



碳化钨复合涂层的制备技术及其耐磨耐蚀性的研究进展

陈志聪¹, 黄超¹, 刘威¹, 沈利民^{1,2}

(1. 中国矿业大学化工学院, 徐州 221116; 2. 国家煤加工与洁净化工程技术研究中心, 徐州 221116)

摘要: 碳化钨涂层具有化学稳定性高、硬度大和耐磨性好等特点, 常用于金属表面涂层的制备。从碳化钨涂层的不同制备原理出发, 综述了超声速火焰喷涂、等离子喷涂、等离子熔覆、激光熔覆和真空熔覆等碳化钨涂层制备技术的国内外研究进展, 分析了不同制备技术下涂层的耐磨性和耐蚀性, 探讨了涂层制备技术存在的问题和未来的研究方向。

关键词: 碳化钨涂层; 超声速火焰喷涂; 等离子喷涂; 等离子熔覆; 激光熔覆; 真空熔覆

中图分类号: TG174

文献标志码: A

文章编号: 1005-748X(2024)04-0046-08

复合层能够有效提高零部件的表面质量、降低维护成本并延长使用寿命, 因此广泛用于石油化工、工程机械、航海等领域零部件的表面性能改善等^[1-2]。碳化钨材料具有良好的热稳定性、化学稳定性、抗氧化性, 还具有熔点高、硬度大, 耐磨性好的特点, 因此常用作表面涂层。然而, 纯碳化钨的润湿性较差, 不能直接用于涂层制备, 因此常将 Co、Ni 等金属作为黏结金属与纯碳化钨粉末混合, 制造硬质合金和耐磨涂层。笔者以碳化钨涂层的制备技术为基础, 综述了超声速火焰喷涂、等离子喷涂、等离子熔覆、激光熔覆和真空熔覆等碳化钨涂层制备技术的国内外研究进展, 讨论了涂层的耐磨性和耐蚀性, 分析了各种制备方法的优缺点和未来的发展趋势。

1 超声速火焰喷涂

超声速火焰喷涂技术, 又称高速氧燃料火焰(HVOF)(喷涂)技术, 是一种基于高速度粒子获得涂层的技术。利用特制的燃烧室或特殊的喷嘴, 喷射引燃燃气或液体燃料形成高速、高压、高温的燃烧

焰流, 金属粉末经惰性气体送入焰流中加热, 熔融的金属粉末加速撞击基体表面并快速凝固, 连续沉积从而形成涂层。

1.1 工艺参数对涂层性能的影响

姚舜晖^[3]采用 HVOF 技术制备了碳化钨(WC, 质量分数为 20%)增强镍基合金涂层, 研究表明 WC 颗粒的几何形状对于涂层耐磨性影响较大, 对于圆形 WC 颗粒来说, 在一定粒径范围内, 其耐磨增强效果与颗粒直径正相关。赵文胜^[4]分析了粉末粒径和喷涂道次对涂层耐磨性和耐蚀性的影响, 结果表明, 所得涂层的孔隙率均小于 1.5%, 显微硬度为 1 000 HV, 粉末粒径越小, 涂层的孔隙率越低, 且粉末粒径为 5~15 μm , 喷涂 8 道次条件下所得涂层在 3.5% (质量分数) 氯化钠溶液中的耐蚀性较好。王大锋等^[5]研究了纳米结构、亚微米结构和常规结构的 WC-10Co-4Cr 涂层, 发现涂层的脱碳率和孔隙率呈现先增大后减小的趋势, 纳米结构涂层的显微硬度最高, 亚微米结构涂层的显微硬度最低。赵立英等^[6]研究表明, 在 HVOF 喷涂过程中添加丙烷, 可有效降低涂层的氧化和脱碳问题, 涂层硬度和附着力随丙烷流量提高呈现出先升高后降低的趋势, 而涂层孔隙率则先降低后升高。张磊等^[7]的研究结果表明: 涂层的孔隙率随送粉速率和喷涂距离的增大先降低后升高, 随喷涂角度和丙烷流量的升高而降低; 涂层显微硬度随喷涂角度的增大而升高, 随丙烷流量、喷涂距离和送粉速率的增大先升高后降低。刘杰等^[8]分析了煤油流量对于 WC-12Co/

收稿日期: 2022-04-09

基金项目: 中国博士后基金(2018M632415); 江苏省绿色过程装备重点实验室开放基金(GPE201802)

通信作者: 沈利民(1984—), 副教授, 博士, 从事极端环境中的材料损伤断裂行为、材料表面改性、装备在线健康检测与检测策略分析、分离技术与装备、煤基炭材料制备, 15005206639, shenlm@cumt.edu.cn

