵对炉体抽真空，极限真空度可达 $6.67 \times 10^{-1} \text{Pa}$ 加扩散泵可达 $6.67 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 。
- ◆ 精炼控温：通过感应加热精确控制合金液温度和过热度。
- ◆ 超音速气雾化：高压惰性气体经紧耦合环缝式喷嘴形成超音速气流，将金属液流击碎。
- ◆ 球化凝固：熔滴在雾化塔内飞行过程中，在表面张力作用下球化，同时快速冷却凝固。
- ◆ 粉末收集：通过旋风分离器和滤筒除尘器进行粉末收集和分级。

3.2. 关键工艺参数

参数	典型范围	公司实际值
极限真空度	$\leq 6.67 \times 10^{-3} \text{Pa}$	一般二级泵 $6.67 \times 10^{-1} \text{Pa}$ 三级泵 $\leq 6.67 \times 10^{-3} \text{Pa}$
雾化气体压力	2~6MPa	2-6MPa
雾化气体流量	10~30Nm ³ /min	10-30Nm ³ /min
熔炼温度	依材料而定（如高温合金 1400~1600℃）	最高 1700 ℃
雾化气体类型	高纯氩气/氮气（纯度 $\geq 99.999\%$ ）	$\geq 99.999\%$
过热度	50~150℃	100~150℃

研究表明，提高雾化压力可显著增强二次破碎强度，使中值粒径（D50）从 $42.1 \mu\text{m}$ 降低至 $37.5 \mu\text{m}$ 。

3.3. 粉末特性

3.3.1 粒径分布

真空气雾化粉末呈对数正态分布，D50 可在 35 μm 范围内调控。以 304 合金粉末为例，中值粒径 D50 约为 40 μm ，粒径主要分布在 15~180 μm 范围内。

3.3.2 氧含量

真空气雾化法在真空环境下完成熔融和雾化全过程，能够有效抑制氧气侵入。以 304 粉末为例，真空气雾化法制备的粉末氧含量约为 240ppm，在性能与成本之间实现了较好平衡。

3.3.3 孔隙率与微观结构

真空气雾化法制备的粉末孔隙尺寸较小、分布均匀，这与真空气雾化工艺的快速冷却过程密切相关。在真空环境下，外界气体夹杂的可能性较低，因此形成的孔隙尺寸较小。

3.3.4 颗粒形貌

真空气雾化粉末颗粒整体呈近似球形，粒径分布较为均匀，但存在少量非球形颗粒。部分颗粒表面可能存在轻微凹陷或微孔，系雾化过程中熔滴未完全冷却或内部气体释放所致。

3.4. 真空气雾化（VIGA）设备硬件配置

真空气雾化产线由真空熔炼系统、真空系统、雾化系统、雾化塔、气体系统、粉末收集系统、控制系统及检测系统组成，核心硬件配置如下：

系统	关键部件	规格型号	技术参数	备注
真空熔炼	真空感应熔炼炉	300KG+100KG	坩埚容量：300kg；最高熔炼温度：1700℃；感应电源功率：350Kw，100KG 感应可与 300KG 感应器互换，电源采用东方四通	支持高温合金、镍基合金等
	炉体炉盖	D2000*1300	内径Φ2000；材质 304 不锈钢；双层水冷结构，外壁 10mm，内壁 12mm，内壁光洁度 $Ra \leq 0.4 \mu m$ ；水套内壁承压 $\geq 0.5MPa$ 。	
中间包	感应加热	D250*250	保温包电源：IGBT 感应加热，45kw，频率 5.0-8KHz（功率无级可调）电源采用东方四通	
真空系统	机械泵+罗茨泵	H150+ZJP600+ZJP1200，采用神舟真空/马德宝品牌	极限真空度 $\leq 0.67 Pa$ ；工作真空度： $\leq 10 Pa$ ；达到工作真空度抽气时间 25 分钟，系统漏气率： $\leq 5Pa/h$ （空炉冷态，当系统处于极限真空度时）	保障低氧熔炼环境
雾化系统	紧耦合环缝式/环孔式喷嘴	D90-14	雾化气体压力：0-8MPa 可调；气流速度：超音速；喷嘴材质：304/316，管路设计的承受压力 20.0MPa。可提供设计图纸	可更换不同口径喷嘴
雾化塔	雾化塔体及下大锥体	非标定制：18000*7500	高度：7500mm；直 1800mm；内外壁材质：304；冷却方式：双层水冷结构，外壁 $\geq 10mm$ ，内壁 $\geq 12mm$ ；内壁光洁度 $Ra \leq 0.4 \mu m$ ；外表面拉丝	影响粉末冷却与球化
粉末收集系统	旋风分离器+滤筒除尘器+集粉罐	500 型	收集效率： $\geq 98\%$ ；滤芯精度： $0.3 \mu m$ ，合理水冷调，粉体收集冷却时间可小于 60 分钟	可实现多级收集

