

高弹性聚氨酯耐磨耐砂蚀防护涂层的研究

李超宇¹, 田继斌¹, 张全伟¹, 刘岳麟¹, 马艳青^{1,3}, 王文全²

(1.中昊北方涂料工业研究设计院有限公司,兰州 730101;

2.陕西飞机工业有限责任公司,陕西 汉中 723213; 3.天津大学,天津 300350)

摘要: 针对戈壁风沙环境中高速旋转发动机增压器铝合金叶轮面临的严峻砂石冲蚀磨损问题,本研究设计并开发了一种高性能弹性聚氨酯基防护涂层。该涂料体系旨在为轻质铝合金基材提供有效屏障,抵御高速砂粒的反复冲击,防止基材过早失效。通过优化聚氨酯树脂的分子结构并复配高性能耐磨填料,显著提升了涂层的动态抗冲击韧性、弹性恢复率及涂层强度。系统评价了涂层在模拟戈壁工况下的关键性能:采用高速砂粒喷射试验模拟极端冲蚀环境,结果表明,优化涂层在高速砂石冲击下展现出优异的耐砂蚀性能,其质量损失率显著低于其他类型涂层。本研究为发动机关键旋转部件在严苛沙尘环境中的长效防护提供了一种高性能弹性聚氨酯涂层解决方案,有效延长叶轮服役寿命。

关键词: 增压器叶轮; 弹性涂料; 耐砂蚀涂料

中图分类号: TQ637 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9548(2025)12-0020-05

Study on High Elastic Polyurethane Wear and Sand Erosion Resistant Protective Coating

LI Chao-yu¹, TIAN Ji-bin¹, ZHANG Quan-wei¹, LIU Yue-lin¹, MA Yan-qing^{1,3}, WANG Wen-quan²

(1.North Paint & Coatings Industry Research and Design Institute Co., Ltd. of China Haohua, Lanzhou 730101, China;

2.Shaanxi Aircraft Industry Co., Ltd., Hanzhong 723213, Shaanxi, China; 3.Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: To address the severe abrasive erosion of aluminum alloy turbocharger impeller vanes in high-speed rotating engines operating within arid desert environments, this study developed a high-performance elastic polyurethane-based protective coating. The coating system provides effective barrier protection for lightweight aluminum alloy substrates against repeated impacts from high-speed sand particles, preventing premature material failure. Through molecular structure optimization of polyurethane resin and incorporation of high-performance wear-resistant fillers, the coating's dynamic impact toughness, elastic recovery rate and structural strength were significantly enhanced. Key performance evaluations under simulated desert conditions demonstrated that optimized coatings exhibited superior sand erosion resistance under high-speed sand impacts, with quality loss rates markedly lower than conventional coatings. This research provides an innovative elastic polyurethane coating solution for long-term protection of critical rotating engine components in harsh desert environments, effectively extending impeller service life.

Key words: turbocharger impeller; elastic coatings; sand erosion resistant coating

0 引言

发动机增压器叶轮是涡轮增压系统的核心作动部

件,它由一组围绕中心轮毂精密排列的叶片组成。当废气涡轮增压器的涡轮被废气驱动旋转时,通过一根轴直接带动叶轮同步高速旋转,转速可达每分钟十几万甚至数十万转。叶轮高速旋转时,叶片之间的通道产生低压区,将新鲜的空气从进气道吸入,在叶轮叶片带动下,从叶轮的边缘被甩向中心,在这个离心过程中,空

收稿日期: 2025-09-30

作者简介: 李超宇(1989—),男,本科,工程师,主要从事水性工业涂料产品的开发工作。E-mail:li_chao_yu@126.com。

气的速度和压力急剧增加。其功能是将涡轮传递的旋转机械能,通过空气动力学原理转化为进气工质的压力能与热能,实现为发动机提供高密度、高质量流量进气的核心目标^[1]。