NiCrBSi 复合涂层的影响,结果表明,随着煤油流量提高,涂层硬度提高,涂层孔隙率和耐磨性先降低后升高,涂层孔隙率最低为 0.11%,硬度为 927 HV。韩旭等^[9]研究发现,粒子速度、温度和直径不沿火焰中心线对称,并且粒径越小,速度越高。SONESTEDT 等^[10]研究发现随着粉末粒径的增大和火焰功率的减小,涂层中 Ti_2AlC 的含量增加,但涂层厚度减小,黏结性降低。CABRAL-MIRAMONTES 等^[11]研究发现涂层厚度随着喷射距离的增加而减小,火焰中粒子的温度随着喷射距离增加而升高,最佳喷射距离为 229~254 mm。MÉNDEZ-MEDRANO 等^[12]分析了火焰类型(还原性、中性和氧化性)和喷枪喷嘴出口区域对于涂层组织、晶体结构的影响后发现,WC 颗粒在喷涂过程中发生了相当程度的脱碳和溶解,相变程度取决于火焰化学成分,涂层的微观结构主要受喷嘴的影响。JONDA 等^[13]分析了基于 HVOF 制备的 AZ31 基体上 WC-Co-Cr 涂层的相组成、残余应力,结果表明相组织的峰值与 WC 有关,残余应力为压应力。

1.2 涂层的耐磨耐蚀性

代雪婷等^[14]采用 HVOF 技术在 AF1410 钢表面制备了厚 200~220 μm 的 WC-10Co-4Cr 涂层,并与电镀硬 Cr 涂层进行对比,结果表明 WC-10Co-4Cr 涂层的摩擦因数低于后者,磨损质量和磨损深度也远低于后者,但是二者的耐蚀性无明显区别。刘福朋^[15]采用 HVOF 技术在 304 不锈钢基体上制备了 WC-Co 和 NiCr-Cr₃C₂ 合金涂层,其硬度为 1 100~1 400 HV,硬质相和黏结相相互错落分布,WC-Co 在 H_2SO_4 中的腐蚀速率与 H_2SO_4 温度和浓度呈现正相关规律。刘建武等^[16]采用 HVOF 技术制备了 WC-10Co4Cr 涂层,其硬度为 1 315 HV,孔隙率为 0.33%,与传统镀铬层相比,硬度和耐磨性分别提高了约 2 倍和 3.6 倍。此外,WC-10Co4Cr 涂层结构致密、结合强度高,具有良好的抗盐雾腐蚀性能。黄博等^[17]研究发现 WC-10Co-4Cr 涂层的硬度随喷涂距离增大而提高,但是涂层孔隙率随喷涂距离增大而降低,涂层硬度最高为 1 100~1 400 HV,此时涂层孔隙率小于 1%,且在盐溶液中,涂层的耐磨性比 304 不锈钢高 2 个数量级。范俊等^[18]研究发现 WC-Co-Ni 涂层中的 WC 相较多,力学性能较均衡,抗电化学腐蚀性能较好。KOMAROV 等^[19]讨论了不同粒径碳化钨粉末和颗粒组合对涂层疏水性的影响。结果表明,粗粉和超

细碳化钨颗粒组合可用于制备高疏水性硬质涂层,通过化学改性可使涂层进一步变为超疏水性硬质涂层。JIN 等^[20]分析了表面载荷对于 HVOF 技术制备的 WC-12Co 涂层耐磨性的影响。结果表明 Fe 和 W 在涂层与基体界面处的相互扩散使涂层具有良好的附着力,摩擦因数随着表面载荷增加而增大。ASL 等^[21]研究发现,采用 HVOF 技术所得 WC-17Co 涂层结构致密,厚度为 500 μm ,但后续进行真空热处理易导致涂层附着失效。

2 等离子喷涂

等离子喷涂(PS)是一种以直流驱动的等离子弧为热源的热喷涂技术。

2.1 工艺参数对涂层性能的影响

宋超群等^[22]研究发现当喷涂功率过低时,WC 颗粒融化程度低;而当喷涂功率过大时,WC 又会出现脱碳现象,最佳喷涂功率为 65 kW,此时涂层孔隙率最低(0.87%)。李万青等^[23]研究发现采用 PS 技术所得纳米结构涂层的致密性和结合强度高于微米涂层,前者孔隙率仅为 0.56%,两者硬度相差不大。黎红英等^[24]对比分析了大气等离子喷涂(APS)和 HVOF 技术的工艺参数对 WC-Ni 涂层性能的影响。结果表明,较大功率下,APS 所得涂层致密,但脱碳程度大;当喷涂距离较小时,HVOF 技术所得涂层致密,脱碳程度小。AFZAL 等^[25]研究发现,在一定范围内,较远喷涂距离条件所得涂层的孔隙率较低,厚度较小,界面良好。鲍君峰等^[26]研究发现 0.8 μm 粒径条件下,WC-17Co 涂层的力学性能最好,随着 WC 粒径增大,涂层孔隙率增大,结合强度和硬度降低,磨损量增大。富伟等^[27]研究发现,在适当的喷涂距离下,涂层脱碳程度和致密度随喷涂功率上升而上升。安连彤等^[28]分析发现,提高电弧电压有利于粉末的融化,提高涂层耐磨性和硬度,但电压过高会反而使 WC-Co 涂层质量劣化。伏利等^[29]利用高焓等离子喷涂法所得 WC-10Co-4Cr 涂层的孔隙率为 0.77%,硬度达到 1 210 HV,耐磨性为 0Cr13Ni4Mo 钢基体的 143 倍,适当提高粒子速率和温度可提高涂层结合强度。KUZMIN 等^[30]基于超音速空气等离子喷涂喷枪,制作了孔隙率小于 0.4%的 WC-10Co-4Cr 涂层,其硬度也比 HVOF 所得涂层更高。ANWAR 等^[31]采用氮气包裹 CO_2 激光对 WC-12Co 涂层进行表面处理后发现,表面涂层的附着力和基体硬度显著提高,且表面无缺陷。