系统	关键部件	规格型号	技术参数	备注
控制系统	PLC/SCADA 控制系统		实时记录熔炼温度、真空度、雾化压力、气体流量；支持数据导出，PLC 品牌西门子，低压电器及小型继电器品牌施耐德、	工艺可追溯
水冷系统	水排	D80	该系统主要对熔炼室、雾化室、真空泵、等进行连续冷却，保障设备运行安；配备有冷却水输入汇流排和冷却水输出汇流排，304 不锈钢材质；本系统由上水管、不锈钢回水收集器、各种不锈钢阀门、抗震电接点压力表等组成； 配备进水总水压、失压断水、温度和流量监控，能实现压力报警、高温报警和断水报警及连锁保护等装置；流量及温度均带数显屏幕；设备内部水路管及配件材质均为 304 不锈钢管，分水管为不锈钢硬管，分别接到各进出水附件，软管进回水有颜色区分，耐压$\geq 5\text{kg}$；总排水设有法兰，只需和用户循环水系统接口连接即可； 1 水温水压水流量监测，冷却水的温度、压力都将显示到二次仪表上，设置水压低低联锁保护装置；具有进回水温度差、流量差检测报警且和中频电源加热联锁自动报警停机； 设置应急水接入装置，以保证设备的安全运行； 冷却水压力：$0.4\sim 0.5\text{MPa}$，水流量约 $65\text{m}^3/\text{h}$，进水温度$\leq 35^\circ\text{C}$，出水温度$\leq 55^\circ\text{C}$	

系统	关键部件	规格型号	技术参数	备注
	抗振压力表	0-16MPa	所有压力表需采用红旗品牌	
工作平台	钢架结构	300KG 真空雾化钢架平台台	平台为 200 型工字钢，设计布局合理、结构稳固、使用安全，支持平台拓展；一般 10000*10000mm；结合车间现有布局和设备，综合设计，设备总高度满足车间梁下高度实际安装和使用需求；（具体设计根据车间实际情况适当调整）	

3.5. 技术优势与局限性

优势：

- ◆ 氧含量低，适用于活性金属及高温合金
- ◆ 合金成分精确可控，化学成分均匀
- ◆ 粉末球形度好，流动性佳
- ◆ 适用于工业化规模应用，性能与成本平衡良好

局限性：

- ◆ 设备投入大，真空系统造价高昂
- ◆ 工艺复杂，生产效率相对较低
- ◆ 存在少量非球形颗粒和卫星粉

第四部分：非真空雾化（GA）技术详解

4.1. 技术原理

非真空雾化（Gas Atomization, GA）是在大气环境下，将金属原料在中频感应炉中熔化，熔化过程中向炉内充入氮气或氩气作为保护气体。熔融金属液经中间包倾倒入雾化喷嘴，通过高压氮气（压力 2~5 MPa）将钢液雾化成细小液滴，液滴在雾化塔中冷却凝固形成粉末。

核心工艺环节包括：

- ◆ 大气熔炼：中频感应炉熔化金属原料，充入惰性保护气体
- ◆ 压气雾化：高压氮气或氩气经环孔喷嘴将金属液流击碎
- ◆ 冷却凝固：液滴在雾化塔中飞行冷却，球化凝固
- ◆ 粉末收集与分级：通过旋风集粉器和气流分级机进行粉末收集与精细分级

4.2. 关键工艺参数

参数	典型范围	公司实际值
雾化气体压力	2~5 MPa	2-6 MPa
雾化/保护气体类型	氮气/氩气	氮气/氩气
熔炼温度	依材料而定	1700 °C
雾化气体流量	依设备规格	1200-1800 Nm ³ /min

