

WC 含量对激光熔覆 NiCrBSi-WC 复合涂层显微结构及力学性能的影响

杨二娟¹, 李勇¹, 李巍¹, 李太江¹, 李毅超², 刘峰², 米紫昊¹, 王博¹

(1.西安热工研究院有限公司, 西安 710054;

2.华能西藏雅鲁藏布江水电开发投资有限公司, 拉萨 860000)

摘要:目的 为盾构、勘探及采矿等高载荷严苛磨损条件下的构件表面防护提供一种新的涂层方法。方法 以激光熔覆技术为手段, 在 NiCrBSi 粉末中混入 30%~80% (体积分数) 的球形 WC 颗粒, 用以制备 NiCrBSi-WC 复合涂层。研究了 WC 颗粒含量对涂层显微组织形成、硬度、断裂韧性和耐磨性的影响规律。采用 SEM 分析了涂层的显微组织; 通过显微维氏硬度计测试涂层的硬度; 通过压痕法测试涂层的断裂韧性; 采用磨粒磨损试验表征涂层的耐磨性。**结果** 当 WC 颗粒体积分数低于 60% 时, 熔融金属的黏度较低, 密度更大的 WC 颗粒会沉淀, 导致涂层表层的 WC 颗粒含量较低; 当 WC 颗粒体积分数介于 60%~80% 时, WC 颗粒在涂层内均匀分布, 涂层内无气孔及裂纹等缺陷。当 WC 颗粒体积分数达到 80% 时, 熔体黏度过大, 使气体难以及时逸出, 在涂层内形成大量气孔。随着 WC 体积分数由 30% 上升到 80% 时, 涂层的平均硬度由 67HRC 提高到 85HRC。涂层的断裂韧性随 WC 含量的提高, 出现先升高后下降的反常现象。60%WC 含量的复合涂层表现出最佳的耐磨性, 比滚刀常用材料 H13 钢提高约 9 倍。**结论** 采用常规激光熔覆技术时, 添加 40%~60% 范围内的硬质陶瓷颗粒, 可获得硬质颗粒分布均匀且耐磨性与抗冲击性能优异的复合涂层。

关键词: 金属陶瓷复合涂层; 激光熔覆; WC 颗粒; 显微组织; 硬度; 断裂韧性; 耐磨性

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)09-0238-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.09.027

Effect of WC Particle Content on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Cladded NiCrBSi-WC Composite Coating

YANG Er-juan¹, LI Yong¹, LI Wei¹, LI Tai-jiang¹, LI Yi-chao², LIU Feng², MI Zi-hao¹, WANG Bo¹

(1.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd, Xi'an 710054, China;

2.Huaneng Tibet Yarlung Zangbo River Hydropower Development Investment Co., Ltd, Lhasa 860000, China)

ABSTRACT: The work aims to provide a new coating method for protecting component surface under severe wear conditions of high load during shielding, exploration, mining, etc. NiCrBSi/WC composite coating was prepared by laser cladding through adding 30%~80% spherical WC particles in NiCrBSi powders. Effect of the WC particle content on microstructure formation, hardness, fracture toughness and abrasive wear resistance was systematically investigated. Microstructure of coating was analyzed by SEM, hardness was tested by the Vickers hardness tester, the fracture toughness was investigated by indentation

收稿日期: 2019-02-25; 修订日期: 2019-07-01

Received: 2019-02-25; Revised: 2019-07-01

基金项目: 中国华能集团科技项目 (HNKJ17-H22-02)

Fund: Supported by China Huaneng Group Science and Technology Project (HNKJ17-H22-02)

作者简介: 杨二娟 (1983—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电站关键部件焊接修复与表面防护技术。邮箱: yangerjuan@tpri.com.cn

Biography: YANG Er-juan (1983—), Female, Doctor, Senior engineer, Research focus: remanufacturing and surface engineering in power station. E-mail: yangerjuan@tpri.com.cn

method and the wear resistance was characterized by abrasive wear test. When mass fraction or volume fraction of WC particle was lower than 60%, the viscosity of molten metal was lower, and WC particles with higher density precipitated, resulting in lower WC particle content in the coating surface layer. When the content of WC particles ranged from 60% to 80%, WC particles were uniformly distributed in the coating, and there were no defects such as pores and cracks in the coating. As mass fraction of WC particles increased to 80%, the melt viscosity was too high, which made it difficult for gas to escape in time and formed a large number of pores in the coating. As the WC mass fraction increased from 30% to 80%, the average hardness of the coating increased from 67HRC to 85HRC. The fracture toughness of the coating increased first and then decreased with the increase of WC content. The composite coating with 60%WC content showed the best wear resistance, which was about 9 times higher than that of H13 steel as the common hob material. When conventional laser cladding technology is adopted, a composite coating with uniform distribution of hard particles and excellent wear resistance and impact resistance can be obtained by adding hard ceramic particles in the range of 40%~60%.