2.2 涂层的耐磨耐蚀性

梁存光等^[32-33]的研究表明喷涂距离太近,WC涂层的脱碳行为严重,耐磨性较差,而喷涂距离过远,涂层结合强度低,抗冲蚀及磨蚀能力差。徐一等^[34]分析了基于超音速等离子喷涂的WC-10Co4Cr涂层在不同条件下的耐磨行为,结果表明:涂层中存在未融化颗粒,涂层硬度达到1 408.2 HV,干燥条件下涂层磨损以磨料磨损为主,湿润条件下以黏着磨损为主,后者磨损率远低于前者。袁晓静等^[35]研究发现采用PS所得纳米结构WC-10Co4Cr涂层在高低温下的摩擦因数和磨损率优于微米结构涂层,可有效提高1Cr18Ni9Ti钢在3.5%(质量分数)NaCl溶液中的腐蚀电位。JIANG等^[36]对比分析了基于APS和HVOF技术制备的Al₂O₃-40TiO₂和WC-10Co-4Cr两种涂层在NaCl溶液中的耐蚀性,结果表明,短期内WC-10Co-4Cr涂层的耐蚀性更好,但是Al₂O₃-40TiO₂涂层的长期耐蚀性更好。HOU等^[37]研究了喷涂功率对WC-(W,Cr)2C-Ni涂层性能的影响,结果表明中等喷涂功率下所得涂层的断裂韧性最高,界面结合力最强,耐磨性最好。

3 等离子熔覆

等离子熔覆技术的原理在于将等离子弧热源作用在预制的熔覆层粉末或者同步送粉,使熔融的粉末与部分熔化的基体呈现冶金结合。

3.1 工艺参数对熔覆层的影响

卢金斌等^[38]利用等离子熔覆技术在Q235碳钢表面制备了含50%(质量分数)Ni-WC的Fe-Cr-B-Si合金涂层,其显微硬度为560~820 HV。屈平等^[39]采用等离子熔覆技术在Q235碳钢表面制备了Ti(C,N)-WC涂层,结果表明在一定范围内,涂层硬度和耐磨耐蚀性随碳化钨含量提高而提高,并且当碳化钨质量分数为12%时,涂层的耐磨耐蚀性最优。王笑生^[40]采用等离子熔覆技术在Q235钢板上制备了镍基碳化钨熔覆层,并分析了铸造和单晶碳化钨含量对镍基合金防护性能的影响。结果表明在Ni25合金熔覆层中加入60%(质量分数)铸造碳化钨,涂层耐磨性最佳,单晶碳化钨熔覆层的耐磨性较低。PENG等^[41-42]研究发现随着WC含量的增加,FeCoCrNi高熵合金/碳化钨复合涂层的组织变得更加复杂,当WC质量分数为60%时,涂层具有最佳的耐磨性,硬度为690 HV。

3.2 熔覆层的耐磨耐蚀性

XIE等^[43]研究表明,三种镍基WC涂层表面无裂纹且孔隙率极低(<1%)。等离子熔覆层的维氏显微硬度随熔覆WC量的增加而增加。熔覆层的显微硬度和电化学行为与镀镍WC粉的含量有关,熔覆层的腐蚀可能是熔覆层中相间的微镀锌腐蚀。胡明强^[44]采用等离子熔覆技术在高锰钢表面制备碳化钨-镍基合金复合涂层,结果表明熔覆涂层厚度可达1~2 mm,且涂层质量好,表面无缺陷,涂层表面硬度最高为621.77 HV。吴磊等^[45]利用等离子熔覆技术制备了涂层,研究碳化钨含量对于镍基碳化钨涂层组织性能的影响,结果表明涂层表面无气孔缺陷,在一定范围内,涂层耐磨性和硬度随碳化钨含量显著提高,当碳化钨质量分数为50%时,涂层硬度和耐磨性最好,硬度达到1 024 HV。XIE等^[46]研究发现在室温下,涂层的耐磨性随着WC含量的增加而逐渐提高,硬度最高达到954.64 HV,随着温度的升高,涂层的耐磨性下降,碳化钨/钴基涂层的磨损机制为氧化磨损。

