**国家标准**

**粉末床熔融增材制造镍基合金**

**编制说明**

（送审稿）

**国家标准《粉末床熔融增材制造镍基合金》**

**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第二批推荐性国家标准制计划的通知》（国标委发[2019]22号）文的要求，由广东省科学院材料与加工研究所负责制定推荐性国家标准《粉末床熔融增材制造镍基合金》，项目计划编号为：20192051-T-610。按计划要求，本标准应在2021年7月完成。

1.2 项目概况

镍基合金材料凭借其耐高温、耐腐蚀、耐复杂应力等性能，被广泛应用于涡轮发动机工作叶片、导向叶片、飞机发动机以及工业用燃气轮机等高温零部件方面。镍基合金材料的传统制备主要通过铸造、锻造及机加工的方式来成形，但是高温合金零构件存在个性化程度较好，而且具有小批量生产的特点。增材制造技术具有加工自由化等加工特点，在制备镍基高温合金上，解除了对加工技术要求高的局限，同时增材制造技术制备的成形件具有较高的致密度、组织均匀、细小，以及显著的加工效率和成本优势，因此增材制造镍基合金的制备成为研究的热点，并已被用于制备航空领域如发动机中的涡轮盘、涡轮叶片等热端部件。

近年全球金属3D打印产品应用市场增长态势迅猛，预计2021年，航空产品市场达1.37亿美元。IDTechEx发布报告，预测2028年，金属3D打印市场全球规模有望达到120亿美元。国务院印发的《中国制造2025》部署全面推进实施制造强国战略中，将增材制造列为重点布局范围；工信部印发的《增材制造产业发展行动计划（2017-2020年）》中，也指出要推动增材制造在航空领域规模化应用。

目前粉末床熔融增材制造镍基合金还没有相关的国家标准或者行业标准，没有统一的标准要求和检验测试规范，对合金的化学成分、力学性能、金相组织通常根据用户的要求进行，产品的使用工况不清晰，用户无选型依据；无产品相关的贮存、运输方法；无产品检验、使用、验收等相关规范；各企业性能参数不在同一基准上，造成了行业市场的无序，为生产制造商及客户都带来了很大的不便，阻碍了增材制造镍基合金行业的技术进步和产业化应用推广。

综上所述，为了使国内增材制造镍基合金的生产、检验和交付使用等全过程得到规范，提高产品的质量可靠性，故制订此国家标准；同时，该标准的制订也有利于增材制造镍基合金的推广应用，促进增材制造行业的健康有序发展

1.3承担单位情况

广东省科学院材料与加工研究所由原广州有色金属研究院金属加工与成型技术研究所与粉末冶金研究所等联合组建而成，现隶属于广东省科学院。主要从事粉末冶金材料、金属基复合材料、铝镁铜钛有色金属材料、先进成形加工技术及装备的研发、设计和工程化应用等研究工作。围绕国家、省市对关键材料技术的迫切需求，以应用基础研究、技术创新和工程应用的综合集成为特色，形成了以粉体制备与改性、耐磨及复合材料、高性能铝镁铜钛有色金属材料、零件近净成形制造、短流程成形技术及相关装备研发等多个特色研究方向。研究所是华南地区材料成形与加工的应用基础理论研究、技术创新和工程化应用示范基地，同时也是华南地区重要的人才培养和学术交流基地。

研究所现有正式职工125人。其中高级职称人员32人，博士25人，硕士31人，研究生导师21人，在读研究生40余人，形成一支年龄结构合理、综合素质高、创新能力强、富有朝气的高层次科研开发团队。

单位拥有“国家钛及稀有金属粉末冶金工程技术研究中心”、“广东省金属粉体材料工程技术研究中心”、“广州市粉体材料及精密零件制造工程技术研究中心”，是“广东省粉末冶金产业技术创新联盟”理事长单位。已形成了从粉体制备、应用到产品中试的创新平台。拥有2500平方米办公场地、10000平方米的应用基础研究和中试化生产基地，拥有各类大型仪器设备180多台套，固定资产9000多万元。拥有国际先进的真空惰性气体雾化制粉系统、丝材等离子雾化制粉系统等粉末制备装备，以及德国EOS金属3D打印设备、直读光谱仪、激光粒度仪等完备的粉末分析评价等仪器设备。