4.3. 粉末特性

4.3.1 粒径分布

非真空雾化粉末的粒径分布与雾化压力、气体流量及喷嘴结构密切相关。株洲双菱科技有限公司通过与中南大学粉冶院优化紧耦合喷嘴设计，D50 可控制在 26 μm。

4.3.2 氧含量

非真空气雾化在熔炼和雾化过程中，粉末中氧含量会高于真空气雾化产品。通过优化保护气体纯度（ $\geq 99.999\%$ ）、控制熔炼过热度及缩短雾化时间，非真空气雾化粉末的氧含量可控制在 ≤ 500 ppm（以不锈钢粉末为例）。

4.3.3 颗粒形貌

非真空气雾化粉末球形度良好，但相较于真空气雾化，卫星粉比例可能略高。通过优化喷嘴结构和雾化参数，卫星粉比例控制在 $\leq 5\%$ 。

4.4. 非真空气雾化（GA）设备硬件配置

系统	关键部件	规格型号	技术参数	备注
熔炼系统	中频感应熔炼炉	300KG*2 对浇炉	坩埚容量: 300kg*2 ; 最高熔炼温度: 1700℃ ; 中频功率: 350 kW 频率: 1-2.5KHZ, 中频电源型号: PZGS-350KW/3*380V/1-2.5KHz/800V 品牌东方四通, 液压倒炉, 电控手柄 液压倾翻, 可实现远端倾翻, 且手电 自由切换	支持 铁基、 不锈钢、 铜基 等
保护气氛系统	氮气 / 氩 气保 护装 置	D10	保护气体纯度: $\geq 99.999\%$; 炉内氧 含量: ≤ 100 ppm	减少 氧化
雾化系 统	环孔 式/ 紧耦 合喷 嘴	D90-14	雾化气体压力: 0-8 MPa 可调; 气 体流量: 1200-1800 Nm ³ /min; 喷嘴 材质: 304/3168. 进气压力 ≤ 20.0 MPa, 可提供相应设计图纸;	适配 不同 合金
雾化塔	雾化 罐体 / 雾 化塔 上锥 / 下 锥	非标定 制, D1800*7500	高度: 7500mm ; 直径: 1800mm ; 内 外壁材质: 304 ; 双层水冷结构, 外 壁 ≥ 10 mm, 内壁 ≥ 12 mm, 内壁光洁度 $Ra \leq 0.4 \mu m$, 外表面拉丝;	保证 冷却 速率
粉末收 集与分 级	旋风 分离器+ 滤芯 除尘 器	D500	收集效率: $\geq 98\%$; 分级精度: 0.3 μm , 合理水冷调, 粉体收集 冷却时间可小于 60 分钟	可定 制粒 度段
水冷系 统	水排	D80	配备有冷却水输入汇流排和冷却水 输出汇流排, 304 不锈钢材质; 本系 统由上水管、不锈钢回水收集器、各 种不锈钢阀门、抗震电接点压力表等 组成;	

系统	关键部件	规格型号	技术参数	备注
			配备进水总水压、失压断水、温度和流量监控，能实现压力报警、高温报警和断水报警及连锁保护等装置；流量及温度均带数显屏幕； 设备内部水路管及配件材质均为 304 不锈钢管，分水管为不锈钢硬管，分别接到各进出水附件，软管进回水有颜色区分，耐压$\geq 5\text{kg}$； 水温水压水流量监测，冷却水的温度、压力都将显示到二次仪表上，设置水压低低连锁保护装置；具有进回水温度差、流量差检测报警且和中频电源加热连锁自动报警停机； 设置应急水接入装置，以保证设备的安全运行； 冷却水压力：0.4~0.5MPa，水流量约 65m³/h，进水温度$\leq 35^{\circ}\text{C}$，出水温度$\leq 55^{\circ}\text{C}$	
机械仪表	耐震压力表	0-16MPa	所有压力表需采用红旗品牌	
控制系统	PLC/触摸屏控制系统		记录熔炼温度、雾化压力、气体流量；支持报警与数据导出，PLC 品牌西门子，低压电器及小型继电器品牌施耐德、	工艺可追溯
工作平台	设备钢结构平台	300KG*2 非真空	平台为 200 型工字钢，设计布局合理、结构稳固、使用安全，支持平台拓展；一般 10000*10000mm：结合车间现有布局和设备，综合设计，设备总高度满足车间梁下高度实际安装和使用需求；（具体设计根据车间实际情况适当调整）	

