

感应熔覆制备镍基合金涂层的研究进展

黄思语^a, 王水波^b

(重庆大学 a.机械工程学院 b.材料科学与工程学院, 重庆 400000)

摘要: 在实际的工业应用中, 大部分工件处于交变载荷、高应力以及强腐蚀的环境中, 严峻的服役条件将会大大缩短工件的实际使用寿命。工件表面往往直接接触不利因素, 所以工件的整体失效基本是从表面开始。熔覆涂层技术是一种常见的金属材料表面处理技术, 可以大幅度改善工件表面性能, 且具备生产效率高、生产成本低、可获得大面积熔覆层等优点, 受到了人们的广泛关注。熔覆涂层的制备技术主要有激光熔覆、氩弧熔覆、等离子熔覆以及高频感应熔覆。其中, 高频感应熔覆技术的应用成本较低。以高频感应熔覆技术为支撑, 对高频感应熔覆技术路线进行阐述, 主要包括预处理、涂层预制、感应熔覆等, 并对各过程中可能对熔覆质量造成影响的因素进行阐述。最后对镍基合金涂层(镍基复合涂层、原位合成制备镍基复合涂层)的制备工艺进行综述, 并对制备过程中存在的部分问题及今后的发展方向进行综述。

关键词: 表面热处理技术; 熔覆涂层; 感应熔覆; 镍基合金涂层

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)09-0039-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.09.007

Research Progress in Preparation of Ni-based Alloy Coating by Induction Cladding Technology

HUANG Si-yu^a, WANG Shui-bo^b

(a. School of Mechanical Engineering,

b. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400000, China)

ABSTRACT: In practical industrial applications, most workpieces are in alternating load, high stress and strong corrosive environment, severe service conditions will greatly shorten actual service life of the workpieces. As the surface of workpieces is often in direct contact with unfavorable factors, overall failure of the workpieces basically originates from the surface. Cladding coating technology is a common surface treatment technology for metallic materials, which can greatly improve surface performance of workpieces and has various advantages including high production efficiency, low production cost and large cladding area, thus it has aroused wide concern. Preparation technologies of cladding coating mainly include laser cladding, argon arc cladding, plasma cladding and high frequency induction cladding, high frequency induction cladding technology is less expensive in application. Supported by high frequency induction cladding technology, the technical route of high frequency induction cladding mainly including: pretreatment, coating prefabrication, induction cladding, etc. was illustrated, and the factors possibly affecting cladding quality during each process were explained. Finally, preparation process of Ni-based alloy coating (Ni-based composite coating and in-situ synthesis preparation of Ni-based composite coating) was reviewed, and some problems in the preparation process and future development direction were reviewed as well.

收稿日期: 2017-06-22; 修订日期: 2017-08-24

Received: 2017-06-22; Revised: 2017-08-24

通讯作者: 王水波(1969—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为材料科学。

Corresponding author: WANG Shui-bo (1969—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: materials science.

KEY WORDS: surface heat treatment technology; cladding coating; induction cladding; Ni-based alloy coating

磨损、腐蚀以及断裂是机械工程件的三大主要破坏形式。其中,由于材料磨损而造成工件失效的案例最多,每年与磨损有关的经济损失约占我国 GDP 的 2%~7%^[1-2],其涉及领域包括冶金、矿山、化工、建材及航空航天等。众所周知,材料的磨损与腐蚀大多发生在工件表面,大部分工况下,二者表现为相互促进的关系,这种协同关系将会加剧材料的失效。在实际工程应用中,人们通常采用合理的表面防护措施来改善材料的耐磨损、耐腐蚀性能,以期达到延长材料使用寿命的目的。

金属材料的表面处理技术很多,但熔覆涂层技术凭借熔覆层厚、质量高、成分可调等优点,已成为应用范围最广的表面处理技术之一。熔覆涂层的制备技术主要有激光熔覆、氩弧熔覆、等离子熔覆以及高频感应熔覆^[3-6]。其中,高频感应熔覆技术凭借其生产效率高,生产成本低,可获得大面积熔覆层,熔覆层表面平整、成形良好、与基体结合可靠的特点,受到了人们的广泛关注。高频感应熔覆技术的理论基础源于集肤效应和电磁感应原理,其是利用感应涡流产生的热量使预置在基体上的合金粉末熔化,得到与基体冶金结合的熔覆层。同时,高频感应熔覆技术对熔覆层材料也有一定的要求^[7],如较好的流动性和润湿性、适当的颗粒度、合适的膨胀系数等。从已公布的文献资料可发现,Ni 基自熔性粉末是目前最常见的熔覆层材料,Ni 基合金具有较高的硬度和优良的耐磨性,采用该种合金粉制备出的熔覆涂层具有优异的综合性能。

本文以高频感应熔覆技术为基础,重点综述其在金属材料表面制备 Ni 基涂层的国内外研究现状,并指出目前该研究领域存在的主要问题及今后的发展方向。

1 感应熔覆制备合金涂层

利用感应熔覆技术制备合金涂层的主要步骤为基体表面预处理、涂层预制、感应熔覆,每个步骤都会对涂层的成形及性能产生影响。

1.1 预处理

张增志^[7]通过试验发现,纯净粗糙的金属表面能大大提高基体与涂层的结合力,从而提高涂层的质量。目前,常用的预处理方法为清洗处理与表面喷砂相结合。王振廷^[8]、贺定勇^[9]、高原^[10]等人均采用此种方法,制备出成形良好且与基体形成冶金结合的涂层。

