

中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7 月 5-8 日, 2025

福建 厦门

E09-表面工程分会
E09-Surface Engineering of Advanced Materials

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



E09-材料表面工程

分会主席：刘敏、李长久、郭洪波、汪爱英、邓畅光、段海涛

E09-01**燃气涡轮发动机高温防护涂层研究进展**

宫声凯

北京航空航天大学

E09-02**基于多源信息感知的增材再制造形性智能调控技术**

王晓明

再制造技术国家重点实验室

E09-03**热障涂层微结构激光调控策略与高温性能增强机制**

蔡杰*、花银群

江苏大学

热障涂层(TBC)是发展先进航空发动机的关键热防护技术,但其在高温复杂环境下服役稳定性较差,界面开裂及早期剥落问题频出。热障涂层由金属粘结层和陶瓷隔热层构成,其中,粘结层/陶瓷层界面处热生长氧化物(TGO)非稳态生长及快速增厚是诱发涂层剥落的首要因素;同时,陶瓷层表面遭受CMAS及熔盐侵蚀会显著加速陶瓷层剥落进程。因此,有效调控TGO微观生长行为、提升陶瓷层抗CMAS/熔盐腐蚀能力,是保障TBC长寿命、高可靠服役的核心难题。基于此,本研究系统提出了一种基于激光重熔的界面调控新策略。针对金属粘结层,利用高能量密度激光快速熔凝特性,精确调控其表面形貌与微观结构,旨在形成一层均匀致密、具有优异高温抗氧化性能的改性层,从源头抑制TGO非受控生长与快速增厚。针对陶瓷层表面,通过激光诱导原位重熔或微织构化处理,优化其表面状态与近表面微观结构,旨在提高其致密度、降低表面活性并改变熔融CMAS润湿铺展行为,从而显著增强其抗CMAS/熔盐腐蚀性能。通过激光对TBC金属层及陶瓷层界面精准调控,解决金属层界面氧化失效与陶瓷层表面腐蚀失效两大瓶颈问题,最终实现高可靠性、长寿命热障涂层的可控制备,为我国自主发展高性能航空发动机提供坚实的科学依据与关键技术支撑。

E09-04**生物镁合金表面离子束改性及性能研究**

齐福刚^{*1}、戴翌龙¹、唐楷为¹、黄启鸿²

1. 湘潭大学

2. 杭州师范大学

本文采取离子束改性表面处理方式在WE43合金表面上分别制备注入层和沉积层,系统地探究了不同注入剂量和沉积时间对WE43合金表面形貌与结构、耐腐蚀性和硬度的影响。主要研究结论如下:(1)在WE43合金表面分别注入不同剂量的Fe、Zn、Ti和Zr四种元素后,改性层是由Mg、MgO、注入元素及其氧化物组成。Fe离子注入会恶化基底的耐腐蚀性,且随着注入剂量的增大,合金的腐蚀速率加快;Zn离子的注入剂量为 $5 \times 10^{16} \text{ ions} \times \text{cm}^{-2}$ 时,合金具有较低的腐蚀电流密度(I_{corr}),比基底降低了47.2%,耐腐蚀性较好,而其他注入剂量下合金的 I_{corr} 值与基底相差不大;Ti离子注入后WE43合金的抗腐蚀能力得到普遍提高,特别是在注入剂量为 $1 \times 10^{17} \text{ ions} \times \text{cm}^{-2}$ 时,合金具有最小的腐蚀速率,其 I_{corr} 值较

基底降低两个数量级;Zr 离子注入 WE43 合金后,其 I_{corr} 值均小于基底。在注入剂量为 $5 \times 10^{16} \text{ ions} \times \text{cm}^{-2}$ 时,该合金的 I_{corr} 值为 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2}$,比基底降低了两个数量级。(2) 在 WE43 合金表面沉积不同时间的 Zn 和 Ti 离子,制备出不同厚度的 Zn 膜和 Ti 膜。当沉积时间为 800 s 时,Zn 膜和 Ti 膜都为致密,且存在的缺陷较少。沉积 800 s 后的 Zn 膜和 Ti 膜具有最低的 I_{corr} 值,分别为 $34.8 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $2.9 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。在浸泡腐蚀过程中,裂纹优先出现在表面缺陷处,并在其周围形成腐蚀产物的堆积。

