

热喷涂 NiCrBSi 基耐磨涂层的研究进展

徐海峰¹, 肖金坤¹, 张嘎², 张超¹

(1. 扬州大学 机械工程学院, 扬州 225127;

2. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 磨损失效是工业生产及材料使用寿命最主要的消耗方式之一,通过热喷涂表面涂层技术提高摩擦副表面摩擦磨损性能受到越来越多的关注。作为一种重要的表面处理技术,热喷涂在防腐、耐磨等方面均有出色的表现。NiCrBSi 是以 Ni、Cr 为主要组元的 Ni 基自熔性合金,近年来,NiCrBSi 基涂层在制备方法、性能表征和应用推广等方面都取得了重要进展。本文主要论述了热喷涂 NiCrBSi 和 NiCrBSi-Mo 涂层的自润滑性能、NiCrBSi-碳化物涂层的硬质相增强效果、NiCrBSi-氧化物涂层综合性能等方向的研究现状,分别对火焰重熔、激光重熔、炉内重熔及感应重熔 NiCrBSi 基涂层的原理、特点及相关应用实例进行了阐述,分析了这四种后处理重熔态涂层结构与磨损性能,着重比较添加组元和重熔工艺对涂层的组织结构、力学性能和耐磨损性能等方面的影响规律,并阐明了各自在机理上的异同。最后总结了 NiCrBSi 基耐磨涂层研究面临的主要问题,并针对这些问题,从材料、工艺和后处理方面提出了三点展望性建议。

关键词: 热喷涂; NiCrBSi; 复合涂层; 耐磨; 熔覆; 后处理

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)02-0109-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.02.017

Progress of Thermal Sprayed NiCrBSi Based Wear-resistant Coatings

XU Hai-feng¹, XIAO Jin-kun¹, ZHANG Ga², ZHANG Chao¹

(1. College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT: Wear failure is one of the most common consumption patterns during industrial production and material life. Using thermal spray technology to improve friction and wear properties of friction pair surface has attracted increasing attention. As an important surface technology, thermal spray has good application in the area of corrosion, wear, etc. NiCrBSi is a kind of Ni-based self-fluxing alloy in which Ni and Cr are main components. In recent years, researches on NiCrBSi based coatings have made important progress in preparation, characterization and application. The first part of this article gave a detailed investigation of state of the art of Ni-based alloys, mainly discussed the research status on pure NiCrBSi coatings, self-lubricating properties of NiCrBSi-Mo coatings, hard phase enhancement of NiCrBSi-carbide coatings, comprehensive performances of NiCrBSi-oxide coatings. The second part presented the principles, characteristics and applications of flame, laser, furnace, inducting remelted NiCrBSi coatings.

收稿日期: 2015-10-17; 修订日期: 2015-12-03

Received: 2015-10-17; Revised: 2015-12-03

作者简介: 徐海峰(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向为热喷涂金属基耐磨涂层。

Biography: XU Hai-feng(1991—), Male, Master graduate student, Research focus: thermal sprayed metal wear-resistant coatings.

通讯作者: 张超(1981—),男,博士,教授,博导,研究方向为热喷涂与再制造技术。

Corresponding author: ZHANG Chao(1981—), Male, Ph. D., Professor, Doctoral tutor, Research focus: thermal spray and remanufacturing technology.

In this part, the effect of post-treatment on coating microstructure and wear performance was also taken into account. Meanwhile the effects of adding component and remelting processes on coating structure, mechanical properties and wear resistance performance were compared in order to clarify the wear mechanism. Finally, the main problems existing in NiCrBSi based wear-resistant coatings were summarized. Three suggestions from the viewpoints of materials, process and post-treatment were prospected.

KEY WORDS: thermal spraying; NiCrBSi; composite coating; wear-resistance; cladding; post treatment

热喷涂是一项利用热源加热喷涂材料至熔融或半熔融状态并喷射到工件表面的技术^[1]。传统热喷涂可分为燃烧法和电热法,前者包括火焰喷涂、高速火焰喷涂、爆炸喷涂^[2-5],后者包括电弧喷涂、等离子喷涂^[6-7]等。热喷涂技术可在普通材料表面制造一个特殊的工作面,使其具有耐磨、减摩、耐高温和耐腐蚀等多种功能,可克服基体材料的性能局限。

NiCrBSi 具有耐磨损、耐腐蚀、耐高温氧化、基体润湿性好和结合强度高特性,广泛应用于机械零部件表面的防护、修复和再制造^[8]。早在 1971 年就有了 NiCrBSi 涂层及 WC/NiCrBSi 涂层在钢铁轧辊上的应用^[9]。近几年来,热喷涂 NiCrBSi 涂层更被看作替代电镀硬铬镀层的最佳选择。电镀硬铬镀层由于在制备过程中会产生六价铬离子,对人体和自然环境产生长期毒害作用^[10],因此在 2000 年 9 月欧盟就已限制使用六价铬及其制品^[11]。虽然我国尚未禁止这项技术,但已开始积极寻找更环保的替代材料,因此, NiCrBSi 涂层也就成为研究重点之一。

近年来,研究者在改善 NiCrBSi 涂层的耐磨性能方面做了许多有意义的研究工作,主要从涂层材料的成分设计、热喷涂工艺以及后处理工艺三个方面开展研究。本文主要对 NiCrBSi 基涂层的组成以及后处理工艺进行详细地综述,以期对后续研究提供可行的研究思路。

1 热喷涂 NiCrBSi 基涂层

1.1 NiCrBSi 涂层

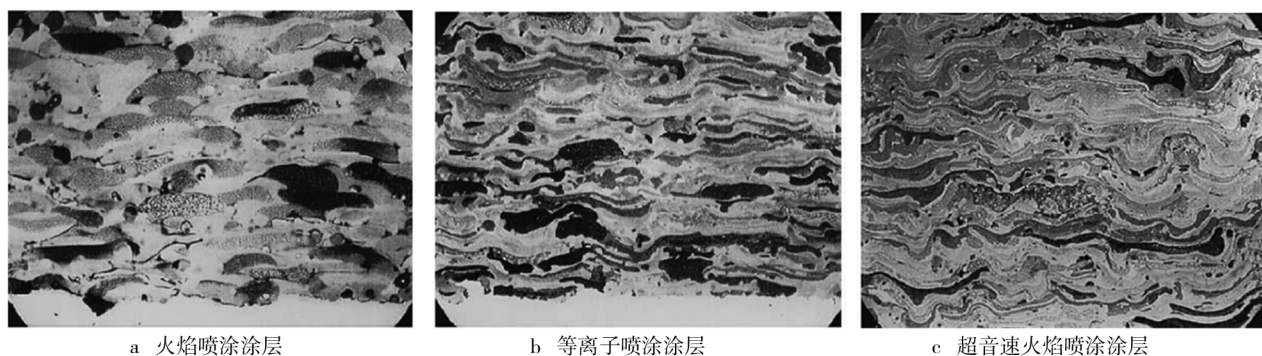
NiCrBSi 主要是以 Ni、Cr 为主的 Ni 基自熔性合金,由 Ni80Cr20 高温合金发展而来,合金中的 Cr 主要提高 Ni 基体的抗高温氧化性能和抗腐蚀性能,富余的 Cr 容易与碳、硼形成碳化铬、硼化铬硬质相,从而提高合金的硬度和耐磨性^[12]。B 和 Si 元素能够降低合金的熔点,改善合金熔体的流动性及与基体表面的润湿性,这主要得益于 B 和 Si 具有很强的脱氧和造渣能力。另外, Si 在合金中还能起固溶强化作用, B 则能与合金中的一些元素结合形成高硬度的金属间

