

国家标准

《增材制造用高熵合金粉》

编制说明

（送审稿）

《增材制造用高熵合金粉》标准编制组

编写单位：江苏威拉里新材料科技有限公司

二〇二二年七月

国家标准《增材制造用高熵合金粉》

编制说明（送审稿）

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2020年第四批推荐性国家标准计划的通知》（国标委发[2020]53号）文件的要求，由全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）和全国增材制造标准化技术委员会（SAC/TC 562）共同归口，江苏威拉里新材料科技有限公司负责制定推荐性国家标准《增材制造用高熵合金粉》，项目计划编号为：20204835-T-610。按计划要求，本标准应在2022年完成。

1.2 产品概况

高熵合金(high-entropy alloys, HEAs)是近十几年来创新合金设计提出的新的合金体系，不同于传统的合金材料单一元素为主的合金设计策略，高熵合金是由多种金属元素以等原子比或近等原子比的成分组成，每个组元的原子分数在 5%~35%之间，混合熵大于 $1.61R$ (R 为气体常数)的简单固溶体相构成的合金。此外，高熵合金也可被定义为在原子占位无序态下的混合熵大于 $1.5R$ 的合金，无论它们在室温下是单相还是多相。目前，根据高熵合金的性质和特点，总结出高熵合金的四大效应：（1）热力学上的高熵效应（2）结构上的晶格畸变效应（3）动力学上的迟滞扩散效应（4）性能上的“鸡尾酒”效应。高熵合金的出现突破了传统金属材料以单一主元素的合金设计思想，使得合金设计从相图边角扩展到中间，极大拓展了合金设计领域，近些年来，有关高熵合金的研究逐渐成为材料领域的国际热点。

得益于采用传统制造工艺成功制造出高熵合金并用于各种不同的场合，3D 打印高熵合金在近年来也得到了飞速发展。3D 打印为制造形状复杂，性能优异的高熵合金提供了无限可能，由此促进了工业的进一步应用。

图 1 为打印的高熵合金产品的强度-韧性之间的关系图。强度和延伸率之间的宽广范围主要取决于高熵合金的成分。高熵合金呈现出不同的屈服强度，自 FCC 为基础的 194MPa 向 BCC 为基础的 773 MPa 进行变化。SLM 打印的高熵合金产品呈现出的屈服强度比 EBM 打印的更高，这是因为晶粒细化，成分分布均匀，且没有金属间化合物相析出所造成的。

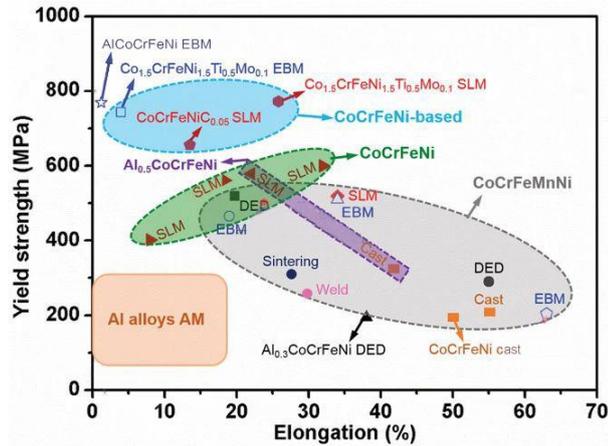


图 1. 3D 打印高熵合金产品拉伸强度和延伸率之间的关系

经过十几年来不断研究的积累，FeCoNiCr 系高熵合金目前已经得到了市场化应用，市场上涌现出了大量 FeCoNiCr 系高熵合金的制造厂商，如北京研邦、高科新材、江西金泰等，主要产品如图 2 所示。



图 2 市场上生产的 FeCoNiCr 系高熵合金板材、棒材及纽扣锭

高熵合金与传统合金相比，其具有高强度、高硬度、耐腐蚀、耐磨、耐高温、抗辐射以及软磁性等优异的综合性能，应用范围广，特别是在发动机工业、硬质刀具工业、海洋工程、核工业等工业领域复杂金属零件的应用上具有很大的优势，如在高温、高压、高速等条件下其依然能够维持较好的力学性能，可被用来服役于一些恶劣环境，例如在航空航天、核能工程等方面；另一方面高熵合金具有优异的耐蚀性，常被用来生产化工器皿、涡轮叶片等长期在侵蚀性溶液里使用的零件。还有一些高熵合金在电学、磁学等方面性能优异，可以被用在电子通信等方面，例如变压器、磁头、磁盘等。高熵合金因其在动态载荷条件下显示出卓越的抗压强度、出色的耐腐蚀性、优异的高温性能以及在环境温度和低温下的机械响应性，已

经得到广泛应用。

高熵合金具有广阔的市场前景，但目前我国尚未对增材制造用高熵合金粉制定相关国家标准以及行业标准，也没有统一的技术要求和检验验收规范。制定该粉末材料的国家标准旨在引导高熵合金的研究和开发有序开展，同时加强供需双方的技术理解和交流，引导和规范该产品的生产和销售，满足市场相关领域的不同需求，对于促进增材制造用高熵合金粉的发展具有十分深远的意义。

同时本标准的制定能够有效的对增材制造用高熵合金粉末的生产、检验、包装等活动进行规范，有利于提高增材制造用高熵合金粉末的产品质量，推进粉末的市场应用。针对不同增材制造工艺的要求，对高熵合金粉末的化学成分及物理化学性能进行了规定，以解决当前增材制造用高熵合金粉末无标准可依、粉末性能参差不齐的问题。

1.3 起草单位及主要起草人工作情况

1.3.1 起草单位情况

本标准主持起草单位江苏威拉里新材料科技有限公司（后简称“公司”）是由徐州矿务集团有限公司于 2015 年投资组建的国家高新技术企业，注册资本金 4000 万元。公司联合上海交通大学、中南大学、西北工业大学等高校进行金属材料基础理论研究和新材料体系开发，拥有国内一流、世界领先的粉末制备专有技术。现已建成国内规模最大金属粉末材料生产线，累计总科研投入五千余万，拥有 12000 炉次的技术数据积累和完整的自主知识产权，同时建立了全系列合金粉末生产工艺数据库。目前公司拥有 9 条 VIGA（1 条在建）粉末生产线和 5 条 EIGA（1 条在建）生产线，年产能可达到 400 吨。能够批量生产、稳定供应模具钢、高温合金、铝合金、钛合金、钴铬合金、高熵合金等多种金属粉体产品，并能够针对客户需求，提供高品质粉体设备及制备工艺整体解决方案。

公司粉末产品球形度、氧含量、纯净度、流动性、粒度分布等性能均达到国际先进水平，材料及打印服务已广泛应用于工业模具、航空航天、3C 电子、生物医疗、激光熔覆等高端制造领域。公司以优越的产品品质及专业的技术服务，致力于打造国内顶尖世界一流的高端金属粉体制造企业。

公司现有员工 124 人，平均年龄 32 周岁，团队年轻有活力、学历层次高。其中高级管理人员 8 人，管理及研发人员 45 人，技术工人 71 人。管理人员中博士研究生 3 人，硕士研究生 15 人。公司还专门建立了特聘专家库，先后引进中南大学、上海交通大学、中国矿业大学等知名专家到场指导工艺生产，提升公司生产技术水平。公司每年营业收入的 25%用于新

产品、新工艺、新设备的研发与改进提升。产品拥有完全自主知识产权，现已获得八十余项发明及实用新型专利，完成了近 20 项科研项目，多次获得省、市级科技进步奖，并通过国际质量管理体系（ISO9001）、国际宇航质量管理体系（AS9100）、国军标质量管理体系（GJB9001C）、国家知识产权管理体系以及煤矿设备检修服务等认证，同时荣获“国家知识产权优势企业”、“江苏省军民融合示范企业”、“江苏省职业经理人大赛一等奖”、“江苏省科技型中小企业”、“江苏省研究生工作站”、“2021 年度航空工业最佳 3D 打印金属粉末材料供应商”等荣誉称号，公司现参与国家标准/行业标准的制/修订达到二十余项，在 SCI 以及省级以上期刊发表论文 10 余篇。

1.3.2 起草单位及主要起草人工作情况

矿冶科技集团有限公司、西北工业大学、中国矿业大学、盘星新型合金材料（常州）有限公司、北京科技大学、大连理工大学积极参与本标准的调研工作；矿冶科技集团有限公司、北京科技大学、盘星新型合金材料（常州）有限公司、浙江亚通焊材有限公司、宁波众远新材料科技有限公司、西安赛隆金属材料有限责任公司等单位提供了本单位相应产品的技术指标报告，为标准的编制提供了大量的高熵合金产品数据；广东省科学院工业分析检测中心、西北有色金属研究院、中国矿业大学、国营芜湖机械厂、上海材料研究所、钢铁研究总院有限公司、飞而康快速制造科技有限责任公司、郑州大学、无锡市产品质量监督检验院等单位为本标准提供了技术支持以及部分高熵合金粉末产品的检测数据、验证等工作。同时标准参与单位针对标准的讨论稿、征求意见稿、送审稿等提出修改意见，确保产品的指标能够满足生产以及实际使用要求。

参编单位及分工见表 1。

表 1 参编单位及分工

序号	参编单位	分工
1	江苏威拉里新材料科技有限公司	编写标准文本及编制说明，提供粉末验证样品以及协调粉末验证、收集数据以及资料审核
2	矿冶科技集团有限公司	提供粉末性能数据及所有产品的验证数据
3	浙江亚通焊材有限公司	提供一种测试用高熵合金粉，提供粉末性能数据和部分产品验证数据
4	有色金属技术经济研究院	文本标准化审核
5	中机研标准技术研究院（北京）有限公司	文本标准化审核
6	北京科技大学	提供部分粉末性能数据和验证数据
7	广东省科学院工业分析检测中心	提供部分粉末验证数据

8	西北有色金属研究院	提供部分粉末验证数据
9	西北工业大学	提供部分粉末性能数据
10	盘星新型合金材料（常州）有限公司	提供部分粉末性能数据和测试数据
11	宁波众远新材料科技有限公司	提供部分粉末性能数据和测试数据
12	中国矿业大学	提供部分粉末验证数据
13	上海材料研究所	提供部分粉末验证数据
14	钢铁研究总院有限公司	提供部分粉末验证数据
15	无锡市产品质量监督检验院	提供部分粉末验证数据
16	飞而康快速制造科技有限责任公司	提供部分粉末验证数据
17	西安赛隆金属材料有限责任公司	提供部分粉末性能数据
18	国营芜湖机械厂	提供部分粉末验证数据
19	郑州大学	提供部分粉末验证数据
20	大连理工大学	参与资料收集、调研
21	广东省科学院新材料研究所	标准及编制说明文本校准

标准主要起草人以及分工见表 2。

表 2 标准主要起草人及分工

姓名	工作单位	分工
唐跃跃 叶国晨	江苏威拉里新材料科技有限公司	负责全过程的标准编制、起草及组织协调，负责标准关键指标得到把控
蒋保林 许荣玉	江苏威拉里新材料科技有限公司	参与标准起草、资料收集、协调工作
胡宇 马尧	矿冶科技集团有限公司	参与资料收集、调研，提供部分产品数据以及产品验证数据
史金光 王彩霞	浙江亚通焊材有限公司	提供部分产品数据，提供粉末样品以及产品验证数据
吴艳华 崔妍	有色金属技术经济研究院	文本标准化审核
薛莲	中机研标准技术研究院（北京）有限公司	文本标准化审核
路新 徐伟	北京科技大学	参与资料收集、调研，提供部分产品数据以及产品验证数据
关耀威 伍超群	广东省科学院工业分析检测中心	资料、数据审核，提供部分产品验证数据
刘楠 殷京瓿	西北有色金属研究院	资料、数据审核，提供部分产品验证数据
林鑫 于君	西北工业大学	参与资料收集、调研，提供部分产品数据