1.2 涂层预制

涂层预制即将合金粉料以一定方式预先制备在处理好的基体表面,制备方法主要有预制粉块法和预制粉末法两种。预制粉块法是采用液压法将粉体压制成药块状,将粉块置于工件表面后,随即进行熔覆处理。预制粉末法又可分为热涂法和冷涂法。热涂法是采用热喷涂的方式将合金粉末喷涂在工件表面,然后进行感应熔覆。如湛峰等人^[11]用氧乙炔喷涂制备涂层,王继东^[12]用电弧喷涂后进行感应重熔。热涂法简单易行、操作方便,但成本较高,并且熔覆材料的氧化现象会很严重,因此逐渐被放弃。冷涂法是目前最常用的感应涂层制备方法,即将粉末与粘接剂混合成膏状,并涂覆到工件表面,然后在约 190 °C 的温度下(预涂层居里点)烘烤 2 h,再进行感应熔覆处理,如图 1 所示。实验表明^[13-15]冷涂法较热涂法更为经济实用,且冷涂法中涂层烘干后无需冷却,可直接进行熔覆处理,得到的涂层质量也更好。

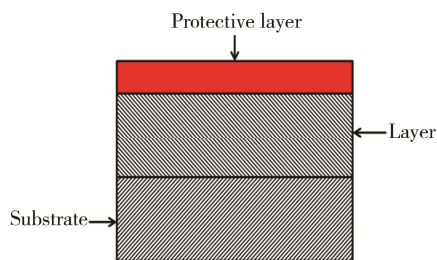


图 1 冷涂法制备表面涂层

Fig.1 Preparation of surface coating by cold coating

冷涂法采用的粘接剂主要有水玻璃、饱和松香油、PVA(聚乙烯醇)、羧甲基纤维素等。王建等人^[16-17]从预涂层成形质量和熔覆涂层组织与性能的研究中发现,不同类型及配比的粘接剂对感应熔覆涂层的质量有重要影响,但并未指出粘接剂的具体成分和配比,也未讨论粘接剂对熔覆涂层具体的作用机理。粘接剂需具有熔点低、易挥发、价格低廉、脱渣性好等特点。当粘接剂过多时,预涂层容易鼓包,熔覆涂层易出现气孔、夹杂,表面成形较差;当粘接剂过少时,粉料结合不紧密,涂层气孔较多。所以,研究合适的粘接剂和粘接剂含量对制备感应熔覆涂层具有显著意义。目前,有一种较为先进的涂层制备工艺,其机理为将基体粉末放置于固定的模具中,在固定模具的表面或侧面涂覆涂层粉末,然后进行加热处理,完成后得到理想的涂层材料,如图 2、3 所示。

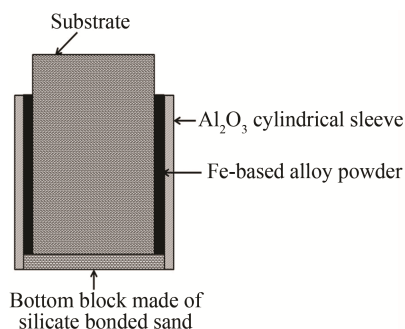


图 2 新型工艺预制侧面涂层

Fig.2 Preparation of side face coating by a new process

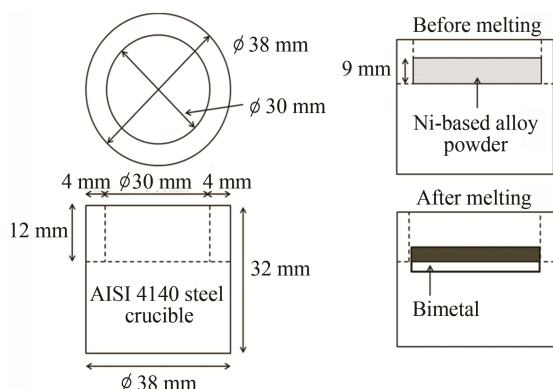


图 3 新型工艺预制表面涂层

Fig.3 Preparation of surface coating by a new process

1.3 感应熔覆

感应熔覆过程中的可控参数较多,且均对熔覆层的质量有重要影响。选用合理的参数不仅可以提高生产效率,节约能源,还能改善合金粉末的成形性和结合质量。张增志^[7]通过理论分析及实验定论熔覆时的感应频率应选在 200~250 kHz,并且提出了控制加热速度的措施,即针对不同的基体材料、合金粉末、直径、涂层厚度,通过试验确定适应的工艺参数。试验时,优先采用大功率、快走速。上述方法在实践中取得了圆满成功。

程国东^[18]利用 ANSYS 有限元分析软件,一定程度上模拟了高频感应熔覆的加热过程,发现随加载电流和频率的增加,基体和涂层的温度上升速度也迅速加快。并结合实际加热设备,确定了当加载电流为 1400 A、时间为 14 s 时,制备出的涂层成形良好,且对基体影响小。

王振廷^[8]、李尚平^[19]、慈文亮^[20]等人在试验时,将熔覆层加热至熔化,停止加热后冷却至室温,得到了与基体成冶金结合且表面平整的熔覆层。高原^[10]在试验时,将预置粉末加热至完全铺开即停止加热,得到了成形良好的涂层。由此可知,熔覆层制备时的加热时间并无固定参数,针对不同的工件形状、不同的合金粉末种类,加热时间存在差异。

此外,感应线圈的大小、形状、感应间隙、输出

功率等因素对熔覆涂层的组织和性能均有重要影响。单匝线圈比多匝线圈更有利于控制涂层的熔化和凝固^[21]。线圈与工件之间的间隙将会影响涡流的分布情况:间隙太大,加热缓慢,效率较低;间隙太小,表面升温过快,局部区域熔化后易发生金属流淌^[22]。间隙的选择原则为:低熔点合金采用大间隙,高熔点合金采用小间隙,通常选择 1.5~5.0 mm 为宜。

