

# 国家标准《增材制造用锌及锌合金粉》

## 编制说明（预审稿）

### 一、工作简况

#### 1.1 任务来源

根据《国家标准化管理委员会关于下达2024年第一批推荐性国家标准计划及相关标准外文版计划的通知》（国标委发【2024】16号）文的要求，国家标准《增材制造用锌及锌合金粉》由全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）归口管理，由广东省科学院新材料研究所负责起草。项目计划编号为：20240529-T-610。按计划要求，本标准应在2025年完成。

#### 1.2 产品概况

金属锌是国民经济发展中十分重要的有色金属。锌及锌合金由于其较低的熔点和极佳的流动性，在传统工业领域常采用铸造、变形和热镀这3种工艺，多应用于汽车、五金、医疗、船舶防腐等领域。

增材制造（3D打印）是一种数字化、短流程、近终形、高效率的多学科交叉融合的先进制造技术。其中以粉末床熔融/激光选区熔化为代表的增材制造技术可以实现复杂结构和个性化设计的金属零部件一体化快速制造，具有较高的成形自由度，且由于采用微熔池逐层堆积、熔化量小、凝固速度快，其成形样品的组织细小，有利于提高材料力学性能。增材制造锌及锌合金克服了锌及锌合金本身加工性能差，使用传统工艺加工无法满足高效制备复杂结构的难题，为高活性、低熔点锌及锌合金复杂构形零部件的制备提供了一个有效的途径。

目前，增材制造用锌及锌合金粉制备技术有旋转盘离心雾化法、气雾化法等。增材制造用锌及锌合金粉显微照片如图1所示。

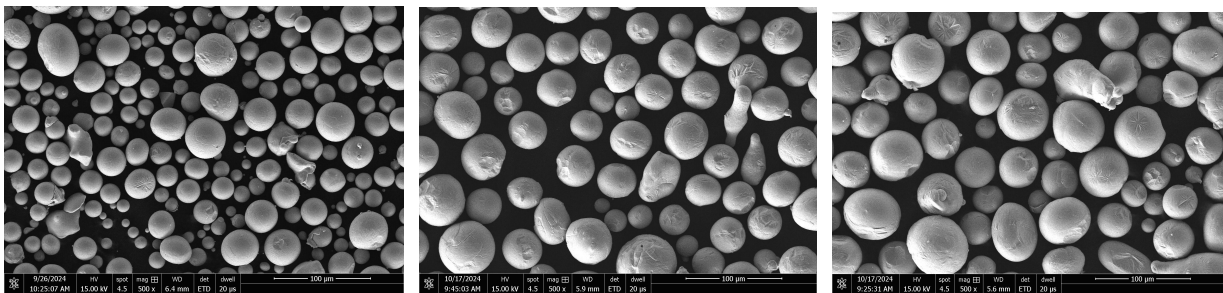


图1 增材制造用锌及锌合金粉形貌

特别地，在医疗领域，锌具有较低的电极电位（ $-0.76V$ ），相对中等的降解速率，具有抗/抑菌效用的同时，还可参加人体200种代谢反应，在促血管、促成骨方面具有不可替代的作用，生物相容性优异。虽然纯锌相比于高分子等可降解材料具有较高的力学性能，但是

纯锌的力学性能依然有待提高，一般通过微合金化提高其力学性能，例如添加 Cu、Mg、Ca 等元素，其中 Mg 元素生物相容性优异，Cu 元素具有抗菌作用。合金化 Cu、Mg 元素有利于提高锌合金的力学性能及生物相容性，成为研究开发热点。经过调研目前增材制造用锌及锌合金粉有 Zn、Zn-Cu、Zn-Mg、Zn-Mg-Cu、Zn-Al 等，Zn-Mg、Zn-Mg-Cu、Zn-Al 合金粉尚处于研究阶段，生产厂家较少、市场供应小，本标准不进行规定。

### 1.3 承担单位情况

广东省科学院新材料研究所是广东省科学院直属的科研单位，是华南地区最早从事粉末冶金研究及产业化的单位之一，组建有国家钛及稀有金属粉末冶金工程技术研究中心、现代材料表面工程技术国家工程实验室等国家、省部级科技创新及基础条件平台 15 个。单位长期从事金属材料及其加工制造技术的工艺研发和工程化应用。

研究所主要围绕广东省战略新兴产业、重点传统产业和高端装备制造业及国家重大工程对产品开发及装备性能不断提升的需求，先后承担了近 700 项国家 973、863、国家支撑等项目，开发出多种金属材料粉末及构件，并实现工程化应用。迄今，累计取得各类科研成果 104 项，其中获国家科学技术进步二等奖 3 项，取得授权专利 490 多件；牵头（参与）制修订标准 150 余项，其中国家标准 30 项，行业标准 13 项，团体标准 19 项，企业标准 90 余项。

金属粉末及激光与增材制造研发及应用由教授级高工、高级工程师、工程师和测试技术人员组成。团队多年来从事金属材料与增材制造的生产与研究，具有较高的科研水平和技术优势，熟悉金属粉末材料制备、性能评价等相关技术要求，具有长期从事工程技术开发的经验。

研究所拥有射频等离子制粉系统、等离子旋转电极制粉系统、雾化制粉系统、注射成型机、金属 3D 打印机（EOS M290）（4 台）、自研轻金属增材制造设备、Eplus-M300、E-plus M450, E-plus M650 等齐全的粉末制备及成形设备。同时，单位具有完善的材料性能检测手段，所内分析检测仪器主要有：电感耦合等离子体发射光谱仪、氧氮分析仪，直读光谱仪、松装密度、振实密度、流动性、马尔文 3000 激光粒度仪、德国 ZWICK 公司 ZHV  $\mu$ -S 显微硬度计、金相显微镜、布洛维硬度计、万能试验机、Zeiss 场发射扫描电镜等，能够对金属材料成分、密度、硬度、金相组织、力学性能等指标进行检测，确保从粉末原材料检验到制品有完整的检测设备。

### 1.4 参编单位及主要起草人工作情况（排名不分先后）

各参编单位及标准主要起草人分工见表 1。

表 1 参编单位及分工

序号	主要起草人	参编单位	分工
1			
2			
3			
4			

## 1.5 主要工作过程

### 1.5.1 起草阶段

根据《国家标准化管理委员会关于下达 2024 年第一批推荐性国家标准计划及相关标准外文版计划的通知》（国标委发【2024】16 号）文的计划要求，本标准于 2024 年 3 月 22 日在山东省淄博市进行了任务落实，广东省科学院新材料研究所立即成立了标准编制工作组，对目标任务进行分解，明确成员的任务要求，制定工作计划和进度安排。项目运行以来，项目组积极收集国内外增材制造用锌及锌合金粉的生产及应用信息，收集增材制造用锌及锌合金粉的生产、检验数据，调研国内外增材制造用锌及锌合金粉的科研单位、生产企业的基本情况，并对各类信息进行分析汇总，于 2024 年 07 月完成标准征求意见稿。