肖海波 徐飞鹏	盘星新型合金材料（常州）有限公司	提供部分产品数据和验证数据
赵文军 程鹏飞	宁波众远新材料科技有限公司	提供部分产品数据和验证数据
陈正 杨小芹	中国矿业大学	提供部分产品验证数据
杨启云	上海材料研究所	提供部分产品验证数据
王长军 刘雨	钢铁研究总院有限公司	提供部分产品验证数据
冒浴沂	无锡市产品质量监督检验院	提供部分产品验证数据
杨广善 计霞	飞而康快速制造科技有限责任公司	提供部分产品验证数据
孙念光 李会霞	西安赛隆金属材料有限责任公司	提供部分产品验证数据
周军 魏放	江苏威拉里新材料科技有限公司	负责调研、验证、标准起草
李海澄 范朝	国营芜湖机械厂	提供部分产品验证数据
郝振华 舒永春	郑州大学	提供部分产品验证数据
卢一平	大连理工大学	参与资料收集、调研
王娟 路建宁	广东省科学院新材料研究所	参与标准文本校准

1.4 主要工作过程

1.4.1 起草阶段

2021年03月16日-18日，全国有色金属标准化技术委员会在江苏苏州组织召开会议，江苏威拉里新材料科技有限公司、矿冶科技集团有限公司、北京科技大学、盘星新型合金材料（常州）有限公司、浙江亚通焊材有限公司、西北工业大学、西北有色金属研究院、广东省科学院工业分析检测中心、西安欧中材料科技有限公司、西安赛隆金属材料有限责任公司、东睦新材料集团股份有限公司、钢铁研究总院有限公司、株洲硬质合金集团有限公司、自贡硬质合金有限责任公司等单位参加了会议，会议对本项目进行了任务落实。

江苏威拉里新材料科技有限公司在接到项目下达的任务后立即与参编单位成立标准编制工作组，对目标任务进行了分解，明确成员的任务要求，制定工作计划和进度安排。由于该标准为首次制定，项目运行以来，工作组成员查阅了大量的国内外相关文献资料，收集、整理、对比分析了相关企业的技术资料，同时也对公司内部生产的高熵合金粉末相关产品检测

分析报告、用户使用状况等进行了相关资料的收集整理；对国内从事高熵合金粉末制造、研发以及生产单位进行了调研，了解其工艺、产能、规格及质量控制水平等基本情况，并对相应结果进行汇总、分析。结合调研情况和公司近年来在高熵合金粉末生产制造经验，以公司现有相关质量文件和高熵合金粉末企业标准为基础，于 2021 年 4 月底完成标准讨论稿。本标准讨论稿完成后，在标准编制工作组及公司内部进行了多次交流，广泛征求意见，对本标准讨论稿进行了认真的修改和完善，最后形成了该标准的征求意见稿。

1.4.2 征求意见阶段

2021 年 05 月 13 日-14 日，全国有色金属标准化技术委员会和全国增材制造标准化技术委员会共同组织在浙江宁波召开本标准的第一次讨论会。编制组成员江苏威拉里新材料科技有限公司、矿冶科技集团有限公司、北京科技大学、西北工业大学、西北有色金属研究院、盘星新型合金材料（常州）有限公司、浙江亚通焊材有限公司、广东省科学院工业分析检测中心、西安赛隆金属材料有限责任公司、钢铁研究总院有限公司、郑州大学、上海材料研究所、飞而康快速制造科技有限责任公司以及西安欧中材料科技有限公司、自贡长城硬面材料有限公司等 25 家单位 37 位专家代表参加了会议。与会代表对本标准的征求意见稿和编制说明进行了认真、细致的讨论，并提出修改意见。

2021 年 9 月 28 日-29 日，由全国有色金属标准化技术委员会和全国增材制造标准化技术委员会共同主持在江苏常州召开了本标准的预审会。来自全国有色金属标准化技术委员会、全国增材制造标准化技术委员会、江苏威拉里新材料科技有限公司、矿冶科技集团有限公司、北京科技大学、西北工业大学、西北有色金属研究院、盘星新型合金材料（常州）有限公司、浙江亚通焊材有限公司、广东省科学院工业分析检测中心、钢铁研究总院有限公司、郑州大学、上海材料研究所、飞而康快速制造科技有限责任公司以及西安欧中材料科技有限公司、西部超导材料股份有限公司、中国航发北京航空材料研究院等 35 家单位 44 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，并提出修改意见，标准编制组采纳了相关意见，并对标准进行修改完善，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。

同时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委员会的“公共信息服务平台”上挂网，向社会公开征求意见。并且通过工作群、邮件向委员单位征求意见，并将征求意见资料在 www.cnsmq.com 网站上挂网。征求意见的单位主要包括生产、经销、使用、科研、检验等单位以及科研院校，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。

2022年07月标准制定工作组对收集到的意见进行整理，共收到了20条意见，形成了标准征求意见稿意见汇总处理表。同时对标准征求意见稿进行修改，于2022年07月完成标准的送审稿和编制说明。

1.4.3 审查阶段

2022年08月15日-16日，国家标准《增材制造用高熵合金粉》审定会由全国有色金属标准化技术委员会和全国增材制造标准化技术委员会主持，于广州召开。来自江苏威拉里新材料科技有限公司、矿冶科技集团有限公司、浙江亚通焊材有限公司以及宁波众远新材料科技有限公司、西北有色金属研究院等XX家单位XX位专家代表参加了会议，见《有色金属标准审定会参加单位及代表签名》。会议对标准送审稿进行了认真、细致的讨论，具体修改内容见《有色金属行业标准审定会会议纪要》。

与会专家经过讨论后一致认为：本标准的制定遵循了满足用户需求、技术内容合理、检验方法可行的原则，并且充分考虑了生产企业、使用单位及相关各方的意见和建议。本标准对我国增材制造用高熵合金粉具有较强的规范和指导作用，达到了国内先进水平。建议标准起草单位按以上修改意见修改后，形成国家标准报批稿上报。

1.4.4 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：2022年XX月XX日至2022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。

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

1) 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。

2) 本标准在编制过程中，主要以国内增材制造用高熵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，既能够反映国内各生产企业的技术水平，便于生产，又提高可操作性，便于应用。其技术要求中技术指标取值范围根据相关企业技术发展水平及测试数据进行确定。本标准符合增材制造行业的市场应用需求，具有指导作用，并能规范市场。

2.2 确定标准主要内容的依据

高熵合金粉末广泛应用于增材制造领域，可通过增材制造工艺实现致密化成形，不同的增材制造工艺对粉末的粒度有不同的要求，而且粉末的化学成分、松装密度、振实密度、流动性等性能指标不仅会影响增材制造工艺过程，并且也会对最终成形坯体的显微组织、力学性能、尺寸精度、表面质量等产生影响。因此，本标准对高熵合金粉的关键性能指标如化学成分、粒度、松装密度、振实密度、流动性等进行了规定。

2.2.1 化学成分

本标准选取目前应用较为广泛且相对成熟的高熵合金粉末，目前批量化生产增材制造用高熵合金粉末的牌号主要有 FeCoNiCrMn、FeCoNiCrAl、FeCoNiCrTi、FeCoNiCrMo、FeCoNiCr。这五种高熵合金化学成分中各主元素按照等原子比或近原子比构成，然后换算成对应的质量百分数；杂质元素主要包含氧、氮气体元素以及碳、磷、硫等杂质。通过调研相关单位生产的高熵合金粉末化学成分报告以及实际应用需求设置恰当合理的化学成分范围。其中产品中主元素 Fe、Mn、Ni、Mo、Co、Cr、Al、Ti 以及杂质元素 C、S、P、O、N 含量分析按供需双方协商确定的方法进行。

国内 8 家相关厂家和科研院所提供的五种高熵合金粉末（FeCoNiCrMn、FeCoNiCrAl、FeCoNiCrTi、FeCoNiCrMo、FeCoNiCr）的化学成分分析结果或范围如表 3 所示。

表 3 相关厂家增材制造用高熵合金粉的化学成分

牌号	化学成分（质量分数）/%												
	主元素								杂质元素，不大于				
FeCoNiCrMn	Fe	Co	Ni	Cr	Mn	Ti	Al	Mo	C	P	S	O	N
单位1	18.31	21.01	21.06	18.67	19.48	—	—	—	0.0079	0.0081	0.0030	0.085	0.022
单位2	20.02	21.52	20.46	19.05	18.60	—	—	—	0.015	0.0050	0.0030	0.070	0.040
单位3	余量	19.85~ 21.90	19.92~ 20.28	17.92~ 19.85	19.28~ 20.23	—	—	—	≤0.02	0.0040	0.0060	0.058	0.019
单位4	19.14	21.44	21.45	17.80	19.69	—	—	—	0.015	≤ 0.010	≤ 0.0050	0.060	0.036
单位5	18.60	22.15	21.59	18.67	18.83	—	—	—	—	—	—	0.040	—
单位6	余量	20.16	20.16	19.96	19.56	—	—	—	—	—	—	—	—
FeCoNiCrAl	Fe	Co	Ni	Cr	Mn	Ti	Al	Mo	C	P	S	O	N
单位1	22.12	23.78	23.20	21.01	—	—	10.76	—	0.0050	0.0081	0.0030	0.055	0.021
单位2	22.11	23.02	22.90	20.46	—	—	10.72	—	0.014	0.0060	0.0040	0.051	0.035
单位3	余量	22.90~2 4.78	22.99~ 23.37	20.51~ 20.61	—	—	10.66~ 11.09	—	0.016	0.0090	0.0030	0.063	0.018

单位4	21.03	21.85	22.16	19.59	—	—	14.61	—	0.015	≤ 0.010	≤ 0.0050	0.076	0.037
单位5	17.83	23.34	24.27	21.68	—	—	13.38	—	—	—	—	0.047	—
单位7	19.62	24.01	22.67	21.06	—	—	12.34	—	0.02	0.0075	0.0005	0.032	0.013
FeCoNiCrTi	Fe	Co	Ni	Cr	Mn	Ti	Al	Mo	C	P	S	O	N
单位1	21.02	21.12	20.62	18.37	—	18.54	—	—	0.006 7	0.005 0	0.006 2	0.07	0.029
单位2	19.86	21.45	21.38	18.75	—	17.52	—	—	0.012	0.009 0	0.005 0	0.05 0	0.036
单位3	余量	20.32~ 22.45	20.21~ 22.57	17.96~ 20.02	—	16.76~18. 48	—	—	0.015	0.008 0	0.005 0	0.06 9	0.021
FeCoNiCrMo	Fe	Co	Ni	Cr	Mn	Ti	Al	Mo	C	P	S	O	N
单位1	16.32	18.72	18.80	16.41	—	—	—	29.55	0.0050	0.0050	0.003 0	0.06 6	0.034
单位2	18.05	18.40	18.25	15.88	—	—	—	29.22	0.018	0.010	0.005 0	0.04 7	0.019
单位3	余量	17.54~ 19.65	17.52~ 19.68	15.72~ 16.88	—	—	—	27.98~ 31.43	0.018	0.0070	0.004 0	0.08	0.023
单位5	16.53	19.27	18.96	16.87	—	—	—	28.27	—	—	—	0.03 7	—
FeCoNiCr	Fe	Co	Ni	Cr	Mn	Ti	Al	Mo	C	P	S	O	N
单位1	24.27	26.26	26.12	22.95	—	—	—	—	0.0077	0.0050	0.0030	0.041	0.040
单位2	24.17	26.32	26.18	22.33	—	—	—	—	0.016	0.0050	0.0040	0.048	0.020
单位3	余量	24.96~ 27.150	24.56~ 27.21	21.78~ 23.98	—	—	—	—	0.017	0.0050	0.0050	0.071	0.037
单位8	25.09	26.13	25.51	23.23	—	—	—	—	0.002	—	—	—	—
注：单位 1-江苏威拉里新材料科技有限公司；单位 2-盘星新型合金材料（常州）有限公司；单位 3-北京科技大学；单位 4-矿冶科技集团有限公司；单位 5-浙江亚通焊材有限公司；单位 6-宁波众远新材料科技有限公司；单位 7-西安赛隆金属材料有限责任公司；单位 8-西北工业大学；													