2 镍基合金涂层

制备镍基合金涂层采用的合金粉体为镍基自熔性合金粉,即在镍基合金粉中加入 B、Si 等能形成低熔点共晶体的合金元素。其作用是降低合金粉末的熔点至 900~1100 °C,扩大固液相线温度区间。此外, B 和 Si 对 O 的亲合力大于 Ni,可起到脱氧造渣的作用。另外, B 还能够减小基体的摩擦系数,增加涂层的磨损抗力,改善元素在界面区域的扩散速率。

镍基自熔性合金粉末可分为镍-硼-硅合金粉和镍-铬-硼-硅合金粉。NiBSi 合金的硬度不高,但具有良好的韧性、抗氧化性和耐急冷急热性,在 600 °C 以下时具有较好的耐磨性和耐蚀性,易于机械加工。NiCrBSi 合金粉末颗粒呈良好的球型,具有优良的自熔性。Ni 基合金中加入 Cr 可对涂层起到固溶强化和钝化的作用,使合金涂层具有较高的抗高温氧化性和耐蚀性。此外, B 能与 Cr、Ni 生成可提高涂层硬度和耐磨性的硬质相。故 NiCrBSi 合金被广泛用于易损零件、耐蚀件以及铸铁件的表面,以达到强化和修复的目的。

国内外研究者们做了大量有关感应熔覆镍基合金涂层的研究,结果表明熔覆涂层与基体结合的界面均出现了“白亮带”,称之为扩散迁移带 (DTB)。DTB 被认为是涂层和基体达到冶金结合的标志,是感应熔覆涂层的特征之一^[23-25]。张增志等^[26-28]认为“白亮带”是熔覆层中的元素向基材扩散造成的,而文献^[12]提出“白亮带”是熔融态的熔覆层和基体共同作用的结果,如图 4 所示。

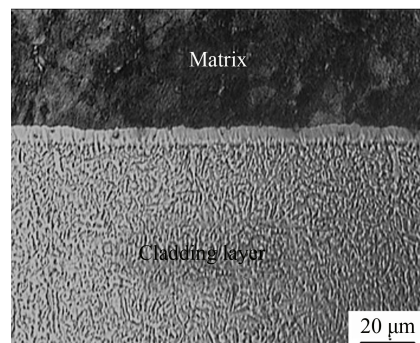
图 4 熔覆层与基体之间的白亮带 (DTB) ^[10]

Fig.4 The white band between the cladding layer and the substrate

镍基涂层的组织均匀且致密,这是因为 γ -Ni上弥散分布着铬的碳化物、硼化物等硬质相^[10]。文献[29-30]通过物相分析证明,这些硬质相主要是 Cr_{23}C_6 、 Cr_7C_3 、 CrB 、 Ni_3B 和 Ni_2Si 等。大量的硬质相使镍基涂层具有较高硬度和优良的耐磨性,且试验证明感应熔覆涂层的表面硬度和耐磨性比激光熔覆涂层及氧乙炔喷焊涂层更好^[3-6]。

王振廷等人^[8,31,32]分别采用不同的摩擦磨损测试手段研究了感应熔覆镍基涂层的耐磨性。结果表明熔覆涂层的耐磨性能良好,摩擦系数较小且随着滑动距离的增加略有增大,磨损机制以擦伤为主。磨粒磨损实验的磨损机制主要表现为轻微的塑性切削,在 90° 冲击角下,冲蚀磨损表现出典型的疲劳剥落特征。高原等人^[10]通过观察干磨损条件下的涂层磨损形貌,发现Ni60合金熔覆层的磨损机制以磨粒磨损和脱落一些硬质相碎片的磨粒磨损为主。

刘祥庆^[33]研究了盐雾腐蚀环境下镍基熔覆涂层的耐蚀性能,发现在348 K时,感应熔覆Ni60涂层后,AISI 1045钢的抗 CO_2 腐蚀性能提高了近100倍。文献[13,34-36]在3.5%NaCl溶液中测试了感应熔覆涂层的电化学腐蚀性能, $E-t$ 曲线表明镍基熔覆涂层的自腐蚀电位高于原始试样,Tafel曲线结果显示感应涂层的腐蚀速率更小,耐蚀性更好。

综上所述,学者们主要从涂层的微观结构、物相、硬度、耐磨性和耐蚀性等方面对感应熔覆涂层进行了研究,发现第二相弥散分布在 γ -Ni上,呈枝晶状、花瓣状,硬质相的分布情况和涂层的结构等因素决定了熔覆层的显微硬度由结合面向表层呈递增趋势,涂层的耐磨性和耐蚀性均较好。

3 镍基复合涂层

镍基自熔性合金具有较好的耐蚀性和耐磨性,但在磨损严重的工况环境下,单一合金涂层已难以满足要求。因此,可通过增加硬质相来进一步提高其硬度和耐磨性,通常引入硬质相的方式有直接掺杂硬质颗粒和原位合成硬质相。

3.1 硬质颗粒掺杂制备Ni基复合涂层

制备镍基复合涂层可直接添加WC、SiC、 Cr_3C_2 、TiN、TiC等高硬度、高熔点的陶瓷颗粒。WC热硬度高、耐磨性好,Wc增强型镍基合金涂层的显微组织均匀致密、显微硬度高,具有较高耐磨性和红硬性^[37-39]。

魏鑫、贺定勇等^[40-42]研究了不同WC添加量对Ni基涂层的影响,结果表明镍基涂层中的WC最佳含量(质量分数)为50%。当WC含量过高时,气孔等缺陷增加,耐磨性下降。然而,当保持WC含量