化合物,起到弥散强化作用,提高了合金的耐磨损性能。通常, NiCrBSi 中还会添加少量其他元素(如 C, Al, Ti, Fe, Nb, Ta, W, Co 和稀土元素等),以提高合金性能。添加元素对合金的强化方式可分为以下三类:固溶强化(W, Mo, Co, Cr 等),沉淀强化(Al, Ti, Nb 和 Ta 等),晶界强化(B, Zr, Mg 和稀土元素等)^[13]。

NiCrBSi 合金的基体相为固溶体 γ -Ni 相^[14],同时还含有少量的如 Ni_3B , Cr_2B , CrB , Ni_3Si , M_7C_3 , M_{23}C_6 和一些其他的复杂化合物相,这些化合物都具有较高的硬度,能够显著地提高合金材料的硬度及耐磨损性能。NiCrBSi 合金粉末在热喷涂过程中冷却速度较快,合金中一些平衡相难以析出,因此获得的涂层组织中主要为 γ -Ni 过饱和固溶体及非常少量的析出相,并且析出相很细小。只有在经过激光重熔、炉内重熔等后处理方式处理后,涂层中的析出相含量和尺寸才能有所增加。

采用热喷涂技术制备的 NiCrBSi 涂层,通常具有片层堆叠结构,片层堆积的交界处存在少量的孔隙及氧化物,这是由于 NiCrBSi 原料粉末经热喷涂枪加热熔融后以较高的速度沉积在基体上,熔融颗粒在与基体碰撞过程中向四周扩展并冷却,形成扁平粒子。Planche 等^[15]采用火焰喷涂、等离子喷涂和超音速火焰喷涂三种方法制备了 NiCrBSi 涂层,涂层形貌如图 1 所示,涂层中片层的厚度依次减小,原因是以上三种涂层制备方法中粉末颗粒的飞行速度依次增大,分别为 39, 137 和 439 m/s,高速有利于颗粒扁平化,形成致密的涂层。由于 NiCrBSi 熔体具有较好的流动性和润湿性,因此采用热喷涂方法制备的 NiCrBSi 涂层一般具有较高的致密度,涂层的孔隙率通常低于 3%。

NiCrBSi 涂层能显著提高基体材料的表面硬度和耐磨损性能。通常基体碳钢材料的显微硬度为 150 ~ 250HV,而 NiCrBSi 涂层的显微硬度一般可达 700 ~ 1000HV,这是 NiCrBSi 涂层具有良好耐磨性能的重要原因^[16]。NiCrBSi 涂层的硬度与固溶体 γ -Ni 相(基体相)和析出化合物相(增强相)有直接关联,同时涂层中的孔隙在一定程度上也影响着涂层的硬度。喷涂粉末快速冷却形成的过饱和固溶体 γ -Ni 相具有很高的硬度,但是析出的化合物弥散增强相较少。喷涂

图1 三种热喷涂方式制备的 NiCrBSi 涂层的形貌^[15]Fig. 1 Microstructures of the NiCrBSi coatings sprayed by the three spray processes^[15];

a) flame sprayed coating, b) plasma sprayed coating, c) HVOF sprayed coating

粉末冷却速度较慢或者涂层经过重熔后,涂层组织中的 γ -Ni 相硬度降低,但是析出的弥散增强相增加。另外,涂层中的孔隙在一定程度上会降低涂层的硬度。Lin 等^[17]采用高速火焰喷涂(HVOF)方法制备的 Ni-17Cr-3B-4Si-4Fe-1C 涂层,比较了该涂层与 304 不锈钢基体材料在砂浆冲蚀下的耐磨性,发现 NiCrBSi 涂层的磨损率比 304 不锈钢低 3~4 倍,表明 NiCrBSi 涂层能够较大幅度地提高基体材料的使用寿命,起到良好的防护作用。

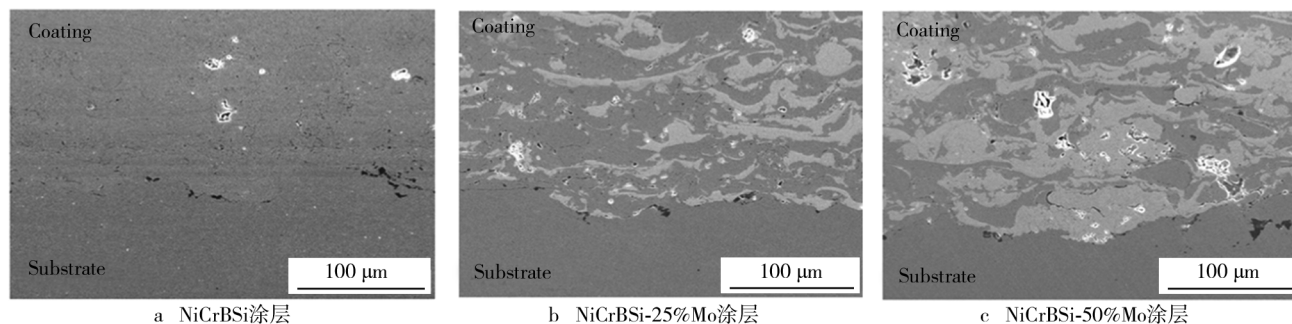
虽然纯 NiCrBSi 在低强度下具有良好的抗磨减摩性能,但随着工作载荷的逐渐增加,局限于其结合强度、相组成等因素,纯 NiCrBSi 容易出现表面形变、应力集中等问题。目前多以添加增强体来进一步提高其力学及耐磨性能,通常在涂层中添加难熔金属 Mo、碳化物和氧化物等颗粒来制备复合涂层。

1.2 NiCrBSi-Mo 涂层

Mo 的熔点高达 2623 °C,通常是以一定粒径颗粒的形式与 NiCrBSi 原料粉末组成混合原料来制备复合涂层,而不是以含难熔金属的合金粉为原料,因此

Mo 颗粒在热喷涂过程中难以完全熔融,与基体碰撞时的变形程度相对较小,所制备的 NiCrBSi-Mo 涂层中含有较多的孔隙。图 2a,b 和 c 分别为采用等离子喷涂技术制备的 NiCrBSi, NiCrBSi-25% Mo 和 NiCrBSi-50% Mo(百分数均为质量分数,后同)涂层,其孔隙率分别为 0.4%, 0.5% 和 1.1%,涂层中的孔隙随着 Mo 含量的增加而增加。另外,图中亮色的区域为金属 Mo,暗色的区域为 NiCrBSi 合金,可以看出,Mo 与 NiCrBSi 能形成很好的结合,这与 Mo 具有很强的自粘合特性有关^[18]。

