水力机械抗磨蚀涂层研究新进展

李　阳
新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司　新疆　乌鲁木齐　830000

摘　要：水力机械磨蚀问题常见且危害大，机理涉及冲蚀、空蚀和腐蚀磨损。在抗磨蚀涂层材料研究方面，高性能金属基复合、新型陶瓷基纳米结构、有机-无机杂化、仿生智能等涂层材料展现独特优势。制备工艺也取得新进展，超音速等离子喷涂、激光熔覆、化学溶液沉积、物理气相沉积多层、原位合成等工艺不断优化改进。这些材料和工艺的研究成果，有助于提升水力机械抗磨蚀涂层性能，为解决水力机械磨蚀问题提供了有效途径。

关键词：水力机械；抗磨蚀涂层；研究进展

引言：水力机械在能源开发、水资源调配等领域发挥着关键作用。然而，磨蚀问题严重影响其运行效率与使用寿命，带来巨大经济损失。传统的抗磨蚀措施存在一定局限性，难以满足复杂工况需求。近年来，随着材料科学与制备技术的发展，抗磨蚀涂层成为解决水力机械磨蚀问题的研究焦点。探索新型涂层材料、优化制备工艺以提升涂层抗磨蚀性能，对提高水力机械可靠性、降低维护成本具有重要意义。

1 水力机械磨蚀的机理

水力机械在运行过程中，磨蚀是一个常见且危害较大的问题，其机理主要涉及冲蚀磨损、空蚀磨损和腐蚀磨损。冲蚀磨损主要是由于水流中携带的固体颗粒，如泥沙等，以一定速度和角度冲击水力机械过流部件表面而引起。当这些硬颗粒与部件表面发生碰撞时，会对表面材料产生切削、挤压和疲劳等作用，导致材料逐渐剥落。颗粒的硬度、形状、粒径以及水流速度和冲击角度等因素都会影响冲蚀磨损的程度。例如，高速含沙水流对水轮机叶片的冲刷，会使叶片表面出现磨损沟痕，降低叶片的效率和使用寿命。空蚀磨损是水流在局部地区流速增高，压力降低至当地汽化压力以下时，水发生汽化形成气泡。当气泡随水流运动到压力较高区域时，会迅速溃灭，产生极高的局部压力和冲击力，反复作用于部件表面，使材料表面产生疲劳破坏，形成麻点、蜂窝状孔洞[1]。空蚀磨损通常发生在水轮机的转轮、叶片以及水泵的叶轮等部位，严重影响水力机械的性能和可靠性。腐蚀磨损是水力机械过流部件表面与周围介质发生化学反应或电化学反应，导致材料的腐蚀破坏。水中的溶解氧、酸碱度、氯化物等化学物质会加速腐蚀过程。同时，冲蚀和空蚀作用会破坏部件表面的保护膜，使腐蚀更加严重。腐蚀磨损会使部件表面变得粗糙，增加水流阻力，降低水力机械的效率。

2 抗磨蚀涂层材料研究新进展

2.1 高性能金属基复合涂层材料探索

高性能金属基复合涂层材料的探索是抗磨蚀涂层研究的重要方向。（1）颗粒增强型复合涂层材料开发。通过在金属基体中加入碳化钨、碳化硅、三氧化二铝等硬质陶瓷颗粒，制备颗粒增强型金属基复合涂层，利用硬质相的高硬度特性显著提升涂层的耐磨粒磨损性能，延长过流部件使用寿命。（2）纳米复合涂层结构优化研究。引入纳米尺度增强相改善涂层组织结构与力学性能，利用纳米颗粒的细晶强化与弥散强化效应，提高涂层致密度、显微硬度与结合强度，减少孔隙与微裂纹等缺陷，全面提升涂层综合防护性能。（3）自润滑复合涂层材料研究。在涂层体系中添加石墨、二硫化钼、六方氮化硼等固体润滑相，制备兼具耐磨与减摩功能的自润滑复合涂层，降低摩擦副表面的摩擦系数，减少磨损产热与粘着磨损，适用于高速滑动摩擦工况。（4）非晶纳米晶复合涂层探索。利用高速热喷涂工艺制备非晶纳米晶复合涂层，借助非晶相优异的耐腐蚀性能与纳米晶相的高硬度特性，实现涂层耐磨与耐蚀性能的协同提升，特别适用于含固体颗粒的腐蚀性介质环境。（5）梯度复合涂层结构设计创新。采用成分渐变的多层复合结构设计，实现涂层从底层的强结合过渡到表层的超高硬度，缓解涂层内部应力集中，改善抗热震性能，有效解决厚涂层易剥落开裂的技术难题。