E09-05**生物镁合金表面离子束改性及性能研究**

黄太红

昆明理工大学

E09-06**Cr 涂层钎合金事故工况下的失效机理研究**

沈朝

上海交通大学

E09-07**高效热阻涂层的设计及制备**

郭洪波

北京航空航天大学

E09-08**高功率脉冲放电管 / 孔内壁真空镀膜技术**

田修波

哈尔滨工业大学

E09-09**通过大气等离子喷涂在钽基表面制备高温抗氧化涂层及其微观结构表征**

徐一*、刘若枚

南昌大学

本研究中,通过喷雾干燥和真空烧结制备了 $\text{ZrB}_2\text{-MoSi}_2$ 复合粉末,并采用大气等离子喷涂技术在钽表面制备了涂层。涂层厚度为 $120 - 140 \mu\text{m}$,结构致密。经 1750°C 氧化 20 小时后,涂层总厚度增至 $290.0 \mu\text{m}$,重量增加 $15.089 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$,抗氧化性能显著提升。研究发现, SiO_2 玻璃相在涂层表面形成保护层,有效阻隔了氧气的渗透。扩散层厚度在氧化过程中发生变化:氧化 5 小时后为 $58.1 \mu\text{m}$,10 小时后为 $86.5 \mu\text{m}$,20 小时后为 $116.7 \mu\text{m}$ 。涂层的热膨胀系数和氧分压对扩散层裂纹的形成具有重要影响。

E09-10**金属粘接层高温耐久性的提升方法及机制研究**

余春堂

重庆理工大学

E09-11**YSZ 改性 MCrAlY 热障涂层粘结层结构调控及其高温氧化行为**

黄继波

华南理工大学

E09-12**高性能金属陶瓷复合涂层的设计及激光可控构筑**

卢冰文

广东省科学院新材料研究所

E09-13**高性能金属陶瓷复合涂层的设计及激光可控构筑**

卢冰文

广东省科学院新材料研究所

E09-14**新型 MAX 相防护涂层材料与延寿技术**

汪爱英

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

E09-15**高温抗氧化涂层氧化膜生长动力学调控**

杨冠军

西安交通大学

E09-16**成分与结构设计在单晶高温合金上的涂层应用技术研究**

王金龙

东北大学

E09-17**智能抗菌表面构建及性能调控**

谭继

中国科学院上海硅酸盐研究所

E09-18**混氢燃气轮机用高温防护涂层氧化腐蚀研究**

杨洪志

湘潭大学

E09-19**关于耐微生物腐蚀和防污材料设计的一点思考**

徐大可

东北大学

E09-20**仿生功能涂层**

张志辉

吉林大学

E09-21**镁合金表面硅碳薄膜的 PECVD 制备及其耐蚀性能研究**陈德馨^{*1}、苏东艺²

1. 暨南大学

2. 广州今泰科技股份有限公司

本报告采用等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 技术制备了有机 (CxOySi) 碳基薄膜, 并研究了其在镁合金表面的沉积机理、微观形貌及演变、耐蚀性能、及其生物相容性。首先选用六甲基二硅氧烷 (HMDSO) 作为前驱体, 利用 PECVD 技术在 MgLi 合金表面制备 CxOySi 薄膜。结果表明, O₂ 流率不同导致了沉积速率的差异, 薄膜厚度先增加后减小, 最高达到 18.67 μm。随 O₂ 流率的增加, 更多的甲基被氧原子取代, 薄膜分子链增长且交联度提高, 结构由有机向无机转变, 弹性增强, 硬度由 0.05 GPa 增加至 1.08 GPa, 有机成分的减少使接触角从 105.4° 逐渐降低至 82.2°。电化学测试表明, 镀膜样品的腐蚀电流密度相比裸基底最大降低了 5 个数量级, 达到 3.496×10^{-10} A/cm²。最后进行的电压腐蚀中, 镀膜样品可以良好抵抗 10 V 电压 2 min, 以及盐雾腐蚀中, 镀膜样品在 9 天的测试后其表面无任何变化。