在 NiCrBSi 涂层中添加 Mo 主要是为了改善涂层的抗咬死性能^[19]。NiCrBSi-Mo 涂层在摩擦磨损过程中,摩擦表面上暴露的金属 Mo 迅速被空气氧化,生成一层 MoO₂ 氧化膜^[20],MoO₂ 氧化膜不仅具有良好的润滑效果,同时也能阻碍摩擦副接触表面的直接粘着,起到减摩作用。在边界润滑条件下,涂层中的 Mo 还会被油中的 S 氧化生成 MoS₂,在涂层表面形成 MoO₂-MoS₂ 润滑膜,润滑作用更好^[21]。Niranatlumpong 等^[22]研究了 Mo 含量对等离子喷涂 NiCrBSi-Mo 涂层摩擦磨损性能的影响规律,研究发现,虽然 NiCrBSi-25% Mo 涂

图2 NiCrBSi 和 NiCrBSi-Mo 涂层截面形貌^[22]Fig. 2 Cross-section microstructures of NiCrBSi and NiCrBSi-Mo coatings^[22];

a) NiCrBSi coating, b) NiCrBSi-25% Mo coating, c) NiCrBSi-50% Mo coating

层的硬度比 NiCrBSi 涂层的低,且孔隙率高,但是其表现出最低的磨损量,表明 Mo 在减摩方面所起的作用不可忽视,但是添加过多的 Mo 会降低涂层内部的结合强度从而导致涂层出现剥层磨损。

1.3 NiCrBSi-碳化物涂层

NiCrBSi 涂层中通常添加 WC, TiC, SiC, Cr_3C_2 等高硬度碳化物,能大幅提高涂层的硬度和耐磨损性能^[22-24]。Serres 等^[25]采用等离子喷涂和原位激光烧结复合技术制备了 WC 质量分数分别为 0.5%, 10%, 25% 和 50% 的 NiCrBSi-WC 复合涂层, NiCrBSi 涂层的硬度和磨损率分别为 10.08 GPa 和 $10.96 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{mN}$, 当涂层中添加了 25% 的(质量分数)WC 时, NiCrBSi-25% WC 涂层的硬度提高至 13.67 GPa, 磨损率降低至 $4.67 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{mN}$ 。

当然,采用激光熔覆制备的 NiCrBSi-WC 复合涂层的硬度和耐磨性也均随着 WC 含量的增加而提高。Zhang 等^[26]比较了采用大气等离子喷涂 (APS) 制备的 NiCrBSi 涂层和 NiCrBSi-15% (WC-Ni) 复合涂层的显微硬度和滚动接触疲劳性能,前者的硬度为 700 ~ 750HV, 后者的硬度达到 800 ~ 900HV, 研究同时发现 NiCrBSi/WC-Ni 涂层的滚动接触疲劳寿命比 NiCrBSi 涂层有明显的提升。Stewart 等^[27]对 WC-NiCrBSi 涂层进行后处理后,涂层的滚动接触疲劳寿命得到了较明显的改善。

WC 是一种非常好的增强相,但是在热喷涂过程中温度超过 1250 °C 时 WC 容易发生脱碳生成硬度较低的 W_2C ^[28], 当脱碳行为继续进行时甚至会产生较软的 W 相。为了尽量减少 WC 的分解,目前公认最有效的方法是超音速火焰喷涂 (HVOF), HVOF 不仅火焰温度较低,而且颗粒在火焰中的受热时间也较短,有效地降低了 WC 的分解。另外,采用 Ni 或 Co 包 WC 粉为原料可以在一定程度上减少 WC 在喷涂过程中的分解。何龙等^[29]分别采用 HVOF 和 APS 制备了 WC-Co/NiCrBSi 涂层,在分析涂层中的物相时发现,APS 制备的复合涂层中 W_2C 和 $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 的衍射峰强度明显强于 HVOF 制备的涂层,表明 WC 颗粒在 APS 制备过程中的分解和氧化程度比 HVOF 大。Betancourt-Dougherty 等^[30]发现采用真空等离子喷涂 (VPS) 制备的 NiCrBSi-40% TiC (百分数为体积分数) 复合涂层的耐磨性比 APS 制备的涂层高,这是由于 VPS 涂层中的氧化物和孔隙率均比 APS 涂层低。Buytoz 等^[31]采用 HVOF 制备了 SiC 质量分数分别为

10%, 20% 和 40% 的 NiCrBSi-SiC 复合涂层,研究结果发现随着涂层中 SiC 含量的增加,涂层的硬度和耐磨性也随之提高。 Cr_3C_2 的常温硬度和热硬度都很高,在金属型碳化物中抗氧化能力最强,空气中 1100 ~ 1400 °C 时才会严重氧化,因此常添加到耐高温复合涂层中。Zikin 等^[32]研究了 TiC 和 Cr_3C_2 颗粒增强的 NiCrBSi 复合涂层的高温冲蚀性能,结果表明不论是 TiC 颗粒还是 Cr_3C_2 颗粒增强的 NiCrBSi 涂层在 700 °C 高温下均保持较低的磨损率。

综上,碳化物增强作用实质是作为 Ni 基涂层中的增强相,部分 C 元素与 Ni, Cr 等生成化合物,且 Ni 能湿润涂层起到强化作用,同时,这类粉末中的粘结性能在一定程度上使碳化物免受氧化或分解。虽然 WC, TiC 等能有效提高 Ni 基涂层摩擦磨损性能,但是也存在成本过高等弊端,并且 WC 高温下容易失 C 从而减弱强化效果。近来,研究者们发现某些氧化物陶瓷也具备类似的强化效果,某些情况下其性能更为优越。

