

中国表面工程协会团体标准

《等离子物理气相沉积用热障涂层粉体材料技术条件》

编制说明

《等离子物理气相沉积用热障涂层粉体材料技术条件》编制组

2022 年 4 月

目 录

1 项目背景	1
1.1 任务来源	1
1.2 工作过程	1
2 标准制定的必要性	2
3 国内外相关情况	3
4 编制原则	3
5 主要技术内容说明	4
5.1 层次框架	4
5.2 技术内容	4
6 对实施本标准的建议	6
7 与有关的现行法律、法规和强制性标准的关系	6

1 项目背景

1.1 任务来源

热障涂层是燃气涡轮发动机（航空发动机和燃气轮机）热端部件不可或缺的核心关键技术，涂层的源头材料（特种粉体或靶材）和涂层特殊微结构是决定热障涂层服役性能的核心，也是涂层性能控制的关键。制备性能优异的热障涂层，必须对热障涂层特种材料的成分、微结构及物理特性加以控制，我国在热障涂层领域起步较晚，对专用材料规范化不足，制约了我国关键动力系统核心热防护涂层技术的发展。

热障涂层的制备技术经过了大气等离子喷涂（Air Plasma Spraying, APS）、电子束物理气相沉积（Electron Beam-Physical Vapor Deposition, EB-PVD）等典型技术的发展，已经获得相对成熟的应用，在材料精细化和系列化方面和国外尚存在一定的差距。随着近年来制备技术向多相复合可调控微结构沉积的等离子物理气相沉积（Plasma Spraying-Physical Vapor Deposition, PS-PVD）发展，该工艺采用一种细团聚、近球形、自流动的粉体作为原料，这种粉体材料制备难度大、物理特性控制要求高，对其源头材料进行规范化，有助于全行业进一步推动该新型工艺技术的发展。

在相关项目的支持下，国机集团中国农机院牵头，在国内开展了 PS-PVD 粉体研制及应用验证工作，形成了高温/超高温热障涂层粉体材料产品，并在多个领域核心零部件表面完成了应用验证，取得了明显成效。利用相关研制成果，进一步提炼粉体的质量控制要素、性能评价要素和供货技术条件，有利于促进本行业的发展。北京金轮坤天特种机械有限公司向中国表面工程协会申报了《等离子物理气相沉积用热障涂层粉体材料》（以下简称《热障涂层粉体材料》）。经标委会组织专家审查后，予以立项编制，项目编号 CSEA202201。

1.2 工作过程

从接到标准的编写任务开始，北京金轮坤天特种机械有限公司成立标准编制组，并组织召开了编制讨论会，制订了具体的工作计划，明确了技术路线，并根据工作需要组内成员进行任务分工。

2022 年 4 月，编制组完成了《等离子物理气相沉积用热障涂层粉体材料技

术条件》(初稿),在广泛征求行业内部分专家和生产企业的意见和建议后,编制组编写完成《等离子物理气相沉积用热障涂层粉体材料技术条件》(征求意见稿),并报送协会征求意见。

