

HVOF 喷涂 WC 系金属陶瓷涂层腐蚀 磨损行为研究现状

周永宽¹, 康嘉杰^{1,2}, 岳文^{1,2}, 付志强^{1,2}, 朱丽娜^{1,2}, 余丁顺^{1,2}, 王成彪^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京) 郑州研究院, 河南 郑州 451283;

3. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006)

摘要: 对国内外 HVOF 喷涂 WC 系金属陶瓷涂层的腐蚀磨损行为进行综述, 系统介绍了 HVOF 喷涂 WC 系金属陶瓷涂层的腐蚀机制、磨损机制及其相互作用, 依据腐蚀磨损机制将建立的模型进行归纳, 并对 HVOF 喷涂 WC 系金属陶瓷涂层腐蚀磨损失效研究的发展方向进行了展望。

关键词: 超音速火焰喷涂(HVOF); WC 系金属陶瓷涂层; 腐蚀磨损

中图分类号: TG178 文献标志码: A 文章编号: 0254-6051(2019)07-0211-07

Research status of corrosion and wear behavior of HVOF sprayed WC based cermet coatings

Zhou Yongkuan¹, Kang Jiajie^{1,2}, Yue Wen^{1,2}, Fu Zhiqiang^{1,2}, Zhu Lina^{1,2}, She Dingshun^{1,2}, Wang Chengbiao^{1,2}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Zhengzhou Institute, China University of Geosciences (Beijing), Zhengzhou Henan 451283, China;

3. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Zhengzhou Henan 450006, China)

Abstract: The corrosion and wear behavior of HVOF sprayed WC based metal cermet coatings was reviewed. The corrosion mechanism and corrosion wear mechanism of HVOF sprayed WC based metal cermet coatings were systematically introduced, and the established model was summarized according to the corrosion and wear mechanism. Besides, the prospect of the research on the corrosion wear of HVOF sprayed WC based metal cermet coatings was also discussed.

Keywords: high velocity oxygen fuel (HVOF); WC based metalcermet coating; corrosion wear

腐蚀磨损是恶劣环境下钻具、水轮机过流部件、水利泵等的主要失效形式之一。金属陶瓷涂层是一种综合性能非常优秀的耐磨涂层, 它由硬质碳化物相来提供硬度和强度, 同时由金属粘结相提供韧性和塑性, 故同时具备了陶瓷材料和金属材料的优点。常见的金属陶瓷涂层包括 WC-Co、WC-CoCr、CrC-NiCr 以及 Al₂O₃-TiO₂/NiMoAl 等, 其中 WC 系应用最广^[1-2]。超音速火焰喷涂(HVOF)具有粒子飞行速度快、涂层质量好、沉积速度快、材料选择性好以及与基体的结合强度高等优点。该技术自 20 世纪 80 年代初研制成功以来, 经

过多年应用研发, 该技术已经日趋完善。由于其焰流具有很高飞行速度和相对较低的温度, 所以在制备 WC 系金属陶瓷耐磨涂层中显出了独特优势^[3-5]。HVOF 喷涂的 WC 系金属陶瓷涂层保证了粉末在喷涂过程中更少的氧化和脱碳, 因此具有高的结合强度、硬度、致密性和耐磨耐蚀性, 在钻井、矿山、装备的表面防护领域得到了广泛应用^[6-7]。

腐蚀磨损是一种环境介质影响的磨损过程, 它是一种材料受腐蚀和磨损综合作用的复杂磨损过程。农机、矿冶、建材、石油化工及水利电力装备中的许多, 在工作中不仅受到严重的磨料磨损或冲蚀磨损, 还要受到环境介质的强烈腐蚀作用^[8], 如工作在同时具有腐蚀介质和较多颗粒物环境下的钻柱、钻杆以及泥浆搅拌机等。虽然过去进行了很多磨损或腐蚀的失效机理研究^[6-7], 可是对腐蚀磨损的耦合作用研究还不够深入^[9]。

使用 HVOF 制备的金属陶瓷涂层能有效提高机械零部件的耐磨耐蚀性, 为此本文对国内外 HVOF 喷

收稿日期: 2019-01-27

基金项目: 国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项(2018YFC0603403); 国家自然科学基金面上项目(41772389, 41872183); 北京市自然科学基金面上项目(3182032); 装备预研教育部联合基金青年人才项目(6141A02033120)

作者简介: 周永宽(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事超音速火焰喷涂及钻具防护的研究, E-mail: 1174752113@qq.com。通讯作者: 康嘉杰, 博士, 副教授, 博士生导师, E-mail: kangjiajie@cugb.edu.cn