1.4 NiCrBSi-氧化物涂层

根据氧化物颗粒在 NiCrBSi 涂层中所起的作用,大致可以分为以下两类:增强作用和润滑作用。硬度较高的氧化物颗粒,如 Al_2O_3 , Cr_2O_3 等,在涂层中主要是起到提高涂层硬度和耐磨性能的作用,而在涂层中添加一些有特殊物理化学性质的稀土或其他氧化物,如 CeO_2 , Y_2O_3 , La_2O_3 , Fe_2O_3 等,则可以起到良好的润滑、减摩作用。韩耀武等^[33]采用等离子喷涂方法制备的 NiCrBSi- Al_2O_3 复合涂层表现出良好的耐冲蚀性能。He^[34]对采用 APS 制备的 NiCrBSi, NiCrBSi-15% Al_2O_3 和 NiCrBSi-15% Al_2O_3 -2% CeO_2 涂层的微观结构、力学性能和摩擦磨损性能进行了比较,实验结果发现,相比于 NiCrBSi 涂层, NiCrBSi- Al_2O_3 和 NiCrBSi- Al_2O_3 - CeO_2 涂层的硬度和耐磨性都有较大幅度的提高,其中显微硬度由 NiCrBSi 涂层的 613.1HV 提高至 NiCrBSi- Al_2O_3 涂层的 671.5HV 和 NiCrBSi- Al_2O_3 - CeO_2 涂层的 700.4HV, 以上三种涂层的摩擦因数也呈现出依次降低的趋势。Żórawski 等^[35]在研究 APS 和 HVOF 制备的 NiCrBSi- Fe_2O_3 复合涂层的摩擦磨损性能时,发现 HVOF 制备的 NiCrBSi- Fe_2O_3 复合涂层比 NiCrBSi 涂层具有更低的摩擦因数,因而认为 Fe_2O_3 在摩擦过程中发挥了一定的润滑作用。Wang 等^[36]比较了 NiCrBSi-TiC 涂层和 NiCrBSi-TiC- La_2O_3 涂层的力学和摩擦磨损性能,发现涂层中含有 0.5% ~

1% (质量分数) 的 La_2O_3 时,涂层的硬度和耐磨性都有提高,摩擦因数由 0.58 降低至 0.42,表明 La_2O_3 发挥了润滑减摩作用。Cai 等^[37] 在 NiCrBSi 涂层中添加 0.5% (质量分数) 的 Y_2O_3 后,涂层的摩擦因数由 0.48 降低至 0.175,磨损量由 2.15 mg 降低至 1.2 mg,添加少量的 Y_2O_3 就能引起涂层摩擦因数和磨损率大幅的降低。NiCrBSi- Y_2O_3 涂层在摩擦过程中,细小 Y_2O_3 颗粒富集在摩擦表面上形成氧化物颗粒膜,阻碍两摩擦表面的直接接触,减小粘着作用力,从而降低摩擦因数和磨损量。但是,当 Y_2O_3 的含量超过 1.5% (质量分数) 时,涂层的磨损又变得严重,这是因为过多的颗粒聚集在摩擦表面上,加剧了摩擦表面的磨粒磨损。

少量的氧化物颗粒可以有效降低材料的粘着磨损,但过量的氧化物颗粒可能会导致材料出现严重的磨粒磨损,因此作为润滑作用添加的氧化物颗粒需要控制在合适的范围内。如何准确快速地找出最合适的添加物含量在这里就显得尤为重要,文献实验中常用控制变量法分别研究喷涂性能,但在添加物含量的选择上比较倾向于对比某些特殊值,而非找出其最优量,笔者建议采用类似方法结合对摩擦磨损机理的分析,拟出涂层的摩擦磨损曲线,以找出最合适的添加物含量。

2 热喷涂 NiCrBSi 基涂层的后处理

虽然热喷涂涂层制备技术已经取得了较大的发展,但是由于热喷涂技术的固有特点,在制备的涂层中难免存在未熔球状颗粒、颗粒间烧结不完全、孔隙、微裂纹和界面结合强度低等缺陷,这些缺陷严重影响涂层的使用性能,为此,常需要对涂层进行后续处理,以降低或者消除涂层中存在的一些缺陷,涂层的后处理技术也因此受到越来越多研究者的关注。常用的后处理工艺有火焰重熔、激光重熔和炉内重熔等^[38-42]。

2.1 火焰重熔

火焰重熔是利用火焰燃烧产生的热量熔化涂层,让涂层实现二次熔融,以消除涂层中的孔隙,同时使涂层与基体形成良好的冶金结合。相对于其他后处理方式,火焰重熔因操作简单、成本低廉而更多地应用于实际生产^[43]。

董晓强等^[44] 对比了氧乙炔火焰重熔前后等离子

喷涂 NiCrBSi-15% WC 涂层的组织与性能,发现经火焰重熔后的涂层出现了 CrB , Cr_2B_3 , Cr_{23}C_6 等新的硬质相,涂层的硬度相对于未经重熔处理的涂层提高了三分之一,达到 800 HV,涂层的磨损率也降低了近 50%。Houdková^[24] 采用火焰重熔、电阻重熔、炉内重熔和激光重熔等四种重熔方式对火焰喷涂和高速火焰喷涂两种方法制备的 NiCrBSi 涂层分别进行了后处理,不论进行哪一种重熔处理,涂层的孔隙都明显减少,涂层和基体的结合由机械结合转变为冶金结合。图 3 为经过不同方式重熔后 NiCrBSi 涂层的磨损率,可以看出,重熔后涂层的磨损率显著低于未重熔涂层,重熔方式对涂层耐磨性的影响规律并不明显。

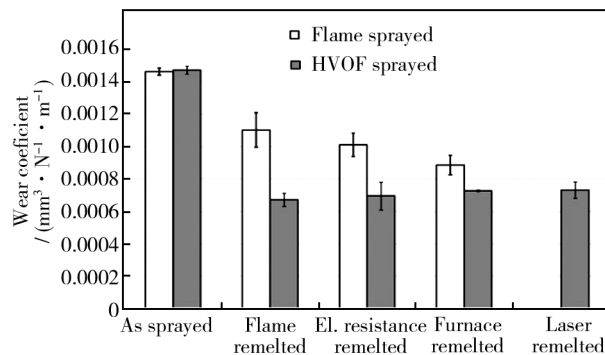


图3 NiCrBSi 涂层与干砂轮对磨时的磨损率^[45]

Fig. 3 Wear coefficient of NiCrBSi coatings measured by dry sand rubber wheel test^[45]

2.2 激光重熔

激光重熔是利用高能激光束辐射加热,使涂层材料表面熔化,并快速凝固,最终达到降低涂层内部孔隙,优化涂层组织和强化涂层与基体界面结合的处理工艺^[46-47]。

尹斌等^[48] 研究了激光重熔对等离子喷涂 NiCrBSi 涂层的显微结构和性能的影响,通过激光重熔后, NiCrBSi 涂层中的未熔颗粒、孔洞以及裂纹等缺陷得以消除,提高了涂层的致密度,且重熔层与基材无明显界面,说明涂层与基材形成了优异的冶金结合,涂层的结合强度得到了显著改善。激光重熔后 NiCrBSi 涂层的硬度在 720 ~ 780HV 之间,明显高于处理前涂层的硬度(600HV),涂层的耐磨性也提高了 2 倍。王东生等^[49] 对激光重熔前后等离子喷涂 WC 颗粒增强 Ni 基涂层进行了对比,结果表明,激光重熔处理对其涂层组织性能有很大影响,经激光重熔处理后,涂层的显微硬度由 880HV 增加到 1090HV,并且平均摩擦因数也由 0.57 降到 0.42。王玲等^[50] 对火焰喷涂制