4 激光熔覆

激光熔覆(LC)是将高功率密度激光束辐照到基材表面,使基材与熔覆层材料迅速熔化凝固,获得与基材冶金结合的涂层。

4.1 工艺参数对熔覆层的影响

张煜等^[47]对比分析了超高速和低速激光熔覆技术对涂层的影响,结果表明采用超高速激光熔覆技术,可以在保证冶金结合的同时,大大抑制基体元素对涂层稀释,同时抑制涂层中WC颗粒热损伤和空隙的形成,降低残余应力,避免裂纹产生。邱焕霞等^[48]通过数值模拟方法发现预热可明显降低激光熔覆层的温度梯度和冷却速度,抑制表面裂纹生成,且最优预热温度为200℃。刘泽^[49]研究了不同尺度WC对Ni基熔覆层微观结构的影响,结果表明在微米尺度涂层的界面结合力和晶粒尺寸随热处理温度的提高而升高,但是硬度和耐蚀性则随热处理温度的提高而下降;亚微米结构涂层的摩擦因数和磨损率随热处理温度的升高呈现出先降低后增加的现象;微纳米结构涂层的冲蚀磨损速率分别为微米和亚微米结构涂层的1/24、1/6。朱继祥^[50]研究发现,当WC质量分数为20%~50%时,WC铁基涂层的硬度值随WC含量的上升而提高,且当WC质量分数为30%时,涂层的耐磨性最优。采用数值模

拟方法研究发现熔覆层与基材结合处存在较大残余拉应力,易产生纵向裂纹。樊帅奇等^[51]讨论了 Ni60+30%(质量分数)WC 涂层和 Ni60+30%(质量分数)Ni 涂层中 WC 初始形态对涂层性能的影响。结果显示,前者内部存在少量孔洞和微裂纹,后者组织均匀致密,无气孔和裂纹。ZHOU 等^[52]研究发现激光熔覆涂层的裂纹主要源于熔覆层和基体的界面,提高激光熔覆速率可以降低复合涂层的孔隙率,此外,提高基体预热温度可大大降低涂层出现裂纹可能性。ERFANMANESH 等^[53]对比分析了镀镍 WC-12Co 粉末和商用 WC-12Co 粉末对激光熔覆层性能的影响,结果发现前者能显著降低复合涂层的孔隙率,获得高质量的复合涂层。BARTKOWSKI 等^[54]分析了工艺参数对于 Fe/WC 金属基复合涂层性能的影响,结果表明:复合层厚度随着激光功率和进粉速度提升而增厚,当送料速度为 12.50 g/min 时,复合涂层的显微硬度达到 1 400 HV,涂层的耐蚀性随着涂层中 WC 含量的增大而增强。

4.2 熔覆层的耐磨耐蚀性

李礼等^[55]在 Cr12MoV 钢表面激光熔覆 Ni60A-35%WC 涂层,研究显示涂层与基体间无裂纹和气孔缺陷,硬度为基体的 1.7 倍。涂层的磨损机理为疲劳磨损和磨粒磨损,而基体则为黏着磨损和磨粒磨损。肖奇等^[56]研究发现在一定范围内,WC 可细化 Ni60A-WC 涂层晶粒,Ni60A-WC 涂层在不同 pH 环境中的耐蚀性与 WC 加入量呈负相关,复合涂层在中性、碱性和酸性腐蚀环境中的耐蚀性依次递减。杨行等^[57]分析了 WC 含量对于 WC-Cr 覆层耐磨性影响,结果表明 25WC-1.5C 覆层的显微硬度达到 666.3 HV,磨损率仅为基体的 30%。何波等^[58]研究发现碳化钨/钴基合金复合涂层的显微硬度和耐磨性比 Co 基合金涂层明显提高,且磨损质量损失量仅为后者的 48%。

5 真空熔覆

真空熔覆技术是将具有需某种特殊性能的金属粉末涂敷在预处理后的零件表面,在一定真空度下,经一段时间高温烧制后,涂覆层与基体间产生分子间结合或化学结合,进而提高零件的使用性能和寿命的技术。