4.5. 技术优势与局限性

优势：

- ◆ 设备投资相对较低，运行成本可控
- ◆ 生产效率高，适合大批量工业化生产
- ◆ 适用于铁基合金、不锈钢、铜基合金等常规材料体系
- ◆ 工艺成熟，维护成本低

局限性：

- ◆ 氧含量高于真空气雾化产品
- ◆ 不适用于含铝钢液等易氧化材料（铝会与大气中的氧气发生激烈反应，产生大量炉渣，极易堵炉）
- ◆ 粉末球形度略逊于真空气雾化

第五部分：应用场景

5.1. 增材制造（SLM/EBM）

宁波海天真空气雾化粉末球形完整、低氧、流动性佳，适配 SLM 打印工艺，可用于矿山抗冲击耐磨衬件、工程机械减震缓冲结构、航空航天精密零部件等。

5.2. 热喷涂与激光熔覆

气雾化粉末具有球形度好、流动性好、振实密度高、粉末粒度区间可控等特点，可用于高温、耐磨、冲击工况零部件的热喷涂防护，以及燃气轮机、热处理炉管、焚烧设备的高温抗氧化防护涂层。

5.3. 粉末冶金与金属注射成型（MIM）

恒基科技气雾化粉末适用于粉末冶金和金属注射成型工艺，可用于制备阻尼减震配件、耐磨滑块、缓冲衬套等精密零部件。

5.4. 其他应用

- ◆ 合金冶炼配料：不锈钢、耐磨高锰钢的脱氧增锰原料
- ◆ 新能源领域：燃料电池连接体涂层材料
- ◆ 过滤器件：多孔金属过滤材料

第六部分：质量保证与检测能力

6.1. 质量控制体系

双菱科技有限公司已通过[ISO 9001/AS9100/IATF 16949 等]质量管理体系认证，建立了覆盖原材料入厂检验、生产过程控制、成品出厂检验的全流程质量管控体系。

6.2. 检测能力

检测项目	检测方法/标准	设备型号
氧含量	惰性气体熔融法	钢研耐克/O-3500
松装密度	GB/T 1479 / ASTM B212	BT-101
流动性	霍尔流速计法	BT-200
松装密度	GB/T 1479 / ASTM B212	BT-311
微观形貌	扫描电子显微镜（SEM）	SG-300

第七部分：技术标准与规范

本公司产品严格遵循以下国家标准和行业规范：

- ◆ GB 4208-2017 外壳防护等级（IP 代码）
- ◆ GB 986 埋弧焊焊缝坡口的基本形式和尺寸
- ◆ HG/T 20592~20635-2009 钢制管法兰、垫片、管法兰

- ◆ GB/T 10066.1-2019 电热设备的试验方法 第一部分：通用部分
- ◆ GB/T 10067.1-2019 电热装置基本技术条件 第一部分：通用部分
- ◆ GB/T 10067.3-2019 电热装置基本技术条件 第三部分：感应电热部分
- ◆ GB/T 5959.1-2019 电热装置的安全 第一部分：通用要求
- ◆ GB/T 5959.3-2019 电热装置的安全 第三部分：对感应和导电加热装置以及感应熔炼装置的特殊要求
- ◆ JB/T 8669-1997 中频感应加热用半导体变频装置
- ◆ GB 4053.3-2009 固定式钢梯及平台安全要求

第八部分：结论

株洲双菱科技有限公司同时具备真空气雾化（VIGA）和非真空气雾化（GA）两条完整的金属粉末制备技术路线，可为客户提供从材料选型、工艺开发到批量供货的一站式解决方案。

真空气雾化技术：面向高温合金、钛合金、铁镍合金、铝合金等高端材料体系，提供低氧含量、高球形度的优质粉末产品。

非真空气雾化技术：面向铁基合金、不锈钢、铜基合金等常规材料体系，提供高性价比、大批量稳定供货能力。

欢迎垂询：**0731-28306000 15007330920**