E09-22**镁合金表面耐蚀-导电复合膜层的构建与表征**

祝闻

东莞理工学院

E09-23**陶瓷防护涂层位错介导力学性能 调控**

周晟昊

广东省科学院新材料研究所

本工作从位错视角研究了两类典型陶瓷相强-韧力学机制。

首先, 过渡金属氮化物 (TMN) 是经典高硬、耐热、耐蚀陶瓷相, 已作为防护涂层得到广泛应用。但其高脆性使其容易突然断裂失效, 降低其在极端工况下可靠性。克服脆性制约是领域内长期挑战与难题。国内外研究已建立基于价电子浓度 (VEC) 与核心电子数 (CEC) 精准描述符的化学成分固溶设计理论。然而, 除本征化学键特性外, 涂层的性能还受晶粒尺寸、结晶取向以及缺陷等综合因素的影响, 实际上涂层力学性能 (如硬度) 往往偏离理论预测值。我们基于 TEM 综合位错分析, 发现高 VEC-CEC 元素 Mo 的固溶削弱 TiN 涂层位错核心应力集中, 其制备态纳米晶中储存了大量纳米尺寸位错, 并在变形过程中发生位错增值, 密度提高 50%。对固溶、压应力、晶粒尺寸和位错密度对力学性能的定量分析表明, 高密度位错及其增值对硬度和韧性均有显著贡献。该研究为陶瓷涂层力学性能起源提供了新见解, 为利用缺陷进行陶瓷涂层力学性能改性奠定了基础。

然后, MAX 相是一类新兴的拥有原子层状结构的陶瓷材料, 具有优异抗高温氧化和耐腐蚀性能, 在航空航天、海洋核能防护方面有很高的应用潜力, 但受限于弱基面金属键和超高变形各向异性 ($c/a > 4$, 是 Mg 的 2 倍以上), 其强韧双低。我们通过原子沉积 bottom-up 方法, 克服了常规烧结、热压成型过程难以精确控制晶粒尺寸的问题, 可控制备了晶粒尺寸 0-100 nm 的 Cr₂AlC MAX 相涂层, 同时排除了取向和残余应力的影响, 孤立出晶粒尺寸的单因素, 并研究其对力学性能影响。结果表明, 纳米晶化大幅提升 MAX 相强度/硬度的同时极大地削弱变形各向异性, 在室温下首次系统观察到基面、锥面、柱面全滑移系激活, 获得了接近金属的塑性与变形模式。该工作揭示了 MAX 相“纳米晶强韧化”的独特性质与陶瓷相各向异性的尺寸依赖性, 为极端环境服役用高性能结构-功能一体化 MAX 相材料开发提供了理论指导和实践经验。

E09-24**激光复合表面工程技术研究进展**

姚建华

浙江工业大学

E09-25

基于电子输运的生物材料表界面设计及构建

刘宣勇

中国科学院上海硅酸盐研究所

E09-26

Si 掺杂对 AlCoCrFeNi_{2.1} 共晶高熵合金强塑性的影响及机制

常发

福建理工大学

E09-27

Cr 前驱膜“催化”低 Cr、Al 合金选择性氧化的机理研究

谢云

南昌航空大学

E09-28

大气等离子喷涂制备低氧 NiCuCrMoB 高熵合金涂层原位脱氧效应

李新茹

西安交通大学

由于高熵合金 (High Entropy Alloys, HEAs) 的独特性质, 其作为保护涂层的热喷涂制备已成为研究热点。然而, 由于金属熔滴在飞行过程氧化严重, 沉积的涂层氧化物夹杂物含量较高, 其性能通常显著低于相应的块体材料。本研究设计了含硼的 NiCrCuMoB 高熵合金粉末, 旨在通过大气等离子喷涂获得无氧化熔滴而沉积高熵合金涂层。通过收集穿过等离子射流的高熵合金颗粒, 对硼元素在飞行中的原位脱氧效应进行了检验, 并在抛光的不锈钢基板上沉积单个扁平粒子, 通过氧化物的分布评估了其氧化行为。分析了涂层的微观结构及其对力学性能的影响。结果表明, 硼元素有效抑制了熔融颗粒在飞行过程中的氧化, 获得了无氧化物熔滴。通过充分利用硼的脱氧效应, 能够获得具有类似块体材料的冶金结合特性且氧化物含量低的高熵合金涂层。