5.1 参数对熔覆层的影响

路王珂等^[59-60]分析了 WC 含量、熔覆温度对镍

基真空熔覆层的影响。结果表明随着 WC 质量分数从 20%增大到 40%,熔覆层的耐磨性提高,但是结合力出现先增后降趋势,当 WC 质量分数为 40%时,WC 颗粒之间或者周围出现大量孔洞。熔覆层厚度随熔覆温度升高而增厚,但若温度过高,WC 颗粒会分解严重,熔覆层耐磨性下降,最优熔覆温度为 1 225 ℃。马世博等^[61]研究发现,当 WC 质量分数小于 60%时,涂层缺陷较少,耐磨性、显微硬度均随 WC 含量上升而增强;但当 WC 质量分数超过 60%,涂层出现气孔和未浸润缺陷,结合力下降。何力^[62]分析指出 WC-10Ni/NiCrBSi 涂层中 WC 的适宜加入量(质量分数)为 30%~45%,此时涂层与基体达到冶金结合,当 WC 含量过少时涂层表面成型较差,当过多时涂层与基体润湿反应较差,无法形成有效冶金结合。苏科勇等^[63]研究发现能与正火态 45 钢基体形成有效冶金结合的 WC 质量分数为 10%~40%,随着 WC 含量提高,WC 颗粒周围孔洞增多,涂层耐蚀性降低,最佳 WC 质量分数为 30%。姚永强等^[64]分析了真空和基体预热温度对于 WC-Ni 基涂层性能的影响,结果表明基体预热和真空环境中涂层显微硬度低于大气环境中氮气吹扫和不开预热的涂层,但是前者的稳定摩擦因素仅为 0.5,且耐磨性更高。YANG 等^[65-66]研究发现基于真空熔覆技术制备的 Ni/WC 复合涂层由复合层、过渡层、熔合层和扩散影响层组成,复合层的显微硬度为基体的 6 倍、整个复合材料熔覆层的形成主要取决于烧结颈的形成和长大、WC 颗粒的浸润以及其随温度和保温时间的增加而完全融合。TAO 等^[67]研究表明,原位合成的 WC 增强相在复合层中的分布比外部添加的 WC 相更加均匀,并且后者易发生断裂和 WC 颗粒脱落。

5.2 熔覆层的耐磨耐蚀性

黄新波等^[68]研究发现当添加 15%(质量分数)WC 时涂层的耐蚀性最佳,在 10%(质量分数)盐酸溶液中,涂层耐蚀性为 45 钢基体的 10 倍,腐蚀出现在基体和涂层界面处。周新星^[69]研究发现熔覆层硬度随 WC 含量提高而提高,少量 WC 可以增强涂层的耐蚀性,但 WC 量过大会导致位错和点阵畸变,降低涂层耐蚀性。张喜冬^[70]研究表明当熔覆温度为 1 225 ℃,WC 质量分数为 30%时,熔覆层的耐磨性和耐蚀性分别为基体 45 钢的 6 倍和 10 倍。ZHANG 等^[71]在制备真空熔覆 WC/NiCrBSi 层的过程中发现,原位合成 WC 增强相和外部添加 WC

增强相涂层的耐蚀性都高于 316L 不锈钢基材,但是前者 WC 颗粒与基体紧密结合,其锚定作用可防止微裂纹的形核和扩展,故前者的耐蚀性、抗空化能力更强。HAN 等^[72]分析了熔覆温度和 WC 含量对于 NiFeCrBSi/WC 熔覆层硬度和耐磨性的影响,表明熔覆温度越高,WC 溶解越严重,当熔覆温度为 1 225 ℃时,涂层的耐磨性随 WC 含量的增加先增大后减小,当熔覆层 WC 质量分数为 30%时,其耐磨性较好。

6 结束语

超声速火焰具有较低的温度和高速的焰流优点,所制备的 WC 涂层具有硬度高、孔隙率低、氧化物、脱碳少和耐磨性好等特点,因此可用于快速制备大面积且厚度可控的梯度耐磨涂层。但是由于设备运行成本高且粉末价格较高,因此 WC 涂层的制备成本较高,且涂层容易存在夹杂和副产物。等离子喷涂由于喷涂温度较高,涂层具备结合强度高、工作环境适应性强优点,且在制备过程中辅助惰性气体保护,因此粉末不易被氧化,但是涂层制备成本比较高,设备比较复杂。基于等离子喷涂技术制备的金属涂层与基体的结合属于机械结合范畴,涂层中的硬质颗粒很容易脱落。激光熔覆技术具备速度快、热影响区域小、工件形变小、熔覆层稀释率小等特点,因此环保、高效、灵活,自动化程度高,但是由于其能量集中、能量大,因此涂层中会存在较大的残余应力,且容易产生裂纹和气孔缺陷。等离子熔覆技术,其熔化速度快,涂层和基体结合力强,硬度均匀,孔隙率低,不容易产生质量缺陷,且涂层中的氧化物与杂质相对较少,因此涂层更厚、耐磨性和耐蚀性也更高,但存在涂层质量控制比较困难,涂层精度难以精准控制、实际性能难以满足预期目标等缺点。

如何进一步优化工艺参数,提高涂层的致密度、强化涂层与基体的结合力,是不同 WC 涂层制备技术后续发展的重点。当前涂层耐磨性和耐腐蚀性的研究主要针对单一因素,比如干摩擦或者湿摩擦,或者单一腐蚀环境。但在涂层实际服役过程中,可能是腐蚀、磨损和疲劳等多因素协同作用,因此有必要对复杂服役环境中涂层的性能开展深入研究。

参考文献:

[1] DING X, CHENG X D, YU X, et al. Structure and cavitation erosion behavior of HVOF sprayed multi-

dimensional WC-10Co4Cr coating[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(3): 487-494.

[2] BONACHE V, SALVADOR M D, GARCÍA J C, et al. Influence of plasma intensity on wear and erosion resistance of conventional and nanometric WC-Co coatings deposited by APS[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(3): 549-559.

[3] 姚舜晖. 碳化钨几何形状对碳化钨增强镍基合金火焰喷涂涂层的摩擦性能影响[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(3): 193-199.