根据表 3 中各参编单位产品化学成分检测结果，本标准规定的增材制造用高熵合金粉末的化学成分要求如表 4 所示。

表 4 化学成分要求

牌号	化学成分（质量分数）/%													
	主元素								杂质元素，不大于					
	Fe	Co	Ni	Cr	Mn	Ti	Al	Mo	C	P	S	O	N	杂质总和
FeCoNiCrMn	18.00~ 21.00	19.50~ 22.50	19.50~ 22.50	17.00~ 20.50	18.00~ 21.50	—	—	—	0.020	0.015	0.010	0.10	0.050	0.18
FeCoNiCrAl	17.50~ 23.00	21.50~ 25.50	21.50~ 25.00	19.00~ 22.00	—	—	10.00~ 15.00	—	0.020	0.015	0.010	0.10	0.050	0.18
FeCoNiCrTi	19.00~ 22.00	20.00~ 23.00	20.00~ 23.00	17.50~ 20.50	—	16.00~ 19.00	—	—	0.020	0.015	0.010	0.10	0.050	0.18
FeCoNiCrMo	16.00~ 18.50	17.00~ 20.00	17.00~ 20.00	15.00~ 17.00	—	—	—	27.50~ 32.00	0.020	0.015	0.010	0.10	0.050	0.18
FeCoNiCr	23.50~ 26.50	24.50~ 28.00	24.00~ 27.50	21.50~ 24.50	—	—	—	—	0.020	0.015	0.010	0.10	0.050	0.18

注：需方对产品化学成分有特殊要求时，由供需双方协商确定。

2.2.2 粒度

高熵合金粉主要采用真空感应熔炼惰性气体雾化法、等离子旋转电极法等工艺进行制备，不同工艺所制备的高熵合金粉的粒度区间有差别，但可通过筛分进行粒度调节。根据激光粉末床熔融、电子束粉末床熔融以及激光定向能量沉积技术不同工艺技术要求，参考江苏威拉里新材料科技有限公司、矿冶科技集团有限公司、北京科技大学、盘星新型合金材料（常州）有限公司、浙江亚通焊材有限公司、宁波众远新材料科技有限公司、西安赛隆金属材料有限责任公司等 7 家单位提供的产品数据（如表 5 和表 6），以及标准会议上生产单位、用户、科研院所的充分讨论。

本标准对高熵合金粉粒度分为两类（如表 7 所示）：第 I 类，适用于激光粉末床熔融增材制造领域，该技术多用于制造尺寸较小、表面光洁度要求较高的精密零件，需要使用尺寸 $\leq 63 \mu\text{m}$ 较细的高熵合金粉末，因为通常细小的粉末可以直接获得精度高、表面光洁度好的零件，从参编单位提供的产品筛分粒度组成和粒度分布检测结果可以看出：粒度组成中 $> 63 \mu\text{m}$ 的粉末质量百分比介于 1.4% 到 3.9% 之间。且粒度分布 D_{10} 介于 $16.5 \mu\text{m} \sim 23.2 \mu\text{m}$ ， D_{90} 介于 $54.4 \mu\text{m} \sim 65.1 \mu\text{m}$ 。第 II 类，适用于电子束粉末床熔融增材制造领域、激光定向能量沉积增材制造领域，该技术电子束、激光能量密度高，可熔化粉末粒径要大于激光粉末床熔融增材制造技术所需粉末，且制造效率更高，从参编单位提供的产品筛分粒度组成和粒度分布测试结

果可以看出：粒度组成中 $\leq 45 \mu\text{m}$ 的粉末质量百分比介于 1.4%到 3.5%之间， $> 150 \mu\text{m}$ 的质量百分比介于 1.3%到 4.2%之间。且粒度分布 D_{10} 介于 $43.0 \mu\text{m} \sim 56.4 \mu\text{m}$ ， D_{90} 介于 $93.1 \mu\text{m} \sim 156.6 \mu\text{m}$ 。

7 家相关生产厂家和科研院所提供的高熵合金粉末的筛分粒度统计表、激光粒度统计表如表 5、表 6 所示。

表 5 筛分粒度统计表

分类	粉末规格 (μm)	牌号	粒度组成				
			单位 1	单位 2	单位 3	单位 4	单位 5
I类	≤ 63		单位 1	单位 2	单位 3	单位 4	单位 5
		FeCoNiCrMn	$> 63 \mu\text{m}$: 3.1%	$> 63 \mu\text{m}$: 2.5%	$> 63 \mu\text{m}$: 2.2%	$> 63 \mu\text{m}$: 2.0%	—
		FeCoNiCrAl	$> 63 \mu\text{m}$: 2.4%	$> 63 \mu\text{m}$: 2.8%	$> 63 \mu\text{m}$: 1.8%	$> 63 \mu\text{m}$: 2.6%	$> 63 \mu\text{m}$: 1.8%
		FeCoNiCrTi	$> 63 \mu\text{m}$: 2.2%	—	$> 63 \mu\text{m}$: 2.0%	—	—
		FeCoNiCrMo	$> 63 \mu\text{m}$: 2.6%	—	$> 63 \mu\text{m}$: 2.0%	—	—
		FeCoNiCr	$> 63 \mu\text{m}$: 1.4%	$> 63 \mu\text{m}$: 2.6%	$> 63 \mu\text{m}$: 3.9%	—	—
II类	45~150		单位 1	单位 2	单位 3	单位 4	单位 5
		FeCoNiCrMn	$\leq 45 \mu\text{m}$: 2.3% $> 150 \mu\text{m}$: 3.2%	—	$\leq 45 \mu\text{m}$: 2.7% $> 105 \mu\text{m}$: 2.3%	$\leq 45 \mu\text{m}$: 2.1% $> 150 \mu\text{m}$: 2.9%	—
		FeCoNiCrAl	$\leq 45 \mu\text{m}$: 1.9% $> 150 \mu\text{m}$: 2.4%	—	$\leq 45 \mu\text{m}$: 3.3% $> 105 \mu\text{m}$: 2.5%	$\leq 45 \mu\text{m}$: 3.5% $> 150 \mu\text{m}$: 4.2%	$\leq 45 \mu\text{m}$: 1.5% $> 150 \mu\text{m}$: 1.7%
		FeCoNiCrTi	$\leq 45 \mu\text{m}$: 3.1% $> 150 \mu\text{m}$: 2.1%	$\leq 45 \mu\text{m}$: 2.3% $> 150 \mu\text{m}$: 1.3%	$\leq 45 \mu\text{m}$: 1.4% $> 105 \mu\text{m}$: 2.7%	—	—
		FeCoNiCrMo	$\leq 45 \mu\text{m}$: 3.0% $> 150 \mu\text{m}$: 2.8%	$\leq 45 \mu\text{m}$: 2.4% $> 150 \mu\text{m}$: 2.6%	$\leq 45 \mu\text{m}$: 2.8% $> 105 \mu\text{m}$: 2.20%	—	—
		FeCoNiCr	$\leq 45 \mu\text{m}$: 2.4% $> 150 \mu\text{m}$: 2.0%	—	$\leq 45 \mu\text{m}$: 2.9% $> 105 \mu\text{m}$: 2.7%	—	—

注：单位 1-江苏威拉里新材料科技有限公司；单位 2-盘星新型合金材料（常州）有限公司；单位 3-北京科技大学；单位 4-矿冶科技集团有限公司；单位 5-西安赛隆金属材料有限责任公司；

表 6 激光粒度统计表

分类	粉末规格 (μm)	牌号	粒度分布						
			单位 1	单位 2	单位 3	单位 4	单位 5	单位 6	单位 7
I类	≤ 63		要求： $15 \mu\text{m} \leq D_{10} \leq 25 \mu\text{m}$ ； $50 \mu\text{m} \leq D_{90} \leq 70 \mu\text{m}$						
		FeCoNiCrMn	D_{10} : 21.4 D_{90} : 54.4	D_{10} : 18.3 D_{90} : 55.6	D_{10} : 21.3 D_{90} : 59.1	D_{10} : 19.9 D_{90} : 64.4	D_{10} : 17.8 D_{90} : 62.5	D_{10} : 23.2 D_{90} : 59.7	—
		FeCoNiCrAl	D_{10} : 20.0 D_{90} : 57.4	D_{10} : 23.0 D_{90} : 63.5	D_{10} : 23.0 D_{90} : 56.3	D_{10} : 16.5 D_{90} : 58.2	D_{10} : 20.1 D_{90} : 60.0	—	—

		FeCoNiCrTi	D ₁₀ : 22.4 D ₉₀ : 56.1	—	D ₁₀ : 17.1. D ₉₀ : 62.4	—	—	—	—
		FeCoNiCrMo	D ₁₀ : 18.3 D ₉₀ : 63.1	—	D ₁₀ : 20.5 D ₉₀ : 57.4	—	D ₁₀ : 16.9 D ₉₀ : 65.1	—	—
		FeCoNiCr	D ₁₀ : 20.5 D ₉₀ : 55.7	D ₁₀ : 17.4 D ₉₀ : 65.1	D ₁₀ : 18.7 D ₉₀ : 57.2	—	—	—	D ₁₀ : 21.4 D ₉₀ : 58.3
		要求: 40 μm ≤ D ₁₀ ≤ 60 μm; D ₉₀ ≤ 160 μm							
			单位 1	单位 2	单位 3	单位 4	单位 5	单位 6	
		FeCoNiCrMn	D ₁₀ : 52.8 D ₉₀ : 139.0	—	D ₁₀ : 54.9 D ₉₀ : 156.6	D ₁₀ : 56.1 D ₉₀ : 156.2	D ₁₀ : 50.4 D ₉₀ : 143.7	D ₁₀ : 51.5 D ₉₀ : 93.1	
		FeCoNiCrAl	D ₁₀ : 52.2 D ₉₀ : 137.1	—	D ₁₀ : 46.9 D ₉₀ : 153.0	D ₁₀ : 47.3 D ₉₀ : 131.6	D ₁₀ : 56.4 D ₉₀ : 142.6	—	
		FeCoNiCrTi	D ₁₀ : 43.6 D ₉₀ : 142.0	D ₁₀ : 43.0 D ₉₀ : 146.3	D ₁₀ : 52.8 D ₉₀ : 150.3	—	—	—	
		FeCoNiCrMo	D ₁₀ : 48.8 D ₉₀ : 155.0	D ₁₀ : 50.1 D ₉₀ : 152.6	D ₁₀ : 53.4 D ₉₀ : 152.3	—	D ₁₀ : 56.1 D ₉₀ : 152.7	—	
		FeCoNiCr	D ₁₀ : 43.6 D ₉₀ : 144.3	—	D ₁₀ : 46.1 D ₉₀ : 146.8	—	—	—	
II	45~150								

注: 单位 1-江苏威拉里新材料科技有限公司; 单位 2-盘星新型合金材料(常州)有限公司; 单位 3-北京科技大学; 单位 4-矿冶科技集团有限公司; 单位 5-浙江亚通焊材有限公司; 单位 6-宁波波众远新材料科技有限公司; 单位 7-西北工业大学

