

doi:10.3969/j.issn.1674-7127.2024.03.007

航空行业热喷涂技术标准现状及发展探讨

张陆¹, 宋长虹²

(1. 北矿新材科技有限公司, 北京 102206; 2. 沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110063)

摘要:探讨了航空行业热喷涂技术标准的现状及其未来发展规划。首先概述了热喷涂技术在航空领域的重要性及其发展历程;随后详细分析了当前国家标准与航空行业内部标准的现状,指出其存在标准数量少、修订滞后、覆盖范围不全及技术指标不完备等问题。针对这些问题,提出了强化顶层战略设计、优化标准体系层次、以需求导向优先推进验收标准修订、加速技术前沿的探索及融合理论与实践等发展策略,旨在为航空行业热喷涂技术的标准化进程提供有力支持,推动其持续健康发展。

关键词:热喷涂技术;航空行业;技术标准;验收标准;工艺标准

中图分类号: TG174.4

文献标志码: A

文章编号: 1674-7127(2024)03-0050-05

Current Status of and Development Discussion on Thermal Spray Technology Standards in the Aviation Industry

ZHANG Lu¹, SONG Changhong²

(1. BGRIMM Advanced Materials Science & Technology Co., Ltd., Beijing 102206, China;

2. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110063, China)

Abstract: The current status and future development plans of thermal spraying technology standards in the aviation industry were discussed. An overview of the importance of thermal spraying technology in the aviation sector and its historical development was provided. Following this, a detailed analysis of the existing national standards and internal standards within the aviation industry was conducted, some issues such as the limited number of standards, delayed revisions, insufficient coverage, and incomplete technical specifications were highlighted. To address these problems, several development strategies are proposed, including strengthening top-level strategic design, optimizing the hierarchical structure of standards, prioritizing the revision of acceptance standards based on demand, accelerating the exploration of cutting-edge technologies, and integrating theory with practice. These strategies aim to provide robust support for the standardization process of thermal spraying technology in the aviation industry and promoting its continuous and healthy development.

Key words: thermal spraying technology; aviation industry; technical standards; acceptance standards; process standards.

0 引言

热喷涂技术,涵盖等离子喷涂、超音速火焰喷

涂、电弧喷涂等多种先进工艺,在航空领域,尤其是飞机与发动机部件的制造过程中占据核心地位,对提升装备性能至关重要。自“六五”计划起,我国便

收稿日期: 2024-09-09

作者简介: 张陆(1993-),女,硕士,工程师。E-mail: zhangluxc@bgrimm.com

积极推广该技术,并取得显著进展。随着航空发动机与重型燃气轮机研发加速,对热喷涂涂层的高温耐受性、耐磨性等提出更高要求,促使新技术如冷喷涂、等离子物理气相沉积等不断涌现。这些技术广泛应用于飞机起落架、压气机转子、涡轮叶片等关键部件的表面防护,显著增强了部件的隔热、封严、抗氧化及耐磨性能,成为航空装备设计与生产不可或缺的表面强化手段。各主机厂已配备先进热喷涂设备,形成稳定生产线,持续推动技术革新与应用深化。

1 航空行业热喷涂技术标准的现状

1.1 国家标准概览

在热喷涂技术领域,国家标准体系由验收准则与检测方法两大核心部分构成。验收标准方面,如《热喷涂粉末成分和供货技术条件》(GB/T 19356—2003)、《热喷涂火焰和电弧喷涂用线材、棒材和芯材分类和供货技术条件》(GB/T 12608—2003)和《热喷涂低压等离子喷涂镍-钴-铬-铝-钇-钽合金涂层》(GB/T 18681—2002)等,为行业提供了基本框架。然而,鉴于航空领域对热喷涂涂层及其原材料的严苛要求,这些国家标准在航空制造单位中的直接应用较为有限。在实际操作中,更多的是依据特定的型号标准或企业内部标准执行。