50%不变时,在微米级WC的基础上掺入一定量纳米WC,涂层的组织更加均匀致密,硬质相数量增多,可进一步提高其硬度和耐磨性^[43-44]。

崔洋^[45]的研究表明在Ni60自熔性合金粉中添加1%的SiC,涂层的平均显微硬度提高了41%,摩擦磨损痕迹也变窄变浅。钟娜、王宝阳等^[29,46]在Ni60A粉末中添加了 Cr_3C_2 -NiCr材料,得到的感应涂层组织呈树枝晶或菊花状,耐磨性和耐蚀性均得到较好改善。

TiC熔点高达3140℃,硬度为3200HV,化学稳定性和热稳定性均较高,用作增强相颗粒不仅可以提高材料的硬度和耐磨性,还可细化晶粒和有效改善合金的韧性和抗裂性能^[47]。TiC掺杂镍基粉末制备复合涂层多见于热喷涂、激光熔覆等热处理工艺^[48-50],而在感应熔覆技术中的研究和应用相对较少,但利用感应热源在镍基上原位合成TiC硬质相制备TiC/Ni基复合涂层的报道则屡见不鲜^[46,51,52]。

3.2 原位合成制备Ni基复合涂层

直接掺入陶瓷相可能存在与基体润湿不良、发生界面污染和界面反应、形成脆性相等问题,导致熔覆层在磨损过程中产生裂纹、脱落等现象,降低涂层性能,因此采用原位合成法制备镍基复合涂层具有更好的发展前景。原位合成法是在一定条件下,通过元素之间或元素与化合物之间的化学反应,或利用金属的固态相变(如共析反应),在金属基体中直接原位合成一种或几种增强体,从而强化基体。原位合成法制备镍基复合材料具有增强相的力学性能稳定、分布均匀、界面洁净、与基体良好结合等特点,被视为解决涂层界面问题的有效方法^[53-55]。王振廷等^[56-58]以钛粉和碳粉为原料(钛碳比4:1),利用感应熔覆技术原位合成了TiC增强镍基复合涂层。TiC颗粒均匀细小,呈规则的八面体状或花瓣状,涂层中无裂纹、气孔等缺陷出现,显微硬度可达9800~10 000HV,耐磨性能优良,其表面形貌如图5所示。

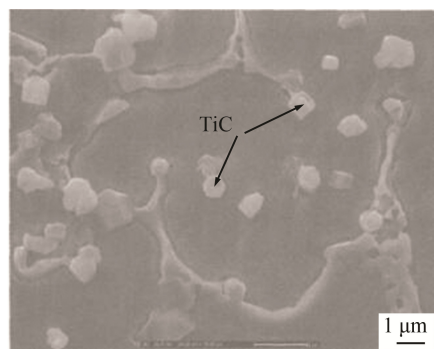


图5 感应熔覆原位自生复合材料涂层表面形貌的SEM照片^[56]

Fig.5 SEM micrographs of induction clad in-situ composite coating

改善感应熔覆制备镍基复合涂层质量的主要途径是引入增强相颗粒。通常一定大小和含量的增强相能有效改善涂层性能,然而过多的颗粒会导致增强相相互聚集且分布不均,降低了增强相与镍基体的接触面积,使涂层孔隙率增加、性能恶化。众所周知,稀土对多种金属具有净化和变质作用,并且在改善金属材料加工性、抗氧化性、耐蚀性和耐磨损性方面具有显著作用^[59,60]。部分学者^[18,29,43]在稀土改性感应熔敷镍基涂层方面做了一定尝试,发现选用的稀土材料为氧化镧或氧化铈时,得到的镍基复合涂层表面成形较好,有效地降低了涂层中的孔洞、杂质等缺陷,抗腐蚀和抗磨损性能也得到提高。但对于稀土改性感应熔敷镍基涂层的报道仍相对较少,且缺乏对稀土改性涂层的深入研究。

4 存在的主要问题和的发展趋势

感应熔敷技术生产效率高、污染小、易于实现自动化且成本低廉,感应熔敷镍基涂层耐蚀、耐磨性能优良,具有重要的研究价值和广阔的应用前景。虽然科研工作者们经过几十年的不懈努力已经取得了一定成果,但仍存在一些制约其大面积推广的关键性问题。

4.1 高频感应熔覆镍基涂层成分设计

感应熔覆过程是在 1000 ℃ 以上的高温下进行的,涂层表面极易被氧化而产生杂质,同时由于涡流加热的不均匀性使局部区域熔化后易发生合金液体流淌,严重影响涂层的表面成形和性能。部分研究者^[29,55]选择在真空环境下进行熔覆反应,一定程度上解决了氧化问题。但真空熔覆成本过高,且难于自动化生产。钟娜、门晓微^[29,61]借鉴焊条药皮的作用,在预制涂层时增加了一层保护层,既可以起到隔绝空气的作用,还可以防止合金液体流淌,能很好地降低金属氧化和流淌问题。但是引入保护涂层的同时,势必带来新的问题,如保护涂层与镍基涂层的结合问题、是否引入杂质以及熔覆后是否方便去除等。就目前而言,对于感应熔覆镍基涂层保护涂层的研究还相对有限,且真正成功案例的报道仍相对较少,因此制备具有良好保护作用且能自行脱落的保护涂层具有重要的研究价值。

感应线圈下的涡流并不均匀,这会导致涂层的局部区域率先发生熔融,熔融区中密度较小的陶瓷颗粒上浮,并相互富集在涂层表面形成夹杂,过多的夹杂将会导致涂层表面凹凸不平,严重影响涂层的表面成形和性能。同时,随着硬质相颗粒添加量的增加,合金的含量减少,硬质颗粒与合金的结合作用减弱,当承受载荷时,涂层易发生脱落。部分学者采用原位合