### 1.5.2 征求意见阶段

2024 年 07 月 08 日至 2024 年 07 月 09 日，由全国有色金属标准化技术委员会主持，在山西省晋中市召开了本标准的讨论会。来自有色金属技术经济研究院有限责任公司、全国有色金属粉末冶金标准化分技术委员会、广东省科学院新材料研究所、深圳市单位 2 岭南科技有限公司、北京大学深圳研究院、北京市春立正达医疗器械股份有限公司、重庆大学，钢铁研究总院有限公司，亚洲新材料（山西）有限公司，西安增材制造国家研究院有限公司，成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司，广东汉邦激光科技有限公司，宁波众远新材料科技有限公司，盘星新型合金材料（常州）有限公司、广东省科学院工业分析检测中心、唐山威豪镁粉有限公司、西安铂力特增材技术股份有限公司、广州赛隆增材制造有限责任公司、中机生产力促进中心有限公司、中国地质大学（武汉）、沈阳飞机工业（集团）有限公司、中国航天科工集团三院三十一研究所、西安国宏天易智能科技有限公司、北矿新材料科技有限公司、上海航天精密机械研究所、江西宝航新材料有限公司、西安交通大学等 40 多家单位 47 位专家代表参加了会议。与会代表对本标准（征求意见稿）进行了认真、细致的讨论，提出了修改意见及建议。

2024 年 07 月 07 日至 2025 年 3 月 4 日，全国有色金属标准化技术委员会将征求意见资

料在国家标准化管理委员会的“公共信息服务平台”上挂网，向社会公开征求意见。同时，全国有色金属标准化技术委员会通过工作群、邮件向委员单位征求意见，并将征求意见资料在 [www.cnsmq.com](http://www.cnsmq.com) 网站上挂网。征求意见的单位包括主要生产、经销、使用、科研、检验等单位及大专院校，征求意见单位广泛且具有代表性，征求意见时间大于 2 个月。

2025 年 3 月 4 日至 2025 年 3 月 7 日，由全国有色金属标准化技术委员会主持，在合肥召开了本标准的预审会。来自 XXX、XXX 等 XX 家单位的 XX 位专家代表参加了会议。与会代表对本标准（预审稿）进行了认真、细致的讨论。标准制定工作组根据讨论的意见，形成标准送审稿及编制说明，并提交标委会对标准进行审查。

2025 年 XX 月，编制组单位对收集到的意见进行整理，共收到了 XX 条意见，形成了《标准征求意见稿意见汇总处理表》。标准制定工作组对征求意见稿进行修改，形成标准送审稿及编制说明。

### 1.5.3 审查阶段

2025 年 XX 月 XX 日至 2025 年 XX 月 XX 日，由全国有色金属标准化技术委员会主持，在 XX 省 XX 市组织召开本标准审定会。来自 XXX、XXX 等 XX 家单位的 XX 余位专家代表参加了会议，见《有色金属审定会参加单位及代表签名》。会议对广东省科学院新材料研究所负责起草的国家标准《增材制造用锌及锌合金粉》（送审稿）进行了认真细致的审定并提出修改意见，见《有色金属标准审定会会议纪要》。标准编制组采纳了审定会意见，对标准送审稿进行了修改完善。

### 1.5.4 报批阶段

标准编制组对标准文本和编制说明进行修改完善，形成标准报批稿报送至全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243），现上报至国家标准化管理委员会审批、发布。

委员投票情况：2025 年 XX 月 XX 日至 2025 年 XX 月 XX 日，由全国有色金属标准化技术委员会粉末冶金分标委会组织，在“全国专业标准化技术委员会工作平台”进行了委员投票，本 SC 全体委员人数共有 XX 人，参与投票 XX 人，投票同意本标准通过审查 XX 人，其中，起草人员 X 人。

## 二、标准编制原则和确定主要内容的论据

### 2.1 标准编制原则

本标准按照 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》给出的规则起草。

本标准在编制过程中，主要以国内增材制造用锌及锌合金粉的生产和应用研究为基础，

遵循满足市场需求、技术内容合理、检测方法可行的原则，综合考虑目前企业的生产水平及推广应用需求，技术指标包括化学成分、粒度、松装密度、振实密度、流动性、外观质量等，相应检测方法考虑可操作性以及便于应用。

## 2.2 标准主要内容的确定依据及主要试验和验证情况分析

### 2.2.1 化学成分

本标准规定了批量化生产且在增材制造领域使用的锌及锌合金粉，包括 Zn、Zn-Cu。其中 Zn 的杂质元素有 Mg、Cu、Fe、Pb、Cd、Sn、Ni、Sb、As 等。Zn-Cu 合金粉的化学成分分为添加元素与杂质元素，其中添加元素为 Cu，杂质元素为 Mg、Fe、Pb、Cd、Sn、Ni、Sb、As 等。锌及锌合金工业应用中，纯锌的抗拉强度较低（通常打印态抗拉强度~100MPa），一般可通过微合金化提高其力学性能，增材制造领域可通过添加 Cu 元素来强化其力学性能，广东省科学院新材料研究所打印的 Zn-Cu 合金拉伸性能可达抗拉强度~150MPa，延伸率~10%。考虑 Cu 元素在锌合金中的强化作用和打印成形质量，同时调研参编单位生产的锌铜合金粉化学成分数据，合理设置添加元素化学成分范围，设置 Zn-Cu 中 Cu 含量为 0.20%~2.50%。

Zn、Zn-Cu 粉杂质化学成分 Mg、Fe、Pb、Sn、Cd、Ni 元素参考相关锌合金最新国标 GB/T 13818-2024 压铸锌合金、GB/T 1175-2018 铸造锌合金、GB/T 8738-2014 铸造用锌合金锭中规定的杂质化学成分要求，同时根据参编单位的实测数据设置杂质含量最高限量。Sb、As 根据参编单位的实测数据设置杂质含量最高限量。并根据增材制造应用需求设置 C、N、H、O 含量，如表 2 所示。

表 2 化学成分

牌号	化学成分（质量分数）/%													
	Zn <sup>a</sup>	Mg	Cu	Fe ≤	Pb ≤	Cd ≤	Sn ≤	Ni ≤	Sb ≤	As ≤	C ≤	N ≤	H ≤	O ≤
Zn	余量	≤ 0.005	≤ 0.005	0.050	0.005	0.003	0.005	0.002	0.003	0.002	0.020	0.015	0.015	0.10
Zn-Cu	余量	≤ 0.005	0.20~2 .50	0.050	0.005	0.003	0.005	0.002	0.003	0.002	0.020	0.015	0.015	0.12

<sup>a</sup> Zn 化学成分余量为 100%减去表中所列杂质（不包含 C、N、H、O）实测含量的总和。

调研参编单位的粉末生产工艺，如表 3 所示：

表 3 参编单位粉末生产工艺情况

序号	牌号	生产单位/粉末提供单位	生产工艺
1	Zn、Zn-Cu	深圳市中金岭南科技有限公司	旋转盘离心雾化法
2	Zn、Zn-Cu	成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司	真空感应熔炼惰性气体雾化法（VIGA）

3	Zn、Zn-Cu	南通金源智能技术有限公司	离心雾化
4	Zn、Zn-Cu	广东省科学院新材料研究所	真空感应熔炼惰性气体雾化法 (VIGA)
5	Zn	北京市春立正达医疗器械股份有限公司	电极感应熔炼气雾化法 (EIGA)

产品的砷、镉、铜、铁、铅、镁、铋、锡化学成分检验方法按 GB/T 12689.2、GB/T 12689.3、GB/T 12689.4、GB/T 12689.5、GB/T 12689.6、GB/T 12689.7、GB/T 12689.9、GB/T 12689.10、GB/T 12689.12、GB/T 26042 的规定执行。