至于检测方法标准,国家标准体系内同样包含了一系列重要文件,包括《金属热喷涂层表面洛氏硬度试验方法》(GB/T 8640—1988)、《热喷涂层抗拉强度的测定》(GB/T 8641—1988)、《热喷涂抗拉结合强度的测定》(GB/T 8642—2002)和《金属热喷涂层剪切强度的测定》(GB/T 13222—1991)等。但鉴于航空行业对涂层性能评估的特殊需求,航空制造企业更倾向于遵循航空行业标准,如《热喷涂涂层硬度试验方法》(HB 5486—1991)、《热喷涂涂层结合强度试验方法》(HB 5476—1991)、《热喷涂涂层剪切强度试验方法》(HB 5474—1991)等,这些标准分别针对涂层硬度、结合强度、剪切强度及抗拉强度的试验方法。或者,企业会直接采用更为细致化的企业标准,以确保产品性能满足极端环境下的高要求^[1]。

1.2 航空行业内部热喷涂技术标准细分

据统计,航空领域的热喷涂技术标准总数达15项,其中包括5项验收标准、2项工艺规范及8项检测标准。然而,受限于项目规划和资金分配等因素,这些标准的修订工作普遍滞后,标龄偏长现象显著,

如图1所示。图1中清晰反映出,大部分现行标准集中在1990至1999年间发布,而自2010年以来新制定的标准仅占总数的两成。

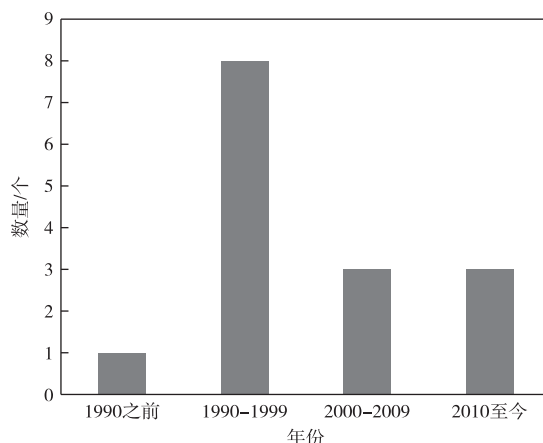


图1 热喷涂技术标准的标龄分布

Fig. 1 Distribution of standard ages for thermal spray technology

深入分析这些标准的年龄结构,不难发现许多标准的制定时间已超过20年,其适用范围主要局限于第二代航空武器装备的研发与生产。随着热喷涂技术的持续进步与新兴技术的不断涌现,当前的标准体系已难以充分满足第三代及更先进航空装备的研制与生产需求。具体而言,这些陈旧标准在应对新材料、新工艺及更高性能要求方面显得力不从心,亟需更新迭代以适应行业发展的新趋势,具体如下。

1.2.1 验收标准

热喷涂技术的验收标准面临多重挑战,其中首要问题在于其适用范围的局限性以及技术指标的不完善。以《热喷涂耐磨涂层质量检验》(HB 6738—1993)标准为例,该标准在涂层种类上存在遗漏,例如,WC-10Co4Cr、CoMoCrSi及NiAlW等关键牌号未被纳入,且技术指标体系不完整,忽略了弯曲性能、残余应力、耐磨性等关键参数,同时显微组织图像的呈现也需进一步丰富和完善。类似地,《热喷涂封严涂层质量检验》(HB 7236—1995)、《热喷涂热障涂层质量检验》(HB 7269—1996)等标准也存在牌号不全及技术指标缺失的问题,如NiCrAlY/PHB、AlSi-PHB等涂层的缺失,以及对球形孔洞尺寸、外观细化要求不足,显微组织及外观图片的缺乏等,这些均难以满足现代涂层验收的高标准要求。

此外,质量保证体系的缺失是另一大痛点。现有标准,例如,《热喷涂耐磨涂层质量检验》(HB 6738—1993)、《热喷涂封严涂层质量检验》(HB

7236—1995)等,均未详尽规定鉴定检验与质量一致性检验的具体分类与规则,导致质量控制流程存在漏洞。同时,关于产品的包装、运输及质量证明文件的交付准备要求也鲜有涉及,这些环节的缺失可能影响涂层产品的最终应用效果。鉴于热喷涂涂层性能深受原材料影响,当前标准体系中对粉末、丝材等原材料的验收要求亦显不足。因此,热喷涂技术验收标准的全面升级与细化已成为行业发展的迫切需求^[2]。