E09-29

畴结构热障涂层及其强韧机制

杨丽

西安电子科技大学

E09-30

超低摩擦润滑材料的设计与应用探索

王道爱

中国科学院兰州化学物理研究所

E09-31

航空发动机新型环境障涂层

卓学士

广东省科学院新材料研究所

E09-32

通过三维连续结构改善 ZrO₂(Y₂O₃)-石墨复合材料的高温摩擦学性能蔺鹏宇^{1,2}、宋俊杰^{*2}、王海丰¹、张永胜²、胡丽天²

1. 西北工业大学

2. 中国科学院兰州化学物理研究所

传统的氧化锆陶瓷基自润滑复合材料由于高磨损和易氧化等劣势，严重阻碍其作为先进结构材料在航空航天领域的应用。通过三维连续结构设计润滑组元和陶瓷基体被认为可以提高陶瓷基体的连续性，从而有希望制备出兼具优异耐磨性和抗氧化性的陶瓷基自润滑复合材料。本工作采用氧化锆包覆石墨颗粒的核壳设计，制备了具有三维连续结构的石墨-氧化锆复合材料，研究了从室温到 700 °C 该结构对减摩抗磨机理的影响。相比于均质结构复合材料，其与 GH4169 合金在 600 °C 时对摩，摩擦系数降低约 10%，磨损率降低近两个数量级。摩擦学性能的强化机制与高承载能力的连续氧化锆基体和具有自润滑和抗热氧化特性的致密摩擦层的形成有关。

E09-33**多级纳米纤维智能涂层设计与防护机制研究**

曹琳、陈守刚*

中国海洋大学

开发智能自修复涂层已成为国内外海洋工程装备腐蚀防护领域的前沿研究热点。本研究介绍了基于功能性纳米纤维的智能自修复涂层的设计策略，包括研制具有光热协同与腐蚀自修复功能的多功能纤维涂层，以及具备可视化指示和损伤自愈双重功能的纳米纤维复合涂层：以静电纺丝构筑核壳结构纤维，纤维表面原位生长光热剂，内部负载单宁酸；将纤维掺入树脂形成光热响应涂层，损伤后单宁酸释放并与亚铁离子螯合修复裂纹，配合光热效应百秒内快速修复。同时，研制一种具有可视化指示功能的纳米纤维环氧复合涂层，利用壳聚糖延缓指示剂释放，裂纹处与亚铁离子反应呈现红色，实现腐蚀预警与自修复双功能。

E09-34**燃气涡轮发动机海洋环境热障涂层**赵泓旭^{1,2}、吕博文^{*1}、毛杰¹、张小锋¹、邓春明¹、邓畅光¹、刘敏¹

1. 广东省科学院新材料研究所

2. 中南大学

燃气涡轮发动机是大型舰船、舰载机、近海电厂及海洋平台的核心能源动力装备，需在高湿热、高盐分的海洋环境中长时稳定服役。随着涡轮进口温度的不断提高，热障涂层成为热端部件不可或缺的表面防护手段。长期以来，我国热障涂层研究主要聚焦于高温服役性能，面向海洋应用的相关研究十分欠缺。由于海洋服役环境与陆基环境显著不同，针对陆基环境发展的现有热障涂层材料体系与制备工艺不能完全适用。传统 YSZ 热障涂层在海洋环境中结构、性能退化和陶瓷层相变、烧结等问题严重影响了燃气涡轮发动机的性能和寿命，发展适应海洋环境的新型热障涂层迫在眉睫。本报告基于等离子喷涂物理气相沉积（PS-PVD）技术制备的羽柱状高应变容限结构热障涂层，阐明模拟海洋高湿热、高盐分条件下的相变及烧结退化机制与失效机理，发展梯度应变容限阻渗结构调控技术，开发高相稳定性、抗烧结高熵稀土锆酸盐陶瓷材料体系，为适海性热障涂层应用提供基础与指导。