成法制备镍基复合涂层在一定程度上解决了界面问题和表面成形问题,但仍然存在由颗粒引起的表面缺陷,且原位合成法并不能保证合成反应完全进行,故多余的粉料同样会以杂质的形式富集在涂层表面。因此,选择适合的陶瓷颗粒种类、大小及含量来制备感应熔覆镍基复合涂层仍具有重要的研究意义。

4.2 高频感应熔覆镍基涂层工艺优化

目前,最常用、效果最好的镍基涂层涂覆工艺是手工冷涂法(以下简称手涂法)。手涂法的随机性较高,可能存在涂层表面凹凸不平、厚薄不一、结合不紧密、不均匀以及气孔等问题,最终直接影响熔覆涂层的涂覆效果。此外,采用手工涂覆时,粘接剂的含量很难控制,加入太少,涂层结合不紧密,加入太多,又可能引入杂质,影响涂层的性能。笔者认为可借鉴电弧焊焊条药皮的制备工艺,采用液压法制备预涂层,既可以严格控制粘接剂的含量,又可以使涂层紧密结合,同时利于自动化生产。

此外,可对涂层进行二次处理以提高涂层性能。目前,已有学者通过后热处理、电接触强化等方式对激光熔覆涂层进行二次处理,明显减少了涂层的气孔、裂纹等缺陷,并生成少量的氧化物,加固了硬质相颗粒与 Ni 基合金的结合,提高了涂层强度。因此,尝试高频感应熔覆与二次处理相结合的方式制备涂层,将是未来工作的重点,对熔覆层组织和性能的改善起着决定性作用。

4.3 高频感应熔覆镍基涂层基础理论研究

为了得到耐蚀性、耐磨性良好的镍基熔覆涂层,科研工作者们大多从涂层的组织与性能方面开展实验,对于熔覆层的成形过程、机理等理论方面的研究相对较少。如在感应熔覆涂层中均发现了“白亮带”,虽然一些学者对其进行了研究和报道,但仍未得到令人信服的结论。笔者认为应通过优选合适的感应熔覆电参数,以涂层中温度场的分布情况为依据,深入研究感应熔覆过程中涂层的成形原理、过程和机理。

目前,感应熔覆镍基涂层技术还主要集中在试验阶段,对于仿真技术的运用相对不足。数值模拟具有成本低、周期短等优点,程国东、岑虎等^[18,60,61]利用有限元法分析了感应熔覆镍基涂层温度场和应力场的分布情况,并结合实验制备出了性能良好的合金涂层。因此,进一步加强运用数值模拟技术进行理论性研究,同时配合试验验证,将是加快研究和推广感应熔覆镍基涂层最有效的途径。

参考文献:

- [1] 刘谦,许一,史佩京,等. 机械零件摩擦磨损表面自

- 修复研究进展[J]. 中国表面工程, 2005, 18(5): 1-11.
- LIU Qian, XU Yi, SHI Pei-jing, et al. The Research Progress of Friction and Wear Surface Self-repairing of Machine Parts[J]. China Surface Engineering, 2005, 18(5): 1-11.
- [2] 江民涛, 郑典模, 王丁. 磨损、解决磨损的方法及耐磨材料综述[J]. 江西科学, 2007, 25(4): 494-499.
- JIANG Min-tao, ZHENG Dian-mo, WANG Ding. Summarization of Abrasion, the Methods of Prevent Abrasion and Wear-resistant Materials[J]. Jiangxi Science, 2007, 25(4): 494-499.
- [3] 张增志, 韩桂泉, 付跃文, 等. 高频感应熔涂、激光熔覆与氧乙炔喷焊 GNi-WC25 涂层的性能研究[J]. 材料工程, 2003(2): 3-6.
- ZHANG Zeng-zhi, HAN Gui-quan, FU Yue-wen, et al. A Study on Properties of GNi-WC25 Coating by High Frequency Induction Cladding, Laser Cladding and Oxygen-Acetylene Spraying-fusing[J]. Journal of Materials Engineering, 2003(2): 3-6.
- [4] YU H L, ZHANG W, WANG H M, et al. In-situ Synthesis of TiC/Ti Composite Coating by High Frequency Induction Cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 701: 244-255.
- [5] 王振廷, 周晓辉. 氩弧熔覆原位自生 TiC-TiB₂/Fe 复合涂层组织与磨损性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(1): 155-158.
- WANG Zhen-ting, ZHOU Xiao-hui. Microstructure and Properties of TiC-TiB₂/Fe Composite Coating by Argon Arc Cladding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(1): 155-158.
- [6] 卢金斌, 王志新, 席艳君. Q235 钢等离子熔覆添加碳化钨铁基合金涂层的研究[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(4): 142-145.
- LU Jin-bin, WANG Zhi-xin, XI Yan-jun, et al. Study on NiCrBSi Steel/WC Composite Coating Prepared by Plasma Cladding on Q235 Steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30(4): 142-145.
- [7] 张增志. 高效快速感应熔涂技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- ZHANG Zeng-zhi. Efficient and Rapid Induction Welding Technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.
- [8] 王振廷, 陈华辉, 郑光海. 感应熔敷微-纳米碳化钨复合涂层的耐磨性研究[J]. 机械工程材料, 2004, 28(3): 44-46.
- WANG Zhen-ting, CHEN Hua-hui, ZHENG Guang-hai. Wear Resistance of Micro-Nanostructured WC Composite Coatings Fabricated by Induced Heating Sintering[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2004, 28(3): 44-46.
- [9] 贺定勇, 许静, 马然, 等. 高频感应熔覆 WC 增强 Ni60 合金涂层性能研究[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(3): 138-141.
- HE Ding-yong, XU Jing, MA Ran, et al. Properties of WC Reinforced Ni60 Coating Prepared by High Frequency Induction Cladding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(3): 138-141.
- [10] 高原, 王成磊, 黄家强, 等. 高频感应熔覆 Ni60 合金组织及耐磨性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(2): 309-312.
- GAO Yuan, WANG Cheng-lei, HUANG Jia-qiang, et al. Microstructure Wear Resistance of Ni60 Layer Prepared by High-frequency Induction Cladding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(2): 309-312.
- [11] 湛峰, 陈茂军. 氧-乙炔火焰喷涂涂层的耐磨性能研究[J]. 电镀与精饰, 2008, 30(8): 23-24.
- CHEN Feng, CHEN Mao-jun. Abrasion Behavior of Oxygen-Acetylene Flame Sprayed Coating[J]. Electroplating and Finishing, 2008, 30(8): 23-24.
- [12] 王继东. 铁基电弧喷涂铝层的高频感应重熔工艺[J]. 电镀与精饰, 2005, 27(3): 15-18.
- WANG Ji-dong. High Frequency Induction-remelting of Arc-spraying Aluminum Coating on Iron Substrate[J]. Electroplating and Finishing, 2005, 27(3): 15-18.
- [13] 张增志, 韩桂泉, 付跃文, 等. 高频感应熔覆 Ni60 合金粉末涂层的研究[J]. 金属热处理, 2003, 28(3): 43-46.
- ZHANG Zeng-zhi, HAN Gui-quan, FU Yue-wen, et al. Study on Ni60 Alloy Powder Coating by High Frequency Induction Heating[J]. Heat Treatment of Metals, 2003, 28(3): 43-46.
- [14] 韩桂泉, 张增志, 付跃文. 高频感应熔涂 NiCrBSi 合金涂层的组织与性能研究[J]. 润滑与密封, 2006(6): 95-97.
- HAN Gui-quan, ZHANG Zeng-zhi, FU Yue-wen. Study on Microstructures and Properties of NiCrBSi Alloy Coating Produced by High Frequency Induction Cladding[J]. Lubrication Engineering, 2006(6): 95-97.
- [15] 韩桂泉, 周品, 胡喜兰, 等. 感应熔覆镍基合金粉末涂层研究[J]. 润滑与密封, 2006(1): 75-77.
- HAN Gui-quan, ZHOU Pin, HU Xi-lan, et al. Study on Nickel-matrix Alloy Coating Fabricated by Rapid Induction Heating[J]. Lubrication Engineering, 2006(1): 75-77.
- [16] 王建. Q235 表面感应熔覆高铬铸铁熔覆层的性能研究[D]. 成都: 西华大学, 2012.
- WANG Jian. Research of High Frequency Induction High Chromium Cast Iron Cladding Coating on the Surface of Q235 Steel[D]. Chengdu: Xihua University, 2012.
- [17] 许福海, 林晨, 吴凌霄. 粘结剂对高频感应熔覆涂层的影响[J]. 表面技术, 2011, 40(6): 35-37.
- XU Fu-hai, LIN Chen, WU Ling-xiao. Effect of Binder on High-frequency Induction Cladding Coating[J]. Surface Technology, 2011, 40(6): 35-37.
- [18] 程国东. 高频感应熔覆制备耐蚀耐磨涂层研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2009.
- CHENG Guo-dong. Study on Anticorrosion and Antiwear Coating Manufactured by High Frequency Induc-