1.2.2 工艺标准

当前,热喷涂技术的工艺标准仅有两份在案,这些标准面临技术落后与覆盖范围不足的问题,具体表现在以下几个维度:

一方面,技术陈旧现象显著。以《航空发动机封严涂层涂覆工艺》(HB/Z 5031—77)为例,该标准主要关注涡喷与涡扇发动机早期使用的七种封严涂层涂覆方法,然而,随着涂层技术的飞速进步,标准中提及的低温封严涂层在航空发动机领域已被逐渐淘汰,取而代之的是铝硅/聚苯酯类高效可磨耗封严涂层或氧化铝类耐磨封严涂层,这凸显了标准更新滞后于技术发展的现状。

另外一方面,工艺标准及检验要求的全面性有待提升。《热喷涂工艺质量控制》(HB 20035—2011)虽构建了热喷涂工艺质量控制的框架,涵盖了人员、设备、材料、环境、涂层设计等多个方面,但未能全面纳入如低压等离子喷涂、超音速火焰喷涂、爆炸喷涂等当代主流技术。此外,部分指标设定过于严苛,例如,过渡区控制在0~3 mm的硬性规定,忽略了实际生产中可能遇到的灵活性与适应性需求,建议借鉴国际转包经验,调整过渡区控制标准,使之更加合理与可行。

此外,随着《热喷涂涂层金相检验》(HB 20195—2014)标准的实施,对于涂层金相组织的检测提出了更高的要求。因此,建议对现有工艺标准中的相关部分进行细化与完善,确保涂层金相试样的制备与检验流程符合最新标准,从而进一步提升涂层质量评估的科学性与准确性。

1.2.3 专用检测标准

当前,涂层检测标准普遍面临标龄过长的问題,多数标准制定于30年前,即便是最新的标准也已历经18年。这些老旧标准未能及时吸纳新兴的检测技术和材料,也未对新型检测技术的适用性做出明确规定,具体缺陷体现在以下几方面:

一是检测技术更新滞后。以《热喷涂涂层硬度

试验方法》(HB 5486—1991)为例,其发布至今已超过25年,未能纳入布氏硬度测试等现代检测方法,且对试样材料、制备、厚度及表面粗糙度的要求已显陈旧,同时忽略了新型硬度计及其试验参数的引入。二是检测用材料与设备标准亟待更新。例如,该试验方法标准仅提及液态环氧树脂黏结剂,未涵盖,例如,FM-1000胶等新型固态黏结剂,且试样规格已不适应新型涂层的测试需求。《热喷涂涂层剪切强度试验方法》(HB 5474—1991)同样因发布时间久远,未能反映测试设备与试样加工精度的最新进展,新型胶黏剂的应用指导也付之阙如。三是新型技术适用性界定模糊。例如,该标准在制定时未考虑超音速火焰喷涂、冷喷涂等现代热喷涂技术的适用性,导致其在评估这些技术制备的涂层时存在局限性。《高温合金及高温防护涂层的抗氧化性能测定方法》(HB 5258—2000)亦存在类似问题,其试验方法种类、试样适用性、计算公式及评级标准均未能充分满足当前高温合金及其防护涂层测试的高要求。此外,《燃气热腐蚀试验方法》(HB 7740—2004)在清除腐蚀产物、试样适用性、燃油及化学药品选择等方面也需根据技术进步进行相应调整^[3]。

由此可见,现行涂层检测标准亟需全面修订,以纳入最新的检测技术与材料,明确新型技术的适用性,确保检测结果的准确性和可靠性,从而满足现代航空装备对涂层质量的高标准要求。