备的 Ni-WC 复合涂层进行了重熔实验,结果表明,经激光重熔处理后,涂层中的孔隙明显减少,涂层显微硬度比火焰喷涂涂层提高了约 20%。此外,激光重熔有效促进了固溶强化、细晶强化和结构致密化作用。

2.3 炉内重熔

炉内重熔实质是工件在电炉内进行加热重熔,涂层中的元素有充分的时间进行扩散传质,消除内部缺陷。同时由于炉内温度可控,有效地避免了温度急剧下降产生的内应力等问题,但是由于高温时间过长,对基体材料的组织和性能会产生较大的影响^[51]。

王韶云等^[52]对等离子喷涂 NiCrBSi 涂层进行了炉内重熔处理,重熔处理的温度为 1020 °C,略高于合金的熔点 1010 °C,重熔处理的时间为 40 min。图 4 为 NiCrBSi 涂层炉内重熔处理前后的截面形貌,从图中可以看出,经过重熔后,涂层内较大的孔隙基本消除或变小,涂层与基体结合界面上的裂纹消失了,两者形成了牢固的冶金结合,其接触疲劳寿命也得到了明显的提高。向兴华等^[53]研究了炉内重熔处理对等离子喷涂 NiCrBSi-(20%~30%)WC 涂层组织形态的

影响,发现经炉熔处理后,涂层由喷涂态的富含孔隙、未熔颗粒的层状结构转变为致密的结晶组织结构,部分 WC 颗粒被 Ni 基合金包覆,使两者间形成更紧密的结合,涂层与基材由机械咬合结合转变为冶金反应扩散结合,涂层的强韧性和涂层与基材的结合强度都得到了显著改善。

2.4 感应重熔

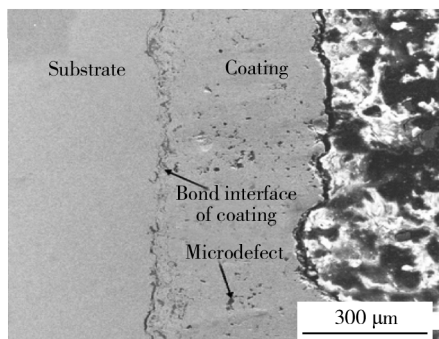
高频感应重熔是近来最受关注的热喷涂后处理方式之一,其实质是通过电磁感应将电能传递至被加热金属,利用电磁涡流加热基材表面涂层,从而获得性能优良的涂层^[54]。它的功率密度较高,加热速度快,温度、时间和加热深度易控制,因此在提高涂层质量和生产效率,改善操作环境,减少对工件的损害等方面相对于传统的炉内重熔和火焰重熔有很大优势^[55]。

由于其重熔机理与其他后处理方式有很大差别,微观形貌上基体与熔覆层之间存在称之为扩散转移带的白亮带^[56],其形成原因是由于基体与涂层特性存在差异导致基体与涂层结合处涡流很大,涂层内元素向基体奥氏体扩散并因快速冷却而留在基体内^[57],因而其孔隙率远远低于其他后处理工艺,冶金结合强度也远高于其他工艺。

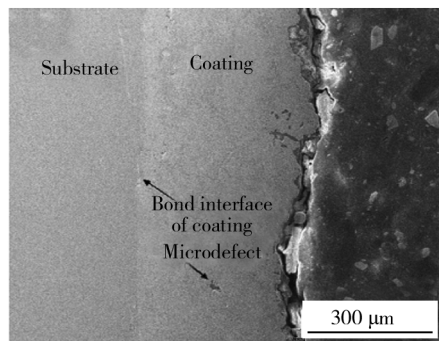
3 总结与展望

NiCrBSi 基耐磨涂层因其优良耐磨损、耐腐蚀和适合热喷涂制备工艺等特点得到了广大研究者的关注,并开展了大量的研究工作。本文综述了改善热喷涂 NiCrBSi 基涂层的摩擦磨损性能而进行的相关研究工作。结果表明,NiCrBSi 基涂层的性能改进主要从降低摩擦因数和提高硬度两个方面着手:在涂层中添加难熔金属 Mo 以及稀土氧化物颗粒都可以降低 NiCrBSi 涂层的摩擦因数,提高耐磨损性能;硬质碳化物颗粒和氧化物颗粒能够起到增强 NiCrBSi 涂层硬度和耐磨损性能;对热喷涂 NiCrBSi 涂层进行重熔后处理,可以显著地降低或消除涂层中的孔隙,增强涂层与基体的结合强度,同时提高涂层的硬度和耐磨损性能。

近年来我国热喷涂技术有了长足发展,但在工艺精度、设备先进性、粉末质量上都与国际先进水平有一定差距,针对 NiCrBSi 基涂层的后续研究,笔者认为以下三项工作值得研究人员关注:



a 重熔前涂层



b 重熔后涂层

图 4 NiCrBSi 涂层炉内重熔前后截面形貌^[53]

Fig. 4 Cross-section microstructures of NiCrBSi coatings before and after furnace remelting^[53]: a) plasma sprayed coating, b) remelting treated coating

1) 在 NiCrBSi 涂层中添加少量质软的纳米氧化物颗粒,可以显著改善涂层减摩性能,但需解决纳米氧化物颗粒的送粉和在涂层中均匀分散等问题。在涂层中选用其他类型的增强相,例如纤维或者晶须,也是提升 NiCrBSi 涂层摩擦性能的有效手段。