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2019.07.045

涂 WC 系金属陶瓷涂层的腐蚀磨损进行了综述,介绍了 HVOF 制备的 WC 的腐蚀机制、磨损机制及其相互作用,并将根据腐蚀磨损机制建立的相应模型进行归纳,对 HVOF 制备的 WC 系金属陶瓷涂层腐蚀磨损失效研究的发展方向进行了展望。

1 热喷涂 WC 系金属陶瓷涂层的腐蚀行为

粘结相的组成是影响腐蚀性能的主要因素之一,但由于其相组成和微观结构的不同,热喷涂 WC 涂层与烧结 WC 性能存在较大差异。热喷涂 WC 涂层结构的不均匀性使其更容易受到腐蚀,尤其是粘结相的存在加剧了 WC 涂层结构的不均匀性,所以热喷涂 WC 涂层耐蚀性较差^[10-11]。

研究发现人造海水中的涂层腐蚀通常发生在粘结相与碳化物界面处,J M Perry 等^[12]在研究 WC-CoCr 涂层在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀时观察到这一点。V A D Souza 等^[10]则比较了 WC-CoCr 和 WC-CrNi 的腐蚀性能,发现粘结相是影响腐蚀性能的主要因素,这是因为粘结相的存在会导致涂层结构不均匀,而不均匀的涂层结构会加剧腐蚀,这种现象归因于微电流或缝隙腐蚀。C Verdon 等^[13]发现粘结剂-碳化物界面处的腐蚀会削弱碳化物和粘结相之间的结合力,导致 WC 颗粒脱落并留下小坑。V A D Souza 和 A Neville

等^[14-15]比较了人造海水中 UNS S31603 不锈钢与 HVOF 喷涂 WC-10Co4Cr 涂层的腐蚀性能,发现与不锈钢样品上产生的连续钝化膜不同,经过 HVOF 喷涂的 WC-10Co4Cr 在粘结相上只有岛状的氧化物。M Takeda 等^[16]也报道了这种现象,当浸入 Na₂SO₄ 溶液时,在 WC-10Co4Cr 上发现斑状 Cr₂O₃ 氧化物。这种氧化物在粘结相与碳化物界面附近结合力最弱,从而加重了腐蚀。

在碱性条件下腐蚀在 W 和 W₂C 相首先发生,M K Thakare 等^[17]通过进一步研究揭示了热喷涂 WC-Co 涂层在碱性条件下的静态腐蚀。使用 SEM 和 FIB 对 WC-Co 涂层的腐蚀表面进行分析,证实了腐蚀首先发生在由于脱碳形成的 W 和 W₂C 相上,接着是碳化物本身受到腐蚀,其中较小的晶粒被腐蚀从而形成空隙。图 1 显示了暴露于碱性环境下 HVOF 喷涂的 WC-10Co4Cr 涂层 SEM 显微照片以及随后在碳化物颗粒周围形成的沟状腐蚀,该样品在碳化物颗粒上的 FIB 切片显示碳化物颗粒松散地存在于腐蚀沟槽中,XPS 分析还显示富含粘结相的区域受到稳定钝化膜的保护,从而使碳化物受到腐蚀。