镍含量的检验方法按 GB/T 8738—2014 附录 A 的规定执行。

产品的 C 含量分析按 GB/T 20123 钢铁 总碳硫含量的测定 高频感应炉燃烧后红外吸收法 (常规方法) 规定执行, 产品的 N 含量分析按 GB/T 20124 钢铁 氮含量的测定 惰性气体熔融热导法 (常规方法) 规定执行, 产品的氢含量分析按 GB/T 223.82 钢铁 氢含量的测定 惰性气体熔融-热导或红外法规定执行, 产品的氧含量分析按 GB/T 11261 钢铁 氧含量的测定 脉冲加热惰气熔融-红外线吸收法规定执行。

参编单位各批次产品的化学成分检测结果统计如表 4 所示。由表可见, 各参编单位数据满足本标准化学成分规定 (表 2 所示)。

检测验证单位简称: 单位 1: 广东省科学院新材料研究所; 单位 2: 深圳市中金岭南科技有限公司; 单位 3: 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司; 单位 4: 南通金源智能技术有限公司; 单位 5: 广东省科学院工业分析检测中心; 单位 6: 西安增材制造国家研究院有限公司; 单位 7: 广东单位 7 激光科技有限公司; 单位 8: 钢铁研究总院有限公司; 单位 9: 唐山威豪镁粉有限公司; 单位 10: 西安塞隆增材制造有限责任公司; 单位 11: 广州赛隆增材制造有限责任公司; 单位 12: 北京市春立正达医疗器械股份有限公司; 单位 13: 盘星新型合金材料 (常州) 有限公司; 单位 14: 单位 14 众远新材料科技有限公司; 单位 15: 北京大学深圳研究院; 单位 16: 康瑞新材料科技 (南通) 有限公司; 单位 17: 西安交通大学; 单位 18: 国家增材制造产品质量监督检验中心; 单位 19: 重庆大学; 单位 20: 华南理工大学

表4 化学成分统计表

牌号	化学成分, 质量分数%														检测单位	粉末厂家
	Zn	Mg	Cu	Fe	Pb	Cd	Sn	Ni	Sb	As	C	N	H	O		
Zn	余量	-	-	0.002	0.0005	0.0001	-	0.0005	-	-	-	0.0021	-	0.0466	单位2	单位2
Zn	余量	-	-	0.0002	0.0008	0.0002	0.0008	0.001	0.0006	0.0002	0.005	0.007	0.007	0.057	单位3	单位3
Zn	余量	-	0.0001	0.00015	0.0008	0.00015	0.0001	-	-	-	0.007	0.0025	-	0.043	单位4	单位4
Zn	余量	0.002	0	0.008	0.005	0.002	0.005	0	0	-	-	-	-	-	单位20	-
Zn	余量	0.0008	0.0014	0.0004	0.001	0	0.0008	0.0001	0	0	-	-	-	-	单位1	单位2
Zn	余量	0.0014	0.0014	0.0003	0.0008	0.0001	0.0004	0.0001	0	0	-	-	-	-	单位1	单位4
Zn	余量	-	0.0006	0	0.0009	0.0001	0.0005	0	0	-	0.0036	-	-	-	单位9	单位2
Zn	余量	-	-	0.0058	-	-	-	-	-	-	-	0.0021	0.015	0.064	单位12	单位4
Zn	余量	-	0.0006	0.0005	0.001	0.0001	0.0002	0.0001	-	0.0009	-	-	-	-	单位9	单位3
Zn	余量	0.0002	0.0008	0.0005	0.0006	<0.001	0.0013	0.0001	0.0004	-	0.012	-	-	-	单位6	单位3
Zn	余量	-	-	0.0014	0.0012	0.0005	0.0008	0.0003	0.0006	0.0001	0.007	0.003	0.0016	0.053	单位3	单位4
Zn	余量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.003	0.0007	0.041	单位3	单位2
Zn	余量	0.0002	0.0009	0.0005	0.0005	<0.001	0.0011	0.0004	0.0001	0.0001	0.012	0.009	0.01	0.008	单位17	单位3
Zn	余量	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	0.0011	-	-	-	单位5	单位2
Zn	余量	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	0.002	-	-	-	单位11	单位2

牌号	化学成分，质量分数%															
	Zn	Mg	Cu	Fe	Pb	Cd	Sn	Ni	Sb	As	C	N	H	O	检测单位	粉末厂家
Zn	余量	-	-	0.0014	0.0012	0.0005	0.0008	0.0003	0.0006	0.0001	0.007	0.003	0.0016	0.053	单位 3	单位 4
Zn	余量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.003	0.0007	0.041	单位 3	单位 2
Zn	余量	0.0011	0.0009	-	-	-	-	-	-	-	0.003	-	-	-	单位 13	单位 3
Zn	余量	0.0005	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0023	-	-	-	单位 13	单位 2
Zn	余量	-	0.0001	0.0002	0.0008	0.0002	0.0001	-	-	-	0.007	0.002	-	0.048	单位 4	单位 4
Zn	余量	<0.005	<0.001	0.014	<0.001	<0.0005	<0.0005	-	<0.002	<0.001	-	-	-	-	单位 8	单位 3
Zn	余量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.005	<0.001	0.001	0.052	单位 16	单位 3
Zn	余量	≤ 0.000015	≤ 0.00009	0.028	≤ 0.00025	≤ 0.00003	≤ 0.00074	≤ 0.000092	≤ 0.00073	≤ 0.00056	-	-	-	-	单位 18	单位 2
Zn	余量	≤ 0.000015	≤ 0.00009	≤ 0.00063	≤ 0.00025	≤ 0.00003	≤ 0.00074	≤ 0.000092	≤ 0.00073	≤ 0.00056	-	-	-	-	单位 18	单位 3
Zn	余量	<0.0001	0.0033	-	-	0.0005	0.0007	-	<0.0001	0.0004	-	-	-	-	单位 2	单位 1
Zn	余量	<0.0001	<0.0001	0.0026	0.0029	<0.0001	<0.0001	0.0006	<0.0001	<0.0001	-	-	-	-	单位 2	单位 4
Zn	余量	<0.0001	0.0006	0.0001	0.0006	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	-	-	-	-	单位 2	单位 2
Zn	余量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0131	0.0019	0.0004	0.0407	单位 19	单位 3
Zn	余量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.012	0.0024	0.0002	0.0083	单位 19	单位 2
Zn	余量	<0.001	<0.001	<0.001	-	-	-	-	-	-	<0.01	0.0008	-	0.0345	单位 14	单位 3