KEY WORDS: composite coating; laser cladding; WC particle; microstructure; hardness; fracture toughness; wear resistance

盾构技术作为隧道建设的一种先进技术,已广泛应用于地铁、铁路、公路、市政、水电等工程领域。其中盾构机刀具的使用寿命对盾构机的工作效率及运行程度具有重要影响^[1-2]。目前商用盾构机的刀具材料主要为淬火态的 H13 热作模具钢(4Cr5MoSiV1),其硬度为 50~57HRC,在以风化泥岩及土壤为主的地质结构内表现出良好的服役性能,但在以高硬度花岗岩为主的地质条件下,H13 钢耐磨性不足,造成刀具失效十分频繁,刀具寿命显著缩短。以滚刀为例,当地质条件由土壤变为花岗岩时,滚刀的掘进长度可由 200 m 降低到 6 m 以下^[2]。频繁的更换刀具不仅会增加运行成本,还会显著降低掘进效率,拖缓工期。对刀具材质的改进是延长其服役寿命的常规有效方法,但对整体刀具材料进行更换成本较高,且耐磨性的提高往往以牺牲韧性为代价。

与常规机械的磨损条件不同,盾构机刀具在掘进过程中会承受极高的平均接触应力(>100 MPa)^[3]。对失效情况进行统计发现,70%的失效是硬度不足引起的磨损失效,同时还有 20%左右的脆性崩刀失效^[4]。因此,需要刀具材料在具备较高耐磨性的同时,兼具高的韧性,以防止出现脆性断裂失效。热喷涂^[5]、堆焊^[6]及激光熔覆^[7]等表面技术,可在提高构件表面耐磨性的同时,不损害基材的韧塑性,且与更换整个刀具相比,成本更低,是提高刀具服役寿命的潜在有效方法。其中,激光熔覆及堆焊改性层与钢基基材的冶金结合可保证在较高冲击载荷作用下刀具表面改性层的完整性。

综上,本文通过激光熔覆技术,在 NiCrBSi 粉末中混入 30%~80%的球形 WC 颗粒,制备 NiCrBSi-WC 复合涂层。主要研究了 WC 颗粒含量对复合涂层显微组织的形成、硬度、断裂韧性和耐磨性的影响规律,以及复合涂层的开裂及磨损机理。以期开发一种具有优异耐磨性及较高韧性的复合涂层,为盾构机滚刀表面强化提供一种新的方法。

1 试验

1.1 试验材料及涂层制备

以商用的气雾化球形 NiCrBSi 粉末(Ni60,成分: Ni 61.7%, Cr 15.5%, Fe 15.4%, B 3.7%, Si 3.0%, C 0.7%)及球形铸造 WC 颗粒为原料。NiCrBSi 合金粉末的粒度介于 45~100 μm,球形 WC 颗粒的粒度为 45~100 μm。为了研究 WC 含量对涂层组织形成规律及力学性能的影响,在 NiCrBSi 粉末中混入体积分数为 30%、45%、60%及 80%的球形 WC 颗粒,以获得 4 种不同 WC 颗粒含量的混合粉末,采用滚筒球磨机将上述粉末分别混合 5 h 后作为熔覆粉末。以 H13 热作模具钢板(50 mm×50 mm×20 mm)作为基材,激光熔覆前采用丙酮对基材表面进行清洗,去除油污。

本研究以额定功率为 4 kW 的 TRUMPF Nd:YAG 固体激光发生器为激光光源,通过六轴机械手,控制激光光源的扫描速度和扫描路径。以氩气作为送粉气体和保护气体,采用自行开发设计的同轴送粉器,将混合粉末在欠焦的条件下送至基材表面的熔池内。试验过程中采用多层熔覆(3 层),单层熔覆层的厚度约为 3.5~5 mm,熔覆层的最终厚度为 10~15 mm。激光熔覆过程中采用同轴送粉装置,以氮气作为送粉气体和保护气体,送粉气的压力设置为 0.4 MPa,送粉器流量设置为 18 L/min。采用前期针对 NiCrBSi 金属熔覆层优化的熔覆参数进行涂层制备,具体熔覆参数如表 1 所示。

表 1 激光熔覆制备 NiCrBSi/WC 复合涂层参数
Tab.1 Laser cladding parameters for deposition of NiCrBSi/WC composite coating

Parameters	Value
Power/kW	2500
Laser tranverse speed/(mm·s ⁻¹)	5
Defocusing distance/mm	5
Powder feed rate/(g·min ⁻¹)	35
Tracks overlap ratio/%	50

1.2 显微组织表征及耐磨损性能测试

采用扫描电子显微镜 (SEM, TESCAN), 表征涂层的断面组织和断裂韧性及磨损性能测试后的样品表面, 并采用能谱分析 WC 颗粒/NiCrBSi 基体之间的界面反应产物。采用洛氏硬度、显微维氏硬度计分别对熔覆层的宏观硬度和各组织显微硬度进行测试。采用维氏硬度计在熔覆层抛光断面诱发裂纹, 测试裂纹的长度, 用式 (1) 估算熔覆层的断裂韧性 (K_{IC})^[8-9]:

$$K_{IC} = \frac{0.113HD^{0.5}}{\left(1 + \frac{C_L}{2D}\right)^{1.5}} \quad (1)$$