- tion Cladding[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2009.
- [19] 李尚平, 骆合力, 曹栩, 等. DZ125 合金表面碳化铬/ Ni_3Al 堆焊涂层显微组织[J]. 金属学报, 2008, 44(12): 1450-1454.
- LI Shang-ping, LUO He-li, CAO Xu, et al. Microstructure of Pile-up Welding Chromium Carbide/ Ni_3Al Composite Cladding on DZ125 Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(12): 1450-1454.
- [20] 慈文亮, 林晨, 陶洪伟. 碳化物含量对高频感应熔覆涂层组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2014, 39(1): 95-98.
- CI Wen-liang, LIN Chen, TAO Hong-wei. Effects of WC Content on Microstructure and Properties of High-frequency Induction Cladding Coating[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(1): 95-98.
- [21] 张增志, 牛俊杰, 付跃文. 感应熔覆镍基合金粉末涂层工艺和性能研究[J]. 材料热处理学报, 2004, 25(2): 31-34.
- ZHANG Zeng-zhi, NIU Jun-jie, FU Yue-wen. Process and Performance of Nickel-base Alloy Coating by Induction Cladding[J]. Transactions of Materials and Heat treatment, 2004, 25(2): 31-34.
- [22] 顾伟超, 张秀群, 沈德久, 等. 铁基电弧喷涂铝层的感应重熔处理[J]. 热加工工艺, 2004(1): 19-20.
- GU Wei-chao, ZHANG Xiu-qun, SHEN De-jiu, et al. Induction-remelting Treatment of Iron-based Arc-spraying Aluminum Coatings[J]. Hot Working Technology, 2004 (1): 19-20.
- [23] LIU J L, HAO H Z, GUO Z A. Interface Morphology of Iron-base Self-fusing Alloy Coating with Induction-refusing[J]. Thermal Spraying—Current Status and Future Trends, 1995(1): 537-541.
- [24] CHANG J H, LIU T H, CHOU J M, et al. Microstructural and Micro-hardness Characteristics of Induction Melted Nickel-based Alloys[J]. Materials Chemistry and Physics, 2010, 120(2): 702-708.
- [25] CHANG J H, TZENG S K, CHOU J M, et al. Effect of Dry Sliding Wear Conditions on a Vacuum Induction Melted Ni Alloy[J]. Wear, 2011, 270(3): 294-301.
- [26] 张增志, 韩桂泉, 付跃文, 等. 感应熔覆涂层涡流分布的控制方法[J]. 金属热处理, 2003, 28(7): 58-61.
- ZHANG Zeng-zhi, HAN Gui-quan, FU Yue-wen, et al. Controlling Means for the Distribution of Eddy Current in Coating by Induction Cladding[J]. Heat Treatment of Metals, 2003, 28(7): 58-61.
- [27] 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 Yue-wen, et al. Analysis on Microstructure of Ni60 Coating by High and Medium Frequency Induction Cladding[J]. Journal of Materials Engineering, 2003(4): 3-5.
- [28] ZHANG Z Z, HAN G Q, FU Y W, et al. Study on GNi-WC25 Coating by High Frequency Induction Cladding[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 12(2): 158-162.
- [29] 钟娜. 高频感应熔覆耐磨耐蚀熔覆层的制备与组织性能研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2010.
- ZHONG Na. Study on Microstructure and Properties of Anticorrosion and Antiwear Coatings Manufactured by High Frequency Induction Cladding[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2010.
- [30] 贺定勇, 许静, 马然, 等. 高频感应熔覆 WC 增强 Ni60 合金涂层性能研究[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(3): 138-141.
- HE Ding-yong, XU Jing, MA Ran, et al. Properties of WC Reinforced Ni60 Coating Prepared by High Frequency Induction Cladding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(3): 138-141.
- [31] 刘祥庆, 郭志猛, 高克玮, 等. 感应熔覆 Ni60 涂层显微组织及耐蚀性[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(S1): 96-100.
- LIU Xiang-qing, GUO Zhi-meng, GAO Ke-wei, et al. Microstructure and Corrosion Resistance of Ni60 Coating Prepared by Induction Cladding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(S1): 96-100.
- [32] 毕雅萱, 赵帅, 许新军. 42CrMo 钢表面高频感应熔覆 WC 增强镍基复合涂层的研究[J]. 粉末冶金技术, 2016, 34(6): 407-412.
- BI Ya-xuan, ZHAO Shuai, XU Xin-jun. WC Reinforced Ni-based Composite Coating Prepared by High Frequency Induction Heating Sintering on the Surface of 42CrMo[J]. Powder Metallurgy Technology, 2016, 34(6): 407-412.
- [33] SHRESTHA S, HODGKISS T, NEVILLE A. Erosion-corrosion Behavior of High-velocity Oxy-fuel Ni-Cr-Mo-Si-B Coatings under High-velocity Seawater Jet Impingement[J]. Wear, 2005, 259(1): 208-218.
- [34] 孙焕, 林晨, 陶洪伟, 等. 真空高频感应熔覆 Ni60-WC 复合涂层的耐蚀性[J]. 中国表面工程, 2013, 26(6): 35-41.
- SUN Huan, LIN Chen, TAO Hong-wei, et al. Corrosion Resistance of Vacuum High-frequency Induction Cladding Ni60-WC Composite Coating[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(6): 35-41.
- [35] WANG H, XIA W, JIN Y. A Study on Abrasive Resistance of Ni-based Coatings with a WC Hard Phase [J]. Wear, 1996, 195(1): 47-52.
- [36] KIM H C, OH D Y, SHON I J. Synthesis of WC and Dense WC-xvol.% Co Hard Materials by High-frequency Induction Heated Combustion Method[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2004, 22(1): 41-49.
- [37] 许新军, 丁浩, 朱世根. WC 增强镍基合金高频感应熔覆层的研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(12): 146-148.
- XU Xin-jun, DING Hao, ZHU Shi-gen. Study on WC Reinforced Ni-based Coating Prepared by High Frequency Induction Heating Sintering[J]. Hot Working