1.3 现有标准采用情况与效果评估

热喷涂技术标准在航空领域面临着双重挑战:一是标准数量匮乏且修订进程迟缓,导致现有标准的采纳率低下,甚至在某些关键领域出现标准空白,迫使型号产品研发与生产中频繁依赖型号标准、企业标准、技术协议等非统一化文件;二是调研揭示,这些替代性标准普遍存在技术条款不一致、协调性欠佳的问题,且部分标准的质量保障水平参差不齐,这无形中增加了航空装备质量稳定性与可靠性的不确定性风险。更为严重的是,这种状况削弱了技术标准的引领与导向功能,限制了先进技术在型号研制过程中的有效应用与推广,阻碍了技术创新与产业升级的步伐。

2 航空行业热喷涂技术标准未来发展规划

2.1 强化顶层战略设计,优化标准体系层次

鉴于航空零部件面临极端服役环境的独特性,强烈建议将热喷涂验收与工艺标准的核心聚焦于航

空行业标准,以精准对接行业需求,确保标准的适用性与前沿性。同时,针对跨行业普遍适用的热喷涂验收标准,一旦技术门槛达到共通标准,应积极推动其升级为国家标准或国家军用标准,例如,《树脂基复合材料用喷涂金属涂层规范》(GJB 10305—2021)的成功案例,通过整合共性需求,实现标准的通用化与系列化,提升整体技术水平。

在热喷涂检测方法标准的制定上,鉴于其固有的通用特性,主张秉持军民融合的原则,优先采用国家标准,减少重复建设,促进资源共享。当然,对于特定行业内的特殊需求,应灵活处理,但原则上应避免无谓的航空行业标准重复制定,以节约资源,提高标准制定的效率与质量。此外,还应加强标准的国际化对接,借鉴国际先进经验,不断完善我国热喷涂技术的标准体系,为航空工业乃至整个制造业的高质量发展提供坚实支撑^[4]。

2.2 需求导向,优先推进验收标准的修订与制定

鉴于当前热喷涂技术领域标准总量有限,且以往标准的修订工作负担相对较轻,而面对新型热喷涂技术的迅猛发展,标准缺失问题愈发凸显。因此,应采取需求导向的策略,精准识别并优先满足行业对于新型热喷涂技术的标准化需求,意味着需要对现有的标准化需求进行细致分类与排序,基于紧迫性和重要性,分批启动并加速相关标准的制定工作。

特别需要注意的是,针对航空行业内部新型热喷涂涂层标准是严重匮乏的,应将其验收标准的制修订置于首要位置,不仅能够为新型涂层的广泛应用提供权威的验收依据,还能有效保障型号产品的按时交付与质量稳定性。在此过程中,需注重与产业链上下游的紧密协作,确保标准的科学性与实用性。在完成验收标准更新的基础上,应适时启动并协调推进工艺标准和检测标准的制修订工作,形成覆盖热喷涂全链条的标准化体系,这将有助于提升整体技术水平,还能为新技术、新工艺的推广应用提供坚实的支撑,进一步推动我国航空工业乃至制造业的高质量发展。

2.3 加速技术前沿探索,为新兴技术标准铺路

随着新一代飞机与航空发动机技术的飞跃,对热喷涂涂层的性能要求达到了前所未有的高度。全球范围内的热喷涂装备正朝着高能量密度、高喷涂速度及高效率的方向迈进,同时,轴向送粉、多功能集成及实时监控等前沿技术正逐步成为热喷涂领域的新趋势。这些技术的革新不仅拓宽了喷涂材料的应用范畴,还催生了纳米、非晶、多功能(包括导热、

催化、导电、绝缘、超导、隔热、隐身等)等一系列创新热喷涂涂层,为航空工业带来了前所未有的发展机遇。

为顺应这一趋势,必须加大技术研发投入,深入探索热喷涂技术的最新进展,特别是针对封严涂层和环境障涂层等关键领域,开展系统性的技术与验证工作,不仅包括涂层材料的选择与优化、制备工艺的精细化控制,还涵盖涂层性能的全面评估与表征。通过这些努力,将为制定科学合理的验收与工艺标准奠定坚实的技术基础^[5]。此外,针对封严涂层显微组织评定等检测技术的空白,应积极组织科研力量,开展专项研究,填补这一领域的技术空白。通过提升检测技术的精准度与可靠性,将为涂层验收提供更加有力的技术保障,确保航空装备的质量与安全。