式中, H 为熔覆层的洛氏硬度, D 为维氏压痕的对角线长度, C_L 为四个对角线尖角处裂纹长度的平均值。本文采用维氏硬度计在复合涂层断面诱发裂纹时选用的载荷为 20 kg, 保载时间为 30 s; 洛氏硬度测试中选用的载荷为 0.3 kg, 保载时间为 30 s。

依照 ASTM G98 标准, 采用销盘式磨损实验测试了涂层的耐磨损性能。测试前将带有熔覆层的基材机加工成尺寸为 30 mm×5 mm×5 mm 的矩形块, 并将改性层朝下作为测试销; 以硬度高于花岗岩 (600HV) 的 SiC (3000HV) 砂纸盘作为对磨件, 测试原理如图 1 所示。

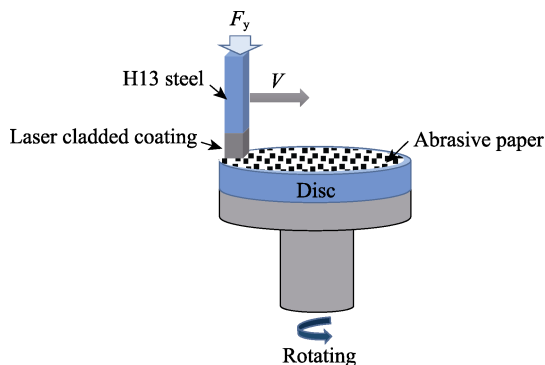


图1 销盘两体磨损试验原理图
Fig.1 Schematic diagram for working principle of the Pin-on-Disc two-body wear test

摩擦压力设定为 200 N, 磨盘的转速为 60 rad/min, 测试过程中, 样品沿径向以 $V=4$ mm/r 的速度移动, 以保证所有的摩擦发生在未被磨损的 SiC 砂纸表面。采用 400# 的 SiC 砂纸作为对磨材料, 每张砂纸磨完一个行程 (每张砂纸对应的摩擦行程为 9.639 m), 更换新砂纸。采用精度为 0.1 mg 的电子天平测试不同样品的失重, WC 含量的不同导致不同复合涂层的密度存在差异, 因此将质量损失转化为体积损失, 以体积损失作为评价不同复合涂层耐磨性的标准。每种样品测试三个平行样, 以平均值作为最终评价指标。为了对比熔覆层的强化效果, 将 H13 钢基体在相同的条件下进行测试。

2 结果与讨论

2.1 不同 WC 颗粒含量对 NiCrBSi/WC 复合涂层显微组织的影响

不同 WC 颗粒含量的激光熔覆 NiCrBSi/WC 复合涂层的断面组织如图 2 所示。如图 2a 所示, 当 WC 颗粒的含量为 45% 时, WC 颗粒在熔覆层内呈层状分布, 即在每道熔覆层内, WC 颗粒趋于向底层偏聚, 每道的表层 WC 颗粒相对较少。WC 颗粒的层状不均匀分布将导致涂层的硬度及韧性出现上述类似分布状态, 熔覆层的力学性能随厚度发生变化, 这一结果与 Ortiz 等^[10]的报道类似。如图 2c 所示, 当 WC 颗粒体积分数增加到 60% 时, 熔覆层内 WC 颗粒分布的不均性消失, 单道熔覆层内上部及下部的 WC 颗粒含量无明显差异。当 WC 颗粒的体积分数进一步提高到 80% 时, 尽管熔覆层内的 WC 颗粒分布均匀, 但熔覆层顶部出现大量如箭头所示的尺寸达到数百微米的近球形气孔 (图 2e)。以上现象主要是由于 WC 颗粒对 NiCrBSi 熔体的黏度产生了影响。NiCrBSi (Ni60) 自熔合金的熔点仅为 900 °C 左右, WC 颗粒的熔点高达 2870 °C, 在激光熔覆制备涂层过程中, NiCrBSi 以液态熔体形式存在, 而极高的熔点使 WC 颗粒以固态形式存在。研究表明^[11], 存在于液态介质中的固态颗粒可以提高液态介质的黏度, 固态颗粒含量越高, 液态介质的黏度也就越大。当 WC 颗粒的体积分数为 45% 时, NiCrBSi 熔体的黏度相对较小, 极高比重的 WC 颗粒 (15.56 g/cm³) 将迅速在 NiCrBSi 熔体中发生沉降, 因此凝固后形成的复合熔覆层中, 下层的 WC 颗粒含量较高, 而表层的 WC 颗粒含量相对较低, 使得多层熔覆得到的复合涂层中 WC 颗粒呈层状分布 (图 2a)。当 WC 颗粒的体积分数提高到 60% 时, NiCrBSi 的黏度提高使得 WC 颗粒的沉降速度显著降低, 因此熔覆层内的 WC 颗粒的分布无明显不均匀现象。另一方面, WC 颗粒的热传导率 (110 W/(m·K)) 显著高于 NiCrBSi 熔体的热传导率 (20~40 W/(m·K)), WC 颗粒的添加有利于加速熔体的冷却。对于金属熔体, 温度的降低也可导致黏度显著提高, 因此也可减缓 WC 颗粒的沉降, 促进 WC 颗粒分布的均匀性。当 WC 颗粒的体积分数进一步提高到 80% 时, 尽管更大的黏度可进一步减弱 WC 颗粒在熔体内的沉降, 但当黏度过大时, 混入 NiCrBSi 中的气体难以在复合层凝固前及时逸出, 导致熔覆层表层出现了大量的气孔 (图 2e), 反而使复合熔覆层的组织和性能发生恶化。高倍显微组织 SEM 照片 (图 2b、d、f) 表明, 所有条件下的 WC 颗粒与 NiCrBSi 都结合良好, 界面处无不润湿现象。同时 NiCrBSi 基体相内也出现一定量的棒状白亮色组织, 由于随着 WC 含量的增加, 此类棒状组织也逐渐增多, 因此可判断其为 WC 颗粒与 NiCrBSi 基体在高温条件下的反应产物。