E09-35**激光熔覆铁基涂层增强热作模具钢的微观结构及高温耐磨性研究**

曹其政

上海大学

E09-36**超快激光跨尺度功能结构制造与性能研究**

张向宇

北京理工大学

E09-37

空心叶片内孔涂层技术及应用

段海涛

中国机械总院集团武汉材料保护研究所有限公司

E09-38

爆炸喷涂双相 CrFeNiAl_{0.3}Ti_{0.3} 高熵合金基自润滑耐磨涂层的制备及其宽温域摩擦学性能研究

杨东升、耿钰山、程军*、杨军、喇培清

中国科学院兰州化学物理研究所

为解决航天斯特林发动机活塞环、气缸壁和空气箔片轴承不耐高温磨损及摩擦失效等问题，美国 NASA 开发了四代 PS 系列高温自润滑涂层来满足航天发动机高温严苛环境下的使用要求。然而，最新一代的 PS400 涂层虽然具有尺寸稳定性好、中高温摩擦系数和磨损低等优势，但是其室温的摩擦系数和磨损率却差强人意，仍保持较高水平。因此有必要继续开展自润滑、耐磨损、抗氧化和强结合的长寿命高温固体润滑涂层的研究。本文选择在宽温域内具备优异热稳定性和兼具强韧/塑性组合的双相 CrFeNiAl_{0.3}Ti_{0.3} 高熵合金为基体，引入 Ag、(Ba, Ca)F₂、SrSO₄ 等润滑相成功构筑 CrFeNiAl_{0.3}Ti_{0.3}-Ag-(Ba, Ca)F₂、CrFeNiAl_{0.3}Ti_{0.3}-Ag-SrSO₄ 宽温域自润滑耐磨涂层。室温至 400 °C，双相 CrFeNiAl_{0.3}Ti_{0.3} 高熵合金基自润滑耐磨涂层依靠 Ag 低剪切和摩擦诱导成润滑膜的特性，有效缓解了摩擦界面的应变局部化、应力集中等问题，最终通过润滑膜耗散塑性变形能的方式抵御了三体磨损；400 ~ 1000 °C，双相 CrFeNiAl_{0.3}Ti_{0.3} 高熵合金基自润滑耐磨涂层通过在磨损表面与对偶磨损表面构筑耐磨性双釉层结构避免了摩擦副之间直接接触，显著提升了涂层的高温摩擦学性能。其中，成分含量为 80 wt% CrFeNiAl_{0.3}Ti_{0.3}-10 wt%Ag-10 wt%(Ba, Ca)F₂ 的高温自润滑涂层在 25 ~ 800 °C 宽温域范围内相较于纯 CrFeNiAl_{0.3}Ti_{0.3} 涂层的摩擦系数降低了 0.14 ~ 0.63；磨损率降低了 1.05 ~ 5.67 × 10⁻⁵ mm³/Nm。此外，成分含量为 80 wt% CrFeNiAl_{0.3}Ti_{0.3}-10 wt%Ag-10 wt%SrSO₄ 的高温自润滑涂层在 25 ~ 1000 °C 宽温域范围内表现出良好的摩擦学性能，摩擦系数低至 0.29 ~ 0.49；磨损率稳定在 2.68 ~ 11.82 × 10⁻⁵ mm³/Nm。

E09-39

镍基网络异质结构中的摩擦机制及相关表面变形机制

张云淞、战再吉*

燕山大学

网状异质结构金属材料作为一种新型复合材料，展现出了传统均质材料难以企及的卓越综合力学性能。有望有效抑制摩擦学应用过程中摩擦所诱导的应变局部化现象，进而实现传统均质材料无法达到的优异摩擦学性能。本研究利用 SEM, TEM, EBSD 等多种先进的材料分析技术手段，对 (W, Cr)₂C/Ni 基网状异质结构材料的微观形貌进行了精准表征，并深入探究了其摩擦机制以及相关的表面变形机制。

本研究通过激光熔覆技术制备了具有不同网络结构尺寸的镍基网络异质结构。结果表明，磨粒磨损-粘着磨损转变的临界条件是法向载荷为 150 N、滑动速度为 30 m/s。出色的应变协调能力和加工硬化能力使试样 Test-8 在高载荷和高速滑动 (130 N 和 10 m/s) 条件下仍能保持低磨损率的磨粒磨损状态。网络异质结构通过容纳大量几何必需位错 (GNDs) 显著增强了加工硬化能力。在滑动过程中，大量变形位错形成，并沿着内部网络结构向深度方向发生转移，有效缓解了应变局部化现象。从表面到更深层区域，位错的形态依次从缠结演变为交叉滑移，再转变为单向滑移，其影响深度超过了 80 μm。即使在单向滑移区域，网络单元之间仍能实现应变协调。所设计的网络异质结构展现出了独特的位错形核与传播机制，为研发具备卓越摩擦学性能的耐磨材料提供了有益的参考。