由表 5 和表 6 可以看出: 第 I 类粉末粒度范围为 ≤ 63 μm 时, 粒度组成满足: > 63 μm 不大于 5%, 粒度分布满足 D₁₀ 为 15 μm ~ 25 μm, D₉₀ 为 50 μm ~ 70 μm; 第 II 类粉末粒度范围为 45 μm ~ 150 μm 时, 粒度组成满足: ≤ 45 μm 不大于 5%, > 150 μm 不大于 5%, 粒度分布满足 D₁₀ 为 40 μm ~ 60 μm, D₉₀ 不大于 160 μm。本标准规定的粒度分布指标如表 7 所示。另外也可以根据供货双方协商确定。

表 7 粒度要求

类别	粒度范围	粒度组成	粒度分布	用途
I 类	≤ 63 μm	> 63 μm 不大于 5%	15 μm ≤ D ₁₀ ≤ 25 μm 50 μm ≤ D ₉₀ ≤ 70 μm	适用于激光粉末床熔融增材制造领域
II 类	45 μm ~ 150 μm	≤ 45 μm 不大于 5%, > 150 μm 不大于 5%	40 μm ≤ D ₁₀ ≤ 60 μm D ₉₀ ≤ 160 μm	适用于电子束粉末床熔融增材制造领域、激光定向能量沉积增材制造领域

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, 是粉末的一种工艺性能。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、颗粒密度和表面状态、粉末的粒度及粒度分布等。粉末颗粒形状越规则、颗粒表面越光滑、颗粒越致密, 粉末的松装密度会越大。通常情况, 松装密

度随颗粒尺寸的减小、颗粒非球状系数的增大以及表面粗糙度的增加而减小。

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的致密度达到目标产品要求。江苏威拉里新材料科技有限公司、矿冶科技集团有限公司、北京科技大学、盘星新型合金材料（常州）有限公司、浙江亚通焊材有限公司、宁波众远新材料科技有限公司、西安赛隆金属材料有限责任公司等 7 家单位提供的高熵合金粉末（FeCoNiCrMn、FeCoNiCrAl、FeCoNiCrTi、FeCoNiCrMo、FeCoNiCr）松装密度的技术指标如表 8 所示：

表 8 高熵合金粉松装密度统计表

分类	粉末规格 μm	牌号	松装密度 g/cm ³						
			单位 1	单位 2	单位 3	单位 4	单位 5	单位 6	单位 7
I类	≤63	FeCoNiCrMn	4.02	3.92	4.12	3.95	4.04	4.44	—
		FeCoNiCrAl	3.53	3.42	3.32	3.55	3.62	—	3.81
		FeCoNiCrTi	3.49	3.58	3.38	—	—	—	—
		FeCoNiCrMo	4.43	4.42	4.40	—	4.47	—	—
		FeCoNiCr	4.20	4.26	4.15	—	—	—	—
		II类	45~150	FeCoNiCrMn	4.16	4.22	—	4.28	—
FeCoNiCrAl	3.67	3.55		—	3.72	—	—	3.98	
FeCoNiCrTi	3.70	3.66		—	—	—	—	—	
FeCoNiCrMo	4.61	4.68		—	—	—	—	—	
FeCoNiCr	4.45	4.48		—	—	—	—	—	

注：单位 1-江苏威拉里新材料科技有限公司；单位 2-盘星新型合金材料（常州）有限公司；单位 3-北京科技大学；单位 4-矿冶科技集团有限公司；单位 5-浙江亚通焊材有限公司；单位 6-宁波众远新材料科技有限公司；单位 7-西安赛隆金属材料有限责任公司；

从表 8 数据可以看出：在第 I 类粉末中 FeCoNiCrMn 粉末的松装密度介于 3.92 g/cm³~4.44 g/cm³ 之间，FeCoNiCrAl 粉末的松装密度介于 3.32 g/cm³~3.81 g/cm³ 之间，FeCoNiCrTi 粉末的松装密度介于 3.38 g/cm³~3.58 g/cm³ 之间，FeCoNiCrMo 粉末的松装密度介于 4.40 g/cm³~4.47 g/cm³ 之间，FeCoNiCr 粉末的松装密度介于 4.15 g/cm³~4.26 g/cm³ 之间；在第 II 类粉末中 FeCoNiCrMn 粉末的松装密度介于 4.16 g/cm³~4.28 g/cm³ 之间，FeCoNiCrAl 粉末的松装密度介于 3.55 g/cm³~3.98 g/cm³ 之间，FeCoNiCrTi 粉末的松装密度介于 3.66 g/cm³~3.70 g/cm³ 之间，FeCoNiCrMo 粉末的松装密度介于 4.61 g/cm³~4.68 g/cm³ 之间，FeCoNiCr 粉末的松装密度介于 4.45 g/cm³~4.48 g/cm³ 之间；

本标准规定的松装密度指标如表 9 所示：

表 9 松装密度

牌号	松装密度 g/cm ³	
	I 类	II 类
FeCoNiCrMn	≥3.80	≥4.00
FeCoNiCrAl	≥3.20	≥3.40
FeCoNiCrTi	≥3.20	≥3.40
FeCoNiCrMo	≥4.20	≥4.40
FeCoNiCr	≥4.00	≥4.20

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密度，其相对于松装密度增大的百分数是粉末多种物理性能，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。粉末振实密度越大，说明粉末的相对流动性越好。

江苏威拉里新材料科技有限公司、矿冶科技集团有限公司、北京科技大学、盘星新型合金材料（常州）有限公司、浙江亚通焊材有限公司、宁波众远新材料科技有限公司、西安赛隆金属材料有限责任公司等 8 家单位提供的高熵合金粉末（FeCoNiCrMn、FeCoNiCrAl、FeCoNiCrTi、FeCoNiCrMo、FeCoNiCr）振实密度的技术指标如表 10 所示：

表 10 粉末振实密度统计表

分类	粉末规格 μm	牌号	振实密度 g/cm ³							
			单位 1	单位 2	单位 3	单位 4	单位 5	单位 6	单位 7	单位 8
I 类	≤63	FeCoNiCrMn	4.6	4.8	4.8	4.8	4.6	4.6	—	—
		FeCoNiCrAl	4.0	4.0	3.9	4.2	4.2	—	4.4	—
		FeCoNiCrTi	4.2	4.4	4.0	—	—	—	—	—
		FeCoNiCrMo	5.4	5.4	5.2	—	5.2	—	—	—
		FeCoNiCr	4.4	4.8	4.8	—	—	—	—	4.8
II 类	45~150	FeCoNiCrMn	4.8	5.2	—	5.0	—	—	—	—
		FeCoNiCrAl	4.6	4.4	—	4.4	—	—	4.6	—
		FeCoNiCrTi	4.6	4.8	—	—	—	—	—	—
		FeCoNiCrMo	5.6	5.4	—	—	—	—	—	—
		FeCoNiCr	5.2	5.0	—	—	—	—	—	—

注：单位 1-江苏威拉里新材料科技有限公司；单位 2-盘星新型合金材料（常州）有限公司；单位 3-北京科技大学；单位 4-矿冶科技集团有限公司；单位 5-浙江亚通焊材有限公司；单位 6-宁波众远新材料科技有限公司；单位 7-西安赛隆金属材料有限责任公司；单位 8-西北工业大学；

从表 10 数据可以看出：在第 I 类粉末中 FeCoNiCrMn 粉末的振实密度介于 $4.6 \text{ g/cm}^3 \sim 4.8 \text{ g/cm}^3$ 之间，FeCoNiCrAl 粉末的振实密度介于 $3.9 \text{ g/cm}^3 \sim 4.4 \text{ g/cm}^3$ 之间，FeCoNiCrTi 粉末的振实密度介于 $4.0 \text{ g/cm}^3 \sim 4.4 \text{ g/cm}^3$ 之间，FeCoNiCrMo 粉末的振实密度介于 $5.2 \text{ g/cm}^3 \sim 5.4 \text{ g/cm}^3$ 之间，FeCoNiCr 粉末的振实密度介于 $4.4 \text{ g/cm}^3 \sim 4.8 \text{ g/cm}^3$ 之间；在第 II 类粉末中 FeCoNiCrMn 粉末的振实密度介于 $4.8 \text{ g/cm}^3 \sim 5.2 \text{ g/cm}^3$ 之间，FeCoNiCrAl 粉末的振实密度介于 $4.4 \text{ g/cm}^3 \sim 4.6 \text{ g/cm}^3$ 之间，FeCoNiCrTi 粉末的振实密度介于 $4.6 \text{ g/cm}^3 \sim 4.8 \text{ g/cm}^3$ 之间，FeCoNiCrMo 粉末的振实密度介于 $5.4 \text{ g/cm}^3 \sim 5.6 \text{ g/cm}^3$ 之间，FeCoNiCr 粉末的振实密度介于 $5.0 \text{ g/cm}^3 \sim 5.2 \text{ g/cm}^3$ 之间；

本标准规定的振实密度指标如表 11 所示：

表 11 振实密度

牌号	振实密度 g/cm^3	
	I 类	II 类
FeCoNiCrMn	≥ 4.4	≥ 4.6
FeCoNiCrAl	≥ 3.8	≥ 4.2
FeCoNiCrTi	≥ 3.8	≥ 4.2
FeCoNiCrMo	≥ 5.0	≥ 5.2
FeCoNiCr	≥ 4.4	≥ 4.6

2.2.5 流动性

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，通常采用霍尔流速漏斗，流动性单位为 $\text{s}/50\text{g}$ ，表征粉末流动的难易程度，数值越小流动性越好。粉末的粒度、湿度、静电以及粉末是否为球形均会影响粉末的流动特性。无论对于铺粉还是送粉的增材制造工艺，粉末的流动性均会影响增材制造过程和制件性能。

本标准结合江苏威拉里新材料科技有限公司、矿冶科技集团有限公司、北京科技大学、盘星新型合金材料（常州）有限公司、浙江亚通焊材有限公司、宁波众远新材料科技有限公司、西安赛隆金属材料有限责任公司等 7 家单位提供的高熵合金粉末（FeCoNiCrMn、FeCoNiCrAl、FeCoNiCrTi、FeCoNiCrMo、FeCoNiCr）流动性的技术指标如表 12 所示。同时考虑到激光粉末床熔融增材制造工艺的一些设备铺送粉方式为上送粉，其对粉末（I 类）的流动性要求不高，而电子束粉末床熔融、激光定向能量沉积工艺（II 类）要求粉末必须具有较好的流动性，所以本标准规定高熵合金粉的流动性应符合表 13 的规定。

表 12 粉末流动性统计表

分类	粉末规格 μm	牌号	霍尔流速 s/50g						
			单位 1	单位 2	单位 3	单位 4	单位 5	单位 6	单位 7
I类	≤63								
		FeCoNiCrMn	21.7	28.5	24.3	24.7	27.8	14.0	—
		FeCoNiCrAl	33.2	31.5	30.2	31.4	19.6	—	19.2
		FeCoNiCrTi	30.1	22.3	27.6	—	—	—	—
		FeCoNiCrMo	20.7	20.1	26.8	—	26.7	—	—
		FeCoNiCr	27.3	18.8	31.0	—	—	—	—
II类	45~150	FeCoNiCrMn	22.1	17.6	—	20.9	22.6	—	—
		FeCoNiCrAl	22.9	20.7	—	22.0	21.2	—	15.8
		FeCoNiCrTi	20.1	18.2	—	—	—	—	—
		FeCoNiCrMo	19.4	17.3	—	—	21.3	—	—
		FeCoNiCr	20.5	18.5	—	—	—	—	—