[4] 赵文胜. 粉末粒径及涂层厚度对 HVOF 制备 WC-10Co-4Cr 涂层耐蚀性能的影响[D]. 太原: 中北大学, 2021.

[5] 王大锋, 马冰, 马良超, 等. WC 颗粒尺寸对超音速火焰喷涂 WC-10Co4Cr 涂层组织及力学性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2019, 37(6): 434-443.

[6] 赵立英, 刘平安, 代洪川. 丙烷对爆炸喷涂碳化钨涂层结构和力学性能的影响[J]. 高校化学工程学报, 2016, 30(2): 466-471.

[7] 张磊, 霍嘉翔, 赵坚, 等. 工艺参数对氧-丙烷超音速火焰喷涂纳米 WC-CoCr 涂层组织及性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2021, 49(4): 15-22.

[8] 刘杰, 刘侠, 胡凯, 等. 煤油流量对 HVOF 喷涂 WC-12Co/NiCrBSi 复合涂层显微组织与性能的影响[J]. 中国表面工程, 2020, 33(3): 119-128.

[9] 韩旭, 杜修忻, 郭孟秋, 等. 超音速火焰喷涂 WC-10Co4Cr 粒子行为试验研究[J]. 失效分析与预防, 2020, 15(3): 172-178.

[10] SONESTEDT M, FRODELIUS J, PALMQUIST J P, et al. Microstructure of high velocity oxy-fuel sprayed Ti2AlC coatings[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(10): 2760-2769.

[11] CABRAL-MIRAMONTES J A, GAONA-TIBURCIO C, ALMERAYA-CALDERÓN F, et al. Parameter studies on high-velocity oxy-fuel spraying of CoNiCrAlY coatings used in the aeronautical industry[J]. International Journal of Corrosion, 2014, 2014: 703806.

[12] MÉNDEZ-MEDRANO K O, MARTÍNEZ-GONZÁLEZ C J, ALVARADO-HERNÁNDEZ F, et al. Microstructure and properties characterization of WC-Co-Cr thermal spray coatings[J]. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2018, 6(4): 482-497.

[13] JONDA E, ŁATKA L, TOMICZEK A, et al. Microstructure investigation of WC-based coatings prepared by HVOF onto AZ31 substrate[J].