表面形貌对增压器叶轮的使用寿命、性能和稳定性有着重要影响^[2]。在戈壁荒漠环境中,高速运动的砂石颗粒对增压器压气机叶轮构成极其严重的固体颗粒侵蚀与机械冲击危害,这种危害是力学、材料学和流体动力学共同作用的破坏性过程,其严重性远超常规磨损。其损伤机理复杂且相互关联,包括微观切削与塑性变形:戈壁砂石主要成分为石英(SiO₂),其莫氏硬度高达7,远高于压气机叶轮常用的铸造铝合金(莫氏硬度3)的硬度,高硬度的尖锐砂粒如同微型刀具,对叶片表面进行“微切削”和“犁削”,形成密集的划痕和磨蚀沟槽,同时冲击会导致材料发生塑性变形,形成凹坑;脆性剥落与材料流失:当冲击能量巨大或攻角接近垂直时,撞击点会产生极高的赫兹接触应力,导致材料以微观碎片的形式从基体上剥落,反复冲击会形成并扩展微观裂纹,最终导致材料大面积流失,叶片壁厚减薄,叶型轮廓改变;疲劳裂纹萌生与扩展:每一次颗粒冲击都是一个应力循环,无数次的冲击构成了高周疲劳载荷,冲击凹坑的底部会形成严重的应力集中,裂纹在交变应力下逐步扩展,可能导致叶轮疲劳断裂,这是最危险的失效模式之一^[3-4]。

在应对高速砂石冲蚀的防护材料体系中,弹性聚氨酯涂层因其独特的能量耗散机制,当砂石以高速撞击叶轮时,弹性涂层通过发生大应变弹性形变来吸收并耗散撞击体的动能,成为研究与应用热点。基于弹性涂层技术的增压器叶轮抗外来物损伤防护机理,本研究提出了一种用于保护发动机增压器叶轮铝合金的弹性聚氨酯耐磨耐砂蚀涂层,采用聚己内酯多元醇复配聚醚胺与高弹性固化剂交联反应配合耐磨润滑填料制备的具有优异回弹性、断裂伸长率、拉伸强度及耐磨性的弹性涂层体系,能够对增压器叶轮铝合金基材的耐磨抗冲蚀性能起到优异防护作用,保证发动机的安全稳定运行。

1 试验部分

1.1 试验原材料及仪器设备

试验原材料:PCL3057 聚己内酯多元醇:工业级,湖南聚仁化工新材料科技有限公司;NH1420 聚天门冬氨酸酯:工业级,德国科思创;CK-2023 液体莫卡:工业级,广州科成环保科技有限公司;X10T-A 聚醚胺:工业级,上海创遂化工科技有限公司;DBTDL 二月桂酸二丁基锡催化剂:工业级,天津化学试剂三厂;C611 普通碳黑:工业级,江苏亿腾化工有限公司;

SE1430 增强型石墨烯:工业级,常州第六元素材料科技股份有限公司;32500 分散剂:工业级,美国路博润;BYK-306 润湿剂、BYK066N 消泡剂、BYK-358N 流平剂:工业级,德国毕克;乙酸正丁酯:工业级,山东金沂蒙集团有限公司;BFJ-1706 弹性防冲击涂料底漆、BFJ-2000 弹性聚氨酯固化剂:工业级,中昊北方涂料工业研究设计院有限公司。

仪器设备 DHG-9145A 电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;BGD-740/1 高速分散机、BGD-755/3 篮式砂磨机、BGD-241 刮板细度计、BGD-263 漆膜干燥时间试验器、BGD-503 附着力划格板,标格达精密仪器(广州)有限公司;STR-1010 箱式普压喷砂机,张家港市斯特尔涂装设备有限公司;3M600 型附着力测试胶带,美国思高;PosiTest AT-A 数显全自动拉拔式附着力测试仪,美国狄夫斯高;Minitest 600 涂层测厚仪,德国 EPK;BL-2000F 电子天平,美国西特;3365 型电子万能材料试验机,美国因斯特朗;TR-471-1000 空气射流冲蚀试验机,美国杜康姆。