注：单位 1-江苏威拉里新材料科技有限公司；单位 2-盘星新型合金材料（常州）有限公司；单位 3-北京科技大学；单位 4-矿冶科技集团有限公司；单位 5-浙江亚通焊材有限公司；单位 6-宁波众远新材料科技有限公司；单位 7-西安赛隆金属材料有限责任公司；

从表 12 可以看出：I 类粉末的流动性介于 14.0 s/50g~33.2 s/50g 之间；II 类粉末的流动性介于 15.8 s/50g~22.9 s/50g 之间，故本标准规定的流动性指标如表 13 所示：

表 13 粉末流动性要求

牌号	霍尔流速 s/50g	
	I类	II类
FeCoNiCrMn	≤35.0	≤25.0
FeCoNiCrAl		
FeCoNiCrTi		
FeCoNiCrMo		
FeCoNiCr		

2.2.6 外观质量

高熵合金粉的外观质量可以直观反映出粉末品质，以及是否因保存不当导致受潮或其他杂物的污染。本标准规定高熵合金产品呈灰色或黑灰色，无结块，无目视可见夹杂物。

2.2.7 其他

根据需方技术要求，若其对粉末的球形率及空心粉率有特殊要求时，由供需双方协商确

定。

2.3 主要试验（或验证）情况分析

江苏威拉里新材料科技有限公司组织标准编制单位，由江苏威拉里新材料科技有限公司提供本标准所涉及的所有牌号高熵合金产品（FeCoNiCrMn、FeCoNiCrAl、FeCoNiCrTi、FeCoNiCrMo、FeCoNiCr）分发给矿冶科技集团有限公司、北京科技大学、盘星新型合金材料（常州）有限公司、浙江亚通焊材有限公司、国营芜湖机械厂、钢铁研究总院有限公司、西北有色金属研究院、上海材料研究所、广东省科学院工业分析检测中心、中国矿业大学、郑州大学、飞而康快速制造科技有限责任公司、无锡市产品质量监督检验院等 13 家单位进行粉末的技术指标验证；浙江亚通焊材有限公司提供部分高熵合金粉末（FeCoNiCrAl）分发给西北有色金属研究院、广东省科学院工业分析检测中心、钢铁研究总院有限公司、宁波众远新材料科技有限公司等 4 家验证单位，按本标准规定的方法，对主要技术指标进行了验证，验证数据如下。

2.3.1 化学成分

各验证单位检测的高熵合金粉的化学成分检测结果如表 14 所示。从表 14 可以看出，使用同一批次、同一牌号的高熵合金粉，不同验证单位得到的化学成分检测结果基本一致；且化学成分均满足标准中规定的指标要求，标准中规定的化学成分是科学合理的。

表 14 化学成分检测结果统计表

批次号	牌号	化学成分（质量分数）/%												
		主元素								杂质元素，不大于				
	FeCoNiCrMn	Fe	Co	Ni	Cr	Mn	Ti	Al	Mo	C	P	S	O	N
	要求	18.00~ 21.00	19.50~ 22.50	19.50~ 22.50	17.00~ 20.50	18.00~ 21.50	—	—	—	0.020	0.015	0.010	0.10	0.050
批次-1	单位1	19.33	21.20	21.00	17.92	19.40	—	—	—	0.008 0	0.0060	0.0050	0.052	0.029
批次-1	单位2	19.98	20.88	21.24	18.21	19.24	—	—	—	0.006 1	0.0063	0.0048	0.061	0.023
批次-1	单位3	20.50	21.24	21.40	18.51	18.90	—	—	—	0.006 4	0.0082	0.0040	0.056	0.026
批次-1	单位4	19.77	21.33	20.81	18.03	18.97	—	—	—	0.007 5	0.0080	0.0050	0.063	0.030
批次-2	单位6	19.46	22.26	22.08	18.52	19.08	—	—	—	0.010 1	/	0.0032	0.071	/
批次-2	单位7	余量	22.42	21.15	18.46	19.60	—	—	—	0.007 7	< 0.0010	0.0046	0.056	0.011

批次-2	单位8	20.11	21.19	20.77	18.50	19.33	—	—	—	0.007 0	0.0050	0.0040	0.063	0.0070
批次-2	单位9	20.18	21.57	21.06	19.18	19.62	—	—	—	0.008 0	< 0.010	< 0.005	0.058	0.018
批次-2	单位10	19.88	20.95	21.05	18.66	19.41	—	—	—	0.006 7	0.0003	0.0045	0.064	0.012

粉末批次-1和粉末批次-2均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；

批次号	FeCoNiCrAl	Fe	Co	Ni	Cr	Mn	Ti	Al	Mo	C	P	S	O	N
	要求		17.50~ 23.00	21.50~ 25.50	21.50~ 25.00	19.00~ 22.00	—	—	10.00~ 15.00	—	0.020	0.015	0.010	0.10
批次-1	单位2	21.22	23.74	23.10	20.24	—	—	11.82	—	0.006	0.0050	0.0030	0.026	0.020
批次-1	单位3	20.68	23.07	24.15	21.67	—	—	10.67	—	0.007 6	0.0064	0.0030	0.033	0.027
批次-1	单位12	21.71	23.50	23.86	20.85	—	—	10.94	—	0.008	0.0060	0.0030	0.029	0.030
批次-2	单位7	22.30	22.82	23.31	20.36	—	—	11.15	—	0.005 0	< 0.0010	0.0015	0.020	0.012
批次-2	单位9	21.88	23.10	23.47	20.44	—	—	11.11	—	0.005	<0.01	0.0020	0.020	< 0.003
批次-2	单位10	22.94	23.03	22.87	20.36	—	—	10.58	—	0.004 4	< 0.0050	0.0017	0.016	0.016

粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；粉末批次-2 由浙江亚通焊材有限公司提供；

批次号	FeCoNiCrTi	Fe	Co	Ni	Cr	Mn	Ti	Al	Mo	C	P	S	O	N
	要求		19.00~ 22.00	20.00~ 23.00	20.00~ 23.00	17.50~ 20.50	—	16.00~ 19.00	—	—	0.020	0.015	0.010	0.10
批次-1	单位3	21.14	21.38	20.73	19.33	—	18.48	—	—	0.009 0	0.0080	0.0050	0.060	0.022
批次-1	单位4	20.42	22.00	20.19	19.06	—	17.82	—	—	0.007 2	0.0050	0.0030	0.051	0.030
批次-1	单位5	20.87	20.55	22.31	19.88	—	18.22	—	—	0.005 0	0.0075	0.0072	0.058	0.025

粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；

批次号	FeCoNiCrMo	Fe	Co	Ni	Cr	Mn	Ti	Al	Mo	C	P	S	O	N
	要求		16.00~ 18.50	17.00~ 20.00	17.00~ 20.00	15.00~ 17.00	—	—	—	27.50~ 32.00	0.020	0.015	0.010	0.10
批次-1	单位1	17.63	18.02	18.80	16.41	—	—	—	29.66	0.0077	0.006 2	0.0031	0.053	0.023
批次-1	单位2	17.09	19.23	19.15	16.07	—	—	—	29.01	0.0051	0.004 5	0.0050	0.063	0.029

批次-1	单位3	18.12	18.51	18.14	16.60	—	—	—	28.74	0.004 3	0.0085	0.0064	0.050	0.030
粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；														
批次号	FeCoNiCr	Fe	Co	Ni	Cr	Mn	Ti	Al	Mo	C	P	S	O	N
	要求	23.50~ 26.50	24.50~ 28.00	24.00~ 27.50	21.50~ 24.50	—	—	—	—	0.020	0.015	0.010	0.10	0.050
批次-1	单位3	25.02	26.47	26.33	23.47	—	—	—	—	0.004 2	0.004 4	0.0051	0.048	0.020
批次-1	单位4	24.86	25.09	25.88	22.79	—	—	—	—	0.006 3	0.006 0	0.0038	0.042	0.015
批次-1	单位5	24.71	26.03	26.04	22.11	—	—	—	—	0.005 0	0.005 0	0.0030	0.042	0.015
批次-2	单位6	24.93	26.36	27.44	23.07	—	—	—	—	0.004 5	/	0.0012	/	/
批次-2	单位7	余量	26.45	27.30	22.76	—	—	—	—	0.004 3	< 0.001	0.0023	0.036	0.020
批次-2	单位8	24.80	26.46	25.69	22.69	—	—	—	—	0.003 0	0.004 0	0.0020	0.041	0.018
批次-2	单位9	25.33	26.30	26.66	23.72	—	—	—	—	0.007 0	< 0.010	< 0.0050	0.041	0.033
批次-2	单位11	25.11	26.88	26.36	22.87	—	—	—	—	0.002	0.009	0.004	0.033	0.020
粉末批次-1和粉末批次-2均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；														
注：单位 1-盘星新型合金材料（常州）有限公司；单位 2-北京科技大学；单位 3-矿冶科技集团有限公司；单位 4-浙江亚通焊材有限公司；单位 5-国营芜湖机械厂；单位 6-郑州大学；单位 7-广东省科学院工业分析检测中心；单位 8-上海材料研究所；单位 9-西北有色金属研究院；单位 10-钢铁研究总院有限公司；单位 11-无锡市产品质量监督检验院；单位 12-中国矿业大学														

2.3.2 粒度

江苏威拉里新材料科技有限公司以及浙江亚通焊材有限公司提供的高熵合金粉末经过验证单位（矿冶科技集团有限公司、北京科技大学、盘星新型合金材料（常州）有限公司、浙江亚通焊材有限公司、国营芜湖机械厂、钢铁研究总院有限公司、上海材料研究所、宁波众远新材料科技有限公司、郑州大学、飞而康快速制造科技有限责任公司、西北有色金属研究院、广东省科学院工业分析检测中心、无锡市产品质量监督检验院等单位）进行验证，其粒度组成验证结果如表 15 所示；从表中可以看出粉末规格为 $\leq 63 \mu\text{m}$ 的粒度组成中 $> 63 \mu\text{m}$ 的质量百分比在 0.2%到 3.32%之间；粉末规格为 $45 \mu\text{m} \sim 150 \mu\text{m}$ 的粒度组成中 $\leq 45 \mu\text{m}$ 的质量百分比在 1.1%到 2.8%之间， $> 150 \mu\text{m}$ 的质量百分比在 0.7%到 3.1%之间。均满足标准设定值。

高熵合金粉的粒度组成和粒度分布分别按照 GB/T 1480 和 GB/T 19077 的规定执行。

表 15 筛分粒度统计表

分类	粉末规格 μm	牌号及粉末批次	粒度组成				
I类	≤63	FeCoNiCrMn	要求：>63 μm 不大于 5%				
		批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	单位 4	
			>63 μm: 1.8%	>63 μm: 1.4%	>63 μm: 2.2%	>63 μm: 1.7%	
		批次-2	单位 6	单位 7	—	—	
			>63 μm: 1.2%	>63 μm: 0.55%	—	—	
		粉末批次-1 和粉末批次-2 均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；					
		FeCoNiCrAl	要求：>63 μm 不大于 5%				
		批次-1	单位 2	单位 3	单位 10	—	
			>63 μm: 1.5%	>63 μm: 0.9%	>63 μm: 1.8%	—	
		批次-2	单位 9				
			>63 μm: 3.32%				
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；粉末批次-2 由浙江亚通焊材有限公司提供；					
		FeCoNiCrTi	要求：>63 μm 不大于 5%				
		批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—	
			>63 μm: 2.1%	>63 μm: 1.2%	>63 μm: 2.7%	—	
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；					
		FeCoNiCrMo	要求：>63 μm 不大于 5%				
		批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	—	
			>63 μm: 1.9%	>63 μm: 1.3%	>63 μm: 2.4%	—	
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；					
FeCoNiCr	要求：>63μm 不大于 5%						
批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—			
	>63 μm: 2.0%	>63 μm: 1.4%	>63 μm: 1.5%	—			
批次-2	单位 6	单位 8	—	—			
	>63 μm: 0.2%	>63 μm: 0.5%	—	—			
粉末批次-1 和粉末批次-2 均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；							
II类	45~150	FeCoNiCrMn	要求：≤45 μm 不大于 5%，>150 μm 不大于 5%				
		批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	单位 4	
			≤45 μm: 1.6%	≤45 μm: 2.7%	≤45 μm: 1.9%	≤45 μm: 2.3%	
			>150 μm: 2.2%	>150 μm: 1.8%	>150 μm: 2.9%	>150 μm: 2.1%	
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；					
		FeCoNiCrAl	要求：≤45 μm 不大于 5%，>150 μm 不大于 5%				
批次-1	单位 2	单位 3	—	—			
	≤45 μm: 1.3%	≤45 μm: 1.8%	—	—			
	>150 μm: 2.6%	>150 μm: 2.7%	—	—			
粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；							