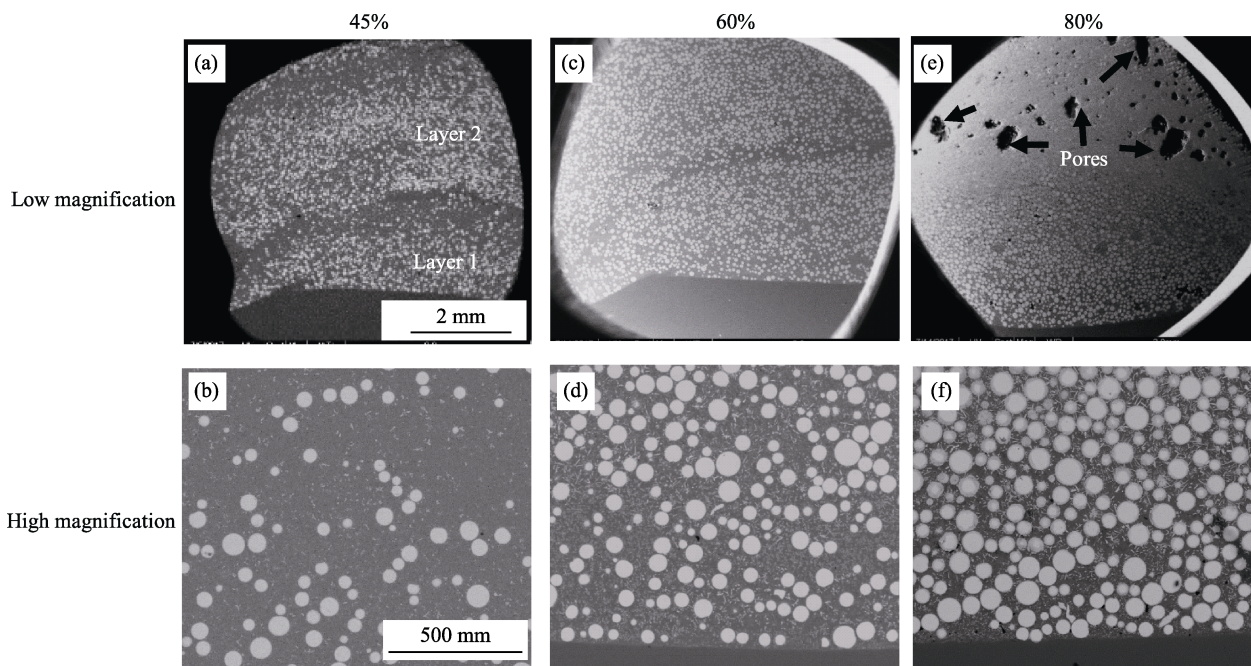


图 2 WC 颗粒含量对激光熔覆 NiCrBSi/WC 复合涂层显微组织的影响

Fig.2 Effect of WC particle content on microstructure of the laser cladded NiCrBSi/WC composite coatings

对于复合材料,除了增强相及基体相的种类、增强相的形态及尺寸分布,基体相与增强相之间的界面结合也是影响复合材料力学及其他物理、化学性能的重要因素^[9,12]。因此本文以含有 60% WC 颗粒的复合熔覆层为例,采用 SEM 及 EDS 能谱,对 WC 颗粒与 NiCrBSi 基体相界面的显微结构及化学成分进行表征,结果如图 3 所示。如图 3a 中的箭头所示,在 WC 颗粒与 NiCrBSi 界面处形成了一层厚度介于 3~7 μm ,具有锯齿状轮廓的反应层,表明 WC 颗粒与 NiCrBSi