2) 通过改进喷涂工艺以及后处理方式来提高涂层性能,理清三要素之间的联系,建立可靠的数据系统,这对材料的使用和评估都有重要意义。

3) 后处理仍然是提高 NiCrBSi 基涂层的有力手段,采用新型的后处理技术,如放电等离子烧结、微波烧结等新技术也可能是提高涂层性能的有效途径。

NiCrBSi 涂层作为电镀硬铬镀层最有希望的替代者,在以后表面工程的研究领域和应用领域都有可能取得重大的进展和突破。

参考文献

- [1] 徐滨士,李长久,刘世参,等. 表面工程与热喷涂技术及其发展[J]. 中国表面工程,1998,11(1):3—9.
XU Bin-shi, LI Chang-jiu, LIU Shi-can, et al. Development of Surface Engineering and Thermal Spray Technology[J]. China Surface Engineering, 1998, 11(1): 3—9.
- [2] 王永兵,刘湘,祁文军,等. 热喷涂技术的发展和应
用[J]. 电镀与涂饰,2007,26(7):52—55.
WANG Yong-bing, LIU Xiang, QI Wen-jun, et al. Development and Application of Thermal Spraying Technology[J]. Electroplating & Finishing, 2007, 26(7): 52—55.
- [3] 牛少鹏,邓畅光,张吉阜,等. 超音速火焰喷涂碳化铬基涂层的高温摩擦磨损性能研究[J]. 表面技术,2012,41(6):10—13.
NIU Shao-peng, DENG Chang-guang, ZHANG Ji-fu, et al. Study on High Temperature Friction and Wear Performance of Chromium Carbide Based Coatings Sprayed by HVOF[J]. Surface Technology, 2012, 41(6): 10—13.
- [4] 路阳,丁明辉,王智平,等. 超音速火焰喷涂研究与应用[J]. 材料导报,2011,25(19):127—130.
LU Yang, DING Ming-hui, WANG Zhi-ping, et al. Research Status and Application of HVOF[J]. Materials Review, 2011, 25(19): 127—130.
- [5] 许磊,张春华,张松,等. 爆炸喷涂研究的现状及趋势[J]. 金属热处理,2004,29(2):21—25.
XU Lei, ZHANG Chun-hua, ZHANG Song, et al. Present State and Trend of Detonation Gun Spray[J]. Heat Treatment of Metals, 2004, 29(2): 21—25.
- [6] 白金元,徐滨士,许一,等. 自动化电弧喷涂技术的研究应用现状[J]. 中国表面工程,2006,19(5):267—270.
BAI Jin-yuan, XU Bin-shi, XU Yi, et al. The Present Researching and Applying Situation of the Technology of Automatic Arc Spraying[J]. China Surface Engineering, 2006, 19(5): 267—270.
- [7] 杨洪伟,栾伟玲,涂善东. 等离子喷涂技术的新进展[J]. 表面技术,2005,34(6):7—10.
YANG Hong-wei, LUAN Wei-ling, TU Shan-dong. Recent Development on Plasma Spray Technology[J]. Surface Technology, 2005, 34(6): 7—10.
- [8] SMITH R W. Thermal Spray Technology. Home Study Course [R]. ASM International, Materials Engineering Institute, 1992:21—39.
- [9] OTSUBO F, ERA H, KISHITAKE K. Structure and Phases in Nickel-base Self-fluxing Alloy Coating Containing High Chromium and Boron[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2000, 9(1): 107—113.
- [10] 王青,王娜. 铬对人体与环境的影响及防治[J]. 微量元素与健康研究,2011,28(5):64—66.
WANG Qing, WANG Na. Chromium Effects on the Human Body and the Environment and Prevention[J]. Studies of Trace Elements and Health, 2011, 28(5): 64—66.
- [11] 谢素玲. 欧洲“ELV 指引”限制汽车六价铬的使用[J]. 电镀与涂饰,2002,21(6):65—66.
XIE Su-ling. Europe "ELV Guidelines" Restricted Car Use of Hexavalent Chromium[J]. Electroplating & Finishing, 2002, 21(6): 65—66.
- [12] SHIEH Y, WANG J, SHIH H, et al. Allowance and Post-heat Treatment of Thermal Sprayed Coatings of Self-fluxing Alloys[J]. Surface & Coatings Technology, 1993, 58: 73—78.
- [13] 余廷,邓琦林,姜兆华,等. 热处理对钽强化激光熔覆 NiCrBSi 涂层的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2013,42(2):410—414.
YU Ting, DENG Qi-lin, JIANG Zhao-hua, et al. Effect of Heated Laser Cladding NiCrBSi Coated Strengthened by Tantalum[J]. Metal Materials and Engineering, 2013, 42(2): 410—414.
- [14] MAHESH C. Multiscale Abinitio Simulation of Ni-based Alloys: Real-space Distribution of Atoms in $\gamma+\gamma'$ Phase[J]. Computational Materials Science, 2015, 108 (A): 192—204.
- [15] PLANCHE M P, LIAO H, NORMAND B, et al. Relationships between NiCrBSi Particle Characteristics and Corresponding Coating Properties Using Different Thermal Spraying Processes[J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 200: 2465—2473.
- [16] MIGUEL J M, GUILMANY J M, VIZCAINO S. Tribological Study of NiCrBSi Coating Obtained by Different Processes[J]. Tribology International, 2003, 36(3): 181—187.