	FeCoNiCrTi	要求: $\leq 45 \mu\text{m}$ 不大于 5%, $> 150 \mu\text{m}$ 不大于 5%			
批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—	
	$\leq 45 \mu\text{m}$: 2.0% $> 150 \mu\text{m}$: 2.1%	$\leq 45 \mu\text{m}$: 2.6% $> 150 \mu\text{m}$: 2.9%	$\leq 45 \mu\text{m}$: 1.1% $> 150 \mu\text{m}$: 1.9%	—	
粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;					
	FeCoNiCrMo	要求: $\leq 45 \mu\text{m}$ 不大于 5%, $> 150 \mu\text{m}$ 不大于 5%			
批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	—	
	$\leq 45 \mu\text{m}$: 2.8% $> 150 \mu\text{m}$: 2.8%	$\leq 45 \mu\text{m}$: 2.0% $> 150 \mu\text{m}$: 3.1%	$\leq 45 \mu\text{m}$: 1.6% $> 150 \mu\text{m}$: 2.3%	—	
粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;					
	FeCoNiCr	要求: $\leq 45 \mu\text{m}$ 不大于 5%, $> 150 \mu\text{m}$ 不大于 5%			
批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—	
	$\leq 45 \mu\text{m}$: 1.8% $> 150 \mu\text{m}$: 2.0%	$\leq 45 \mu\text{m}$: 1.6% $> 150 \mu\text{m}$: 2.4%	$\leq 45 \mu\text{m}$: 2.2% $> 150 \mu\text{m}$: 1.8%	—	
批次-2	单位 8				
	$\leq 45 \mu\text{m}$: 2.3% $> 150 \mu\text{m}$: 0.7%				
粉末批次-1 和粉末批次-2 均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;					
注: 单位 1-盘星新型合金材料(常州)有限公司; 单位 2-北京科技大学; 单位 3-矿冶科技集团有限公司; 单位 4-浙江亚通焊材有限公司; 单位 5-国营芜湖机械厂; 单位 6-上海材料研究所; 单位 7-郑州大学; 单位 8-无锡市产品质量监督检验院; 单位 9-广东省科学院工业分析检测中心; 单位 10-中国矿业大学					

高熵合金粉的激光粒度分布验证结果见表 16; 从表中数据可以看出: 粉末规格 $\leq 63 \mu\text{m}$ 的 FeCoNiCrMn 粉末的 D_{10} 处于 $20.71 \mu\text{m} \sim 24.2 \mu\text{m}$ 之间, D_{90} 处于 $58.0 \mu\text{m} \sim 62.3 \mu\text{m}$ 之间; $\leq 63 \mu\text{m}$ 的 FeCoNiCrAl 粉末 D_{10} 处于 $18.99 \mu\text{m} \sim 21.43 \mu\text{m}$ 之间, D_{90} 处于 $52.1 \mu\text{m} \sim 58.1 \mu\text{m}$ 之间; $\leq 63 \mu\text{m}$ 的 FeCoNiCrTi 粉末 D_{10} 处于 $19.4 \mu\text{m} \sim 22.1 \mu\text{m}$ 之间, D_{90} 处于 $54.2 \mu\text{m} \sim 56.7 \mu\text{m}$ 之间; $\leq 63 \mu\text{m}$ 的 FeCoNiCrMo 粉末 D_{10} 处于 $21.77 \mu\text{m} \sim 22.7 \mu\text{m}$ 之间, D_{90} 处于 $55.55 \mu\text{m} \sim 57.2 \mu\text{m}$ 之间; $\leq 63 \mu\text{m}$ 的 FeCoNiCr 粉末 D_{10} 处于 $21.0 \mu\text{m} \sim 23.1 \mu\text{m}$ 之间, D_{90} 处于 $55.4 \mu\text{m} \sim 60.6 \mu\text{m}$ 之间, 故标准规定 FeCoNiCrMn、FeCoNiCrAl、FeCoNiCrTi、FeCoNiCrMo 以及 FeCoNiCr 在 $\leq 63 \mu\text{m}$ 的粒度范围内, 激光粒度分布为 $15 \mu\text{m} \leq D_{10} \leq 25 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m} \leq D_{90} \leq 70 \mu\text{m}$ 是合理的。

粉末规格 $45 \mu\text{m} \sim 150 \mu\text{m}$ 的 FeCoNiCrMn 粉末 D_{10} 处于 $51.50 \mu\text{m} \sim 58.78 \mu\text{m}$ 之间, D_{90} 处于 $139.4 \mu\text{m} \sim 147.0 \mu\text{m}$ 之间; $45 \mu\text{m} \sim 150 \mu\text{m}$ 的 FeCoNiCrAl 粉末 D_{10} 处于 $41.4 \mu\text{m} \sim 49.7 \mu\text{m}$ 之间, D_{90} 处于 $104.5 \mu\text{m} \sim 136.06 \mu\text{m}$ 之间; $45 \mu\text{m} \sim 150 \mu\text{m}$ 的 FeCoNiCrTi 粉末 D_{10} 处于 $43.4 \mu\text{m} \sim 46.9 \mu\text{m}$ 之间, D_{90} 处于 $146.1 \mu\text{m} \sim 150.0 \mu\text{m}$ 之间; $45 \mu\text{m} \sim 150 \mu\text{m}$ 的 FeCoNiCrMo 粉末 D_{10} 处于 $46.83 \mu\text{m} \sim 50.2 \mu\text{m}$ 之间, D_{90} 处于 $147.0 \mu\text{m} \sim 154.36 \mu\text{m}$ 之间; $45 \mu\text{m} \sim 150 \mu\text{m}$ 的 FeCoNiCr 粉末 D_{10} 处于 $40.54 \mu\text{m} \sim 51.0 \mu\text{m}$ 之间, D_{90} 处于 $114.4 \mu\text{m} \sim 151.0 \mu\text{m}$ 之间, 故标准

规定 FeCoNiCrMn、FeCoNiCrAl、FeCoNiCrTi、FeCoNiCrMo 以及 FeCoNiCr 在 45 μm~150 μm 的粒度范围内，激光粒度分布为 40 μm ≤ D₁₀ ≤ 60 μm、D₉₀ ≤ 160 μm 是合理的。

从以上数据可以看出不同单位使用不同型号的激光粒度仪检测同一批、同一牌号的高熵合金粉末时，得到的检测结果均满足标准中规定的指标要求。由此可见，标准对高熵合金粉末的粒度要求是科学合理的。

表 16 激光粒度统计表

分类	粉末规格 μm	牌号及粉末 批次号	粒度分布				
I类	≤63	FeCoNiCrMn	要求：15 μm ≤ D ₁₀ ≤ 25 μm；50 μm ≤ D ₉₀ ≤ 70 μm				
		批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	单位 4	
			D ₁₀ : 22.1 D ₉₀ : 60.4	D ₁₀ : 20.71 D ₉₀ : 59.08	D ₁₀ : 21.2 D ₉₀ : 61.1	D ₁₀ : 22.6 D ₉₀ : 62.3	
		批次-2	单位 6	单位 7	单位 8	单位 9	单位 10
			D ₁₀ : 22.18 D ₉₀ : 58.21	D ₁₀ : 24.2 D ₉₀ : 58.0	D ₁₀ : 20.94 D ₉₀ : 59.61	D ₁₀ : 23.1 D ₉₀ : 60.4	D ₁₀ : 23.4 D ₉₀ : 61.3
		粉末批次-1 和粉末批次-2 均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；					
		FeCoNiCrAl	要求：15 μm ≤ D ₁₀ ≤ 25 μm；50 μm ≤ D ₉₀ ≤ 70 μm				
		批次-1	单位 2	单位 3	单位 13	—	
			D ₁₀ : 21.43 D ₉₀ : 55.02	D ₁₀ : 19.8 D ₉₀ : 58.1	D ₁₀ : 20.4 D ₉₀ : 56.0	—	
		批次-2	单位 8	单位 10			
			D ₁₀ : 18.99 D ₉₀ : 54.05	D ₁₀ : 19.1 D ₉₀ : 52.1			
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；粉末批次-2 由浙江亚通焊材有限公司提供；					
		FeCoNiCrTi	要求：15 μm ≤ D ₁₀ ≤ 25 μm；50 μm ≤ D ₉₀ ≤ 70 μm				
		批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—	
			D ₁₀ : 20.9 D ₉₀ : 54.2	D ₁₀ : 22.1 D ₉₀ : 56.1	D ₁₀ : 19.4 D ₉₀ : 56.7	—	
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；					
		FeCoNiCrMo	要求：15 μm ≤ D ₁₀ ≤ 25 μm；50 μm ≤ D ₉₀ ≤ 70 μm				
		批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	—	
			D ₁₀ : 22.1 D ₉₀ : 56.8	D ₁₀ : 21.77 D ₉₀ : 55.55	D ₁₀ : 22.7 D ₉₀ : 57.2	—	
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；					
FeCoNiCr	要求：15 μm ≤ D ₁₀ ≤ 25 μm；50 μm ≤ D ₉₀ ≤ 70 μm						
批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—			
	D ₁₀ : 22.4 D ₉₀ : 57.4	D ₁₀ : 21.7 D ₉₀ : 55.4	D ₁₀ : 21.0 D ₉₀ : 60.6	—			