2 热喷涂 WC 系金属陶瓷涂层的磨损行为

机械磨损,是指两相互接触产生相对运动的摩擦

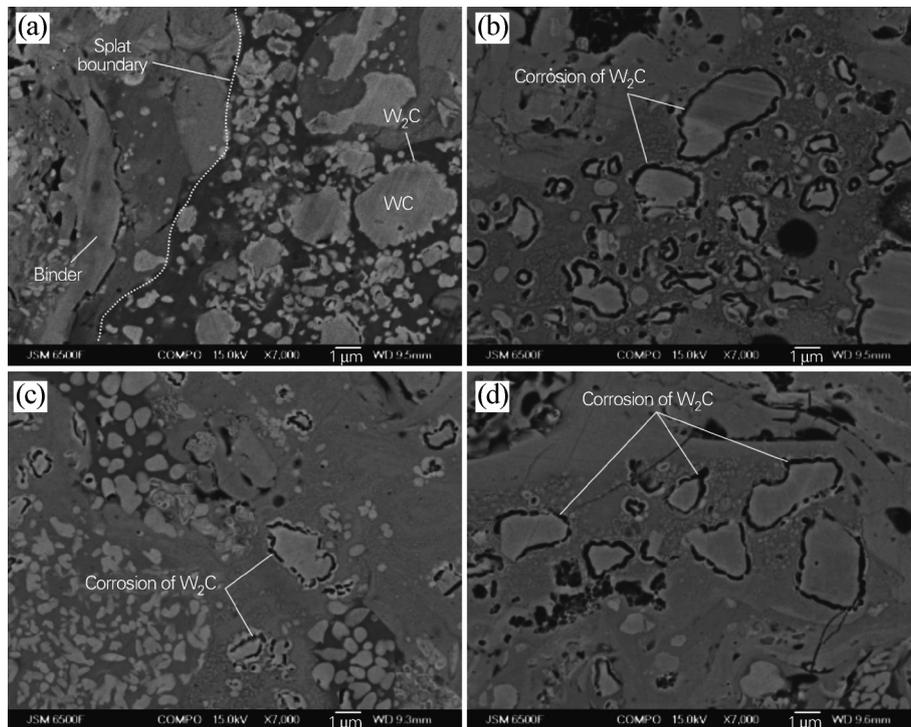


图 1 经过 HVOF 喷涂的 WC-10Co4Cr 涂层的背散射电子显微照片^[17]
Fig. 1 Backscattered electron micrographs of the WC-10Co4Cr with HVOF spraying^[17]

表面引起能量的消耗并放出热量,从而产生的磨损。通常将磨损分为磨粒磨损、冲蚀磨损、疲劳磨损、粘着磨损和腐蚀磨损等。热喷涂 WC 涂层在实际应用时往往会遇到不同的工况,从而经受不同种类的磨损。

在摩擦过程中,由于硬颗粒或摩擦副表面的硬微凸体对固体表面挤压和沿表面运动所引起的损失或材料流失称为磨粒磨损。磨粒磨损的材料去除方式有犁铧、切削、微断裂和微疲劳等。C N Machio 等^[18]和 H Wang 等^[19]发现在 WC 基金属陶瓷涂层的磨粒磨损过程中,磨粒对粘结相的犁铧和切削是造成涂层失效的主要原因,所以无论是增加涂层对磨粒的载荷还是提高磨粒的硬度都会加重涂层的磨粒磨损,而 Q Wang 等^[20]的研究表明提高涂层的硬度会降低涂层的磨损率。

冲蚀磨损是指材料受到小而松散的流动粒子冲击时表面出现破坏的一类磨损现象。可以描述为固体表面同含有固体粒子的流体接触做相对运动其表面材料所发生的损耗。当冲蚀粒子以较尖锐的面接触涂层时易于引发微切削,当冲蚀粒子以较圆滑表面接触涂层时易于引发微犁铧,如图 2 所示^[21]。由于硬质碳化物周围的粘结相被大量切削去除,碳化物与涂层基质的结合力下降,在冲蚀粒子的撞击下形成脱落坑,同时可能存在冲蚀粒子嵌入脱落坑^[21]。另外不同的冲蚀角度产生的冲蚀形貌也不一样,90°冲蚀后的表面存在明显的裂纹和粒子剥落的凹坑。在冲蚀表面的次表面存在平行于涂层冲蚀表面的裂纹,有些已经扩展到表面^[22]。

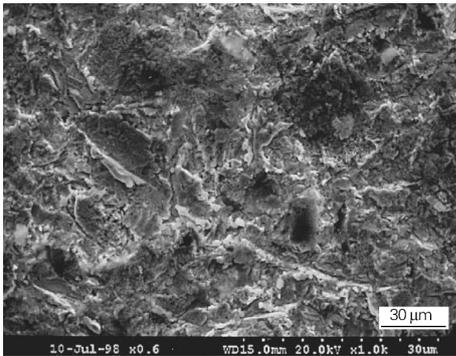


图 2 冲蚀粒子造成的微犁铧沟^[21]

Fig. 2 The furrow caused by erosion particles^[21]

两个接触表面做纯滚动或滚动与滑动复合摩擦时,在高接触压应力的作用下,经过多次循环后,在其相互作用表面的局部地区产生小块材料剥落,形成麻点或凹坑,这种现象称为疲劳磨损。疲劳磨损会导致剥落, S Hogmark 等^[23]认为 WC 基金属陶瓷涂层剥落

失效起始于涂层的表面或次表面,即表面磨损、涂层内部的微观缺陷以及层状结构的界面裂纹是导致剥落发生的原因。S Tkachenko 等^[24]指出当涉及表面疲劳磨损时,涂层的耐磨性更依赖于硬质相的大小、形状和分布,而不是硬度,另外冲击也会导致疲劳磨损引起涂层剥落。

3 热喷涂 WC 系金属陶瓷涂层的腐蚀磨损行为

3.1 腐蚀磨损机制

热喷涂 WC 系金属陶瓷涂层的腐蚀磨损较为复杂,这主要是由于其不均匀的微观结构、多孔性和复杂的组成,包括产生的氧化物 Cr_2O_3 导致的。此外,喷涂过程会影响基体性能,涂层基体预处理的残留物可能会嵌入涂层中,会导致涂层与基体的结合力变差并且可能削弱碳化物和粘结相之间的结合。热喷涂 WC 涂层的性能试验侧重于单独测试耐磨或耐蚀性,设计变量诸如涂层组成、微观结构、缺陷、粘附性、内聚力和基体性质等都会影响耐腐蚀磨损性能。