- Materials,2021,15(1):40.
- [14] 代雪婷,南健,程庆元.碳化钨代铬涂层耐磨及电化学腐蚀性能研究[J].长沙航空职业技术学院学报,2020,20(1):81-84.
- [15] 刘福朋.碳化钨、碳化铬类硬质合金涂层及耐磨耐蚀性能研究[D].银川:宁夏大学,2020.
- [16] 刘建武,张雪莹,张吉阜,等.热喷涂碳化钨涂层对40CrNiMoA钢耐腐蚀与抗疲劳性能的影响[J].热加工工艺,2015,44(8):125-128.
- [17] 黄博,吴庆丹,魏新龙,等.超音速火焰喷涂 WC-10Co-4Cr涂层的摩擦腐蚀性能研究[J].表面技术,2020,49(1):285-293.
- [18] 范俊,杨超,刘志强,等.超音速火焰喷涂 WC-Co-Ni涂层电化学腐蚀行为研究[J].化学研究与应用,2020,32(9):1547-1551.
- [19] KOMAROV P,JECH D,TKACHENKO S,et al. Wetting behavior of wear-resistant WC-Co-Cr cermet coatings produced by HVOF: the role of chemical composition and surface roughness [J]. Journal of Thermal Spray Technology,2021,30(1):285-303.
- [20] JIN Y F,KONG W C,SHENG T Y,et al. Effect of load on friction-wear behavior of HVOF-sprayed WC-12Co coatings [J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2017,26(7):3465-3473.
- [21] ASL S K,RABIZADEH T,NOORI N F. The effects of heat treatment on the corrosion behavior of HVOF-sprayed WC-17 wt. % Co coatings [J]. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces,2019,55(5):936-941.
- [22] 宋超群,林铁松,何鹏,等.超音速等离子喷涂 WC-17Co涂层的工艺及性能分析[J].焊接学报,2016,37(11):35-38,130.
- [23] 李万青,林铁松,宋超群,等.超音速等离子喷涂 WC-17Co纳米涂层的性能[J].稀有金属材料与工程,2017,46(3):807-811.
- [24] 黎红英,罗朝勇,谢善,等.大气等离子喷涂和超音速火焰喷涂制备的 CoMoCrSi 涂层组织结构和性能[J].热喷涂技术,2020,12(1):62-68.
- [25] AFZAL M,AJMAL M,KHAN A N,et al. Surface modification of air plasma spraying WC-12% Co cermet coating by laser melting technique[J]. Optics Laser Technology,2014,56:202-206.
- [26] 鲍君峰,王辉,张康.等离子喷涂不同尺度 WC 钴基耐磨金属陶瓷涂层组织及性能研究[J].热喷涂技术,2016,8(4):23-27.
- [27] 富伟,陈清宇,徐明哈,等.等离子喷涂 WC-Ni涂层的组织结构及力学性能[J].金属热处理,2019,44(4):211-215.
- [28] 安连彤,孙成琪,高阳.电弧电压对低能等离子喷涂 WC-Co 涂层组织及性能的影响[J].中国表面工程,2016,29(4):111-117.
- [29] 伏利,陈小明,吴燕明,等.高焓等离子喷涂 WC-10Co-4Cr涂层的微观组织及其拉伸断裂机理[J].腐蚀与防护,2018,39(2):95-98,102.
- [30] KUZMIN V,GULYAEV I,SERGACHEV D,et al. Supersonic air-plasma spraying of carbide ceramic coatings[J]. Materials Today: Proceedings,2021,38:1974-1979.
- [31] ANWAR M Y, AJNAL M, AFzal M, et al. Effects of laser treatment on WC-12Co lermet coating by air plasma spraying technique[J]. Journal of Faculty on Engineering & Technology, 2014,21(2):1-9.
- [32] 梁存光.大气等离子喷涂 WC-12Co 涂层工艺参数优化及抗冲蚀磨损性能研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2018.
- [33] 梁存光,李新梅,张鹏飞.等离子喷涂 WC-12Co 涂层抗冲刷磨损行为[J].表面技术,2017,46(9):7-12.
- [34] 徐一,于修水,蒋穹,等.超音速等离子喷涂 WC10Co 4Cr 涂层干湿条件下的摩擦磨损性能研究[J].中国钨业,2019,34(5):54-58.
- [35] 袁晓静,查柏林,陈小虎,等.等离子喷涂 WC-10Co-4Cr涂层的组织演变与抗腐蚀磨损性能[J].稀有金属材料与工程,2019,48(2):473-481.
- [36] JIANG L H,DAI W W,WEI Z,et al. The effect of immersion time on corrosion performance of the Al_2O_3 -40TiO₂ and WC-10Co-4Cr coatings in 3.5 wt.% NaCl solution[J]. Surface Topography: Metrology and Properties,2022,10(1):015013.
- [37] HOU G L, AN Y L, LIU G, et al. Effect of atmospheric plasma spraying power on microstructure and properties of WC-(W,Cr)₂C-Ni coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011,20(6):1150-1160.
- [38] 卢金斌,弓金霞,彭竹琴,等.等离子熔覆添加碳化钨的铁基合金涂层的研究[J].表面技术,2009,38(4):4-6.
- [39] 屈平,马跃进,赵建国,等.适宜碳化钨含量提高 Ti (C,N)-WC 涂层耐磨耐蚀性[J].农业工程学报,2014,30(16):33-40.
- [40] 王笑生.等离子熔覆碳化钨增强镍基合金耐磨覆层的研究[D].郑州:郑州大学,2020.
- [41] PENG Y B,ZHANG W,LI T C,et al. Effect of WC content on microstructures and mechanical properties of FeCoCrNi high-entropy alloy/WC composite coatings by plasma cladding[J]. Surface and Coatings Technology,2020,385:125326.