基体之间形成了化学结合。强的结合可以阻止复合层在经受外力作用时 WC 颗粒的脱落,从而提高复合熔覆层的耐磨损性能。采用 EDS 对图 3b 中不同区域的化学成分进行分析,结果表明,WC 颗粒及 NiCrBSi 基体的基本化学成分未发生变化(图 3c、f),反应层及棒状析出物(图 3d、e)为含有 Ni、Cr、Fe、W、Si、C 的多元相,可推断此类反应物为脆性相,过厚的反应产物将造成复合涂层的韧性及抗冲击能力显著降低。

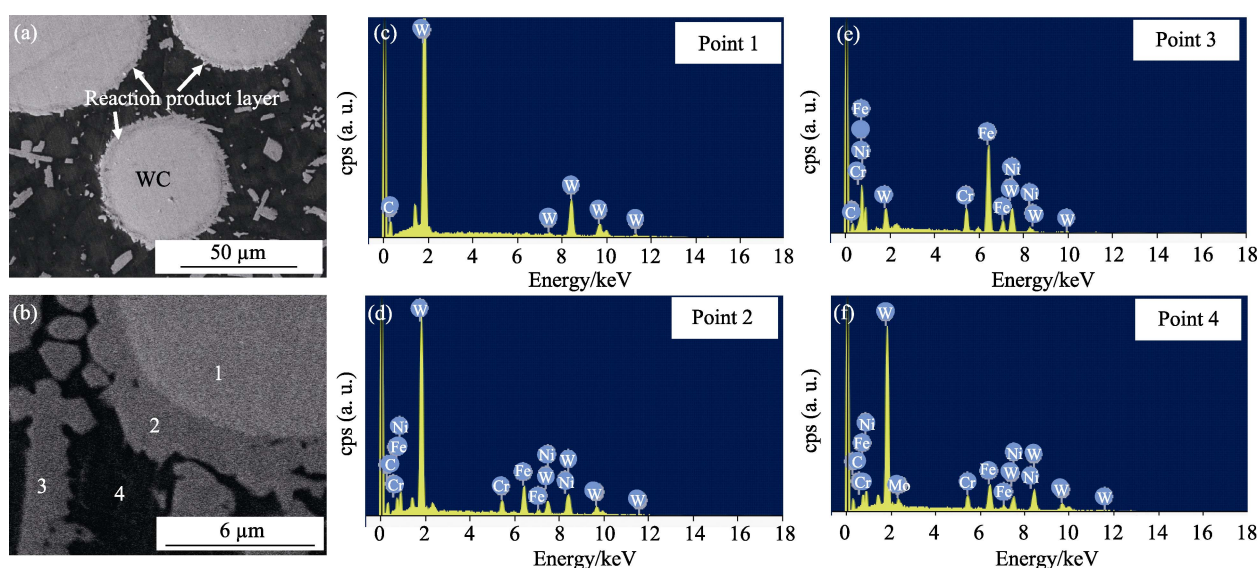


图 3 复合涂层中 NiCrBSi 与 WC 界面反应产物的显微结构及化学成分

Fig.3 Microstructure and chemical composition of the reaction product between WC particles and NiCrBSi matrix in composite coating

2.2 不同WC颗粒含量对NiCrBSi/WC复合涂层显微硬度的影响

WC颗粒含量对复合熔覆层的硬度影响如图4a所示。随着WC颗粒体积分数由30%提到80%，涂层的硬度由67HRC近线性提高到85HRC。可以发现，所有复合熔覆层的硬度均显著高于淬火态H13热作模具钢的硬度。这主要是由于NiCrBSi的自身硬度较高及WC颗粒的强化效应引起的。B及Si元素的添加使NiCrBSi具有较高的非晶形成能力^[13]，NiCrBSi涂层内的非晶相及合金元素的强化作用使复合熔覆层中的金属相自身具有相对较高的硬度。如图4b所示，复合熔覆层中NiCrBSi基体的硬度约为870HV，而WC颗粒内部的硬度高达2670HV，且复合熔覆层内部的硬度呈不均匀分布。

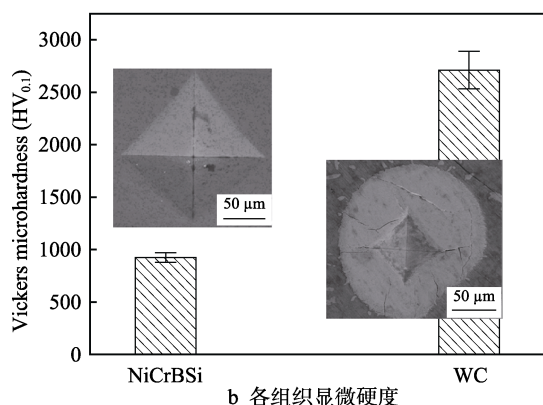
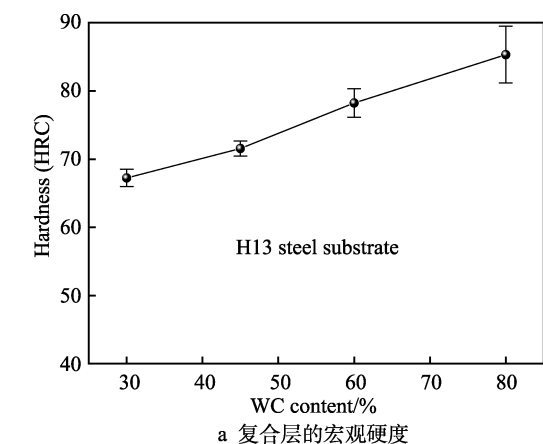