申请单位先后承担完成国家和省市200余项科研课题，项目累计经费逾2 亿元，获国家、省部级奖励20 余项，其中获得国家科学技术进步二等奖2 项、省部级科学进步一等奖6 项、二等奖9 项，三等奖5 项，广东省专利金奖1 项；申请专利161项，国家发明专利授权29 件，发表学术论文500 余篇，SCI/EI 检索100余篇；编写专著4 部，制定国家或行业标准20余项。与国内外高校和科研机构建立定期互访机制，主办7次国际国内大型学术会议，获批国际合作项目8项。派驻企业科技特派员20余人，与企业共建实验室/工程中心9个。近年来，研究所取得了一批高水平、具有自主知识产权的研究成果，开发的技术和产品广泛应用于汽车、轨道交通、船舶、电子电器、矿山、建筑、水泥、电力、冶金等行业，产生了显著的经济和社会效益，在推动行业技术进步、人才培养、学术交流等方面为国家和省市做出了重要贡献。

1.4参编单位及主要起草人工作情况

整个标准起草过程中各参编单位给予了大力的支持帮助。广东省科学院材料与加工研究所进行了标准的调研、起草及数据验证工作；北京康普锡威科技有限公司、西安赛隆金属材料有限责任公司、西北有色金属研究院、广州赛隆增材制造有限责任公司、无锡市产品质量监督检验院、江苏威拉里新材料科技有限公司、华南理工大学等参编单位提供了资料收集及实验数据验证的工作。

标准主要起草人以及分工见下表。

标准主要起草人及分工

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 姓名 | 单位 | 分工 |
|  | 广东省科学院材料与加工研究所 | 负责调研、验证、标准起草 |
|  |  | 负责调研、验证、标准起草 |
|  |  | 负责全过程的标准编制、协调工作 |
|  |  | 负责标准审核、协调工作 |
|  |  | 参与标准起草，资料收集，提供相关验证 |
|  |  | 参与标准起草，资料收集，提供相关验证 |
|  |  | 参与标准起草，资料收集，提供相关验证 |
|  |  | 参与标准起草，资料收集，提供相关验证 |
|  |  | 参与标准起草，资料收集，提供相关验证 |
|  |  | 参与标准起草，资料收集，提供相关验证 |
|  |  | 参与标准起草，资料收集，提供相关验证 |

1.5主要工作过程

1.5.1 起草阶段

2019年10月17日，有色标委会组织召开会议，对本项目进行了任务落实。广东省科学院材料与加工研究所及参编单位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粉末床熔融增材制造镍基合金的应用信息，收集粉末床熔融增材制造镍基合金的生产、检验数据，调研国内外粉末床熔融增材制造镍基合金科研单位、生产企业的基本情况，并对各类信息进行分析汇总，已于2020年7月31日形成了标准的征求意见稿和编制说明。

1.5.2 征求意见阶段

2020年9月11日，由全国有色金属标准化技术委员会组织有色粉末冶金标准项目讨论会，江苏威拉里新材料科技有限公司、北京康普锡威科技有限公司、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、西北工业大学、西北有色金属研究院、广州赛隆增材制造有限责任公司、无锡市产品质量监督检验院、西安欧中材料科技有限公司、湖南顶立科技有限公司、广东银纳科技有限公司、上海材料研究所、华中科技大学、同济大学、珠海天威飞马打印耗材有限公司、中航迈特有限公司等20余家单位对标准的征求意见稿和编制说明进行了充分、细致地讨论。

2020年9月3日至2020年11月20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。编制组单位对收集到的意见进行整理，共收到了5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，形成标准预审稿。

2020年11月24日～11月26日，由全国有色金属标准化技术委员会在江苏省徐州市组织召开有色金属标准工作会。来自编制组成员等20多家单位30余名专家代表参加了会议**。**会议对广东省科学院材料与加工研究所负责修订的国家标准《粉末床熔融增材制造镍基合金》（预审稿）进行了认真仔细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。

1.5.3审查阶段

2021年5月13日至5月15日，由全国有色金属标准化技术委员会在浙江省宁波市组织召开有色金属标准工作会。来自编制组成员等XX家单位XX名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材料与加工研究所负责修订的国家标准《粉末床熔融增材制造镍基合金》（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：2021年XX月XX日至2021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27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、标准的制定原则、主要内容与论据