1.2 弹性聚氨酯耐砂蚀涂料的制备

表1为弹性聚氨酯耐砂蚀涂料的参考配方。将基料树脂、助剂以及有机溶剂依次加入研磨罐内,600 r/min 高速分散 10 min 搅拌均匀;将高速分散机转速降至 300 r/min,在搅拌状态下缓慢加入碳黑、石墨烯等粉料,再将分散机转速提升至 1 000 r/min,继续搅拌 10 min;采用篮式砂磨机将配好的黑色树脂浆进行研磨,直到细度 $\leq 30 \mu\text{m}$,以 120 目滤网过滤出料,即制备完成弹性聚氨酯耐砂蚀涂料甲组分。将弹性固化剂与有机溶剂加入分散缸中,600 r/min 高速分散 15 min 搅拌均匀,以 120 目滤网过滤出料,弹性聚氨酯耐砂蚀涂料乙组分制备完成。

表1 弹性聚氨酯耐砂蚀涂料参考配方

组分	原材料	质量分数/%
甲组分	基料树脂	5~30
	碳黑	1~3
	耐磨填料	0.3~0.7
	分散剂	0.1~0.5
	润湿剂	0.01~0.1
	流平剂	0.01~0.1
	消泡剂	0.01~0.1
	催化剂	0.01~0.1
	有机溶剂	15~30
乙组分	弹性固化剂	40~70

1.3 试验样板的制备

单道涂层样板采用马口铁板作为基材,样板用 0[#]

刚玉砂布打磨粗糙,用清洗溶剂擦拭干净,采用空气喷涂的方法制备弹性聚氨酯耐砂蚀涂层,漆膜厚度控制在 $(23\pm 3)\ \mu\text{m}$,恒温 $(23\pm 2)\ ^\circ\text{C}$ 干燥 12 h 后,在 $(80\pm 2)\ ^\circ\text{C}$ 下烘烤 4 h,放置待用。

使用 5 mm 厚的专用铝合金试板(耐喷砂试板为 50 mm×50 mm 方形试板、耐磨试板为直径 100 mm 圆形试板)喷涂配套涂层,喷涂前试板采用阿洛丁化学氧化处理(碱洗 5 min,酸洗 5 min,阿洛丁溶液 1 min),表面用去离子水冲洗干净,以空气喷涂方式喷涂 BFJ-1708 弹性防冲击涂料底漆,涂层厚度控制在 30~40 μm ,表干 1 h 后继续以空气喷涂方式喷涂高弹性聚氨酯耐磨耐砂蚀涂料,涂层厚度控制在 200~250 μm ,恒温 $(23\pm 2)\ ^\circ\text{C}$ 干燥 12 h 后,于 $(80\pm 2)\ ^\circ\text{C}$ 烘箱中烘烤 4 h,放置待用。

以抽真空的方式抽除混合好的甲、乙组分内的气泡,然后将配制好的涂料在四氟乙烯槽型模具中进行浇注,漆膜厚度控制在 500~1 000 μm ,恒温 $(23\pm 2)\ ^\circ\text{C}$ 干燥 12 h 后,将弹性漆膜取下,于 $(80\pm 2)\ ^\circ\text{C}$ 烘箱中烘烤 4 h 后,用于拉伸强度以及拉断伸长率的测试。

1.4 性能指标及测试

该涂料性能指标测试按表 2 进行。

表 2 高弹性聚氨酯耐磨耐砂蚀防护涂料性能指标

项目	性能指标	检测标准
涂料外观	无结皮和搅不开的硬块	目视观察法
细度/ μm	≤ 20	GB/T 1724—2019
适用期/h	≥ 2	GB/T 31416—2015
表干时间/h	≤ 2	GB/T 1728—2020
实干时间/h	≤ 12	GB/T 1728—2020
漆膜颜色及外观	黑色,平整光滑	目测观察法
划格附着力/级	≤ 1	GB/T 9286—2021
拉开法附着力/MPa	≥ 5	GB/T 5210—2006
柔韧性/mm	1	GB/T 1731—2020
耐冲击性/cm	50	GB/T 1732—2020
耐磨性/mg	≤ 10	GB/T 1768—2006
拉伸强度/MPa	≥ 20	GB/T 528—2009
拉断伸长率/%	≥ 300	GB/T 528—2009
拉断永久变形/%	≤ 20	GB/T 528—2009
沙尘试验	50 h 无漏底	GJB 150.12A—2009