牌号	化学成分，质量分数%															
	Zn	Mg	Cu	Fe	Pb	Cd	Sn	Ni	Sb	As	C	N	H	O	检测单位	粉末厂家
Zn	余量	-	<0.001	<0.001	-	-	-	-	-	-	<0.01	0.0012	-	0.0181	单位 14	单位 2
Zn	余量	0.001	-	0.001	0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.005	0.0022	0.0012	0.025	单位 10	单位 2
<b>Min</b>	<b>余量</b>	<b>0.0002</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.0005</b>	<b>0</b>	<b>0.0001</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.0011</b>	<b>0.0008</b>	<b>0.0002</b>	<b>0.008</b>	—	—
<b>Max</b>	<b>余量</b>	<b>&lt;0.005</b>	<b>0.0033</b>	<b>0.028</b>	<b>0.005</b>	<b>0.002</b>	<b>0.005</b>	<b>0.001</b>	<b>0.002</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>0.0131</b>	<b>0.009</b>	<b>0.015</b>	<b>0.064</b>	—	—
Zn-Cu	余量	-	0.85	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0009	-	0.0481	单位 2	单位 2
Zn-Cu	余量	0.0014	0.6333	0.0001	0.0011	0.0001	0.0014	0	0	0	-	-	-	-	单位 1	单位 2
Zn-Cu	余量	0.0009	1.2838	0.0082	0.0037	0.0001	0.0009	0.0018	0.0001	0	-	-	-	-	单位 1	单位 2
Zn-Cu	余量	0.0012	0.6772	0	0.0008	0	0.0003	0.0001	0	0	-	-	-	-	单位 1	单位 4
Zn-Cu	余量	-	2.2	0.0043	<0.0010	<0.0010	0.0022	<0.0010	<0.0010	<0.0010	0.0042	0.0076	-	0.024	单位 2	单位 2
Zn-Cu	余量	-	2.0	0.004	<0.001	<0.001	<0.001	0.002	<0.002	<0.001	-	-	-	-	单位 5	单位 2
Zn-Cu	余量	-	2.01	0.0003	0.0007	0.0001	0.001	0.001	0.0002	0.0001	0.006	0.008	0.008	0.054	单位 3	单位 3
Zn-Cu	余量	-	1.98	0.0001	0.0008	0.0001	0.0001	-	-	-	0.006	0.0029	-	0.056	单位 4	单位 4
Zn-Cu	余量	0.0015	0.6178	-	0.0010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	单位 15	单位 2
Zn-Cu	余量	-	0.3669	0	0.0008	0.0002	-	0	-	-	0.0035	-	-	-	单位 9	单位 2
Zn-Cu	余量	-	0.6836	0	0.0010	0.0001	0.0001	0	-	0	0.0036	-	-	-	单位 9	单位 2

牌号	化学成分，质量分数%														检测单位	粉末厂家
	Zn	Mg	Cu	Fe	Pb	Cd	Sn	Ni	Sb	As	C	N	H	O		
Zn-Cu	余量	-	1.98	0.0001	0.0008	0.0001	0.0002	-	-	-	0.0056	0.002	0.001	0.054	单位 4	单位 4
Zn-Cu	余量	0.001	0.74	0.001	0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.005	0.0040	0.0005	0.0187	单位 10	单位 2
Zn-Cu	余量	0.001	0.4	0.001	0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.005	0.0056	0.0008	0.0196	单位 10	单位 2
Zn-Cu	余量	-	-	0.008	0.0008	0.0002	0.0008	0.001	0.0006	0.0001	0.005	0.003	0.0014	-	单位 3	单位 4
Zn-Cu	余量	-	0.93	0.0043	-	-	-	-	-	-	-	0.002875	0.00985	0.11	单位 12	单位 4
Zn-Cu	余量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.003	0.0008	0.039	单位 3	单位 2
Zn-Cu	余量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.003	0.0004	0.036	单位 3	单位 2
Zn-Cu	余量	≤ 0.000015	0.4	0.03	≤ 0.00025	≤ 0.00003	≤ 0.00074	≤ 0.000092	≤ 0.00073	≤ 0.00056	-	-	-	-	单位 18	单位 2
Zn-Cu	余量	≤ 0.000015	0.73	0.024	≤ 0.00025	≤ 0.00003	≤ 0.00074	≤ 0.000092	≤ 0.00073	≤ 0.00056	-	-	-	-	单位 18	单位 2
Zn-Cu	余量	-	0.37	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	0.0008	-	-	-	单位 5	单位 2
Zn-Cu	余量	-	0.67	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	0.0008	-	-	-	单位 5	单位 2
Zn-Cu	余量	-	0.5	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	0.002	-	-	-	单位 11	单位 2
Zn-Cu	余量	<0.0001	0.85	0.0012	0.0028	<0.0001	<0.0001	0.0005	<0.0001	0.0002	-	-	-	-	单位 2	单位 4
Zn-Cu	余量	<0.0001	0.36	0.0001	0.0007	0.0002	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	-	-	-	-	单位 2	单位 2

牌号	化学成分，质量分数%														检测单位	粉末厂家
	Zn	Mg	Cu	Fe	Pb	Cd	Sn	Ni	Sb	As	C	N	H	O		
Zn-Cu	余量	<0.0001	0.62	0.00011	0.001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	-	-	-	-	单位 2	单位 2
Zn-Cu	余量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0087	0.0005	0.0003	0.008	单位 19	单位 2
Zn-Cu	余量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0088	0.0014	0.0012	0.0193	单位 19	单位 2
Zn-Cu	余量	-	0.40	<0.001	-	-	-	-	-	-	<0.01	0.0015	-	0.0195	单位 14	单位 2
Zn-Cu	余量	-	0.73	<0.001	-	-	-	-	-	-	<0.01	0.0010	-	0.0213	单位 14	单位 2
Zn-Cu	余量	0.0006	0.3751	-	-	-	-	-	-	-	0.0031	-	-	-	单位 13	单位 2
Zn-Cu	余量	0.0006	0.6783	-	-	-	-	-	-	-	0.0022	-	-	-	单位 13	单位 2
Zn-Cu	余量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.11	单位 1	单位 2
<b>Min</b>	余量	<b>0.0006</b>	<b>0.36</b>	<b>0</b>	<b>0.0007</b>	<b>0</b>	<b>0.0001</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.0008</b>	<b>0.0005</b>	<b>0.0003</b>	<b>0.008</b>	—	—
<b>Max</b>	余量	<b>0.0015</b>	<b>2.2</b>	<b>0.03</b>	<b>0.0037</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>0.0022</b>	<b>0.002</b>	<b>0.002</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>0.0088</b>	<b>0.008</b>	<b>0.00985</b>	<b>0.11</b>	—	—

## 2.2.2 粒度

锌及锌合金粉末目前主要采用旋转盘离心雾化法、气雾化法工艺进行制备，制备的粉末可通过筛分进行粒度调节，选择合适的粉末粒度范围。目前锌及锌合金粉末增材制造工艺主要是激光粉末床熔融/选区激光熔融，本标准粉末粒度范围为  $15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$ ，类别为 I 类。适用于激光粉末床熔融/选区激光熔融工艺。