		批次-2	单位 7 D ₁₀ : 22.3 D ₉₀ : 58.7	单位 10 D ₁₀ : 21.9 D ₉₀ : 59.2	单位 12 D ₁₀ : 23.1 D ₉₀ : 57.8	
		粉末批次-1 和粉末批次-2 均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;				
II类	45~150	要求: $40\ \mu\text{m} \leq D_{10} \leq 60\ \mu\text{m}; D_{90} \leq 160\ \mu\text{m}$				
		FeCoNiCrMn	单位 1	单位 2	单位 3	单位 4
		批次-1	D ₁₀ : 53.3 D ₉₀ : 147.0	D ₁₀ : 51.50 D ₉₀ : 141.72	D ₁₀ : 52.4 D ₉₀ : 139.4	D ₁₀ : 52.6 D ₉₀ : 143.8
		批次-2	单位 6	单位 8		
			D ₁₀ : 58.78 D ₉₀ : 142.12	D ₁₀ : 54.94 D ₉₀ : 145.3		
		粉末批次-1 和粉末批次-2 均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;				
		FeCoNiCrAl	要求: $40\ \mu\text{m} \leq D_{10} \leq 60\ \mu\text{m}; D_{90} \leq 160\ \mu\text{m}$			
		批次-1	单位 2	单位 3	—	—
			D ₁₀ : 47.71 D ₉₀ : 136.06	D ₁₀ : 49.7 D ₉₀ : 132.7	—	—
		批次-2	单位 8	单位 10	单位 11	—
			D ₁₀ : 43.08 D ₉₀ : 107.1	D ₁₀ : 41.4 D ₉₀ : 110.0	D ₁₀ : 45.6 D ₉₀ : 104.5	—
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供; 粉末批次-2 由浙江亚通焊材有限公司提供;				
		FeCoNiCrTi	要求: $40\ \mu\text{m} \leq D_{10} \leq 60\ \mu\text{m}; D_{90} \leq 160\ \mu\text{m}$			
		批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—
			D ₁₀ : 45.0 D ₉₀ : 146.1	D ₁₀ : 43.4 D ₉₀ : 147.5	D ₁₀ : 46.9 D ₉₀ : 150.0	—
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;				
		FeCoNiCrMo	要求: $40\ \mu\text{m} \leq D_{10} \leq 60\ \mu\text{m}; D_{90} \leq 160\ \mu\text{m}$			
		批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	—
			D ₁₀ : 48.7 D ₉₀ : 147.0	D ₁₀ : 46.83 D ₉₀ : 154.36	D ₁₀ : 50.2 D ₉₀ : 151.8	—
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;				
FeCoNiCr	要求: $40\ \mu\text{m} \leq D_{10} \leq 60\ \mu\text{m}; D_{90} \leq 160\ \mu\text{m}$					
批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—		
	D ₁₀ : 48.4 D ₉₀ : 151.0	D ₁₀ : 51.0 D ₉₀ : 145.4	D ₁₀ : 46.7 D ₉₀ : 149.1	—		
批次-2	单位 9	单位 10	单位 12			
	D ₁₀ : 40.54 D ₉₀ : 127.13	D ₁₀ : 47.0 D ₉₀ : 136.0	D ₁₀ : 44.2 D ₉₀ : 114.4			
粉末批次-1 和粉末批次-2 均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;						
注: 单位 1-盘星新型合金材料(常州)有限公司; 单位 2-北京科技大学; 单位 3-矿冶科技集团有限公司; 单位 4-浙江亚通焊材有限公司; 单位 5-国营芜湖机械厂; 单位 6-飞而康快速制造科技有限责任公司; 单位 7-上海材料研究所; 单位 8-钢铁研究总院有限公司; 单位 9-郑州大学; 单位 10-广东省科学院工业分析检测中心; 单位 11-宁波众远新材料科技有限公司; 单位 12-无锡市产品质量监督检验院; 单位 13-中国矿业大学						

2.3.3 松装密度

松装密度验证结果如表 17 所示，从统计数据可以看出 I 类 FeCoNiCrMn 松装密度最小值 4.00 g/cm³，最大值 4.32 g/cm³，满足标准规定 I 类 FeCoNiCrMn 粉末松装密度不小于 3.80 g/cm³ 的要求；I 类 FeCoNiCrAl 松装密度最小值 3.50 g/cm³，最大值 3.71 g/cm³，满足标准规定 I 类 FeCoNiCrAl 粉末松装密度不小于 3.20 g/cm³ 的要求；I 类 FeCoNiCrTi 松装密度最小值 3.46 g/cm³，最大值 3.61 g/cm³，满足标准规定 I 类 FeCoNiCrTi 粉末松装密度不小于 3.20 g/cm³ 的要求；I 类 FeCoNiCrMo 松装密度最小值 4.52 g/cm³，最大值 4.63 g/cm³，满足标准规定 I 类 FeCoNiCrMo 粉末松装密度不小于 4.20 g/cm³ 的要求；I 类 FeCoNiCr 松装密度最小值 4.07 g/cm³，最大值 4.40 g/cm³，满足标准规定 I 类 FeCoNiCr 粉末松装密度不小于 4.00 g/cm³ 的要求。

从统计数据可以看出 II 类 FeCoNiCrMn 松装密度最小值 4.35 g/cm³，最大值 4.48 g/cm³，满足标准规定 II 类 FeCoNiCrMn 粉末松装密度不小于 4.00 g/cm³ 的要求；II 类 FeCoNiCrAl 松装密度最小值 3.75 g/cm³，最大值 3.86 g/cm³，满足标准规定 II 类 FeCoNiCrAl 粉末松装密度不小于 3.40 g/cm³ 的要求；II 类 FeCoNiCrTi 松装密度最小值 3.72 g/cm³，最大值 3.78 g/cm³，满足标准规定 II 类 FeCoNiCrTi 粉末松装密度不小于 3.40 g/cm³ 的要求；II 类 FeCoNiCrMo 松装密度最小值 4.82 g/cm³，最大值 4.91 g/cm³，满足标准规定 II 类 FeCoNiCrMo 粉末松装密度不小于 4.40 g/cm³ 的要求；II 类 FeCoNiCr 松装密度最小值 4.24 g/cm³，最大值 4.71 g/cm³，满足标准规定 II 类 FeCoNiCr 粉末松装密度不小于 4.20 g/cm³ 的要求。

由此可以看出，不同验证单位检测的不同粒度范围的高熵合金粉末，其松装密度均可满足标准设定值，标准对高熵合金粉末松装密度的要求是科学合理的。

高熵合金粉松装密度的检测按照 GB/T 1479.1 的规定执行。

表 17 粉末松装密度统计表

分类	粉末规格 μm	牌号及粉末 批次号	松装密度 g/cm ³				
I 类	≤63	FeCoNiCrMn	要求：≥3.80 g/cm ³				
		批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	单位 4	
			4.11	4.00	4.14	4.23	
		批次-2	单位 6	单位 7	单位 8	—	
			4.20	4.24	4.32	—	
		粉末批次-1 和粉末批次-2 均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；					
		FeCoNiCrAl	要求：≥3.20 g/cm ³				
批次-1	单位 2	单位 3	单位 14	—			
	3.50	3.55	3.58	—			

		批次-2	单位 8	单位 12	单位 13	—			
			3.71	3.71	3.61	—			
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供; 粉末批次-2 由浙江亚通焊材有限公司提供;							
		FeCoNiCrTi	要求: $\geq 3.20 \text{ g/cm}^3$						
		批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—			
			3.46	3.55	3.61	—			
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;							
		FeCoNiCrMo	要求: $\geq 4.20 \text{ g/cm}^3$						
		批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	—			
			4.63	4.55	4.52	—			
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;							
		FeCoNiCr	要求: $\geq 4.00 \text{ g/cm}^3$						
		批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—			
			4.32	4.40	4.37	—			
		批次-2	单位 7	单位 11	—	—			
			4.10	4.07	—	—			
		粉末批次-1 和粉末批次-2 均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;							
		II类	45~150	FeCoNiCrMn	要求: $\geq 4.00 \text{ g/cm}^3$				
				批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	单位 4	
					4.41	4.35	4.48	4.46	
粉末批次-1 和粉末批次-2 均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;									
FeCoNiCrAl	要求: $\geq 3.40 \text{ g/cm}^3$								
批次-1	单位 2			单位 3	—	—			
	3.75			3.85	—	—			
批次-2	单位 8			单位 10	单位 12	单位 13			
	3.81			3.80	3.86	3.80			
粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供; 粉末批次-2 由浙江亚通焊材有限公司 提供;									
FeCoNiCrTi	要求: $\geq 3.40 \text{ g/cm}^3$								
批次-1	单位 3			单位 4	单位 5	—			
	3.78			3.72	3.75	—			
粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;									
FeCoNiCrMo	要求: $\geq 4.40 \text{ g/cm}^3$								
批次-1	单位 1			单位 2	单位 3	—			
	4.82			4.91	4.87	—			
粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;									
FeCoNiCr	要求: $\geq 4.20 \text{ g/cm}^3$								
批次-1	单位 3			单位 4	单位 5	—			
	4.71	4.66	4.60	—					
批次-2	单位 9	单位 11	—	—					
	4.25	4.24	—	—					

	粉末批次-1 和粉末批次-2 均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供；
注：单位 1-盘星新型合金材料（常州）有限公司；单位 2-北京科技大学；单位 3-矿冶科技集团有限公司；单位 4-浙江亚通焊材有限公司；单位 5-国营芜湖机械厂；单位 6-飞而康快速制造科技有限责任公司；单位 7-上海材料研究所；单位 8-钢铁研究总院有限公司；单位 9-郑州大学；单位 10-宁波众远新材料科技有限公司；单位 11-无锡市产品质量监督检验院；单位 12-西北有色金属研究院；单位 13-广东省科学院工业分析检测中心；单位 14-中国矿业大学	

2.3.4 振实密度

振实密度验证结果如表 18 所示，从统计数据可以看出 I 类 FeCoNiCrMn 振实密度最小值 4.6 g/cm³，最大值 5.2 g/cm³，满足标准规定 I 类 FeCoNiCrMn 粉末振实密度不小于 4.4 g/cm³ 的要求；I 类 FeCoNiCrAl 振实密度最小值 4.2 g/cm³，最大值 4.4 g/cm³，满足标准规定 I 类 FeCoNiCrAl 粉末振实密度不小于 3.8 g/cm³ 的要求；I 类 FeCoNiCrTi 振实密度最小值 3.9 g/cm³，最大值 4.2 g/cm³，满足标准规定 I 类 FeCoNiCrTi 粉末振实密度不小于 3.8 g/cm³ 的要求；I 类 FeCoNiCrMo 振实密度最小值 5.4 g/cm³，最大值 5.6 g/cm³，满足标准规定 I 类 FeCoNiCrMo 粉末振实密度不小于 5.0 g/cm³ 的要求；I 类 FeCoNiCr 振实密度最小值 4.6 g/cm³，最大值 5.1 g/cm³，满足标准规定 I 类 FeCoNiCr 粉末振实密度不小于 4.4 g/cm³ 的要求。

II 类 FeCoNiCrMn 振实密度最小值 5.0 g/cm³，最大值 5.4 g/cm³，满足标准规定 II 类 FeCoNiCrMn 粉末振实密度不小于 4.6 g/cm³ 的要求；II 类 FeCoNiCrAl 振实密度最小值 4.4 g/cm³，最大值 5.0 g/cm³，满足标准规定 II 类 FeCoNiCrAl 粉末振实密度不小于 4.2 g/cm³ 的要求；II 类 FeCoNiCrTi 振实密度最小值 4.8 g/cm³，最大值 5.0 g/cm³，满足标准规定 II 类 FeCoNiCrTi 粉末振实密度不小于 4.2 g/cm³ 的要求；II 类 FeCoNiCrMo 振实密度最小值 5.8 g/cm³，最大值 6.0 g/cm³，满足标准规定 II 类 FeCoNiCrMo 粉末振实密度不小于 5.2 g/cm³ 的要求；II 类 FeCoNiCr 振实密度最小值 4.8 g/cm³，最大值 5.4 g/cm³，满足标准规定 II 类 FeCoNiCr 粉末振实密度不小于 4.6 g/cm³ 的要求。

由此可以看出，不同验证单位检测的不同粒度范围的高熵合金粉末，其振实密度均可满足标准设定值，标准对高熵合金粉末振实密度的要求是科学合理的。

高熵合金粉振实密度的检测按照 GB/T 5162 的规定执行。

表 18 粉末振实密度统计表

分类	粉末规格 μm	牌号及粉末 批次号	振实密度 g/cm ³			
I 类	≤63	FeCoNiCrMn	要求：≥4.4 g/cm ³			
		批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	单位 4
			4.8	4.6	4.8	5.2