以下为需特殊说明条件的测试项目,涂层耐磨性测试按 GB/T 1768—2006 进行,选用 CS-10 砂轮,配重/圈数为 500 g/1 000 r;涂层拉伸强度、拉断伸长率和拉断永久变形测试按 GB/T 528—2009 进行,用 I A 型刀具裁成哑铃形状,在万能材料试验机上测试,速度

为 500 mm/min;由于沙尘试验测试费用昂贵、周期较长,本研究前期研究以喷砂的方式进行模拟试验,喷砂压力为 0.4~0.6 MPa,喷砂角度为 90° ,砂砾为白刚玉砂。

2 结果与讨论

2.1 基料树脂的选择

弹性聚氨酯材料在抗冲蚀、耐磨损等方面具备天然优势,一般情况下,弹性涂层在受到外力作用时,会产生内应力导致弹性形变,去除负载后,弹性表面将恢复其原始形貌,这种弹性形变在交替吸收和释放输入的机械能中充当反向能量存储,从而避免了材料受冲击、磨损的破坏,能够满足发动机叶轮在高速砂砾冲击下的高磨损场景的长效防护需求^[5]。选用不同种类的基料树脂与 BFJ-2000 弹性聚氨酯固化剂,在 $n(\text{—NCO}):n(\text{—OH})=1.05:1$ 的条件下制备漆膜,性能测试结果见表 3,其中 A1 为聚己内酯多元醇;A2 为聚天门冬氨酸酯;A3 为液体莫卡;A4 为聚醚胺;B 为弹性聚氨酯固化剂。

从表 3 的测试结果中可以看出,单纯的弹性聚氨酯虽然弹性性能优异,但是由于其交联密度不足导致耐磨性、耐喷砂性很差,纯聚脲具有优异的强度,但是反应速度过快,无法进行普通场景下的施工工艺。本研究选用弹性聚氨酯和聚脲的混合涂料体系,既可保证涂层具有弹性聚氨酯的高伸长率和回弹性,又具有聚脲涂层的高强度和耐磨性,并且能够避免聚脲树脂的适用期短的劣势,可采用常规的空气喷涂方式完成施工。

2.2 聚己内酯多元醇与聚醚胺树脂当量比对涂料性能的影响

聚己内酯多元醇由小分子醇与己内酯单体聚合而成,其树脂相容性突出,结构以脂肪族直链聚酯为主,具有良好的韧性以及回弹性,氨基树脂与异氰酸酯树脂生成脲键(—NH—CO—NH—)极性极强,分子间能形成大量的氢键,这使得聚脲材料具有极高的拉伸强度和撕裂强度,同时抗冲击和耐磨性能非常出色^[6]。

羟基树脂与氨基树脂的不同当量比对涂料性能的影响见表 4。由表 4 可知,羟基树脂含量较多时,涂层较软,耐磨性、耐喷砂性均有不足;氨基树脂较多时,涂层耐磨性优异,但由于较硬而缺少弹性形变,不能吸收砂石冲击的能量而被磨损较多。其中当 $n(\text{—OH})$ 与 $n(\text{—NH}_2)$ 当量比为 1:1 时,其各项性能最为优异。

2.3 扩链系数 R 对涂层性能的影响

根据表 3~4 测试结果,以 A1 和 A4 为基料树脂与弹性固化剂进行涂料配制,改变扩链系数 R 的数值, $R=n(\text{NCO}):n(\text{OH})$,所制备的弹性涂层各项性能如表 5 所列。