粒度检测按照 GB/T 1480《金属粉末 干筛分法测定粒度》和 GB/T 19077《粒度分布 激光衍射法》的规定执行。

参编单位产品的粒度组成及粒度分布的测试结果统计如表 5 所示。

表 5 粒度组成统计表

类别	检测单位	粉末厂家	材料牌号	粒度范围	粒度组成	粒度分布/ $\mu\text{m}$
I类	单位1	单位2	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	-	$D_{10}: 20.0; D_{50}: 30.3; D_{90}: 44.5$
I类	单位1	单位3	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	-	$D_{10}: 18.5; D_{50}: 31.3; D_{90}: 49.6$
I类	单位2	单位2	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	-	$D_{10}: 21.6; D_{50}: 35.9; D_{90}: 56.6$
I类	单位2	单位2	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	$>53\ \mu\text{m}: 0\%$	$D_{10}: 19.4; D_{50}: 33.1; D_{90}: 52.3$
I类	单位17	单位3	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	-	$D_{10}: 17.78; D_{50}: 34.01; D_{90}: 52.96$
I类	单位3	单位3	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	$>53\ \mu\text{m}: 2.3\%$	$D_{10}: 20.5; D_{50}: 33.7; D_{90}: 54.4$
I类	单位4	单位4	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	$>53\ \mu\text{m}: 2.25\%$	$D_{10}: 21.327; D_{50}: 34.544; D_{90}: 51.582$
I类	单位9	单位2	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	$>53\ \mu\text{m}: 0.2\%$	$D_{10}: 19.88; D_{50}: 31.97; D_{90}: 48.32$
I类	单位9	单位3	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	$>53\ \mu\text{m}: 1.2\%$	$D_{10}: 18.57; D_{50}: 31.84; D_{90}: 49.16$
I类	单位6	单位3	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	-	$D_{10}: 17.80; D_{50}: 34.03; D_{90}: 52.99$
I类	单位10	单位2	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	$>53\ \mu\text{m}: 0.14\%$	/
I类	单位8	单位3	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	-	$D_{10}: 16.64; D_{50}: 31.21; D_{90}: 52.76$
I类	单位 8	单位 3	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	-	$D_{10}: 16.66; D_{50}: 31.21; D_{90}: 52.72$
I类	单位 8	单位 3	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	-	$D_{10}: 16.70; D_{50}: 31.18; D_{90}: 52.67$
I类	单位4	单位4	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	-	$D_{10}: 18.6; D_{50}: 30.5; D_{90}: 51.3$
I类	单位6	单位2	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	-	$D_{10}: 22.87; D_{50}: 38.29; D_{90}: 56.69$
I类	单位16	单位3	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	-	$D_{10}: 20.8; D_{50}: 33.2; D_{90}: 51.1$
I类	单位16	单位3	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	-	$D_{10}: 16.97; D_{50}: 33.60; D_{90}: 53.09$
I类	单位20	-	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	-	$D_{10}: 11; D_{50}: 22; D_{90}: 42$
I类	单位3	单位2	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	$>53\ \mu\text{m}: 1.78\%$	$D_{10}: 19.8; D_{50}: 34.0; D_{90}: 52.7$
I类	单位11	单位2	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	$>53\ \mu\text{m}: 1.20\%$	$D_{10}: 22.3; D_{50}: 35.6; D_{90}: 55.5$
I类	单位15	单位2	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	-	$D_{10}: 22.1; D_{50}: 36.4; D_{90}: 58.5$
I类	单位18	单位2	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	$>53\ \mu\text{m}: 0\%$	$D_{10}: 21.8; D_{50}: 33.7; D_{90}: 50.4$
I类	单位18	单位3	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	$>53\ \mu\text{m}: 3\%$	$D_{10}: 18.9; D_{50}: 32.2; D_{90}: 51.3$
I类	单位19	单位3	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	-	$D_{10}: 19.18; D_{50}: 35.99; D_{90}: 56.50$
I类	单位19	单位2	Zn	$15\ \mu\text{m}\sim 53\ \mu\text{m}$	-	$D_{10}: 24.77; D_{50}: 37.19; D_{90}: 53.98$

I类	单位14	单位3	Zn	15 μm~53 μm	-	D <sub>10</sub> : 22.03; D <sub>50</sub> : 38.04; D <sub>90</sub> : 60.02		
I类	单位14	单位2	Zn	15 μm~53 μm	-	D <sub>10</sub> : 22.87; D <sub>50</sub> : 36.72; D <sub>90</sub> : 54.26		
I类	单位 13	单位 3	Zn	15 μm~53 μm	>53 μm: 0.1%	D <sub>10</sub> : 17.1; D <sub>50</sub> : 30.1; D <sub>90</sub> : 50.3		
I类	单位 13	单位 2	Zn	15 μm~53 μm	>53 μm: 0%	D <sub>10</sub> : 22.5; D <sub>50</sub> : 34.5; D <sub>90</sub> : 51.3		
I类	<b>Min</b>		<b>Zn</b>	<b>15 μm~53 μm</b>	<b>&gt;53 μm: 0%</b>	<b>D<sub>10</sub>: 11</b>	<b>D<sub>50</sub>: 22</b>	<b>D<sub>90</sub>: 42</b>
I类	<b>Max</b>		<b>Zn</b>	<b>15 μm~53 μm</b>	<b>&gt;53 μm: 3%</b>	<b>D<sub>10</sub>: 24.77</b>	<b>D<sub>50</sub>: 38.29</b>	<b>D<sub>90</sub>: 60.02</b>
I类	单位1	单位3	Zn-Cu	15 μm~53 μm	-	D <sub>10</sub> : 19.1; D <sub>50</sub> : 30.2; D <sub>90</sub> : 45.7		
I类	单位1	单位2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	-	D <sub>10</sub> : 20.8; D <sub>50</sub> : 32.5; D <sub>90</sub> : 49.5		
I类	单位2	单位2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	>53 μm: 0%	D <sub>10</sub> : 21.7; D <sub>50</sub> : 33.9; D <sub>90</sub> : 51.0		
I类	单位2	单位2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	>53 μm: 0%	D <sub>10</sub> : 19.6; D <sub>50</sub> : 31.7; D <sub>90</sub> : 49.5		
I类	单位1	-	Zn-Cu	15 μm~53 μm	-	D <sub>10</sub> : 29.6; D <sub>50</sub> : 41.2; D <sub>90</sub> : 56.2		
I类	单位1	单位4	Zn-Cu	15 μm~53 μm	-	D <sub>10</sub> : 19.1; D <sub>50</sub> : 30.1; D <sub>90</sub> : 45.6		
I类	单位1	单位2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	-	D <sub>10</sub> : 21.8; D <sub>50</sub> : 35.0; D <sub>90</sub> : 55.1		
I类	单位7	单位4	Zn-Cu	15 μm~53 μm	>53 μm: 0.21%	D <sub>10</sub> : 19.62; D <sub>50</sub> : 33.47; D <sub>90</sub> : 49.39		
I类	单位2	单位2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	-	D <sub>10</sub> : 21.6; D <sub>50</sub> : 34.1; D <sub>90</sub> : 52.0		
I类	单位3	单位3	Zn-Cu	15 μm~53 μm	>53 μm: 1.4%	D <sub>10</sub> : 19.4; D <sub>50</sub> : 32.8; D <sub>90</sub> : 53.6		
I类	单位4	单位4	Zn-Cu	15 μm~53 μm	>53 μm: 1.53%	D <sub>10</sub> : 19.836; D <sub>50</sub> : 33.481; D <sub>90</sub> : 50.884		
I类	单位 9	单位 2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	>53 μm: 0.3%	D <sub>10</sub> :23.16; D <sub>50</sub> :35.02; D <sub>90</sub> :52.40		
I类	单位 9	单位 2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	>53 μm: 0.2%	D <sub>10</sub> :21.12; D <sub>50</sub> :32.77; D <sub>90</sub> :48.96		
I类	单位 10	单位 2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	>53 μm: 0.12%	-		
I类	单位 10	单位 2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	>53 μm: 0.25%	-		
I类	单位 4	单位 4	Zn-Cu	15 μm~53 μm	-	D <sub>10</sub> : 16.63; D <sub>50</sub> : 28.5; D <sub>90</sub> : 48.9		
I类	单位 6	单位 2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	-	D <sub>10</sub> : 25.32; D <sub>50</sub> : 39.52; D <sub>90</sub> : 57.08		
I类	单位 6	单位 2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	-	D <sub>10</sub> : 23.07; D <sub>50</sub> : 37.60; D <sub>90</sub> : 54.84		
I类	单位 3	单位 4	Zn-Cu	15 μm~53 μm	>53 μm: 0.63%	D <sub>10</sub> : 18.7; D <sub>50</sub> : 32.0; D <sub>90</sub> : 50.2		
I类	单位 3	单位 2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	>53 μm: 1.52%	D <sub>10</sub> : 18.2; D <sub>50</sub> : 32.9; D <sub>90</sub> : 52.6		
I类	单位 3	单位 2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	>53 μm: 0.42%	D <sub>10</sub> : 17.3; D <sub>50</sub> : 30.5; D <sub>90</sub> : 49.0		
I类	单位11	单位 2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	>53 μm: 0.90%	D <sub>10</sub> : 20.7; D <sub>50</sub> : 34.2; D <sub>90</sub> : 54.9		
I类	单位18	单位2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	>53 μm: 0%	D <sub>10</sub> : 26.3; D <sub>50</sub> : 37.1; D <sub>90</sub> : 51.5		
I类	单位18	单位2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	>53 μm: 0%	D <sub>10</sub> : 21.1; D <sub>50</sub> : 32.7; D <sub>90</sub> : 49.6		
I类	单位19	单位2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	-	D <sub>10</sub> : 23.57; D <sub>50</sub> : 35.67; D <sub>90</sub> : 51.74		
I类	单位19	单位2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	-	D <sub>10</sub> : 21.89; D <sub>50</sub> : 35.54; D <sub>90</sub> : 52.61		
I类	单位14	单位2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	-	D <sub>10</sub> : 26.23; D <sub>50</sub> : 39.50; D <sub>90</sub> : 56.81		
I类	单位14	单位2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	-	D <sub>10</sub> : 22.27; D <sub>50</sub> : 35.81; D <sub>90</sub> : 54.25		
I类	单位 13	单位 2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	>53 μm: 0%	D <sub>10</sub> : 26.3; D <sub>50</sub> : 37.4; D <sub>90</sub> : 52.2		
I类	单位 13	单位 2	Zn-Cu	15 μm~53 μm	>53 μm: 0%	D <sub>10</sub> : 22.3; D <sub>50</sub> : 33.9; D <sub>90</sub> : 50.3		
<b>I类</b>	<b>Min</b>		<b>Zn-Cu</b>	<b>15 μm~53 μm</b>	<b>&gt;53 μm: 0%</b>	<b>D<sub>10</sub>: 16.63</b>	<b>D<sub>50</sub>: 28.5</b>	<b>D<sub>90</sub>: 45.6</b>
<b>I类</b>	<b>Max</b>		<b>Zn-Cu</b>	<b>15 μm~53 μm</b>	<b>&gt;53 μm: 1.53%</b>	<b>D<sub>10</sub>: 29.6</b>	<b>D<sub>50</sub>: 41.2</b>	<b>D<sub>90</sub>: 57.08</b>