2.2 新型陶瓷基纳米结构涂层的特性

新型陶瓷基纳米结构涂层凭借独特性能成为抗磨蚀材料研究热点。（1）高硬度与优异耐磨性能。纳米结构陶瓷涂层晶粒细小、组织致密，显微硬度显著高于传统微米级陶瓷涂层，硬质纳米相均匀分布使涂层具备出色的抗磨粒磨损与抗冲蚀磨损性能，可有效延长部件服役寿命。（2）良好的强韧结合特性。纳米晶粒间的界面强

化效应赋予涂层较高的断裂韧性，克服了传统陶瓷涂层脆性大、易开裂的固有缺陷，裂纹在纳米晶界处发生偏转与钝化，显著提升了涂层的抗疲劳剥落能力。（3）卓越的耐腐蚀与抗氧化性能。纳米结构涂层孔隙率低、致密度高，腐蚀介质难以渗透至基体界面，同时部分陶瓷材料本身化学稳定性优异，使涂层在酸碱盐等恶劣环境中表现出卓越的耐蚀与抗氧化能力。（4）较低的热导率与耐热震性能。纳米晶界对声子与电子输运的散射作用使涂层热导率降低，配合良好的应变容忍度，涂层在冷热交变工况下不易产生热应力开裂，适用于高温磨蚀复合服役环境。（5）优良的结合强度与界面性能。通过纳米过渡层设计与等离子体表面改性等技术手段，涂层与基体界面结合强度大幅提高，有效抑制了涂层剥落失效，保障了防护体系的长效稳定运行。

2.3 有机-无机杂化抗磨蚀涂层材料

有机-无机杂化抗磨蚀涂层材料是抗磨蚀涂层领域的研究热点，结合了有机和无机材料的优点，展现出卓越性能。有机成分赋予涂层良好的韧性和可加工性，使其能更好地适应基体表面，形成均匀致密的防护层。同时具备一定的柔韧性，可缓解应力集中，减少涂层开裂和剥落的风险。无机成分则提供了高硬度、耐磨性和化学稳定性，能有效抵抗磨蚀介质的侵蚀。无机纳米粒子均匀分散在有机基体中，增强了涂层的抗磨蚀性能，显著提高涂层对固体颗粒冲蚀和液体空蚀的抵抗能力[2]。有机-无机杂化涂层还可通过调整有机和无机成分的比例及种类，实现性能的灵活调控。在不同的水力机械工况下，可根据具体需求设计出具有最佳抗磨蚀性能的涂层。

2.4 仿生智能抗磨蚀涂层材料创新

仿生智能抗磨蚀涂层材料创新是抗磨蚀涂层领域的前沿方向，它借鉴生物界的优异特性，赋予涂层智能响应能力。从仿生角度看，模仿荷叶的自清洁效应，使涂层表面具有超疏水性，能有效减少泥沙等颗粒的附着，降低冲蚀磨损。像鱼鳞的微观结构能分散水流冲击力，受此启发设计的涂层可优化表面应力分布，增强抗磨蚀能力。在智能响应方面，这种涂层能感知外界环境变化，如当涂层受到磨损或腐蚀时，可自动释放缓蚀剂或修复剂[3]。例如，微胶囊技术被应用其中，微胶囊内包裹着修复成分，当涂层受损，微胶囊破裂释放修复物质，及时修复涂层缺陷，恢复防护性能。仿生智能抗磨蚀涂层还可根据水流速度、温度等工况条件，自动调节表面性能，始终保持良好的抗磨蚀状态，为水力机械提供持久、高效的防护。