WC 基涂层在酸性环境中的耐腐蚀磨损性能已被广泛研究^[25-27],在酸性环境中主要关注的是粘结相 (Co、Ni 和 Cr) 在环境中的敏感性。正如前面所讨论的那样,涂层中粘结相和硬质相的不均匀分布使涂层容易受到腐蚀磨损。V D A Souza 和 A Neville 等^[14-15]发现,WC-CoCr 涂层的腐蚀始于粘结相与碳化物界面,并在随后的磨损中加速了碳化物颗粒的去除。M M Stack 等^[25]在 WC-CoCr 涂层的腐蚀冲蚀研究中也类似的观察结果。他们发现,粘结相与碳化物界面的优先腐蚀导致腐蚀冲蚀试验过程中质量损失的增加,同时在 CoCr 粘结相可能钝化的条件下,腐蚀冲蚀期间质量损失轻微下降。这是由于粘结相钝化所提供的附加保护导致的。A Karimi^[26]等和 G Barbezat 等^[27]得出的结论是,Cr 在不研究其腐蚀行为的情况下可以改善冲蚀磨损性能,表明该材料的耐磨性能较好。

基本上, Cr 分布较为均匀的涂层表现出相对较低的腐蚀速率。然而,整体材料损失是由机械损失和电化学损失比率决定的。M K Thakare 等^[28]使用原位电化学测量来计算由于机械作用和电化学作用引起的材料损失(使用电化学噪声数据计算),证明了对于典型的爆炸喷涂(D-gun) WC-10Co4Cr 涂层,机械作用比电化学作用高两三个数量级。同时他们通过使用原位电化学方法进行微磨损试验研究了 pH 值对磨损率的影响,在不同 pH 条件下的微磨损试验测量了电化学活

性,如图3所示。其中, i_{exp} 为微磨损测试前先在电解液中浸泡了 168 h。观察到在 pH = 13 溶液中电流最大,同时磨损速率也最快, pH = 11 则相反,电流最小,同时磨损速率也最慢。

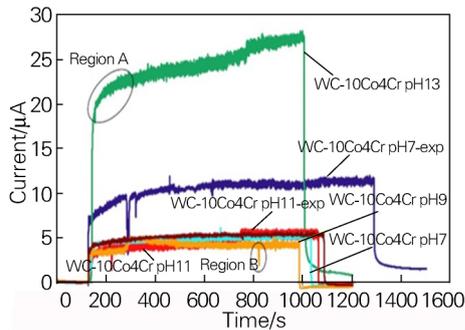


图3 在不同 pH 条件下的微磨损测试期间,经过 HVOF 喷涂的 WC-10Co-4Cr 涂层的磨蚀腐蚀电流^[28]

Fig. 3 Abrasive corrosion current of the WC-10Co-4Cr coating after HVOF spraying during micro-wear test under different pH conditions^[28]

不同的处理方法对于减缓腐蚀磨损方面起着重要作用。Z Liu 等^[29]的研究表明激光处理的 HVOF 涂层的耐蚀性和耐磨性大大改善,这是由于激光处理可使孔隙和微裂纹等缺陷减少。此外,由于界面相的形成导致通过 WC 和粘结相之间微电流活性降低。L Fedrizzi 等^[30]进行了喷涂后再研磨的试验,发现研磨过程可能会对涂层产生结构损伤,导致其腐蚀磨损性能变差。研磨后的表面可以观察到磨粒磨损和粘着磨损特征,并且偶尔发生裂纹扩展导致涂层脱落的现象。在图4中示意性地总结了各种机制的作用^[28]。

同时腐蚀磨损不是简单的腐蚀与磨损的叠加,而是通过协同方式共同作用,其数学模型可概括为^[31-32]:

$$W = W_w + W_c + \Delta W \quad (1)$$

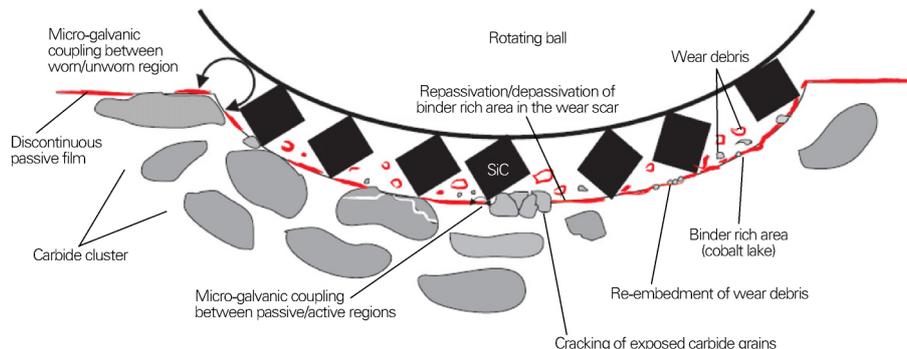


图4 热喷涂涂层的腐蚀磨损示意图^[28]