2.1标准制定的原则

该标准按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》和GB/T 20000.2-2009《标准化工作指南 第2部分：采用国际标准》的要求编写。标准规定了粉末床熔融增材制造镍基合金的要求、试验方法、检验规则和包装、标志、运输、贮存、质量证明书及合同（或订货单）内容等。

本标准编制小组对粉末床熔融增材制造镍基合金进行标准化，对标准适用范围、产品的供应状态、化学成分、力学性能、金相组织、尺寸及允许偏差、外观质量、热处理、抽样方法等做了规定，使其符合相关行业的实际应用。

2.2标准制订的主要内容及论据

2.2.1 供应状态

采用粉末床熔融增材制造技术生产镍基合金，可直接得到镍基合金产品，此状态即为成形态；由于成形态的产品存在孔隙或裂纹缺陷，对于性能要求较高的产品需要进行热等静压处理，得到热等静压态的产品，该状态的产品孔隙和裂纹大幅减少；由于GH3625镍基合金是以钼铌为主要强化元素的固溶强化型镍基变形高温合金，因此需要进行固溶热处理，对应产品的状态即为固溶热处理态；而GH4169镍基合金是以γ’（Ni3Al）和γ’’（Ni3Nb）为主要强化相的沉淀强化型镍基高温合金，通常需要先通过固溶热处理，再进行时效热处理，从而保证强化相的沉淀析出，得到的产品状态即为时效热处理态。因此，本标准规定将产品按供应状态分为成形态、热等静压态、热处理态、热等静压+热处理态。

2.2.2化学成分

粉末床熔融增材制造GH3625镍基合金化学成分主要包括镍、铬、钼、铌等元素；粉末床熔融增材制造GH4169镍基合金化学成分主要包括镍、铬、钼、铌、铝、钛等元素；GH3625镍基合金和GH4169镍基合金是镍基合金中应用最为广泛的两种，化学成分在GB14992中已有明确规定。因此，本标准产品的化学成分与GB/T 14992的规定相符合。相关厂家粉床熔融增材制造镍基合金的成分见表1，为了确保增材制造目标零件的综合性能达到产品的设计要求，本标准规定粉床熔融增材制造镍基合金的化学成分如表2所示。