从表中可以看出，I类粉末 Zn、Zn-Cu 粒度组成>53 μm 含量介于 0~3%；粒度分布 D<sub>10</sub> 介于 11 μm~29.6 μm，D<sub>50</sub> 介于 22 μm~41.2 μm，D<sub>90</sub> 介于 42 μm~60.02 μm，根据粉末样本

及其检测结果，以及增材制造工艺需求，本标准规定粒度的要求如表 6 所示。此外，粒度要求也可由供需双方协商确定。

表 6 粒度

类别	粒度范围 μm	粒度组成	粒度分布	用途
I 类	15~53	>53 μm 不大于 5%	$D_{10} \geq 10 \mu\text{m}$ $20 \mu\text{m} \leq D_{50} \leq 45 \mu\text{m}$ $D_{90} \leq 65 \mu\text{m}$	适用于激光粉末床熔融 工艺

### 2.2.3 松装密度

粉末松装密度是粉末在规定条件下自由充满标准容器后所测得的堆积密度，即粉末松散填充时单位体积的质量。松装密度是粉末多种性能的综合体现，可以反映出粉末的密度、颗粒形状、颗粒表面状态、颗粒的粒度及粒度分布等，对产品生产工艺的稳定性以及产品质量的控制都有重要的影响。较高的粉末松装密度有利于增材制造工艺的设置和优化，并确保增材制造最终产品致密度达到目标产品要求。松装密度检测按照 GB/T 1479.1 金属粉末 松装密度的测定 第 1 部分：漏斗法的规定执行。

参编单位产品的松装密度测试结果统计如表 7 所示。

表 7 松装密度统计表

类别	检测单位	粉末厂家	材料 牌号	粒度范围	松装密度 g/cm <sup>3</sup>
I类	单位1	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	3.99
I类	单位1	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	3.78
I类	单位1	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	4.02
I类	单位1	易金	Zn	15 μm ~53 μm	3.74
I类	单位2	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	4.28
I类	单位2	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	3.99
I类	单位15	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	3.84
I类	单位1	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	3.71
I类	单位3	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	3.88
I类	单位20	-	Zn	15 μm ~53 μm	3.74
I类	单位4	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	3.91
I类	单位9	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.15
I类	单位9	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	4.15
I类	单位6	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.22
I类	单位4	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	3.93

I类	单位8	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.26
I类	单位10	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	4.19
I类	单位16	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.25
I类	单位16	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.22
I类	单位3	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	4.02
I类	单位3	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	4.24
I类	单位17	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.20
I类	单位5	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	4.19
I类	单位11	单位 2	Zn	15 μm ~53 μm	4.24
I类	单位18	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	4.22
I类	单位18	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.23
I类	单位19	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.20
I类	单位19	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	4.07
I类	单位14	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.18
I类	单位14	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	4.18
I类	单位 13	单位 3	Zn	15 μm ~53 μm	4.20
I类	单位 13	单位 2	Zn	15 μm ~53 μm	4.24
I类	单位12	-	Zn	15 μm ~53 μm	3.93
I类	单位7	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	4.03
<b>I类</b>	<b>Min</b>		<b>Zn</b>	<b>15 μm ~53 μm</b>	<b>3.71</b>
<b>I类</b>	<b>Max</b>		<b>Zn</b>	<b>15 μm ~53 μm</b>	<b>4.28</b>
I类	单位1	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	3.99
I类	单位1	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	3.91
I类	单位1	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	3.85
I类	单位1	易金	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.06
I类	单位15	易金	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	3.93
I类	单位2	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	3.84
I类	单位2	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.11
I类	单位2	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.08
I类	单位12	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.00
I类	单位1	单位3	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	3.94
I类	单位3	单位3	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	3.95
I类	单位4	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	3.96
I类	单位1	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.15
I类	单位9	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.05
I类	单位9	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.00

I类	单位4	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	3.98
I类	单位 10	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.05
I类	单位 10	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.09
I类	单位3	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	3.91
I类	单位3	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.16
I类	单位3	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.12
I类	单位5	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.12
I类	单位5	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.10
I类	单位11	单位 2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.13
I类	单位18	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.12
I类	单位18	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.14
I类	单位19	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.05
I类	单位19	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.15
I类	单位15	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.12
I类	单位14	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.08
I类	单位14	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.01
I类	单位 13	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.11
I类	单位 13	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.11
I类	单位 7	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	3.79
<b>I类</b>	<b>Min</b>		Zn-Cu	<b>15 μm ~53 μm</b>	<b>3.79</b>
<b>I类</b>	<b>Max</b>		Zn-Cu	<b>15 μm ~53 μm</b>	<b>4.16</b>

由表可见，I类 Zn、Zn-Cu 粉末松装密度介于 3.71~4.28 g/cm<sup>3</sup>，根据粉末样本及其检测结果，以及增材制造工艺需求，规定锌及锌合金粉的松装密度应不小于 3.50 g/cm<sup>3</sup>。

#### 2.2.4 振实密度

振实密度是粉末在容器中经过机械振动达到较理想排列状态的粉末集体密度，其相对于松装密度主要是粉末多种物理性能和工艺性能的综合体现，如粉末粒度及其分布、颗粒形状及其表面粗糙度、比表面积等的综合体现。振实密度检测按照 GB/T 5162 金属粉末 振实密度的测定的规定执行。