Fig. 4 Schematic diagram of corrosion wear of the thermal spray coating^[28]

$$\Delta W = \Delta W_c + \Delta W_w \quad (2)$$

其中, W 为腐蚀磨损造成的材料总流失量, W_c 为单纯腐蚀质量损失; W_w 为单纯磨损质量损失; ΔW 为腐蚀磨损交互作用下的质量损失; ΔW_c 为磨损对腐蚀的增加量(腐蚀增量),描述的是例如通过机械作用引起的裂纹发生长期自催化或缝隙腐蚀的过程。 ΔW_w 为腐蚀对磨损的增加量(磨损增量),描述诸如由于粘结相的溶解而导致机械磨损增加的过程,这会导致碳化物颗粒失去支撑,从而加重磨损^[33]。

3.2 腐蚀磨损模型

为了既能解释在复杂环境中腐蚀磨损的现象又能预测特定环境中的磨损性能,本领域学者提出了一些模型^[35-37]。通过研究材料的失效行为及其相互作用,理论上这种模型可以模拟腐蚀磨损。此外,通过分离各个参数,该模型可以解释腐蚀和磨损的协同效应。目前的建模方法主要分为两种:实证建模和数值模拟。

3.2.1 实证建模

以前的磨损模型主要是由经验派生出来的,例如 Archard 磨损定律^[34],它使用磨损常数作为特定磨损系统的拟合参数。将这些公式进行修正,可用于研究其他腐蚀磨损系统,比如化学机械抛光(CMP),这种方法的一个例子就是 Q Luo 等^[35]修改普雷斯顿方程,他研究了酸性和碱性溶液中铜的 CMP,其中抛光速率 R 被定义为:

$$R = (\alpha_1 P + \alpha_2) V + \alpha_3 \quad (3)$$

其中: P 是施加载荷; V 是线速度; α_1 、 α_2 和 α_3 是试验数据的拟合参数。经验模型方法的一个主要优点是其应用简单,拟合参数可以用于任何一组试验材料损失的测量,这种方法还可以用来进行材料的寿命预测。但该方法的简单性也是其主要缺点,材料通常会经历一定的转变过程才能逐步建立稳态磨损,而如果从某一阶段的预测材料寿命往往不准确,如图5所示^[36],可以看出材料的磨损是个非线性过程,从单一阶段的

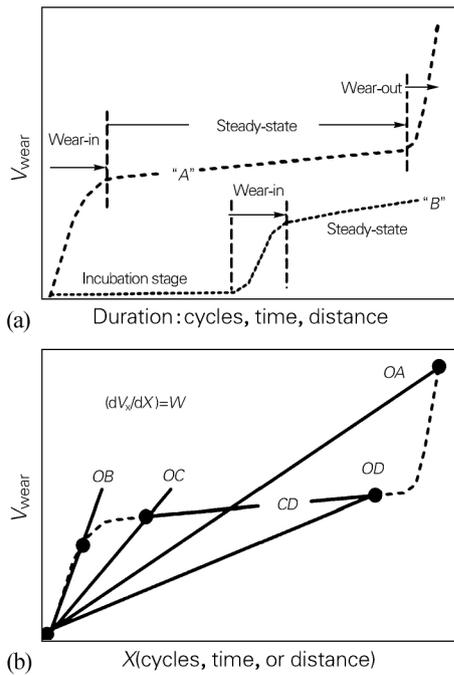


图 5 材料非线性磨损示意图 (a) 及从单一阶段的材料损失推断磨损率的局限性 (b) [36]

Fig. 5 Schematic diagrams (a) of nonlinear wear of materials and the limitation (b) of wear rate inferred from single material loss [36]

材料损失推断磨损率往往是不准确的。达到稳态磨损所需时间及其程度受材料、环境和接触区域形状的影响,无法预测准确的磨损率。这些条件也很难准确地在建模中对应,这意味着即使对于稳态磨损,运用这种办法,推断材料的损失也是不够准确的。

3.2.2 数值模拟

有限元法是使用最广泛的数值模拟方法,可以模拟复杂的几何形状、异质材料和非线性行为。然而,这种方法的一个局限性是它没有考虑从连续行为与非连续行为的转变,而这正是 WC 系金属陶瓷失效过程中的一个重要机制。P E McHugh 等 [37] 使用 Abaqus 有限元软件研究了假想的几何结构,并添加了一个改良的 Rice 和 Tracey [38] 损伤模型,模型通过使用用户定义函数来实现。该模型可以研究粘结相中的孔洞增长,一旦满足损伤的条件,元件会变得极其柔软从而无法承受载荷,并有效地改变了区域内的应力分布。该研究通过一系列阻力曲线 (R 曲线) 证明裂纹扩展模拟中的增韧效应 [38]。U A Özden 等 [39] 使用 Abaqus 进行有限元模拟了 WC-Co 的疲劳断裂,WC 和 Co 相分别有不同的失效标准和失效机制。Ozden 根据实际材料中的微观结构模拟了较为精确的几何结构,因此仿真结果与测试结果比较相近,与实际断裂路径具有良好的一致性,参见图 6 [40]。