表1相关厂家增材制造镍基合金产品的化学成分

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **GH3625化学成分统计情况** | | | | | | | | | | | | | | |
| 化学成分(质量分数)/% | | | | | | | | | | | | | | 数据来源 |
| Ni | Cr | | Fe | | Mo | | Nb | | Al | | Ti | | C |
| 余量 | 20.00～23.00 | | ≤5.00 | | 8.00～10.00 | | 3.15～4.15 | | ≤0.40 | | ≤0.40 | | ≤0.10 | GB/T 14992 |
| 余量 | 21.21 | | 0.52 | | 8.19 | | 3.91 | | 0.32 | | 0.24 | | 0.02 | 广材所 |
| 余量 | 21.54 | | 1.10 | | 8.81 | | 3.85 | | 0.35 | | 0.31 | | 0.03 | 华南理工大学 |
| 余量 | 21.68 | | 3.15 | | 9.11 | | 3.65 | | 0.049 | | 0.003 | | 0.03 | 上海材料所 |
|  | | | | | | | | | | | | | | |
| 化学成分(质量分数)/% | | | | | | | | | | | | | | 数据来源 |
| Co | Mn | | Si | | P | | S | | Cu | | B | | Mg |
| ≤1.00 | ≤0.50 | | ≤0.50 | | ≤0.015 | | ≤0.015 | | ≤0.070 | | - | | - | GB/T 14992 |
| 0.04 | 0.02 | | 0.019 | | 0.004 | | 0.006 | | 0.01 | | - | | - | 广材所 |
| 0.15 | 0.10 | | 0.03 | | 0.007 | | 0.004 | | - | | - | | - | 华南理工大学 |
| 0.006 | 0.004 | | 0.029 | | 0.002 | | 0.001 | | 0.004 | | - | | - | 上海材料所 |
| **GH4169化学成分统计情况** | | | | | | | | | | | | | | |
| 化学成分(质量分数)/% | | | | | | | | | | | | | | 数据来源 |
| Ni | Cr | Fe | | Mo | | Nb | | Al | | Ti | | C | |
| 50.0～55.0 | 17.00～21.00 | 余量 | | 2.80～3.30 | | 4.75～5.50 | | 0.20～0.80 | | 0.65～1.15 | | ≤0.08 | | GB/T 14992 |
| 52.20 | 18.21 | 余量 | | 3.08 | | 5.19 | | 0.47 | | 0.80 | | 0.057 | | 广材所 |
| 52.45 | 18.61 | 余量 | | 3.29 | | 5.36 | | 0.50 | | 0.99 | | 0.041 | | 西北院 |
| 52.75 | 18.18 | 余量 | | 3.11 | | - | | 0.43 | | 0.97 | | 0.04 | | 西安赛隆 |
| 52.75 | 18.17 | 余量 | | 3.11 | | - | | 0.43 | | 0.97 | | 0.05 | | 广州赛隆 |
| 52.60 | 18.92 | 余量 | | 3.09 | | 4.94 | | 0.60 | | 1.03 | | 0.05 | | 无锡质检院 |
| 52.80 | 18.66 | 余量 | | 3.12 | | 5.02 | | 0.58 | | 0.92 | | 0.045 | | 华南理工大学 |
| 53.14 | 18.36 | 余量 | | 3.07 | | 5.02 | | 0.37 | | 0.95 | | 0.031 | | 上海材料所 |
|  | | | | | | | | | | | | | | |
| 化学成分(质量分数)/% | | | | | | | | | | | | | | 数据来源 |
| Co | Mn | Si | | P | | S | | Cu | | B | | Mg | |
| ≤1.00 | ≤0.35 | ≤0.35 | | ≤0.015 | | ≤0.015 | | ≤0.300 | | ≤0.006 | | ≤0.010 | | GB/T 14992 |
| 0.03 | 0.10 | 0.22 | | 0.009 | | 0.006 | | 0.05 | | 0.003 | | 0.002 | | 广材所 |
| 0.31 | 0.11 | 0.14 | | 0.01 | | ＜0.002 | | 0.09 | | 0.005 | | 0.005 | | 西北院 |
| 0.29 | - | - | | - | | - | | - | | - | | - | | 西安赛隆 |
| 0.29 | - | - | | - | | - | | - | | - | | - | | 广州赛隆 |
| 0.015 | 0.04 | 0.30 | | 0.012 | | 0.002 | | 0.019 | | 0.0015 | | 0.0002 | | 无锡质检院 |
| 0.04 | 0.06 | 0.28 | | 0.010 | | 0.003 | | - | | - | | - | | 华南理工大学 |
| 0.096 | 0.12 | 0.16 | | 0.008 | | 0.002 | | 0.055 | | 0.0021 | | - | | 上海材料所 |

表2 化学成分

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 牌号 | 化学成分(质量分数)/% | | | | | | | |
| Ni | Cr | Fe | Nb | Mo | Al | Ti | C |
| GH3625 | 余量 | 20.00～23.00 | ≤5.00 | 3.15～4.15 | 8.00～10.00 | ≤0.40 | ≤0.40 | ≤0.10 |
| GH4169 | 50.0～55.0 | 17.00～21.00 | 余量 | 4.75～5.50 | 2.80～3.30 | 0.20～0.80 | 0.65～1.15 | ≤0.08 |
|  | | | | | | | | |
| 牌号 | 化学成分(质量分数)/% | | | | | | | |
| Co | Cu | Mn | Si | S | P | B | Mg |
| GH3625 | ≤1.00 | ≤0.070 | ≤0.50 | ≤0.50 | ≤0.015 | ≤0.015 | - | - |
| GH4169 | ≤1.00 | ≤0.300 | ≤0.35 | ≤0.35 | ≤0.015 | ≤0.015 | ≤0.006 | ≤0.010 |

2.2.3密度

根据对部分企业的生产数据调研和统计结果表明：粉床熔融增材制造镍基合金试样的致密度都大于99%，其结果如表3所示，所以，本标准规定产品实体结构的相对密度应不小于99%。