图4 激光熔覆NiCrBSi/WC复合层的宏观硬度与各组组织显微硬度

Fig.4 Macrohardness (a) and microhardness (b) of the laser cladded NiCrBSi/WC composite coatings

2.3 不同WC颗粒含量对NiCrBSi/WC复合涂层断裂韧性的影响

WC颗粒含量对激光熔覆NiCrBSi/WC复合层断裂韧性的影响如图5所示。由图可知，断裂韧性随着WC颗粒含量的提高，先增大后减小。当WC颗粒的体积含量低于60%时，随着WC颗粒的提高，复合层

的断裂韧性逐渐升高；随着WC颗粒含量的进一步提高，复合涂层的断裂韧性显著下降。分析认为，断裂韧性的提高主要与复合熔覆层内裂纹扩展过程中，WC颗粒引起的裂纹偏转有关^[14]。由于NiCrBSi涂层本身的脆性较大，裂纹偏转可显著提高裂纹扩展经历的路径长度，因此可显著提高复合层的断裂韧性。随着WC颗粒体积分数提高到80%，WC颗粒之间的距离逐渐缩短，WC颗粒与NiCrBSi之间的脆性反应产物使WC颗粒之间出现了连接。如图6所示，当WC含量达到80%时，裂纹偏向于沿着相互连接的脆性相（界面反应产物及WC颗粒网络）扩展，裂纹扩展的路径变短，因此导致复合熔覆层的断裂韧性显著降低。

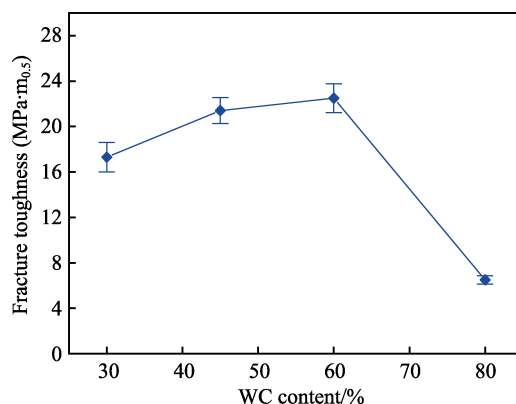


图5 WC含量对激光熔覆NiCrBSi/WC复合层断裂韧性的影响

Fig.5 Effect of WC content on fracture toughness of laser cladded NiCrBSi/WC composite coatings

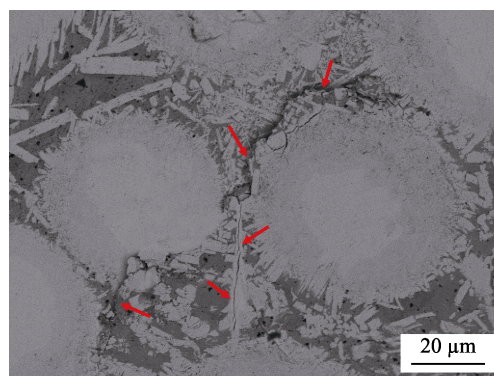


图6 压痕法断裂韧性测试中NiCrBSi-80%WC复合涂层中的裂纹扩展路径

Fig.6 Crack propagation pathway of NiCrBSi-80% WC composite coating in the indentation fracture toughness test

2.4 不同WC颗粒含量对NiCrBSi/WC复合涂层耐磨性的影响

WC颗粒含量对激光熔覆NiCrBSi/WC复合层耐磨性的影响如图7所示。磨损率呈现出先增大后减小的趋势，与熔覆层断裂韧性的变化趋势对应良好，其中60%WC颗粒含量的复合熔覆层的体积磨损率最

低, 仅为淬火态 H13 钢材的 13%, 表明在复合熔覆层不发生脆性破坏的前提下, NiCrBSi/WC 复合熔覆层的耐磨性约为淬火 H13 热作模具钢的 9 倍, 即相同厚度的 NiCrBSi/WC 复合熔覆层在该磨损条件下的服役寿命约为 H13 热作模具钢的 9 倍。