3 抗磨蚀涂层制备工艺研究新进展

3.1 超音速等离子喷涂工艺优化

超音速等离子喷涂工艺优化是提升涂层质量的关键途径。（1）喷涂参数协同优化研究。通过正交试验与响应曲面法系统优化电流、电压、主气流量等工艺参数，明确各参数对焰流温度、速度及粒子熔化状态的影响规律，获得致密度与硬度俱佳的涂层制备工艺窗口。（2）送粉工艺与粉末受热控制改进。优化送粉位置、送粉角度与载气流量，改善粉末在焰流中的受热均匀性，减少未熔颗粒与过烧现象，提高粉末沉积效率与涂层质量稳定性，降低原材料损耗。（3）喷枪结构与流场仿真设计。借助数值模拟技术分析喷枪内部气流场与温度场分布，优化拉瓦尔喷管型线与电极结构设计，提升焰流速度与能量集中度，实现粒子加速度与熔化程度的同步改善。（4）在线监测与智能控制技术应用。引入粒子温度速度在线诊断系统与闭环控制技术，实时监测喷涂过程粒子状态参数，动态调整工艺参数补偿波动，保障涂层性能的批次一致性，提升工艺过程可控性。（5）基体温度与残余应力调控。通过优化基体预热温度与层间冷却策略，调控涂层内部残余应力分布，减少微裂纹萌生倾向，改善涂层与基体的结合强度，有效防止厚涂层的开裂与剥落失效。

3.2 激光熔覆制备抗磨蚀涂层新方法

激光熔覆作为制备抗磨蚀涂层的重要工艺，新方法不断涌现且优势显著。新的激光熔覆方法在粉末输送方面有创新，采用同轴送粉与旁轴送粉结合的方式，能精准控制粉末的输送量和分布，使熔覆材料更均匀地融入基体，提高涂层质量。在激光参数调控上，运用智能控制系统实时监测熔池状态，动态调整激光功率、扫描速度等参数，确保熔覆过程稳定，减少气孔、裂纹等缺陷[4]。为增强涂层与基体的结合强度，新方法还引入了预热和后热处理环节。预热可降低基体与涂层间的温差，减小热应力；后热处理则能消除残余应力，改善涂层的组织结构。此外，复合激光熔覆技术兴起，将不同类型的激光或与其他工艺复合，如激光与等离子喷涂复合，充分发挥各自优势，制备出性能更优的抗磨蚀涂层，为水力机械的磨蚀防护提供了更有效的途径。

3.3 化学溶液沉积抗磨蚀涂层技术

化学溶液沉积技术以其低成本、良好覆盖能力成为抗磨蚀涂层制备的重要方法。（1）化学镀镍磷合金涂层技术改进。通过优化镀液配方与施镀温度，制备高磷非晶态镍磷合金镀层，并经后续热处理析出Ni3P硬化相，显著提升镀层硬度与耐磨性能，广泛应用于复杂形状零件的表面防护。（2）复合化学镀技术快速发展。在镀

液中引入碳化硅、金刚石、聚四氟乙烯等微粒，实现基质金属与硬质或减摩颗粒的共沉积，获得镍磷基复合镀层，兼具高耐磨与自润滑特性，拓展了镀层应用范围。（3）电沉积工艺参数精细调控。采用脉冲电沉积、超声辅助电沉积等新工艺，改善镀层晶粒尺寸与致密性，减少孔隙与内应力，提高沉积速率与镀层均匀性，增强镀层与基体的结合质量。（4）溶胶凝胶涂层制备技术拓展。利用溶胶凝胶工艺制备氧化物陶瓷基防护涂层，通过浸渍提拉或喷涂方式成膜，经干燥烧结获得致密耐磨涂层，工艺简单且易于大面积施工。（5）环保型镀液体系研究开发。针对传统镀液含重金属与有害添加剂的问题，开发无氰、无铬的低毒环保镀液体系，降低废液处理成本，推动化学溶液沉积技术的绿色可持续发展。