E09-40

电刷镀 Ni/diamond + Al₂O₃ 双相硬质颗粒复合镀层的耐磨性和耐腐蚀性高美玉¹、宋贵宏*¹、裴志亮²、宫骏²

1. 沈阳工业大学

2. 中国科学院金属研究所

大型工业设备、船舶、航空航天零部件表面会发生划伤、磨损、腐蚀问题，采用电刷镀方式进行修复可有效提高耐磨、耐蚀性能，节约维修成本。本文采用电刷镀技术在 304 基体上制备 Ni/diamond+ Al₂O₃ 双相硬质颗粒复合镀层，探究 diamond、Al₂O₃ 两种颗粒的协同作用对复合镀层的耐磨、耐腐蚀性能的影响。随着 Al₂O₃/diamond 比率增加，复合镀层硬度先从 520HV 增加到 609 HV，，然后降低至 530 HV。比率为 0.75 时，镀层的磨损率最低为 $5.14 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ；比率为 0.51 时，镀层电化学腐蚀位-0.326V，腐蚀电流 $1.896 \mu \text{ A/cm}^2$ ，最大阻抗为 $12343 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。结果表明添加 Al₂O₃、diamond 硬质颗粒可以有效提高 Ni 基镀层的耐磨、耐腐蚀性。在摩擦磨损过程中，diamond 颗粒承受载荷，抵抗塑性变形，阻碍位错滑移或晶界滑动；纳米 Al₂O₃ 颗粒弥散分布在镀层中实现第二相强化，抑制裂纹的萌生与扩展。同时双相硬质颗粒的存在起到物理屏障作用，能够阻碍电子的传输，从而降低腐蚀电流。电化学测试后，涂层表面发生局部腐蚀，形成“迷宫效应”，延缓了腐蚀过程。

E09-41

航空发动机关键件用涂层研究进展及需求

田浩亮

中国航发北京航空材料研究院

E09-42

活性元素 Hf 改性铂铝涂层热腐蚀行为

鲍泽斌

中国科学院金属研究所

E09-43

大气等离子喷涂 NiAl 涂层的制备与改性研究

薛铤

西安交通大学

E09-44

高硬质相含量的激光熔覆 WC 基涂层制备与耐磨机理研究

姜洋

北京工业大学

E09-45

Q235 钢表面制备钴基合金熔覆层及耐磨特性研究

张锦泽

华北电力大学

日益严苛复杂的工况对机械零件提出更高要求，考虑大多数零件受损主要发生在表面，激光熔覆技术作为一种先进的表面改性手段，在许多领域都有广阔的应用前景。钴基 Stellite 合金作为一种非常成熟的合金材料，被广泛应用于能源电力、航空航天和远洋船舶等重要领域。本文以 Stellite31 粉末为熔覆层材料，利用激光熔覆技术在 Q235 钢基体表面制作熔覆层，通过磨粒磨损实验对熔覆层进行了耐磨测试，结合材料表征检测手段，对熔覆层的耐磨性、磨损机理进行了分析。研究发现，在熔覆层晶界上析出的 Co-Cr 固溶体以及晶内分布的少量金属碳化物起到了强化作用，高硬度的 Co、Cr 二者固溶有效强化了晶界，提高了熔覆层的硬度，进而提升了耐磨性。熔覆层的硬度可达 390HV，大约是基体的 3 倍。试样在进入稳定磨损阶段后，30000r 磨损下失重仅为 14.7mg。同时对熔覆层内部气孔的成因进行了分析，表明气孔的产

生受激光熔覆工艺、基体材料和熔覆层材料缺陷等复杂因素的影响。上述研究为严苛复杂工况下机械零件的表面改性和寿命延长提供了理论依据和技术支持。