- [17] LIN M C, CHANG L S, LIN H C, et al. A Study of High-speed Slurry Erosion of NiCrBSi Thermal-sprayed Coating [J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201: 3193—3198.
- [18] 杨忠须, 刘贵民, 闫涛, 等. 热喷涂 Mo 及 Mo 基复合涂层研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(5): 20—30.
YANG Zhong-xu, LIU Gui-min, YAN Tao, et al. Research Progress of Mo and Mo-based Coating Prepared by Thermal Spraying[J]. Surface Technology, 2015, 44(5): 20—30.
- [19] LARIBI M, MESRATI N, VANNES A B, et al. Adhesion and Residual Stresses Determination of Thermally Sprayed Molybdenum on Steel [J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 166: 206—211.
- [20] WAYNE S F, SAMPATH S, ANAND V. Wear Mechanisms in Thermally-sprayed Mo Based Coatings [J]. Tribology Transactions, 1994, 37: 636.
- [21] 吴凯, 刘国权, 胡本芙, 等. 合金元素对新型镍基粉末高温合金的热力学平衡相析出行为的影响[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(6): 721—725.
WU Kai, LIU Guo-quan, HU Ben-fu, et al. Effect of Alloy Elements on the Precipitation Behavior of Thermodynamic Equilibrium Phases in New Type Nickel-based P/M Super Alloys[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(6): 721—725.
- [22] NIRANATLUMPONG P, KOIPRASERT H. The Effect of Mo Content in Plasma-sprayed Mo-NiCrBSi Coating on the Tribological Behavior [J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205(2): 483—489.
- [23] CAI B, TAN Y F, HE L, et al. Tribological Properties of TiC Particles Reinforced Ni-based Alloy Composite Coatings [J]. Transaction Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23: 1681—1688.
- [24] DING Z, KNIGHT R, SMITH R W. Thermal Spray: A United Forum for Scientific and Technological Advances [M]. USA: Materials Park, 1997: 91—95.
- [25] SERRES N, HLAWEKA F, COSTIL S, et al. Microstructures and Mechanical Properties of Metallic NiCrBSi and Composite NiCrBSi-WC Layers Manufactured Via Hybrid Plasma/Laser Process [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(12): 5132—5137.
- [26] YU H L, ZHANG W, WANG H, et al. Bonding and Sliding Wear Behaviors of the Plasma Sprayed NiCrBSi Coatings [J]. Tribology International, 2013, 66: 105—113.
- [27] STEWART S, AHMEDA R, ITSUKAICHI T. Contact Fatigue Failure Evaluation of Post-treated WC-NiCrBSi Functionally Graded Thermal Spray Coatings [J]. Wear, 2004, 257: 962—983.
- [28] CHO T Y, YOON J H, KIM K S, et al. A Study on HVOF Coatings of Micron and Nano WC-Co Powders [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(22/23): 5556—5559.
- [29] 何龙, 谭业发, 周春华, 等. HVOF 和 APS 制备 WC-Co/NiCrBSi 复合涂层高温摩擦学特性研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(9): 1109—1115.
HE Long, TAN Ye-fa, ZHOU Chun-hua, et al. Research on Tribological Properties of WC-Co/NiCrBSi Composite Coatings Prepared by HVOF and APS at Elevated Temperature [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(9): 1109—1115.
- [30] BETANCOURT-DOUGHERTY L C, SMITH R W. Effects of Load and Sliding Speed on the Wear Behaviour of plasma [J]. Wear, 1998, 217: 147—154.
- [31] SONER B, MUSTAFA U, SERKAN I, et al. Microstructural and Wear Characteristics of High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) Sprayed NiCrBSi-SiC Composite Coating on SAE 1030 Steel [J]. Arab J Sci Eng, 2013, 38: 1481—1491.
- [32] ZIKIN A, ANTONOV M, HUSSAINOVA I, et al. High Temperature Wear of Cermet Particle Reinforced NiCrBSi Hard-facings [J]. Tribology International, 2013, 68: 45—55.
- [33] 韩耀武, 孙大千, 谷小燕, 等. 等离子喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{p}/\text{NiCrBSi}$ 涂层组织与性能 [J]. 沈阳工业大学学报, 2010, 32: 290—295.
HAN Yao-wu, SUN Da-qian, GU Xiao-yan, et al. Microstructures and Properties of Plasma Sprayed $\text{Al}_2\text{O}_3\text{p}/\text{NiCrBSi}$ Composite Coating [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2010, 32: 290—295.
- [34] HE L, TAN Y F, WANG X L, et al. Microstructure and Wear Properties of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2/\text{Ni-base}$ Alloy Composite Coatings on Aluminum Alloys by Plasma Spray [J]. Applied Surface Science, 2014, 314: 760—767.
- [35] WOJCIECH Z, STANISŁAW J S. Tribological Properties of Plasma and HVOF-sprayed NiCrBSi- Fe_2O_3 Composite Coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 220: 282—289.
- [36] WANG H, XIA W, JIN Y. A Study on Abrasive Resistance of Ni Based Coatings with a WC Hard Phase [J]. Wear, 1996, 195: 47—52.
- [37] CAI B, TAN Y F, TAN H, et al. Tribological Behavior and Mechanism of NiCrBSi- Y_2O_3 Composite Coatings [J]. Non-ferrous Metals, 2013, 23: 2002—2010.
- [38] 邱星武, 李刚, 邱玲. 激光熔覆技术发展现状及展望 [J]. 稀有金属与硬质合金, 2008, 36(3): 54—66.
QIU Xing-wu, LI Gang, QIU Ling. The Latest Development and Prospects of Laser Cladding Technology [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2008, 36(3): 54—66.
- [39] 程西云, 何科杉, 何俊. 氧化铈对镍基碳化钛复合涂层微观结构及摩擦学性能影响 [J]. 摩擦学学报, 2010, 30(3): 250—255.

- CHENG Xi-yun, HE Ke-shan, HE Jun. Influence of CeO_2 on Tribological Properties and Micro-structure of Laser-cladding TiC_4 Ceramic Layer [J]. Tribology, 2010, 30 (3): 250—255.
- [40] 罗燕, 彭玉娟, 张伟强. 激光熔覆涂层与粉末火焰喷焊涂层组织性能比较[J]. 热加工工艺, 2005(6): 63—64.
- LUO Yan, PENG Yu-juan, ZHANG Wei-qiang. Comparison of Micro-structure and Hardness of Laser Cladding Layer with Flame Spray-welding Layer[J]. Hot Working Technology, 2005(6): 63—64.
- [41] 姬寿长, 李争显, 杜继红, 等. 钛合金表面火焰喷焊 WC/Ni 涂层组织和性能[J]. 热加工工艺, 2007, 36(19): 60—62.
- Ji Shou-chang, LI Zheng-xian, DU Ji-hong, et al. Structure and Properties of Flame Spray-welding WC/Ni Coating on Titanium Alloys Substrate [J]. Hot Working Technology, 2007, 36(19): 60—62.
- [42] 安家宪, 袁庆龙. 镍基合金涂层炉内重熔研究[J]. 太原理工大学学报, 2000, 31(1): 27—30.
- AN Jia-xian, YUAN Qing-long. Research on Nickel-based Alloy Coating Remelted by Furnace[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2000, 31(1): 27—30.
- [43] 赵滨, 杨炎川, 崔林珠, 等. 火焰重熔高硬度镍基自熔性合金组织及性能研究[J]. 热处理技术与装备, 2009, 30(6): 32—34.
- ZHAO Bin, YANG Yan-chuan, CUI Lin-zhu, et al. Research on Microstructure and Performance of High Hardness Ni-based Self-fluxing Alloy after Flame Remelting [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2009, 30(6): 32—34.
- [44] 董晓强, 王永谦, 张楠楠, 等. 火焰重熔对镍基碳化钨涂层显微结构及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2013, 42(12): 154—157.
- DONG Xiao-qiang, WANG Yong-qian, ZHANG Nan-nan, et al. Effect of Oxyacetylene Flame Remelting on Micro-structure and Performance of Ni-based WC Coating [J]. Hot Working Technology, 2013, 42(12): 154—157.
- [45] ŠÁRKA H, EVA S, MAREK V, et al. Properties of NiCrBSi Coating, as Sprayed and Remelted by Different Technologies [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 253: 14—26.
- [46] 吴莹, 牛焱. 激光熔覆添加碳化钨的镍基合金层的组织和硬度研究[J]. 材料保护, 2005, 38(2): 61—63.
- WU Ying, NIU Yan. Microstructure and Hardness of Laser Cladding Nickel Based Alloy Layer Adding Tungsten Carbide[J]. Materials Protection, 2005, 38(2): 61—63.
- [47] CUI C, YE F, SONG G R. Laser Surface Remelting of Fe-based Alloy Coatings Deposited by HVOF [J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(8/9): 2388—2395.
- [48] 尹斌, 周惠娣, 徐海燕, 等. 激光重熔对 NiCrBSi 等离子喷涂层显微结构和性能的影响[J]. 材料保护, 2011, 44(3): 71—73.
- YIN Bin, ZHOU Hui-di, XU Hai-yan, et al. Effects of Laser Remelting on Microstructure and Properties NiCrBSi Plasma Sprayed Coating [J]. Materials Protection, 2011, 44(3): 71—73.
- [49] 王东生, 田宗军, 王松林, 等. 激光重熔等离子喷涂 WC 颗粒增强镍基涂层组织及高温磨损性能[J]. 焊接学报, 2012, 33(11): 13—16.
- WANG Dong-sheng, TIAN Zong-jun, WANG Song-lin, et al. Laser Remelting of Plasma Sprayed WC Particles Reinforced Nickel Base Coating and High Temperature Wear Properties [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(11): 13—16.
- [50] 王玲, 陈志刚, 朱小蓉, 等. 激光重熔对火焰喷涂法制备 Ni-WC 复合涂层耐磨性能的影响[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 281—286.
- WANG Ling, CHEN Zhi-gang, ZHU Xiao-rong, et al. Effects of Laser Remelting on Wear Resistance of Ni-WC Composite Coatings by Flame-Spraying [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(2): 281—286.
- [51] BERGANT Z, TRDAN U, GRUM J. Effect of High-temperature Furnace Treatment on the Microstructure and Corrosion Behavior of NiCrBSi Flame-sprayed Coatings [J]. Corrosion Science, 2014, 88: 372—386.
- [52] 王韶云, 李国禄, 王海斗, 等. 重熔处理对 NiCrBSi 涂层接触疲劳性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(11): 135—139.
- WANG Shao-yun, LI Guo-lu, WANG Hai-dou, et al. Influence of Remelting Treatment on Rolling Contact Fatigue Performance of NiCrBSi Coating [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(11): 135—139.
- [53] 向兴华, 刘正义, 陈康年, 等. 炉熔处理对等离子喷涂 Ni 基 WC 型自熔合金涂层组织形态的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(1): 111—115.
- XIANG Xing-hua, LIU Zheng-yi, CHEN Kang-nian, et al. Furnace Melt Treatment on Plasma Sprayed Ni-based WC Type Fluxing Alloy Coating Morphology [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(1): 111—115.
- [54] ABBASIN B J, ZAKERI M, TAYEBIFARD S A. High Frequency Induction Heated Sintering of Nano Structured Al_2O_3 - ZrB_2 Composite Produced by MASHS [J]. Ceramics International, 2014, 40: 9217—9224.
- [55] KWON S M, LEE S J, SHON I J. Enhanced Properties of Nanostructured ZrO_2 -graphene Composites Rapidly Sintered via High-frequency Induction Heating [J]. Ceramics International, 2015, 41: 835—842.