表3 相关厂家增材制造镍基合金产品的相对密度

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 牌号 | 相对密度/% | 数据来源 |
| GH3625 | 99.2 | 广材所 |
| 99.5 | 北京康普锡威 |
| 99.6 | 华南理工 |
| 99.4 | 无锡飞而康 |
| GH4169 | 99.6 | 广材所 |
| 99.5 | 西安赛隆 |
| 99.8 | 上海材料所 |
| 99.5 | 盘星 |

2.2.4力学性能

结合相关企业粉床熔融增材制造镍基合金的力学性能统计分析（结果见表4），本标准规定了成形态产品的室温力学性能要求，如表5所示。如需要时，产品可进行高温力学性能测试，具体性能要求由供需双方协商确定。

表4力学性能数据统计表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 牌号 | 成形工艺 | 抗拉强度Rm/MPa | | 规定塑性延伸强度Rp0.2/MPa | | 断后伸长率A/% | | 数据来源 |
| X和Y轴方向 | Z轴方向 | X和Y轴方向 | Z轴方向 | X和Y轴方向 | Z轴方向 |
| GH3625 | SLM，EBM | ≥485 | ≥485 | ≥275 | ≥275 | ≥30 | ≥30 | ASTM |
| SLM | 980 | 870 | 720 | 630 | 33 | 48 | 德国EOS |
| SLM | 965 | 850 | 704 | 611 | 34 | 50 | 广材所 |
| SLM | 955 | 840 | 674 | 601 | 35 | 49 | 华南理工大学 |
| SLM | 909 | - | 607 | - | 51.8 | - | 盘星新型合金 |
| SLM | 940 | 850 | 675 | 565 | 30 | 37 | 上海材料所 |
| GH4169 | SLM，EBM | ≥980 | ≥920 | ≥635 | ≥600 | ≥27 | ≥27 | ASTM |
| SLM | 1051.11 | 996.35 | 799.12 | 699.97 | 27.25 | 32.88 | 广材所 |
| SLM | 1060±50 | 980±50 | 780±50 | 634±50 | 27±5 | 31±5 | 德国EOS |
| SLM | 1097 | 1028 | 812 | 665 | 22.1 | 26.3 | 华南理工大学 |
| SLM | 940±28 | - | 633±11 | - | 35±3.6 | - | 西北院 |
| EBM | 1123 | 1054 | 661 | 654 | 15.5 | 14.0 | 西安赛隆 |
| SLM | 1120 | 1049 | 658 | 652 | 15.7 | 14.2 | 广州赛隆 |

注：SLM为选区激光熔融，EBM为电子束粉末床熔化。

表5室温力学性能

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 牌号 | 抗拉强度Rm/MPa  ≥ | | 规定塑性延伸强度Rp0.2/MPa  ≥ | | 断后伸长率A/%  ≥ | |
| X和Y轴方向 | Z轴方向 | X和Y轴方向 | Z轴方向 | X和Y轴方向 | Z轴方向 |
| GH3625 | 485 | 485 | 275 | 275 | 30 | 30 |
| GH4169 | 980 | 920 | 635 | 600 | 27 | 27 |

2.2.5 无损检验

需方要求并在合同（或订货单）中注明时，可对零件可进行X射线照相检验，表面抛光或机加后的产品还可进行荧光渗透检测。

2.2.6 尺寸及允许偏差

产品的尺寸及允许偏差应符合供需双方签订的技术图样，允许通过机加工达到技术图样要求。

2.2.7 外观质量

本标准对外观质量规定如下：（1）产品不应有缺损、掉块、裂纹等缺陷。（2）产品外表面及内表面允许轻微起伏，允许对表面凸起进行修磨处理。（3）在不超出尺寸允许偏差的前提下，允许采用喷砂、打磨、机加工等方法改善表面质量。（4）需方对外观质量有特殊要求并在合同(或订货单)中注明时，按照约定进行。

2.3 验证情况

本标准所规定的检验项目符合粉末床熔融增材制造镍基合金产品生产制作工艺要求，各项指标满足产品的设计要求，同时符合粉末床熔融增材制造镍基合金产品的实际水平。广东省科学院材料与加工研究所组织标准编制组单位，由江苏威拉里提供GH3625镍基合金粉末分发给广材所、华南理工大学、上海材料所、西安赛隆、无锡飞而康等单位进行粉末床熔融增材制造及性能验证；由中航迈特提供GH4169镍基合金粉末分发给广材所、西安赛隆、广州赛隆及北京康普锡威等单位进行粉末床熔融增材制造及性能验证。具体验证情况如下：