3.4 物理气相沉积多层抗磨蚀涂层工艺

物理气相沉积多层抗磨蚀涂层工艺在抗磨蚀涂层制备领域取得显著进展。该工艺通过交替沉积不同成分或结构的涂层，形成多层复合结构，充分发挥各层材料的优势。多层结构设计可有效改善涂层的综合性能，不同层之间的界面能阻碍裂纹扩展，提高涂层的韧性和抗剥落能力。例如，在硬涂层之间插入软质缓冲层，能缓解应力集中，增强涂层的抗冲击性能。在工艺控制方面，精确控制每层涂层的厚度、成分和沉积速率至关重要。先进的物理气相沉积设备可通过计算机精确调控工艺参数，确保每层涂层质量稳定、均匀[5]。通过优化工艺参数，还能实现多层涂层的致密化和界面结合强度的提高。多层抗磨蚀涂层可根据不同的应用场景进行定制设计，针对水力机械的不同磨蚀工况，选择合适的涂层材料和结构组合，以达到最佳的抗磨蚀效果。

3.5 原位合成抗磨蚀涂层制备工艺改进

原位合成抗磨蚀涂层制备工艺改进是提升抗磨蚀涂层性能的关键方向。在原料体系上，改进后的工艺采用新型前驱体材料，其活性更高、反应更充分，能在原位形成性能优异的涂层相。例如引入纳米级别的反应物，可加快反应速度并细化涂层组织，增强涂层的硬度和韧性。加热方式上也有革新，采用更精准的局部快速加热技术，如激光诱导加热，能精确控制反应区域和温度，避免对基体造成过大热影响，同时促进原位反应高效发生。工艺过程的控制也更为精细，通过实时监测反应参数并自动调整，确保涂层成分和结构均匀稳定。比如利用先进传感器监控温度、气氛等，实现闭环控制改进后的工艺还注重与基体的结合性能提升，在涂层形成过程中，使涂层与基体之间形成过渡层，增强二者的结合强度，防止涂层脱落。这些改进让原位合成抗磨蚀涂层在水力机械等领域有更广阔的应用前景。

结语

未来，水力机械抗磨蚀涂层研究将朝着多元化、智能化和绿色化方向迈进。在材料方面，会持续开发兼具多种优异性能的新型涂层材料，如具备自修复、自适应功能的智能涂层。制备工艺也将不断优化创新，结合先进制造技术实现更精准、高效、环保的涂层制备。同时，跨学科研究将更为普遍，融合材料科学、力学、化学等多学科知识，深入探究磨蚀机理与涂层性能提升机制。此外，加强涂层在实际工况中的长期性能监测和评估，建立完善的数据库，为涂层的优化和应用提供更坚实的依据，助力水力机械行业的可持续发展。

参考文献

[1]梁运健,马宇,周理安,等.水力机械抗磨蚀涂层研究新进展[J].北京建筑大学学报,2025,41(2):123-128.

[2]张哲,张舒研,王拓.激光熔覆合金涂层抗空蚀和抗冲蚀性能研究进展[J].稀有金属材料与工程,2026,55(9):2411-2420.

[3]孔令辉,刘东,张雷,等.水力机械抗空蚀涂层研究进展[J].人民黄河,2023,45(6):157-162.

[4]郭鹏,陈仁德,李昊,等.海洋环境PVD抗磨蚀防护涂层的研究进展[J].中国表面工程,2024,37(6):1-20.

[5]王亚雄,林浩然,蔡金波,等.合金叶轮的冲蚀磨损研究进展[J].稀有金属,2025,49(9):1435-1453.