参编单位产品的振实密度测试结果统计如表 8 所示。

表 8 振实密度统计表

类别	检测单位	粉末厂家	材料牌号	粒度范围	振实密度, g/cm <sup>3</sup>
I类	单位1	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	4.51



I类	单位2	易金	Zn	15 μm ~53 μm	4.71
I类	单位2	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	4.35
I类	单位2	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	4.55
I类	单位3	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.77
I类	单位20	-	Zn	15 μm ~53 μm	4.59
I类	单位4	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	4.38
I类	单位9	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	4.64
I类	单位9	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.62
I类	单位6	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.80
I类	单位4	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	4.33
I类	单位8	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.79
I类	单位8	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.81
I类	单位8	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.82
I类	单位10	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	4.63
I类	单位3	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.81
I类	单位4	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	4.36
I类	单位16	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.76
I类	单位16	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.72
I类	单位16	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.77
I类	单位3	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	4.55
I类	单位3	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	4.67
I类	单位17	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.8
I类	单位5	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	4.6
I类	单位18	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	4.8
I类	单位18	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.9
I类	单位19	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.55
I类	单位19	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	4.55
I类	单位14	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	4.6
I类	单位14	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	4.6
I类	单位 13	单位 3	Zn	15 μm ~53 μm	4.76
I类	单位 13	单位 2	Zn	15 μm ~53 μm	4.67
I类	单位 15	单位 2	Zn	15 μm ~53 μm	4.49
I类	单位 12	单位 12	Zn	15 μm ~53 μm	4.59
I类	单位 7	单位 4	Zn	15 μm ~53 μm	4.37
<b>I类</b>	<b>Min</b>		<b>Zn</b>	<b>15 μm ~53 μm</b>	<b>4.33</b>
<b>I类</b>	<b>Max</b>		<b>Zn</b>	<b>15 μm ~53 μm</b>	<b>4.9</b>
I类	单位1	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.8

I类	单位9	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.63
I类	单位9	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.62
I类	单位2	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.35
I类	单位 2	单位 2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.54
I类	单位 2	单位 2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.41
I类	单位 1	单位 2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.42
I类	单位4	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.37
I类	单位8	单位3	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.79
I类	单位8	单位3	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.81
I类	单位8	单位3	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.82
I类	单位 10	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.59
I类	单位 10	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.55
I类	单位3	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.46
I类	单位3	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.71
I类	单位3	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.63
I类	单位5	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.6
I类	单位5	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.6
I类	单位18	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.9
I类	单位18	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.9
I类	单位19	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.55
I类	单位19	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.63
I类	单位14	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.6
I类	单位14	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.6
I类	单位 13	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.67
I类	单位 13	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.67
I类	单位 7	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	4.39
<b>I类</b>	<b>Min</b>		<b>Zn-Cu</b>	<b>15 μm ~53 μm</b>	<b>4.35</b>
<b>I类</b>	<b>Max</b>		<b>Zn-Cu</b>	<b>15 μm ~53 μm</b>	<b>4.9</b>

由表可见，I类 Zn、Zn-Cu 粉末振实密度介于 4.33~4.9 g/cm<sup>3</sup>，根据粉末样本及其检测结果，以及增材制造工艺需求，本标准规定锌及锌合金粉的振实密度不小于 4.1 g/cm<sup>3</sup>。

### 2.2.5 流动性

粉末流动性是指以一定量粉末流过规定孔径的标准漏斗所需要的时间来表示，通常采用的单位为 s/50g，其数值愈小说明该粉末的流动性愈好，它是粉末的一种工艺性能。粉末流动性性能与很多因素有关，如粉末颗粒尺寸、形状和粗糙度、比表面积等。一般地说，增加颗粒

间的摩擦系数会使粉末流动困难。通常球形颗粒的粉末流动性最好，而颗粒形状不规则、尺寸小、表面粗糙的粉末，其流动性差。另外，粉末流动性受颗粒间粘附作用的影响，颗粒表面水分、气体等的吸附会降低粉末的流动性。粉末流动性检测按照 GB/T 1482 金属粉末流动性的测定 标准漏斗法(霍尔流速计)的规定执行。

参编单位产品的流动性测试结果统计如表 9 所示。

表 9 流动性统计表

类别	检测单位	粉末厂家	材料牌号	粒度范围	流动性 s/50g
I类	单位1	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	16.30
I类	单位1	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	17.62
I类	单位1	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	18.15
I类	单位1	-	Zn	15 μm ~53 μm	18.06
I类	单位12	-	Zn	15 μm ~53 μm	18.23
I类	单位2	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	22.90
I类	单位3	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	19.5
I类	单位20	-	Zn	15 μm ~53 μm	11.5
I类	单位2	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	22.72
I类	单位2	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	20.44
I类	单位7	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	17.1
I类	单位4	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	20.2
I类	单位9	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	17.53
I类	单位9	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	17.85
I类	单位6	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	16
I类	单位4	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	18.9
I类	单位8	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	24.6
I类	单位8	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	24.8
I类	单位10	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	16.1
I类	单位16	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	17.9
I类	单位16	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	15.0
I类	单位16	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	14.9
I类	单位3	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	17.2
I类	单位3	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	18.1
I类	单位17	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	15.9
I类	单位5	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	17.5
I类	单位11	单位 2	Zn	15 μm ~53 μm	15.06

I类	单位18	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	14.8
I类	单位18	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	15.6
I类	单位19	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	16.20
I类	单位19	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	14.96
I类	单位14	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	17.8
I类	单位14	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	19.6
I类	单位 13	单位 3	Zn	15 μm ~53 μm	16.92
I类	单位 13	单位 2	Zn	15 μm ~53 μm	15.77
<b>I类</b>	<b>Min</b>		<b>Zn</b>	<b>15 μm ~53 μm</b>	<b>11.5</b>
<b>I类</b>	<b>Max</b>		<b>Zn</b>	<b>15 μm ~53 μm</b>	<b>24.8</b>
I类	单位1	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	17.17
I类	单位1	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	18.39
I类	单位1	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	20.15
I类	单位2	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	24.03
I类	单位3	单位3	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	18.4
I类	单位2	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	19.88
I类	单位2	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	19.44
I类	单位2	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	20.40
I类	单位4	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	23.7
I类	单位1	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	17.5
I类	单位9	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	16.72
I类	单位9	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	16.84
I类	单位4	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	25.5
I类	单位10	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	15.5
I类	单位10	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	15.1
I类	单位3	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	18.3
I类	单位3	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	18.3
I类	单位3	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	20.5
I类	单位5	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	16.1
I类	单位5	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	17.2
I类	单位11	单位 2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	15.37
I类	单位18	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	14.3
I类	单位18	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	14.2
I类	单位19	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	15.47
I类	单位19	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	14.34
I类	单位14	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	17.3
I类	单位14	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	21.4

I类	单位 13	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	15.43
I类	单位 13	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	16.05
I类	单位7	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	23.0
I类	<b>Min</b>		<b>Zn-Cu</b>	<b>15 μm ~53 μm</b>	<b>14.2</b>
I类	<b>Max</b>		<b>Zn-Cu</b>	<b>15 μm ~53 μm</b>	<b>25.5</b>

由表可见，I类 Zn、Zn-Cu 粉末流动性介于 11.5~25.5 s/50g，根据粉末样本及其检测结果，本标准规定锌及锌合金粉流动性不大于 28.0 s/50g。