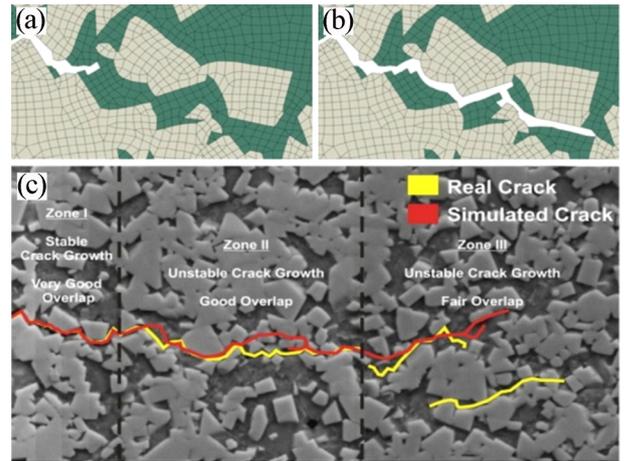


图 6 50 次 (a) 和 244 次 (b) 不同周次循环后的裂纹扩展及试验和模拟裂纹路径的对比 (c) [40]

Fig. 6 Crack propagation after different cycles of 50 times (a) and 244 times (b) and the comparison (c) of experimental and simulated crack paths [40]

在准确建立磨损模型之前,需要先进行数值模拟。而且验证数值方法和对材料性能的了解对于实现这一目标至关重要。迄今为止建模研究的重点一直放在材料的力学性能,而一旦能够证明建模方法的有效性,就有可能扩展模型,例如 U A Özden 等所使用的模型 [39],通过材料的损失、相位特性的变化甚至氧化物的产生等,将腐蚀的影响也考虑进去。

4 结论与展望

HVOF 喷涂的金属陶瓷涂层由于具有良好的耐磨耐蚀性能而得到日益广泛的应用。学者们通过对 HVOF 金属陶瓷涂层的磨损机制进行广泛的研究,确定了影响磨损性能的两个重要因素:相组成和微观结构,这些不仅决定了材料的整体性质,而且对材料的失效机制起着至关重要的作用。

腐蚀磨损过程受多种因素影响,所以比单一磨损更复杂。用协同作用描述物理和化学因素对磨损机制的影响,这种方法在 WC 系金属陶瓷涂层的腐蚀磨损试验中广泛采用。为了解释腐蚀磨损的现象并预测特定环境中的磨损性能,本文将依据腐蚀磨损机制建立的模型归纳为两种:实证建模和数值模拟。实证建模的一个主要优点是其应用简单,这种方法可解释某一特定因素对腐蚀磨损过程的作用机制。

WC 系金属陶瓷涂层的腐蚀磨损是一个物理、机械、化学和电化学作用的综合过程,各种因素的影响错综复杂。因此虽然在单独的腐蚀和磨损领域中的研究工作已取得一定成果,但对于两者的综合作用的研究

及其基本规律的探索,仍不够系统深入。因此深入和系统研究 WC 系金属陶瓷涂层腐蚀磨损的失效机理,制定有效的防护措施等将仍是本领域未来的重要研究方向之一。

参考文献:

- [1] 崔晓宇,王成彪,康嘉杰,等. 热喷涂金属陶瓷涂层复合磨损失效机制[J]. 材料导报,2016,30(15): 75-79.
Cui Xiaoyu, Wang Chengbiao, Kang Jiajie, et al. Composite wear failure mechanisms of thermally sprayed cermet coatings[J]. Materials Review, 2016, 30(15): 75-79.
- [2] Yu F L, Yu B, Xie H, et al. Erosion resistance of cermet coatings deposited by supersonic atmospheric plasma spraying[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(6): 1884-1889.
- [3] 徐滨士,刘世参. 表面工程技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社,2009.
- [4] 徐滨士,朱绍华,刘世参. 材料表面工程技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社,2014.
- [5] 华绍春,王汉功,汪刘应,等. 热喷涂技术的研究进展[J]. 金属热处理,2008,33(5): 82-87.
Hua Shaochun, Wang Hangong, Wang Liuying, et al. Development on thermal spray technology[J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(5): 82-87.
- [6] 陈小明,周夏凉,吴燕明,等. 超音速火焰喷涂微、纳米结构 WC-10Co4Cr 涂层及其性能[J]. 金属热处理,2016,41(5): 52-56.
Chen Xiaoming, Zhou Xialiang, Wu Yanming, et al. Properties of micro and nano structured WC-10Co4Cr coatings by HVOF spray[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(5): 52-56.
- [7] Hong S, Wu Y, Gao W, et al. Slurry erosion-corrosion resistance and microbial corrosion electrochemical characteristics of HVOF sprayed WC-10Co-4Cr coating for offshore hydraulic machinery [J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2018, 74: 7-13.
- [8] 王成彪,刘家浚,韦淡平,等. 摩擦学材料及表面工程[M]. 北京: 国防工业出版社,2012.
- [9] Liu Y, Hang Z, Chen H, et al. Erosion-corrosion property of CeO₂-modified HVOF WC-Co coating [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2016, 25(4): 815-822.
- [10] De Souza V A, Neville A. Linking electrochemical corrosion behaviour and corrosion mechanisms of thermal spray cermet coatings (WC-CrNi and WC/CrC-CoCr) [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 352(1): 202-211.
- [11] Cho J E, Hwang S Y, Kim K Y. Corrosion behavior of thermal sprayed WC cermet coatings having various metallic binders in strong acidic environment[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(8): 2653-2662.
- [12] Perry J M, Neville A, Wilson V A, et al. Assessment of the corrosion rates and mechanisms of a WC-Co-Cr HVOF coating in static and liquid-solid impingement saline environments [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 137(1): 43-51.
- [13] Verdon C, Karimi A, Martin J L. Microstructural and analytical study of thermally sprayed WC-Co coatings in connection with their wear resistance [J]. Materials Science and Engineering A, 1997, 234: 731-734.
- [14] De Souza V A, Neville A. Corrosion and synergy in a WC-CoCr HVOF thermal spray coating—understanding their role in erosion-corrosion degradation[J]. Wear, 2005, 259(1/6): 171-180.
- [15] De Souza V A, Neville A. Corrosion and erosion damage mechanisms during erosion-corrosion of WC-Co-Cr cermet coatings [J]. Wear, 2003, 255(1/6): 146-156.
- [16] Takeda M, Morihiro N, Ebara R, et al. Corrosion behavior of thermally sprayed WC coating in Na₂SO₄ aqueous solution [J]. Materials Transactions, 2002, 43(11): 2860-2865.
- [17] Thakare M R, Wharton J A, Wood R J K, et al. Exposure effects of strong alkaline conditions on the microscale abrasion-corrosion of D-gun sprayed WC-10Co-4Cr coating [J]. Tribology International, 2008, 41(7): 629-639.
- [18] Machio C N, Akdogan G, Witcomb M J, et al. Performance of WC-Co thermal spray coatings in abrasion and slurry erosion tests[J]. Wear, 2005, 258(1/4): 434-442.
- [19] Wang H, Song X, Wei C, et al. Abrasion resistance enhancement of ultrafine-structured WC-Co coating fabricated by using in situ synthesized composite powder [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2013, 29(11): 1067-1073.
- [20] Wang Q, Chen Z, Li L, et al. The parameters optimization and abrasion wear mechanism of liquid fuel HVOF sprayed bimodal WC-12Co coating [J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(8/9): 2233-2241.
- [21] Hawthorne H M, Arsenaault B, Immarigeon J P, et al. Comparison of slurry and dry erosion behaviour of some HVOF thermal sprayed coatings[J]. Wear, 1999, 225(4): 825-834.
- [22] 陈清宇,纪南昌,富伟,等. 超音速火焰喷涂金属陶瓷涂层冲刷磨损特性[J]. 金属热处理,2011,36(7): 84-87.
Chen Qingyu, Ji Gangchang, Fu Wei, et al. Erosion wear property of HVOF sprayed cermets coating[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(7): 84-87.
- [23] Hogmarl S, Hedenqvist P. Tribological characterization of thin, hardcoatings [J]. Wear, 1994, 179(1/2): 147-154.
- [24] Tkachenko S, Dvorak K, Jech D, et al. Wear of grinding rotors with thermally-sprayed coatings in a high-speed mill [J]. Wear, 2018, 412: 49-59.
- [25] Stack M M, El Badia T A. On the construction of erosion-corrosion maps for WC/Co-Cr-based coatings in aqueous conditions [J]. Wear, 2006, 261(11/12): 1181-1190.
- [26] Karimi A, Verdon C, Martin J L, et al. Slurry erosion behaviour of thermally sprayed WC-M coatings [J]. Wear, 1995, 186(95): 480-486.
- [27] Barbezat G, Nicol A R, Sickinger A. Abrasion, erosion and stuffing resistance of carbide and oxide ceramic thermal sprayed coatings for different applications [J]. Wear, 1993, 162-164: 529-537.
- [28] Thakare M R, Wharton J A, Wood R J K, et al. Investigation of micro-scale abrasion-corrosion of WC-based sintered hard metal and sprayed coating using in situ electrochemical current-noise measurements [J]. Wear, 2009, 267(11): 1967-1977.