- [42] PENG Y B, ZHANG W, LI T C, et al. Microstructures and mechanical properties of FeCoCrNi high entropy alloy/WC reinforcing particles composite coatings prepared by laser cladding and plasma cladding [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019,84:105044.
- [43] XIE G Z, SONG X L, ZHANG D J, et al. Microstructure and corrosion properties of thick WC composite coating formed by plasma cladding [J]. Applied Surface Science, 2010,256(21):6354-6358.
- [44] 胡明强. Mn13 钢等离子熔覆碳化钨-镍基合金复合涂层组织与性能的研究[D]. 广州:广东工业大学, 2021.
- [45] 吴磊,浦娟,吴铭方,等. 不同碳化钨含量对等离子弧熔覆镍基碳化钨涂层组织及性能的影响[J]. 材料导报, 2021,35(16):16111-16114,16119.
- [46] XIE Z X, ZHANG C, WANG R D, et al. Microstructure and wear resistance of WC/Co-based coating on copper by plasma cladding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 821-833.
- [47] 张煜,娄丽艳,徐庆龙,等. 超高速激光熔覆镍基 WC 涂层的显微结构与耐磨性能[J]. 金属学报, 2020,56(11):1530-1540.
- [48] 邱焕霞,俞文斌,宋建丽,等. H13 钢表面激光熔覆 316L/H13+20%WC 复合涂层温度场数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2022,59(3):314.
- [49] 刘泽. Ni-65WC 激光熔覆涂层微观结构及性能研究 [D]. 西安:西安科技大学, 2021.
- [50] 朱继祥. WC、TiC 增强铁基复合涂层组织和摩擦磨损性能的研究[D]. 合肥:安徽建筑大学, 2021.
- [51] 樊帅奇,张蕾涛,李海涛,等. WC 初始状态对激光熔覆 Ni60/WC 涂层组织及性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021,42(6):157-162.
- [52] ZHOU S F, ZENG X Y, HU Q W, et al. Analysis of crack behavior for Ni-based WC composite coatings by laser cladding and crack-free realization [J]. Applied Surface Science, 2008,255(5):1646-1653.
- [53] ERFANMANESH M, SHOJA-RAZAVI R, ABDOLLAH-POUR H, et al. Influence of using electroless Ni-P coated WC-Co powder on laser cladding of stainless steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2018,348:41-54.
- [54] BARTKOWSKI D, BARTKOWSKA A, JURČI P. Laser cladding process of Fe/WC metal matrix composite coatings on low carbon steel using Yb: YAG disk laser [J]. Optics & Laser Technology, 2021,136:106784.
- [55] 李礼,叶宏,刘越,等. Cr₁₂MoV 钢表面激光熔覆 Ni/Ni-WC 梯度涂层的组织与耐磨性能[J]. 金属热处理, 2021,46(9):223-228.
- [56] 肖奇,孙文磊,刘金朵,等. Ni60A/WC 激光熔覆涂层表面抗蚀行为 [J]. 材料导报, 2021, 35(8): 8146-8150.
- [57] 杨行,王华,林相,等. 激光熔覆铁基 WC-Cr 覆层的摩擦磨损性能研究[J]. 热加工工艺, 2021,50(24):106-109.
- [58] 何波,庄家良,兰姣姣,等. 激光熔覆碳化钨/钴基合金复合涂层的组织与耐磨性能[J]. 应用激光, 2017,37(3):314-318.
- [59] 路王珂,李亚敏,张喜冬,等. WC 含量对真空熔覆镍基合金涂层组织及性能的影响[J]. 材料保护, 2018, 51(5):94-97,102.
- [60] 路王珂,李亚敏,张喜冬,等. 熔覆温度对真空熔覆 WC 增强镍基合金层组织及性能的影响[J]. 材料保护, 2017,50(7):64-67,70.
- [61] 马世博,邵明杰,侯瑞东,等. 碳化钨对真空熔覆铁基复合涂层结构和性能的影响[J]. 燕山大学学报, 2016,40(2):116-122.
- [62] 何力. 真空熔覆 WC-10Ni/NiCrBSi 复合涂层的力学性能建模及工程应用[D]. 镇江:江苏科技大学, 2018.
- [63] 苏科勇,张明,王文慧,等. 真空熔覆 WC 颗粒增强镍基合金涂层的组织与性能[J]. 材料保护, 2018, 51(11):80-83.
- [64] 姚永强,林晨,申井义,等. 真空环境与基体预热对激光熔覆 WC 增强镍基合金涂层组织和性能的影响[J]. 机械工程材料, 2020,44(5):49-53.
- [65] YANG G R, HUANG C P, SONG W M, et al. Microstructure characteristics of Ni/WC composite cladding coatings [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2016, 23(2): 184-192.
- [66] YANG G R, SONG W M, WANG N, et al. Fabrication and formation mechanism of vacuum cladding Ni/WC/GO composite fusion coatings[J]. Materials Today Communications, 2020,25:101342.
- [67] TAO X P, ZHANG S, WU C L, et al. In situ synthesised WC-reinforced Co-based alloy layer by vacuum cladding [J]. Surface Engineering, 2018, 34(4):316-323.
- [68] 黄新波,贾建援,林化春. 钴基合金-碳化钨复合涂层的耐蚀性能[J]. 机械工程材料, 2003,27(11):49-51.
- [69] 周新星. 高频感应真空熔覆金属陶瓷的组织及性能研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2014.

[70]

张喜冬. 真空熔覆碳化钨增强镍基合金熔覆层组织及性能的研究[D]. 郑州:郑州大学,2015.

[71]

ZHANG H F, ZHANG C H, WANG Z Y, et al. Microstructure and corrosion behaviour of WC/NiCrBSi coatings by vacuum cladding[J]. Materials Science and Technology,2022,38(1):19-29.

[72]

HAN C F, ZHANG X D, SUN Y F. Microstructure and properties of NiFeCrBSi/WC composite coatings fabricated by vacuum cladding[J]. Physics of Metals and Metallography,2019,120(9):898-906.

Research Progress on WC Composite Coating Preparation Technique and Performance of
Wear Resistance and Corrosion Resistance

CHEN Zhicong¹, HUANG Chao¹, LIU Wei¹, SHEN Limin^{1,2}

(1. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. National Engineering Research Center of Coal Preparation and Purification, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Tungsten carbide coatings have the characteristics of high chemical stability, high hardness, and good wear resistance, and are commonly used in the preparation of metal surface coatings. Starting from the different preparation principles of tungsten carbide coatings, the research progress of supersonic flame spraying technology, plasma spraying, plasma melting, laser melting, and vacuum melting tungsten carbide coatings at home and abroad were reviewed. The wear resistance and corrosion resistance of the coatings with different preparation technologies were analyzed, and the problems and future research directions of coating preparation technology were discussed.

Key words: tungsten carbide coating; supersonic flame spraying; plasma spraying; plasma cladding; laser cladding; vacuum cladding