### 2.2.6 外观质量

粉末的外观质量可以直观反映粉末的品质，外观质量采用目视检查，观察粉末的颜色和均匀性，无目视可见夹杂物。本标准规定增材制造用锌及锌合金粉产品呈灰色，无目视可见夹杂物。

### 2.2.7 其他

增材制造用锌及锌合金粉末目前采用旋转盘离心雾化法、气雾化法等工艺进行制备，制备的粉末颗粒呈球形或近球形，颗粒球形程度是决定粉末流动性的关键因素之一，不规则的颗粒形貌由于颗粒之间的摩擦力导致粉末流动性较差。

粉末形貌表征可采用球形率与/或平均球形度，球形度定义见 GB/T 37406 电子封装用球形二氧化硅微粉球形度的检测方法 颗粒动态光电投影法，球形度：单个粒子平面投影图像接近标准圆形的程度。平均球形度：所有颗粒球形度的平均值，反映所有颗粒接近球形的程度。球形率检测标准为：YS/T 1297 钛及钛合金粉末球形率测定方法，平均球形度检测标准是参考 GB/T 21649.2-2017 粒度分析 图像分析法 第2部分：动态图像分析法。分析比对增材制造用锌及锌合金粉球形率与平均球形度结果，见表 10，球形率与平均球形度物理意义不同，数值有区别，但均可有效表征粉末整体球形程度。

目前增材制造用金属粉末标准多采用球形率表征，本标准也采用球形率表征粉末形貌。

表 10 球形率、平均球形度数据对比分析

类别	单位简称	粉末厂家	材料牌号	粒度范围	球形率	平均球形度
I类	单位6	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	91.5%	0.936
I类	单位18	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	-	0.94
I类	单位18	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	-	0.93
I类	单位16	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	92.4%	0.938
I类	单位6	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	89.0%	0.933
I类	单位6	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	88.1%	0.932

I类	单位18	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	-	0.94
I类	单位18	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	-	0.93

粉末在制备过程中会形成一定数量的空心粉颗粒，空心粉会引起制件内部产生孔隙、裂纹等缺陷，直接影响制件的使用性能和寿命，不同制备方法得到的金属粉末的空心粉率差别较大，通常旋转盘离心雾化法制备的粉末空心粉率相对较低。

目前增材制造行业对粉末球形率、空心粉率技术指标没有成熟且统一的判定标准，并且一般不对这两项指标作明确要求。一般粉末球形率的测定按YS/T 1297 钛及钛合金球形率测定方法的规定执行，空心粉率的测定按GB/T 41978 增材制造 金属粉末空心粉率检测方法的规定执行，球形率与空心粉率测试方法也可由供需双方协商确定。

各参编单位提供的粉末球形率和空心粉率数据见表 11，由表可见，I 类 Zn、Zn-Cu 粉末球形率介于 78.46%~95.3%，空心粉率介于 0.19%~4.36% 本标准对这两项指标不作明确要求。

表 11 球形率、空心粉率统计表

类别	检测单位	粉末厂家	材料牌号	粒度范围	球形率	空心粉率
I类	单位1	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	92.31%	-
I类	单位6	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	95.3%	-
I类	单位6	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	91.5%	-
I类	单位16	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	92.40%	0.50%
I类	单位3	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	91.05%	-
I类	单位3	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	92.46%	-
I类	单位5	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	88.15%	0.19%
I类	单位18	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	-	2.56%
I类	单位18	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	-	4.36%
I类	单位19	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	84.77%	1.98%
I类	单位19	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	88.33%	1.12%
I类	单位14	单位3	Zn	15 μm ~53 μm	93%	0.42%
I类	单位14	单位2	Zn	15 μm ~53 μm	94%	0.58%
I类	单位 13	单位 3	Zn	15 μm ~53 μm	93.25%	0.33%
I类	单位 13	单位 2	Zn	15 μm ~53 μm	94.31%	0.42%
I类	单位7	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	78.6%	-
I类	单位1	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	78.46%	-
I类	单位12	单位4	Zn	15 μm ~53 μm	78.47%	-
<b>I类</b>	<b>Min</b>		<b>Zn</b>	<b>15 μm ~53 μm</b>	<b>78.46%</b>	<b>0.19%</b>

<b>I类</b>	<b>Max</b>		<b>Zn</b>	<b>15 μm ~53 μm</b>	<b>95.3%</b>	<b>4.36%</b>
I类	单位1	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	89.12%	-
I类	单位1	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	81.27%	-
I类	单位1	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	87.17%	-
I类	单位6	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	89.0%	-
I类	单位6	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	88.1%	-
I类	单位3	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	92.34%	-
I类	单位5	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	88.14%	0.23%
I类	单位5	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	91.39%	0.26%
I类	单位3	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	92.81%	-
I类	单位3	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	93.10%	-
I类	单位18	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	-	1.09%
I类	单位18	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	-	0.84%
I类	单位19	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	90.66%	1.27%
I类	单位19	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	88.75%	1.18%
I类	单位14	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	91%	0.44%
I类	单位14	单位2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	92%	0.46%
I类	单位 13	单位 2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	91.97%	0.36%
I类	单位 13	单位 2	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	92.40%	0.26%
I类	单位7	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	78.9%	2.1%
I类	单位12	单位4	Zn-Cu	15 μm ~53 μm	81.11%	-
<b>I类</b>	<b>Min</b>		<b>Zn-Cu</b>	<b>15 μm ~53 μm</b>	<b>78.9%</b>	<b>0.23%</b>
<b>I类</b>	<b>Max</b>		<b>Zn-Cu</b>	<b>15 μm ~53 μm</b>	<b>93.1%</b>	<b>2.1%</b>

## 2.2.8 检验规则，标志、包装、运输、贮存

粉末产品的检验规则包括检验和验收、组批规定、检验项目及取样、检验结果判定，其中每一项技术指标均规定了对应的试验方法及取样方法，并对各项技术指标检验出现不合格的情况作出明确规定。

增材制造用锌及锌合金粉在包装、运输和贮存过程中可能会吸附空气中的氧、氮等气体元素而降低品质，且易吸附水汽而受潮导致粉末性能受到影响。此外粉末可能会因碰撞、挤压等原因发生起火、爆炸。因此本标准对产品的标志、包装、运输、贮存做出相应规定。

## 三、标准水平分析

### 3.1 采用国际标准和国外先进标准的程度

未采用国际标准和国外先进标准。

### 3.2 与国际标准及国外同类标准水平的对比

本标准的主要技术指标达到国内先进水平。

### 3.3 与现有标准及制定中的标准协调配套情况

本标准的制订与现有的标准及制订中的标准协调配套，无重复交叉现象

### 3.4 涉及国内外专利及处置情况

经过检索，本标准不涉及国内外专利。

## 四、与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

本标准与有关的现行法律、法规和强制性国家标准具有一致性，无冲突之处。

## 五、重大分歧意见的处理经过和依据

本标准制定过程中，无重大分歧意见。

## 六、标准作为强制性或推荐性国家（或行业）标准的建议

本标准建议作为推荐性国家标准。

## 七、贯彻标准的要求和措施建议

本标准建议发布后 6 个月实施。

## 八、废止现行有关标准的建议

无。

## 九、其他应予以说明的事项

无

## 十、预期效果

本标准是增材制造用锌及锌合金粉标准，主要针对增材制造用锌及锌合金粉的技术要求、试验方法、检验及产品合格标准。本标准实施后，我国增材制造锌及锌合金粉将会更加规范，并促进增材制造锌及锌合金的广泛应用。

《增材制造用锌及锌合金粉》标准编制组

2025 年 2 月