2.4 融合理论与实践,破解工艺标准制定的技术瓶颈

当前,我国飞机及航空发动机制造领域的领军企业普遍采用进口热喷涂设备,以满足多样化的军品型号与转包生产任务的需求,并在此过程中积累了丰富的实战经验。尽管在涂层种类、基本工艺流程及工艺参数控制方面存在共通性,但具体到每台设备、每项任务时,热喷涂工艺参数的设定却千差万别,难以形成统一的规范体系,给工艺标准的制定带来了巨大挑战。为破解这一技术瓶颈,提议借鉴国际先进的 Nadcap(国家航空航天和国防合同方授信项目)检查清单要求,结合国内实际生产情况,灵活制定热喷涂工艺控制标准。此标准应聚焦于工艺实施的关键要点,而非拘泥于具体的参数数值,以此实现不同设备、不同场景下工艺标准的兼容性与灵活性。通过这一策略,既能保留企业在工艺控制上的自主性与创新性,又能确保整体工艺水平的标准化与一致性,为航空装备的高质量生产提供有力支撑。

3 结束语

航空领域热喷涂技术标准的现状面临诸多挑战,但其发展前景依然广阔。通过上述策略的实施,有信心克服当前困难,推动热喷涂技术标准体系的不断完善与升级。同时,将为航空工业的高质量发展提供坚实的技术支撑,促进技术创新与产业升级,助力我国从航空大国向航空强国迈进。

参考文献

- [1] 陈永雄,罗政刚,梁秀兵,等.热喷涂技术的装备应用现

- 状及发展前景[J]. 中国表面工程, 2021, 34(4): 12-18.
- CHEN Y X, LUO Z G, LIANG X B, et al. Development status and prospect on equipment application of thermal spray technology[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(4): 12-18.
- [2] 高俊国, 张欢欢, 张昂. 航空领域热喷涂碳化钨涂层国内外标准对比分析[J]. 标准科学, 2021(5): 84-89.
- GAO J G, ZHANG H H, ZHANG A. Comparative analysis of domestic and foreign standards for thermal sprayed tungsten carbide coating in aviation field[J]. Standard Science, 2021(5): 84-89.
- [3] 舒琴, 何建洪, 韩建兴, 等. 热喷涂航空发动机用耐磨涂层的制备方法及其性能研究[J]. 中国金属通报, 2020(9): 91-92.
- SHU Q, HE J H, HAN J X, et al. Research on the preparation methods and performance of wear-resistant coatings for thermal spray in aircraft engines[J]. China Metal Bulletin, 2020(9): 91-92.
- [4] 王磊. 热喷涂材料在航空发动机中的运用探讨[J]. 冶金与材料, 2020, 40(4): 178, 180.
- WANG L. Discussion on the application of thermal spray materials in aerospace engines[J]. Metallurgy and Materials, 2020, 40(4): 178, 180.
- [5] 李长久. 热喷涂技术应用及研究进展与挑战[J]. 热喷涂技术, 2018, 10(4): 1-22.
- LI C J. Applications, research progresses and future challenges of thermal spray technology[J]. Thermal Spray Technology, 2018, 10(4): 1-22.

(上接第 27 页)

- [9] 党晓凤, 李尧, 席生岐, 等. 机械合金化制备 304 不锈钢显微组织与性能研究[J]. 铸造技术, 2020, 41(6): 509-512, 517.
- DANG X F, LI Y, XI S Q, et al. Study on microstructure and properties of 304 stainless steel prepared by mechanical alloying, HIP and solid solution heat treatment[J]. Foundry Technology, 2020, 41(6): 509-512, 517.
- [10] 帅歌旺, 郭正华, 黄惠珍, 等. 机械合金化制备过饱和固溶体的研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(增刊 2): 201-203, 214.
- SHUAI G W, GUO Z H, HUANG H Z, et al. Research progress in supersaturated solid solution prepared by mechanical alloying[J]. Materials Reports, 2008, 22(Suppl. 2): 201-203, 214.