铝合金中间形变热处理工艺方法及研究进展

孙会¹, 沈忱^{1,2}

(1. 上海电机学院机械学院, 上海 201306; 2. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 全面综述了铝合金中间形变热处理工艺方法、发展历程以及国内外在中间形变热处理领域的研究动态, 分析了中间形变热处理工艺参数对微观结构和力学性能的影响规律, 介绍了不同中间形变热处理工艺的特点, 总结了研究中存在的一些问题, 并提出了相关的解决方案, 最后进一步展望了中间形变热处理工艺优化和改进的方法和途径。

关键词: 中间形变热处理; 铝合金; 再结晶; 组织; 性能

中图分类号: TG156 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-6051(2019)07-0217-07

Technology and research progress of intermediate thermomechanical treatment for aluminum alloys

Sun Hui¹, Shen Chen^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The process and development of intermediate thermomechanical treatments (ITMT) are reviewed comprehensively, and the research trends in the ITMT field at home and abroad are introduced. The effects of ITMT parameters on the microstructures and mechanical properties of aluminum alloys are discussed. The characteristics about different ITMT processes are presented as well. Some problems about ITMT technology of aluminium alloys are summarized, and relevant solutions are proposed. Finally, the techniques to further improve and develop ITMT processes are envisaged.

Keywords: intermediate thermomechanical treatment; aluminum alloy; recrystallization; microstructure; property

收稿日期: 2018-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(51304133)

作者简介: 沈忱(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 铝合金材料热处理, E-mail: 2421741319@qq.com。通讯作者: 孙会(1974—), 女, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事新型设备的开发与研究、材料热处理等方向的研究, E-mail: 2421741319@qq.com

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2019.07.046

铝合金是重要的结构材料, 具有低密度、高强度、良好加工性等一系列优点, 在航空航天等多个领域得到广泛应用, 但伴随着大量的应用, 对其综合性能也提出更高的要求。提高铝合金综合性能有很多途径, 如调整元素含量、减少杂质(Fe、Si等)含量、采用特殊方法和工艺(粉末冶金、喷射成形)以及开发和应用形变

[29] Liu Z, Cabrero J, Niang S, et al. Improving corrosion and wear performance of HVOF-sprayed Inconel 625 and WC-Inconel 625 coatings by high power diode laser treatments [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 201(16): 7149-7158.

[30] Fedrizzi L, Valentinelli L, Rossi S, et al. Tribocorrosion behaviour of HVOF cermet coatings [J]. *Corrosion Science*, 2007, 49: 2781-2799.

[31] Iwabuchi A, Lee J W, Uchidate M. Synergistic effect of fretting wear and sliding wear of Co-alloy and Ti-alloy in Hanks' solution [J]. *Wear*, 2007, 263(1/6): 492-500.

[32] Mischler S. Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: a comparative evaluation [J]. *Tribology International*, 2008, 41(7): 573-583.

[33] Akonko S, Li D Y, ZiomekMoroz M. Effects of cathodic protection on corrosive wear of 304 stainless steel [J]. *Tribology Letters*, 2005, 18(3): 405-410.

[34] Nazir M H, Khan Z A, Saeed A, et al. Synergistic wear-corrosion analysis and modelling of nanocomposite coatings [J]. *Tribology International*, 2018, 121: 30-44.

[35] Luo Q, Ramarajan S, Babu S V. Modification of the Preston equation for the chemical-mechanical polishing of copper [J]. *Thin Solid Films*, 1998, 335(1/2): 160-167.

[36] Blau P J. How common is the steady-state? The implications of wear transitions for materials selection and design [J]. *Wear*, 2015, 332: 1120-1128.

[37] McHugh P E, Connolly P J. Micromechanical modelling of ductile crack growth in the binder phase of WC-Co [J]. *Computational Materials Science*, 2003, 27(4): 423-436.

[38] Rice J R, Tracey D M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields [J]. *J Mech Phys Solids*, 1969, 17: 201-217.

[39] Özden U A, Bezold A, Broeckmann C. Numerical simulation of fatigue crack propagation in WC/Co based on a continuum damage mechanics approach [J]. *Procedia Materials Science*, 2014, 3: 1518-1523.

[40] Özden U A, Mingard K P, Zivcec M, et al. Mesoscopic finite element simulation of fatigue crack propagation in WC/Co-hardmetal [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2015, 49: 261-267.