- Technology, 2014, 43(12): 146-148.
- [38] 魏鑫. 45 钢表面感应熔覆 Ni60 涂层及 WC-Ni60 复合涂层的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
WEI Xin. Study on the Complex Coating of Ni60 and WC-Ni60 on the 45 Steel Surface by Induction Cladding[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [39] 贺定勇, 许静, 马然, 等. 微米 WC 增强 Ni60 合金高频感应熔覆涂层耐磨性能[J]. 焊接学报, 2008, 29(8): 1-4.
HE Ding-yong, XU Jing, MA Ran, et al. Wear Resistance Properties of Micron-WC Reinforced Ni60 Coating by High Frequency Induction Cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(8): 1-4.
- [40] WEI X, WANG G Q, CHANG Y F, et al. Study on WC-Ni60 Complex Coating by High Frequency Induction Cladding[J]. Materials Science Forum, 2011, 675: 1299-1302.
- [41] 许静. 高频感应熔覆微纳米 WC-Ni60A 复合涂层性能的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2008.
XU Jing. Study on Properties of Micro-Nano WC-Ni60A Composite Coating by High Frequency Induction Cladding[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008.
- [42] 王振廷, 陈华辉. 碳化钨颗粒增强金属基复合材料涂层组织及其摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(3): 203-206.
WANG Zhen-ting, CHEN Hua-hui. Microstructure and Friction and Wear Behavior of Induction Clad Ni-based Composite Coating Reinforced with Micro- and Nano-WC Particulates[J]. Tribology, 2005, 25(3): 203-206.
- [43] 崔洋. 超声辅助高频感应熔敷金属镍复合涂层的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
CUI Yang. Study on Ultrasonic Assisted High-frequency Induction Cladding of Nickel Composite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [44] 王宝阳. 感应熔覆原位合成 TiC/Ni 基熔覆层的组织与性能研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2009.
WANG Bao-yang. Study on Microstructure and Performance of Induction Cladding in Situ Synthesized TiC/Ni-based Cladding Coatings[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2009.
- [45] KONG F Z, YAO J H, TANG X D, et al. Study of Microstructure and Properties of Laser Cladding TiC-H13 Composite Coating[J]. Mechanic Automation and Control Engineering, 2010, 14(6): 3611-3614.
- [46] CAI B, TAN Y, LONG H E, et al. Tribological Properties of TiC Particles Reinforced Ni-based Alloy Composite Coatings[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(6): 1681-1688.
- [47] 柴龙顺, 王存山, 韩立影, 等. 纳米 TiC/C 对激光熔覆镍基合金涂层组织和性能的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 70-76.
CAI Long-shun, WANG Cun-shan, HAN Li-ying, et al. Influence of Nano-TiC/C Content on Microstructure and Properties of Laser Clad Ni-based Alloy Coatings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(12): 70-76.
- [48] 王永东, 于小永, 刘兴. 氩弧熔覆原位自生 TiC/TiN 增强镍基复合涂层分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(4): 420-422.
WANG Yong-dong, YU Xiao-yong, LIU Xing. Analysis of In-Situ TiC/TiN Reinforced Ni-based Composite Coating by Argon Arc Cladding[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2014, 34(4): 420-422.
- [49] 王振廷, 陈华辉, 孙俭峰, 等. 原位自生 TiC 颗粒增强金属基复合材料涂层的组织与性能[J]. 金属热处理, 2006, 31(6): 57-60.
WANG Zhen-ting, CHEN Hua-hui, SUN Jian-feng, et al. Microstructure and Properties of In-Situ Synthesis TiC Particle Reinforced Metal Matrix Composite Coating[J]. Heat Treatment of Metals, 2006, 31(6): 57-60.
- [50] 王振廷, 王永东, 陈华辉. 感应熔覆原位自生 TiC/Ni 基复合涂层的组织与耐磨性研究[J]. 材料保护, 2006, 39(5): 10-12.
WANG Zhen-ting, WANG Yong-dong, CHEN Hua-hui. Microstructure and Wear Resistance of Induction Cladding In-Situ TiC/Ni Metal Matrix Composite Coating on Mn-Alloyed Steel[J]. Journal of Materials Protection, 2006, 39(5): 10-12.
- [51] 王振廷, 孟君晟, 陈丽丽, 等. 感应熔覆原位自生 TiC/Ni 基复合涂层组织和形成机理[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(6): 99-103.
WANG Zhen-ting, MENG Jun-sheng, CHEN Li-li, et al. Microstructure and Forming Mechanism of TiC/Ni Composite Coating In-situ Synthesized by Induction Cladding[J]. Transactions of Materials and Heat treatment, 2007, 28(6): 99-103.
- [52] MENG Y, HU H. In Situ Laser Surface Coating of TiC Metal-matrix Composite layer[J]. Journal of Materials Science, 1996, 31(16): 4303-4306.
- [53] 陈颢, 李惠琪. 等离子束表面冶金原位颗粒增强铁基涂层的研究[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(2): 114-117.
CHEN Hao, LI Hui-qi. Study on Particulate Reinforced Iron-matrix Coating Produced by Plasma Jet Surface Metallurgy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27(2): 114-117.
- [54] 王振廷, 孟君晟, 王永东, 等. 原位自生 TiC/Ni60A 复合涂层组织结构及长大特性[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(a02): 709-711.
WANG Zhen-ting, MENG Jun-sheng, WANG Yong-dong, et al. Microstructure and Growth Characteristic of In-situ Synthesized TiC/Ni60A Based Composite Coating[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(a02): 709-711.
- [55] 王振廷, 王永东. 原位自生 TiC/Ni 复合材料涂层滑动磨损行为[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(3): 440-443.

- WANG Zhen-ting, WANG Yong-dong. Sliding Wear Behaviors of In-situ formed TiC/Ni composite coatings[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(3): 440-443.
- [56] 王振廷, 陈华辉, 王永东. 感应熔覆原位合成 TiC 增强金属基复合涂层组织与抗磨性能的研究[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(4): 310-313.
- WANG Zhen-ting, CHEN Hua-hui, WANG Yong-dong. Microstructure and Dry Sliding Wear Resistance of Induction Cladding In-Situ Formed TiC Particle Reinforced Metal Matrix Composite Coatings[J]. Tribology, 2006, 26(4): 310-313.
- [57] WANG K L, ZHANG Q B, SUN M L, et al. Microstructure and Corrosion Resistance of Laser Clad Coatings with Rare Earth Elements[J]. Corrosion Science, 2001, 43(2): 255-267.
- [58] 赵卫民, 王勇, 吴开源, 等. NiCrBSi-RE 粉末制备新工艺及其对喷熔层组织性能影响[J]. 焊接学报, 2004, 25(6): 93-96.
- ZHAO Wei-min, WANG Yong, WU Kai-yuan, et al. A New Way of Preparation for NiCrBSi-RE Composite Powders[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(6): 93-96.
- [59] 门晓微. 连续抽油杆腐蚀机理及防腐技术的研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2010.
- MEN Xiao-wei. The Study of Corrosion Mechanism and Anti-corrosion Technology of Continuous Sucker Rod[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2010.
- [60] 岑虎, 王云山, 雷剑波, 等. 锅炉管表面 NiCrSiB 合金高频感应熔覆的数值模拟及熔覆层的性能[J]. 材料保护, 2014, 47(2): 12-15.
- CEN Hu, WANG Yun-shan, LEI Jian-bo, et al. Numerical Simulation of Temperature Field of High Frequency Induction Cladding of NiCrSiB Alloy on Boiler Tube and Corrosion Resistance of the Cladding Layer[J]. Journal of Materials Protection, 2014, 47(2): 12-15.
- [61] 秦义. 高频感应熔涂温度场及应力场的数值模拟[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2012.
- QIN Yi. The Numerical Simulation of Temperature and Stress Field in High Frequency Induction Cladding[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2012.