		批次-2	单位 6	单位 7	单位 8	—		
			4.9	5.0	5.0	—		
		粉末批次-1 和粉末批次-2 均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;						
		FeCoNiCrAl	要求: $\geq 3.8 \text{ g/cm}^3$					
		批次-1	单位 2	单位 3	单位 14	—		
			4.4	4.2	4.4	—		
		批次-2	单位 8	单位 12	单位 13	—		
			4.4	4.4	4.4	—		
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供; 粉末批次-2 由浙江亚通焊材有限公司提供;						
		FeCoNiCrTi	要求: $\geq 3.8 \text{ g/cm}^3$					
		批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—		
			4.2	4.0	3.9	—		
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;						
		FeCoNiCrMo	要求: $\geq 5.0 \text{ g/cm}^3$					
		批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	—		
			5.6	5.4	5.4	—		
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;						
		FeCoNiCr	要求: $\geq 4.4 \text{ g/cm}^3$					
		批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—		
			4.8	4.8	4.6	—		
批次-2	单位 7	单位 11	—	—				
	5.1	4.8	—	—				
粉末批次-1 和批次-2 均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;								
II类	45~150	FeCoNiCrMn	要求: $\geq 4.6 \text{ g/cm}^3$					
		批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	单位 4		
			5.0	5.2	5.4	5.2		
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;						
		FeCoNiCrAl	要求: $\geq 4.2 \text{ g/cm}^3$					
		批次-1	单位 2	单位 3	—	—		
			4.6	5.0	—	—		
		批次-2	单位 10	单位 8	单位 12	单位 13		
			4.4	4.4	4.4	4.6		
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供; 粉末批次-2 由浙江亚通焊材有限公司提供;						
		FeCoNiCrTi	要求: $\geq 4.2 \text{ g/cm}^3$					
		批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—		
			4.8	5.0	5.0	—		
		粉末批次-1 江苏威拉里新材料科技有限公司提供;						
FeCoNiCrMo	要求: $\geq 5.2 \text{ g/cm}^3$							
批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	—				
	6.0	6.0	5.8	—				

		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;			
	FeCoNiCr	要求: $\geq 4.6 \text{ g/cm}^3$			
	批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—
		4.8	5.4	5.0	—
	批次-2	单位 9	单位 11	—	—
		4.8	5.0	—	—
		粉末批次-1 和批次-2 均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;			
注: 单位 1-盘星新型合金材料(常州)有限公司; 单位 2-北京科技大学; 单位 3-矿冶科技集团有限公司; 单位 4-浙江亚通焊材有限公司; 单位 5-国营芜湖机械厂; 单位 6-飞而康快速制造科技有限责任公司; 单位 7-上海材料研究所; 单位 8-钢铁研究总院有限公司; 单位 9-郑州大学; 单位 10-宁波众远新材料科技有限公司; 单位 11-无锡市产品质量监督检验院; 单位 12-西北有色金属研究院; 单位 13-广东省科学院工业分析检测中心; 单位 14-中国矿业大学					

2.3.5 流动性

高熵合金粉末流动性验证结果如表 19 所示, 从统计数据可以看出 I 类五种高熵合金粉末流动性最小值为 15.8 s/50g, 最大值 27.7 s/50g, 满足标准规定 I 类五种高熵合金粉末霍尔流速不大于 35 s/50g 的要求; 在 II 类五种高熵合金粉末中流动性最小值为 15.3 s/50g, 最大值 22.5 s/50g, 满足标准规定 II 类五种高熵合金粉末霍尔流速不大于 25 s/50g 的要求。

由此可以看出, 不同验证单位检测的不同粒度范围的高熵合金粉末, 其流动性均可满足标准设定值, 标准对高熵合金粉末流动性要求是科学合理的。

高熵合金粉末流动性的检测按照 GB/T 1482 的规定执行。

表 19 粉末流动性统计表

分类	粉末规格 μm	牌号及粉末 批次号	霍尔流速 s/50g				
I类	≤ 63	FeCoNiCrMn	要求: $\leq 35.0 \text{ s/50g}$				
		批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	单位 4	
			22.3	21.7	21.7	22.0	
		批次-2	单位 6	单位 7	单位 8	—	
			16.7	15.8	17.8	—	
		粉末批次-1 和批次-2 均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;					
		FeCoNiCrAl	要求: $\leq 35.0 \text{ s/50g}$				
		批次-1	单位 2	单位 3	单位 14	—	
			26.9	27.7	27.0	—	
		批次-2	单位 8	单位 13	—	—	
25.8	23.8		—	—			
粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供; 粉末批次-2 由浙江亚通焊材有限公司提供;							
FeCoNiCrTi	要求: $\leq 35.0 \text{ s/50g}$						
批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—			

			23.3	22.7	22.5	—		
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;						
		FeCoNiCrMo	要求: ≤ 35.0 s/50g					
		批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	—		
			20.6	21.1	20.0	—		
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;						
		FeCoNiCr	要求: ≤ 35.0 s/50g					
		批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—		
			19.2	19.8	20.5	—		
		批次-2	单位 7	单位 11	—	—		
			19.1	20.8	—	—		
		粉末批次-1 和批次-2 均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;						
II类	45~150	FeCoNiCrMn	要求: ≤ 25.0 s/50g					
		批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	单位 4		
			16.6	16.1	15.7	16.4		
				粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;				
				FeCoNiCrAl	要求: ≤ 25.0 s/50g			
		批次-1	单位 2	单位 3	—	—		
			21.0	22.5	—	—		
		批次-2	单位 8	单位 10	单位 12	单位 13		
			18.4	16.1	18.7	17.5		
				粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供; 粉末批次-2 由浙江亚通焊材有限公司提供;				
				FeCoNiCrTi	要求: ≤ 25.0 s/50g			
		批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—		
			20.1	20.4	19.8	—		
				粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;				
				FeCoNiCrMo	要求: ≤ 25.0 s/50g			
		批次-1	单位 1	单位 2	单位 3	—		
			15.6	16.1	15.7	—		
		粉末批次-1 由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;						
		FeCoNiCr	要求: ≤ 25.0 s/50g					
批次-1	单位 3	单位 4	单位 5	—				
	17.0	15.3	18.8	—				
批次-2	单位 9	单位 11	—	—				
	16.3	17.5	—	—				
		粉末批次-1 和批次-2 均由江苏威拉里新材料科技有限公司提供;						
注: 单位 1-盘星新型合金材料(常州)有限公司; 单位 2-北京科技大学; 单位 3-矿冶科技集团有限公司; 单位 4-浙江亚通焊材有限公司; 单位 5-国营芜湖机械厂; 单位 6-飞而康快速制造科技有限责任公司; 单位 7-上海材料研究所; 单位 8-钢铁研究总院有限公司; 单位 9-郑州大学; 单位 10-宁波众远新材料科技有限公司; 单位 11-无锡市产品质量监督检验院; 单位 12-西北有色金属研究院; 单位 13-广东省科学院工业分析检测中心; 单位 14-中国矿业大学								

验证结果表明：虽然各家验证单位的检测仪器型号以及检测方法不完全相同，但对同一批次的高熵合金粉末的化学成分、粒度分布、松装密度、振实密度以及流动性等检测结果基本一致，且各项指标均满足标准中规定的指标要求，进一步证明了本标准均有广泛的适用性。

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

在对国内外增材制造用高熵合金粉的调研分析过程中，没有查询到相关产品标准。本标准为首次起草的增材制造用高熵合金粉的国家标准。

3.2 与国际标准及国外同类标准水平的对比

本标准是国内首次起草的增材制造用高熵合金粉国家标准，本标准对产品化学成分、粒度分布、松装密度、振实密度、流动性以及外观质量的要求均依据实际工业生产水平，参考了已成熟稳定实施的企业标准和技术协议，标志着我国增材制造用高熵合金粉在产品质量上完全可以达到国外甚至超过国外先进的产品质量，可以完全满足我国增材制造用高熵合金粉的产品需求。

通过上述综合分析，本标准的制定达到了国内先进水平。

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

无。

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

本标准原计划与中国科学院兰州化学物理研究所联合申请，同为标准主要起草单位，但在标准任务落实、标准讨论、征求意见等环节均未参加相关会议，也未参与本标准任何相关工作。基于此，中国科学院兰州化学物理研究所不在作为本标准主要起草单位。

十、预期效果

本标准实施后，对我国增材制造工业领域所需高熵合金粉的要求更加合理规范，这有利于提升增材制造高熵合金材料的各项性能指标，使我国高熵合金材料的增材制备技术和整体性能达到国际先进水平，实现有标准可查、有据可依，同时可以满足发动机工业、硬质刀具工业、海洋工程、核工业等工业领域的复杂金属零件关键原材料需求，并对推进高性能高熵合金材料的发展和应用起到积极的促进作用。

本标准实施后，编制组将积极向国内生产厂家及用户推荐采用本标准。

《增材制造用高熵合金粉》标准编制组

2022年07月

标准征求意见稿意见汇总处理表

标准名称：增材制造用高熵合金粉

承办人：唐跃跃

标准负责起草单位：江苏威拉里新材料科技有限公司

共 2 页 第 1 页

电话：15720788994

2022 年 07 月 26 日填写

序号	标准章条编号	意见内容	提出单位	处理意见	备注
1	3	修改为 GB/T 35351 界定的术语和定义适用于本文件本文。	全国增材制造标准化技术委员会	采纳	
2	4.1	增加杂质含量总和	西安欧中材料科技有限公司	采纳	
3	4.3	表 3 中松装密度测试结果精确到 0.01g/cm ³	北京康普锡威科技有限公司	采纳	
4	4.4	表 4 中将“松装密度”改为“振实密度”	广州赛隆增材制造公司	采纳	
5	4.6	表 5 中流动性测试结果精确到 0.1s	广东银纳科技有限公司	采纳	
6	5.1	将“Fe、Mn、Ni、Mo、Co、Cr、Al、Ti、C、S、O、N、P”改为“化学成分”	全国有色金属标准化技术委员会	采纳	
7	6.2	将“同一粒度范围”改为“同一类别”	湖南华曙高科技有限责任公司	采纳	
8	6.3	表 6 删除“球形率和空心粉率”检测项目及取样	自贡长城硬面材料有限公司	采纳	
9	7.1	h)删除“防火”、“向上”、“禁止翻滚”	星尘科技（广东）有限公司	采纳	
10	7.2	删除“或者真空包装”	华中科技大学	采纳	
11	7.4	a)删除“产品获得的质量认证”	宁夏东方钽业股份有限公司	采纳	
12	5.2	将“需方对产品粒度有特殊要求时，由供需双方协商确定。”放在表 2 内	中国航发北京航空材料研究院	采纳	
13	7.3	表 6 中“要求的章条号”改为“技术要求的章条号”	浙江华友钴业股份有限公司	采纳	

标准征求意见稿意见汇总处理表

标准名称：增材制造用高熵合金粉

承办人：唐跃跃

标准负责起草单位：江苏威拉里新材料科技有限公司

共 2 页 第 2 页

电话：15720788994

2022 年 07 月 26 日填写

序号	标准章 条编号	意见内容	提出单位	处理意见	备注
14	8.3	删除“雨淋”	西部超导材料股份有限公司	采纳	
15		无意见	宝钛集团有限公司		
16		无意见	湖南普利特医疗器械有限公司		
17		无意见	珠海天威飞马打印耗材有限公司		
18		无意见	安徽相邦复合材料有限公司		
19		无意见	株洲普利特增材制造有限公司		
20		无意见	中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司		

- 说明：
- (1) 发送《征求意见稿》的单位数：20 个。
 - (2) 收到《征求意见稿》后，回函无意见的单位数：6 个。
 - (3) 收到《征求意见稿》后，回函并有建议或意见的单位数：14 个。
 - (4) 没有回函的单位数：0 个。