- Well Tubing Experimental Research on H₂S Corrosion[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(6): 95—97.
- [10] 艾志久, 范钰玮, 赵乾坤. H₂S 对油气管材的腐蚀及防护研究综述[J]. 表面技术, 2015, 44(9): 108—115.
- AI Zhi-jiu, FAN Yu-wei, ZHAO Qian-kun. Corrosion and Protective Research of H₂S to Oil and Gas Pipes[J]. Surface Technology, 2015, 44(9): 108—115.
- [11] 赵国仙, 吕祥鸿. 温度对油套管用钢腐蚀速率的影响[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2008, 23(4): 74—78.
- ZHAO Guo-xian, LYU Xiang-hong. Effect of Temperature on the Corrosion Rate of Oil Tubing and Casing[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science), 2008, 23(4): 74—78.
- [12] SCHMITT G. CO₂ Corrosion of Steels: an Attempt to Range Parameter and Their Effects[C]. Advances in CO₂ Corrosion, 1984.
- [13] 朱世东, 白真权, 刘会, 等. Ca²⁺、Mg²⁺ 对 N80 钢腐蚀速率的影响[J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(12): 724—726.
- ZHU Shi-dong, BAI Zhen-quan, LIU Hui, et al. Ca²⁺, Mg²⁺ on the Corrosion Rate of N80 Steel [J]. Corrosion and Protection, 2008, 29(12): 724—726.
- [14] 李春福, 王斌, 张颖, 等. 油气田开发中 CO₂ 腐蚀研究进展[J]. 西南石油学院学报, 2004, 26(2): 42—47.
- LI Chun-fu, WANG Bin, ZHANG Ying, et al. Research Progress of CO₂ Corrosion in Oil/Gas Field Exploitation[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2004, 26(2): 42—47.
- [15] 李建平, 赵国仙, 郝士明, 等. 几种因素对油套管钢 CO₂ 腐蚀行为影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(4): 241—244.
- LI Jian-ping, ZHAO Guo-xian, HAO Shi-ming, et al. Dynamic Corrosion Behaviors of N80, P105 and SM110 Steel [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2005, 25(4): 241—244.
- [16] 刘雨薇, 王振尧, 吕旺燕, 等. 模拟酸雨大气环境中 Cl⁻ 浓度对镀锌钢腐蚀行为的影响[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 22—26, 43.
- LIU Yu-wei, WANG Zhen-yao, LYU Wang-yan, et al. Effects of Cl⁻ Concentration on Corrosion Behavior of Hot-dip Galvanized Steel in Simulated Acid Rain Atmospheric Environment [J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 22—26, 43.

(上接第 108 页)

- CAO Yu-xia, HUANG Chuan-bing, DU Ling-zhong, et al. Preparation and Tribological Properties of Atmospheric Plasma-sprayed NiCr/Cr₃C₂-hBN Wear-resistant Coatings [J]. Surface Technology, 2015, 44(6): 27—31.
- [13] 刘如铁, 李溪滨, 程时和. Ni-Cr-Mo-S 合金的自润滑机理[J]. 中国有色金属学报, 2003(2): 469—474.
- LIU Ru-tie, LI Xi-bin, CHENG Shi-he. Self-lubrication Mechanism of Ni-Cr-Mo-S Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003(2): 469—474.
- [14] 王振生, 周兰章, 郭建亭, 等. NiAl-Cr(Mo)-Cr_xS_y 自润滑复合材料的摩擦磨损特征[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(6): 589—595.
- WANG Zheng-sheng, ZHOU Lan-zhang, GUO Jian-ting, et al. Friction and Wear Behavior of NiAl-Cr(Mo)-Cr_xS_y Self-lubricating Composite [J]. Journal of Tribology, 2010, 30(6): 589—595.
- [15] 王常川, 王日初, 彭超群, 等. 金属基固体自润滑复合材料的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2012(7): 1945—1955.
- WANG Chang-chuan, WANG Ri-chu, PENG Chao-qun, et al. Research Progress of Metallic Solid Self-lubricating Composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012(7): 1945—1955.
- [16] XIONG Dang-sheng. Lubrication Behavior of Ni-Cr Based Alloys Containing MoS₂ at High Temperature [J]. Wear, 2001, 251(1/12): 1094—1099.

(上接第 117 页)

- [56] LIU J L, HAO H Z, GUO Z A. Interface Morphology of Iron-base Self-fusing Alloy Coating with Induction-refusing [C]//Proceeding of the Fourteenth International Thermal Spray Conference. Japan, 1995: 537—541.
- [57] 张增志, 韩桂泉, 付跃文, 等. 高中频感应熔涂 Ni60 涂层组织分析[J]. 材料工程, 2003(4): 3—5.
- ZHANG Zeng-zhi, HAN Gui-quan, FU Yao-wen, et al. Analysis on Micro-structure of Ni60 Coating by High and Medium Frequency Induction Cladding [J]. Journal of Materials Engineering, 2003(4): 3—5.