表3 性能测试结果

项目	A1/B	A2/B	A3/B	A4/B	A1+A2/B	A1+A3/B	A1+A4/B
胶化时间/h	24	6	0.25	0.25	12	2	2
柔韧性/mm	1	1	1	1	1	1	1
耐冲击性/cm	50	50	50	50	50	50	50
拉伸强度/MPa	3.1	9.6	40.5	44.1	7.8	30.2	33.2
拉断伸长率/%	703	323	405	391	410	483	477
拉断永久变形/%	5	>100	30	35	35	10	10
耐磨性/mg	漏底	30	胶化太快	胶化太快	41	3	2
耐喷砂性	30 s 漏底	30 s 漏底	胶化太快	胶化太快	30 s 漏底	10 min 厚度损失 20 μm	10 min 厚度损失 13 μm

表4 羟基树脂与氨基树脂当量比对涂料性能的影响

项目	$n(\text{OH}):n(\text{NH}_2)$				
	3:7	4:6	5:5	6:4	7:3
胶化时间/h	1	1.5	2	2.5	3
柔韧性/mm	1	1	1	1	1
耐冲击性/cm	50	50	50	50	50
拉伸强度/MPa	38.8	35.7	33.2	27.0	18.9
拉断伸长率/%	431	450	477	482	501
拉断永久变形/%	18	15	10	8	7
耐磨性/mg	1	2	2	5	9
耐喷砂性	10 min 厚度损失 20 μm	10 min 厚度损失 20 μm	10 min 厚度损失 13 μm	10 min 厚度损失 22 μm	10 min 厚度损失 40 μm

表5 R 值对涂层性能的影响

项目	R 值				
	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15
柔韧性/mm	1	1	1	1	1
耐冲击性/cm	50	50	50	50	50
拉伸强度/MPa	25.6	28.7	34.5	31.0	28.1
拉断伸长率/%	495	491	470	499	511
耐溶剂擦拭	掉色明显	掉色	无掉色	无掉色	无掉色
耐喷砂性	10 min 厚度损失 23 μm	10 min 厚度损失 21 μm	10 min 厚度损失 12 μm	10 min 厚度损失 18 μm	10 min 厚度损失 28 μm

随着 R 值的增加,漆膜的拉伸强度先增大后减小、拉断伸长率先降低后升高。当扩链系数 $R < 1$ 时,多余的含活泼氢化合物未完全与异氰酸酯反应,在体系中起到了增塑剂的作用,整体漆膜中胺酯键、脲键含量减少,并且未反应掉的氨基树脂、羟基树脂,会使漆膜发黏、发软,导致弹性涂层拉伸强度减小、伸长率升高,耐溶剂擦拭会有部分溶解。当扩链系数 $R > 1$ 时,固化剂与基料树脂反应后还有剩余,会使漆膜中固化剂的弹性链段增加,弹性涂层拉伸强度减小、伸长率升高,对力学性能产生影响^[7]。由表 5 可知,当 R 值为 1.05 左

右时,化学交联与分子间氢键产生的物理交联起到协同作用,能很好地提升涂膜的力学性能。

2.4 耐磨填料对涂层性能的影响

本研究以石墨烯作为耐磨填料。石墨烯是一种质轻、坚韧的片状材料,在外应力作用下抵抗变形能力的模量可达 1 TPa,受力时抵抗破坏能力的强度约为 130 GPa,其在涂层中形成的层状结构可为涂层提供优异的抗冲击性能;石墨烯具有稳定的杂化结构,且尺寸小,易填充到材料中的微小空隙中,与弹性涂层协同作用下,能在被防护面与腐蚀介质间形成连续、惰性的物