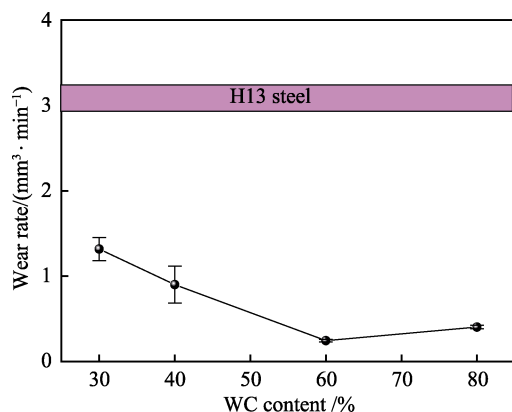


图 7 WC 颗粒含量对激光熔覆 NiCrBSi/WC 复合层及 H13 钢基材磨损率的影响
Fig.7 Effect of WC particle content on the laser cladded NiCrBSi/WC composite coatings and wear of H13 steel substrate

对磨损后样品的表面形貌表征结果表明, 复合熔覆层耐磨性能的显著提高除了与更高的硬度有关外, 还与磨损过程中材料损失机理的转变有关。如图 8a 所示, 由于 SiC 磨粒的硬度显著高于 H13 钢, 因此在 H13 钢表面沿着摩擦方向形成了连续的犁沟, 材料的损失以犁削为主。

当在 NiCrBSi 内引入一定量的高硬度 WC 后, 由于 NiCrBSi 基体相的硬度依然低于 SiC 磨粒的硬度, 因此在摩擦过程中会被优先去除 (图 8b)。而 WC 颗粒的硬度与 SiC 磨料颗粒相当, 因此形成如图 8b 所示的 WC 颗粒凸起, NiCrBSi 基体向下凹的磨损形貌。如图 8c 的磨损机理示意图所示, 当测试材料为硬度显著低于磨料颗粒的均一金属材料时, 磨料颗粒可对测试材料造成连续的犁削, 造成较大的磨损量, 测试材料表现出较低的耐磨性。当测试材料表面具有如图 8b 所示的凸起高硬度增强相时, 高硬度的凸起增强相可降低硬质磨料颗粒在金属基体相内的压入深度, 因此可有效降低材料的磨损率, 实现耐磨性能的提升^[15-16]。当硬质增强相进一步提高时, 硬质颗粒凸起甚至可完全阻绝硬质磨料颗粒对金属相的磨削, 使金属陶瓷复合熔覆层的耐磨性显著提高。

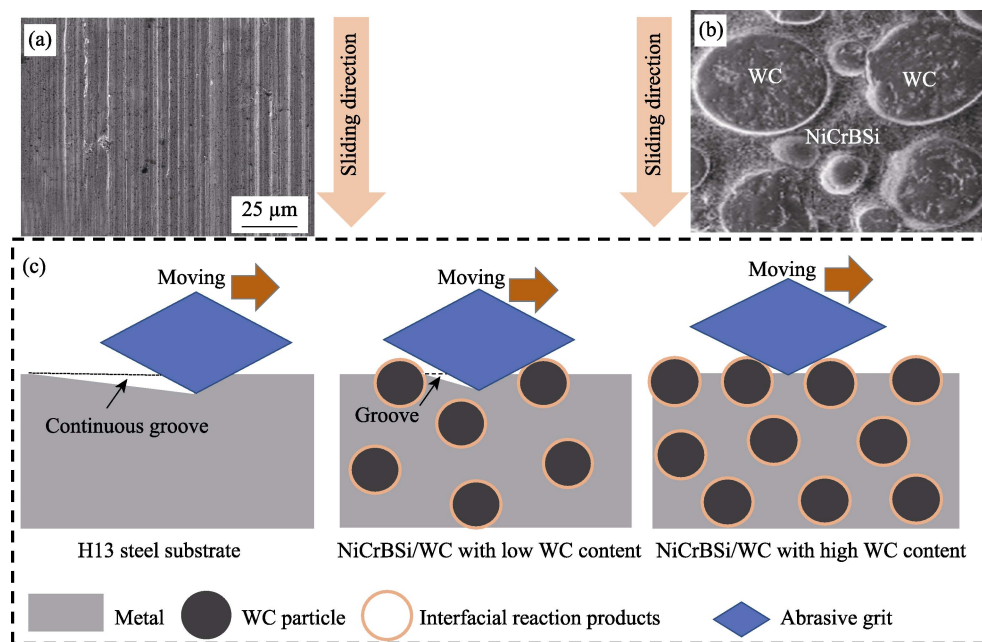


图 8 激光熔覆 NiCrBSi/WC 复合层的磨损机理示意图
Fig.8 Schematic diagram for wear mechanism of the laser cladded NiCrBSi/WC composite coatings

3 结论

1) 激光熔覆制备 NiCrBSi/WC 复合熔覆层过程中, 当 WC 硬质颗粒含量约为 60% 及以上水平时, 可获得 WC 颗粒不发生明显沉降且均匀分布的金属陶瓷复合熔覆层; 过高的 WC 颗粒含量会导致金属熔体的黏度过大, 气体难以及时逸出, 在熔覆层表层出现大量的亚毫米级气孔。