2022 年 9 月,编制组根据征求意见内容,对《等离子物理气相沉积用热障涂层粉体材料技术条件》(征求意见稿)进行了再次修改后报送中国表面工程协会。

2022 年 12 月,编制组完成《等离子物理气相沉积用热障涂层粉体材料技术条件》送审稿,召开专家评审会。

2 标准制定的必要性

党的十九届六中全会审议通过的《中共中央关于党的百年奋斗重大成就和历史经验的决议》强调,党坚持实施创新驱动发展战略,把科技自立自强作为国家发展的战略支撑。

热障涂层是燃气涡轮发动机(航空发动机和燃气轮机)热端不见不可或缺的核心关键技术。等离子物理气相沉积技术(Plasma Spraying-Physical Vapor Deposition, PS-PVD)是在 APS 和 EB-PVD 技术基础上发展而来的可控气氛超低压环境下的喷涂/沉积技术,结合了等离子喷涂熔融沉积和物理气相沉积工艺的优点,可通过工艺调节实现典型的固-液-气三相复合沉积技术,制备柱状晶或准柱状结构的热障涂层陶瓷层,获得高效率、低成本、高隔热和长寿命的热障涂层,被认为是今后热障涂层发展的核心工艺技术之一。一代装备、一代材料,材料先行,该工艺适配的喷涂粉体材料我国尚未完全掌握制备技术,亟待突破,以满足先进航空发动机和燃气轮机对先进高效 PS-PVD 多相复合调控沉积涂层的应用需求。

结合 PS-PVD 加工工艺过程和热障涂层目标微结构(柱状晶、准柱状结构),其工艺过程中要求该工艺粉体具有高气化率、高气相比、稳定的输送(包括送粉和不粘附喷嘴内壁),同时结合 PS-PVD 系统特点和喷涂过程,该工艺粉体必须具有适宜的松装密度、自流动特性和一定强度保障稳定性输送至等离子发生器高温区。结合以上分析和系统研究研制验证,提出并研发了该粉体的制备技术,掌握了国产化粉体的工艺适配性规律,并投入了工艺及涂层性能系列验证,结果表明粉体控制一定的特性可以满足工艺需求和先进动力系统使用需求。

目前,在等离子物理气相沉积用热障涂层粉体材料方面尚无可供参考的国际、国内标准,因此,制定等离子物理气相沉积用热障涂层粉体材料的团体标准,规范专用材料,进一步提炼了等离子物理气相沉积用热障涂层粉体材料的质量控制要素、性能评价要素和供货技术条件,有利于促进本领域、本行业的发展。

3 国内外相关情况

等离子物理气相沉积技术(PS-PVD)商用化起源于2010年,美国NASA联合Metco公司开发了这一技术,后续在国内外掀起了研究热潮,被视为热障涂层陶瓷隔热功能层的第三代制备技术。目前国内该工艺技术的研究、研制和应用发展较快,据统计国内在PS-PVD工艺方面发表文章数量居于全球领先水平,在基础研究成果的指导下,国内优势单位如农机院、北航、航天703所等将该技术在航空、航天领域推广应用,获得了明显成效。该技术的应用缩短了国内外技术差距,已发展形成了自主化涂层材料、涂层制备技术并通过了应用验证。

该技术存在较强的前沿性,国外对于核心材料和涂层制备技术对国内严密封锁,国内外尚无相关标准,主要是由于核心制备技术被国外先进动力制造单位所垄断,一般以航空、航天、能源动力企业专属认证规范的形式形成准入和标准化,尚未有公开标准规范;我国已经形成了自主化材料-工艺技术体系基础,在新产业技术方面要打破国外垄断,需要进一步将现有成果总结、提炼和规划化,形成行业标准以促进行业技术进步。

4 编制原则

(1) 科学性原则。在制定本粉体材料技术条件时,充分总结现有的等离子物理气相沉积用热障涂层粉体材料的制备方法、粉体性能、粉体材料的工艺适配性规律以及涂层性能和验证成效,考虑理论和方法的科学性,科学制定与国内现有技术水平相衔接的等离子物理气相沉积用热障涂层粉体材料的质量控制要素、性能评价要素和供货技术条件。

(2) 实用性原则。在制定本粉体材料质量控制、性能评价条件时,充分考虑目前我国喷涂行业粉体材料现状,确保条件中提出的等离子物理气相沉积用热障涂层粉体材料性能指标及其测试方法具有可行性。

(3) 兼容性原则。

在制定本粉体材料时,充分考虑国家环境保护需求,使用环保的质量控制、

性能评价手段，进一步促进行业健康发展。

5 主要技术内容说明

5.1 层次框架

本技术条件正文由 6 部分组成, 包括:

- (1) 范围
- (2) 规范性引用文件
- (3) 术语与定义
- (4) 技术要求
- (5) 质量保证
- (6) 标志、包装、运输、贮存和质量证明书

5.2 技术内容

5.2.1 範圍

本文件规定了等离子物理气相沉积用热障涂层粉体材料的技术要求、质量保证, 标志、包装、运输、贮存和质量证明书。

本文件适用于等离子物理气相沉积用热障涂层粉体材料。

5.2.2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- | | |
|---------------|---|
| GB/T 1479.2 | 金属粉末 松装密度的测定 第 2 部分：斯柯特容量计法 |
| GB/T 4984 | 含锆耐火材料化学分析方法 |
| GB/T 13747.16 | 锆及锆合金化学分析方法 第 16 部分：氯量的测定 氯化银浊度法和离子选择性电极法 |
| GB/T 18115.1 | 稀土金属及其氧化物中稀土杂质化学分析方法 第 1 部分：镧中铈、镨、钆、钇、铈、钆、铈、钆、铈、钆、铈、钆、铈、钆和钆量的测定 |
| GB/T 19077 | 粒度分析 激光衍射法 |
| GB/T 21649.1 | 粒度分析 图像分析法 第 1 部分：静态图像分析法 |

GB/T 21782.5	粉末涂料 第 5 部分：粉末空气混合物流动性的测定
YB/T 5320	金属材料定量相分析 X 射线衍射 K 值法
YS/T 568.1	氧化锆、氧化钪化学分析方法 氧化锆和氧化钪含量的测定 苦杏仁酸重量法
YS/T 568.2	氧化锆、氧化钪化学分析方法 铁量的测定 磺基水杨酸分光 光度法
YS/T 568.3	氧化锆、氧化钪化学分析方法 硅量的测定 钼蓝分光光度 法
YS/T 568.4	氧化锆、氧化钪化学分析方法 铝量的测定 铬天青 S-氯化十 四烷基吡啶分光光度法
YS/T 568.6	氧化锆、氧化钪化学分析方法 钛量的测定 二安替吡啶甲烷 分光光度法
YS/T 568.8	氧化锆、氧化钪化学分析方法 氧化锆中铝、钙、镁、锰、钠、 镍、铁、钛、锌、钼、钒、钪量的测定 电感耦合等离子体发 射光谱法

5.2.3 技术条件

本技术条件对等离子物理气相沉积（PS-PVD）用热障涂层粉体材料成分组成，粉体外观，粉体粒度范围，中值粒径控制，松装密度、粉体流化因子、粉体晶体结构、粉体球形度等规定了具体要求。

其中，本文件技术要求中，8YSZ 粉体晶体结构主要为四方相，与国外产品有较大差异，国外 Metco 公司等等离子物理气相沉积 8YSZ 粉体晶体结构主要为单斜相。

5.2.4 质量保证

本技术条件对等离子物理气相沉积（PS-PVD）用热障涂层粉体材料，明确了质量一致性检验的组批、检验项目及取样和检验结果的判定，以及各类检验项目的检验方法，确保等离子物理气相沉积（PS-PVD）用热障涂层粉体材料性能评价的规范性、合理性。

5.2.5 标志、包装、运输、贮存和质量证明书

本技术条件对等离子物理气相沉积（PS-PVD）用热障涂层粉体材料产品的标志、包装、运输、贮存和质量证明书等方面进行了相应的规定，确保产品使用时的有效性。

6 对实施本标准的建议

本粉体材料技术条件作为表面工程行业标准，建议本技术条件发布实施后，行业主管部门组织对本文件进行宣贯。现阶段可作为指导性标准，未来应根据实施情况适时对本技术条件进行完善、修订与补充，并进一步申报相关国家标准编制以扩大使用规模。

7 与有关的现行法律、法规和强制性标准的关系

本技术条件与现行法律、法规和强制性标准没有冲突。