理阻隔层,起到很强的屏蔽作用;石墨烯具有良好的导热性,在涂层体系被砂石冲击时,能及时将动能转化的

热能传导消散,有效减缓能量集中对涂层带来的影响。表 6 为石墨烯不同加量对涂层性能的影响。

表 6 耐磨填料加量对涂层性能的影响

项目	耐磨填料加量/%				
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
柔韧性/mm	1	1	1	1	
耐冲击性/cm	50	50	50	50	
拉伸强度/MPa	35.6	35.6	39.2	39.7	甲组分浆料黏度过大,无法使用
拉断伸长率/%	475	475	462	458	
拉断永久变形/%	9	9	10	13	
耐喷砂性	10 min 厚度损失 12 μm	10 min 厚度损失 12 μm	10 min 厚度损失 8 μm	10 min 厚度损失 9 μm	

由表 6 可知,当耐磨填料加量逐渐增大时,漆膜拉伸强度增大,拉断伸长率降低,拉断永久变形增大,耐喷砂性增强。当加量增加至 0.5%、0.6%时,性能变化不大,但从涂料制备和施工的角度来看,当加量达到 0.6%时,涂料甲组分的配制黏度增加较为明显,研磨效率下降较多,当加量达到 0.7%时,涂料甲组分黏度过大,已无法进行研磨。最终,确定耐磨填料加量为 0.5%。

2.5 高弹性聚氨酯耐磨耐砂蚀防护涂料性能

以 X10T-B 氨基树脂与 PCL3057 聚己内酯多元醇按当量比 1:1 作为基料树脂,BFJ-2000 弹性聚氨酯固化剂作为交联固化剂,甲组分与乙组分按 R=1.05:1,以 0.5%加量的 SE1430 增强型石墨烯为耐磨填料,制备的涂料综合性能见表 7。

表 7 高弹性聚氨酯耐磨耐砂蚀防护涂料性能

项目	测试结果
涂料外观	无结皮、无沉底
细度/μm	≤20
适用期/h	≥2
表干时间/h	≤2
实干时间/h	≤12
漆膜颜色及外观	黑色,平整光滑
划格附着力/级	0
拉开法附着力/MPa	15.4
柔韧性/mm	1
耐冲击性/cm	50
耐磨性/mg	2
拉伸强度/MPa	39.1
拉断伸长率/%	464
拉断永久变形/%	10
沙尘试验	50 h 无漏底

3 结语

研究表明,当该涂料 R 值为 1.05、X10T-B 氨基树脂与 PCL3057 聚己内酯多元醇当量比为 1:1、耐磨填料加量为 0.5%时,涂层具有最佳的弹性力学性能。其中 PCL3057 聚己内酯多元醇和 BFJ-2000 弹性聚氨酯固化剂为涂层体系提供了优异的拉断伸长率和回弹性,羟基树脂、氨基树脂与弹性固化剂反应生成的氨基甲酸酯基团、脲基,同时复配耐磨填料,为涂层体系提供了优异的拉伸强度、耐磨性和耐砂蚀性能。该涂料对发动机叶轮铝合金基材起到了优异的保护作用。

参考文献:

- [1] 李飞.涡轮增压器叶轮零件的动平衡测试系统开发[D].北京:北方工业大学,2025.
- [2] XU B,GAN W M, HE Y F, et al.Five-axis numerical control of electrochemical mechanical polishing of an integral impeller [J].International Journal of Electrochemical Science, 2020(15):12504-12523.
- [3] 杨天南,张轲,郑培英,等.沙尘对压气机叶片的侵蚀及性能影响[J].航空发动机,2023(5):57-63.
- [4] 龚情,范金娟,黄遥,等.直升机旋翼桨叶防护材料耐砂蚀评价技术研究进展[J].高科技纤维与应用,2020(6):33-38.
- [5] 徐文婷,傅平安,欧军飞.耐久超疏水表面的研究进展[J].表面技术,2023(11):23-39.
- [6] 张全伟,郭绍华,宋欢欢,等.含有聚己内酯为软段的弹性聚氨酯树脂合成[J].现代涂料与涂装,2024(5):1-6.
- [7] 李超宇,王翀,田继斌,等.橡胶风挡保护涂料的研制和应用[J].现代涂料与涂装,2024(9):1-5.