2) 随着 WC 颗粒含量的增加, 复合熔覆层的硬度逐渐提高, 熔覆层的断裂韧性出现先升高后降低的变化趋势。断裂韧性的提高主要是由于 WC 颗粒引起的裂纹在 NiCrBSi 基体中的偏转机制导致。

3) 复合熔覆层耐磨性随 WC 颗粒含量的变化与断裂韧性的变化趋势一致。60%WC 含量的 NiCrBSi/WC 复合熔覆层的耐磨性可达淬火态 H13 钢材的 9 倍。

参考文献:

- [1] 李超, 孙昊, 李庆党. 盾构机刀具磨损检测技术研究[J]. 机械制造, 2018, 56(12): 105-107.
LI Chao, SUN Hao, LI Qing-dang. Study on dection technology on tunnel boring machine[J]. Machinery, 2018, 56(12): 105-107.
- [2] 朱英伟, 郑立波, 张洪涛. 新型盾构机刀具磨损检测技术研究[J]. 施工技术, 2014, 43(1): 121-123.
ZHU Ying-wei, ZHENG Li-bo, ZHANG Hong-tao. Detection technology research on cutting tool wear of new shield machine[J]. Construction technology, 2014, 43(1): 121-123.
- [3] LI Guo-hui, WANG Wen-jin, JING Zhi-juan, et al. Mechanism and numerical analysis of cutting rock and soil by TBM cutting tools[J]. Tunnelling and underground space technology, 2018, 81: 428-437.
- [4] GONG Qiu-ming, YIN Li-jun, MA Hong-su, et al. TBM tunnelling under adverse geological conditions: An overview[J]. Tunnelling and underground space technology, 2016, 57: 4-17.
- [5] LI Chang-jiu, YANG Guan-jun. Relationships between feedstock structure, particle parameter, coating deposition, microstructure and properties for thermally sprayed conventional and nanostructured WC-Co[J]. international journal of refractory metals and hard materials, 2013, 39: 2-17.
- [6] 李淑涛, 刘珊珊, 陈海龚, 等. 等离子弧堆焊镍基球形碳化钨涂层摩擦磨损研究[J]. 表面技术, 2018, 47(2): 103-110.
LI Shu-tao, LIU Shan-shan, CHEN Hai-gong, et al. Wear resistance of PTAW deposited Ni-based WC composite coating[J]. Surface technology, 2018, 47(2): 103-110.
- [7] 高才, 许斌. 激光熔覆陶瓷增强金属基复合涂层技术的研究进展[J]. 表面技术, 2008, 37(4): 63-66.
GAO Cai, XU Bin. Advances in laser cladding ceramic particle reinforced metal matrix composite coating technology[J]. Surface technology, 2008, 37(4): 63-66.
- [8] USMANI S, SAMPATH S, HOUCK D L, et al. Effect of carbide grain size on the sliding and abrasive wear behavior of thermally sprayed WC-Co coatings[J]. Tribol: Transactions, 1997, 40: 470-478.
- [9] LUO Xiao-tao, LI Chang-jiu. Tailoring the composite interface at lower temperature by the nanoscale interfacial active layer formed in cold sprayed cBN/ NiCrAl nanocomposite[J]. Materials and design, 2018, 140: 387-399.
- [10] ORTIZ A, GARCIA A, CADENAS M, et al. WC particles distribution model in the cross-section of laser cladded NiCrBSi+WC coatings for different wt% WC[J]. Surface and coatings technology, 2017, 324: 298-306.
- [11] AN Zhuo-qing, ZHU Jesse. Correlating the apparent viscosity with gas-solid suspension flow in straight pipelines[J]. Powder technology, 2019, 345: 346-351.
- [12] TRINH P V, LEE J, PHAN N M, et al. Effect of oxidation of SiC particles on mechanical properties and wear behavior of SiCp/Al6061 composites[J]. Journal of alloys and compounds, 2018, 769: 282-292.
- [13] LI H X, LU Z C, WANG S L, et al. Fe-based bulk metallic glasses: Glass formation, fabrication, properties and applications[J]. Progress in materials science, 2019, 103: 235-318.
- [14] EBRAHIMI M T, DINI D, BALINT D S, et al. Discrete crack dynamics: A planar model of crack propagation and crack-inclusion interactions in brittle materials[J]. International journal of solids and structures, 2018, 152-153: 12-27.
- [15] LUO Xiao-tao, LI Chang-jiu. Large sized cubic BN reinforced nanocomposite with improved abrasive wear resistance deposited by cold spray[J]. Materials & design, 2015, 83: 249-256.
- [16] KAMDI Z, SHIPWAYA P H, VOISEYA K T, et al. Abrasive wear behavior of conventional and large-particle tungsten carbide-based vermet coatings as a function of abrasive size and type[J]. Wear, 2011, 271: 1264-1272.