2.3.1化学成分验证

化学成分验证结果见表6。从表6可以看出，不同单位采用同一批粉末制造的镍基合金产品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。

表6 化学成分检测结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **GH3625化学成分统计情况** | | | | | | | | | | | | | | |
| 化学成分(质量分数)/% | | | | | | | | | | | | | | 数据来源 |
| Ni | Cr | | Fe | | Mo | | Nb | | Al | | Ti | | C |
| 余量 | 21.55 | | 0.29 | | 8.89 | | 3.72 | | 0.023 | | 0.046 | | 0.03 | 广材所 |
| 余量 | 21.65 | | 0.31 | | 8.93 | | 3.69 | | 0.023 | | 0.052 | | 0.026 | 华南理工大学 |
| 余量 | 21.59 | | 0.32 | | 8.82 | | 3.7 | | 0.027 | | 0.045 | | 0.033 | 上海材料所 |
| 余量 | 21.55 | | 0.29 | | 8.89 | | 3.72 | | 0.023 | | 0.046 | | 0.03 | 飞而康 |
|  | | | | | | | | | | | | | | |
| 化学成分(质量分数)/% | | | | | | | | | | | | | | 数据来源 |
| Co | Mn | | Si | | P | | S | | Cu | | B | | Mg |
| ≤1.00 | ≤0.50 | | ≤0.50 | | ≤0.015 | | ≤0.015 | | ≤0.070 | | - | | - | GB/T 14992 |
| 0.029 | 0.1 | | 0.09 | | 0.004 | | 0.002 | | 0.005 | | - | | - | 广材所 |
| 0.028 | 0.08 | | 0.08 | | 0.002 | | 0.001 | | 0.006 | | - | | - | 华南理工大学 |
| 0.028 | 0.09 | | 0.09 | | 0.003 | | 0.001 | | 0.004 | | - | | - | 上海材料所 |
| 0.029 | 0.1 | | 0.09 | | 0.004 | | 0.002 | | 0.005 | |  | |  | 飞而康 |
| **GH4169化学成分统计情况** | | | | | | | | | | | | | | |
| 化学成分(质量分数)/% | | | | | | | | | | | | | | 数据来源 |
| Ni | Cr | Fe | | Mo | | Nb | | Al | | Ti | | C | |
| 50.0～55.0 | 17.00～21.00 | 余量 | | 2.80～3.30 | | 4.75～5.50 | | 0.20～0.80 | | 0.65～1.15 | | ≤0.08 | | GB/T 14992 |
| 52.86 | 18.62 | 余量 | | 3.11 | | 5.19 | | 0.47 | | 0.98 | | 0.05 | | 广材所 |
| 52.79 | 18.68 | 余量 | | 3.07 | | 5.09 | | 0.43 | | 0.97 | | 0.04 | | 西安赛隆 |
| 52.81 | 18.57 | 余量 | | 3.09 | | 5.14 | | 0.50 | | 1.03 | | 0.05 | | 康普锡威 |
|  | | | | | | | | | | | | | | |
| 化学成分(质量分数)/% | | | | | | | | | | | | | | 数据来源 |
| Co | Mn | Si | | P | | S | | Cu | | B | | Mg | |
| ≤1.00 | ≤0.35 | ≤0.35 | | ≤0.015 | | ≤0.015 | | ≤0.300 | | ≤0.006 | | ≤0.010 | | GB/T 14992 |
| 0.03 | 0.06 | 0.28 | | 0.009 | | 0.003 | | 0.05 | | 0.002 | | 0.003 | | 广材所 |
| 0.29 | 0.04 | 0.32 | | 0.010 | | 0.003 | | 0.06 | | 0.003 | | 0.001 | | 西安赛隆 |
| 0.03 | 0.04 | 0.30 | | 0.012 | | 0.002 | | 0.06 | | 0.0015 | | 0.002 | | 康普锡威 |

2.3.2密度验证

密度验证结果见表7。从表7可以看出，不同单位采用同一批粉末制造的镍基合金产品的密度检测结果为99.3~99.8%；均满足标准中规定的指标要求。

表7 相关厂家增材制造镍基合金产品的相对密度

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 牌号 | 相对密度/% | 数据来源 |
| GH3625 | 99.3 | 广材所 |
| 99.6 | 华南理工 |
| 99.5 | 飞而康 |
| 99.6 | 上海材料所 |
| GH4169 | 99.8 | 广材所 |
| 99.5 | 西安赛隆 |
| 99.5 | 广州赛隆 |
| 99.8 | 北京康普锡威 |

2.3.3 力学性能验证

力学性能验证结果见表8。从表8可以看出，由于不同单位采用的设备型号及成形工艺参数不同，采用同一批粉末制造的镍基合金产品的力学性能存在一定差异，但得到的力学性能均满足标准中规定的指标要求。

表8力学性能数据统计表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 牌号 | 成形工艺 | 抗拉强度Rm/MPa | | 规定塑性延伸强度Rp0.2/MPa | | 断后伸长率A/% | | 数据来源 |
| X和Y轴方向 | Z轴方向 | X和Y轴方向 | Z轴方向 | X和Y轴方向 | Z轴方向 |
| GH3625 | SLM | 956 | 844 | 692 | 578 | 35 | 46 | 广材所 |
| SLM | 970 | 820 | 667 | 570 | 36 | 48 | 华南理工 |
| SLM | 940 | 809 | 635 | 541 | 41 | 43 | 飞而康 |
| EBM | 912 | 799 | 608 | 490 | 43 | 51 | 西安赛隆 |
| SLM | 943 | 856 | 680 | 573 | 31 | 39 | 上海材料所 |
| GH4169 | SLM | 1073 | 994 | 801 | 696 | 28 | 32 | 广材所 |
| EBM | 1094 | 1012 | 771 | 644 | 29 | 33 | 西安赛隆 |
| SLM | 1080 | 1006 | 658 | 622 | 31 | 35 | 广州赛隆 |
| SLM | 1118 | 1062 | 820 | 729 | 28 | 29 | 北京康普锡威 |

注：SLM为选区激光熔融，EBM为电子束粉末床熔化。

验证结果表明：虽然各单位的增材制造设备及检测仪器的厂家和型号不完全相同，但对同一批粉末制造的镍基合金的化学成分、密度及力学性能基本一致，且均满足标准中规定的指标要求，进一步证明本标准具有广泛的适用性。

三、标准水平

3.1 采用国际标准及国外先进标准的程度

本标准力学性能部分参考了国外标准ASTM F3055-14a《粉末床熔融增材制造镍合金（UNS N07718）标准规范》和ASTM F3056-14e1《粉末床熔融增材制造镍合金（UNS N06625）标准规范》。

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粉床熔融增材制造镍基合金国家标准，本标准对产品化学成分、密度、力学性能、外观质量等要求均依据实际生产水平，参考了已成熟稳定实施的企业标准和技术协议。本标准达到了国内先进水平。

3.3 与现有标准及修订中的标准协调配套情况

本标准与现有标准及修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

经查，本标准没有涉及国内外专利。

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

无。

八、废止现行有关标准的建议

无。

九、其他应予以说明的事项

起草单位变更说明：“广东省科学院材料与加工研究所”是由“广东省材料与加工研究所”变更而来，根据《关于对省科学院所属单位同意更名有关事宜备案的函》（粤机编办函【2020】136号）和“广东省科学院关于院属单位统一更名有关事项的通知”（粤科院规字【2020】17号）的要求，单位名称于2020年8月5日起由“广东省材料与加工研究所”变更“广东省科学院材料与加工研究所”。此次变更仅涉及单位名称，单位性质、统一社会信用代码、业务范围、银行账户等保持不变。

十、预期效果

在充分考虑我国增材制造工艺技术水平，并结合国际先进标准技术规范的前提下，本标准的制定有利于进一步规范完善增材制造镍基合金的生产、检验和交付使用等全过程，提高产品的质量可靠性；引导增材制造镍基合金产品的生产及使用企业进行质量控制，实现有标准可查、有据可依，提高行业的整体技术水平，促进企业的有序竞争和发展，推动增材制造镍基合金产品的生产和应用，促进增材制造行业的健康有序发展。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。

《粉末床熔融增材制造镍基合金》标准编制组

2021年5月6日