

激光熔覆陶瓷增强金属基复合涂层技术的研究进展

高才, 许斌

(山东建筑大学材料科学与工程学院, 山东 济南 250101)

[摘要] 讨论了激光熔覆外加陶瓷增强金属基复合涂层技术中外加陶瓷相与基体的界面问题及一般的解决方法, 指出原位合成技术与激光熔覆技术结合可有效解决界面问题, 从铁基、镍基等复合涂层的原位反应材料体系、反应机理分析、组织结构和性能的改善等几个方面, 综述了激光熔覆原位自生陶瓷增强金属基复合涂层技术的研究进展, 最后从微观反应机制和宏观实际应用 2 个角度提出了今后的研究方向: 原位合成试验与热力学理论的互相补充与验证, 及计算机数值模拟技术的应用。

[关键词] 激光熔覆; 陶瓷涂层; 金属基复合涂层; 外加陶瓷; 界面; 原位合成; 反应机理

[中图分类号] TG156.99; TG174.453

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2008)04-0063-04

Advances in Laser Cladding Ceramic Particle Reinforced Metal Matrix Composite Coating Technology

GAO Cai, XU Bin

(School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

[Abstract] The interface problem between the extra reinforced phase and the matrix of the ceramic particle reinforced metal matrix composite coating by laser cladding was proposed, and average measures to settle this problem were discussed. It was pointed that the combination of laser cladding and in-situ synthesis technique will resolve the interface problem well. Advances in laser cladding in-situ synthesized composite coating technology were reviewed, including in-situ materials reaction system, the reaction mechanism analysis, the improvement on microstructure and performance of composite coatings such as Fe based, Ni based etc. Finally, from two angles of microscopic reaction mechanism and macroscopic practical application, the further research directions were put forward: the complement and verification between in-situ synthesis tests and thermodynamic theory, and the application of computer numerical value imitation technology.

[Key words] Laser cladding; Ceramic coating; Metal matrix composite coating; Extra ceramic; Interface; In-situ synthesis; Reaction mechanism

0 引言

在实际生产中, 机械零件的失效多数发生在零件表面或者从表面开始, 因此表面强化技术一直是研究的热点。与传统的表面强化技术相比, 激光熔覆技术以其具有快速凝固, 使组织细化; 涂层与基体呈冶金结合; 稀释率低, 变形小等特点, 在耐磨、抗蚀、热障等涂层制备方面显示出了良好的应用前景。陶瓷颗粒增强金属基复合材料兼有金属和陶瓷相的优点, 具有高强度、高模量、低膨胀系数和更高的使用温度、热稳定性、抗磨损性, 以及高的导热系数与导电率等特性, 因此应用前景广阔^[1]。自 1980 年美国将两种技术结合得到金属陶瓷复合涂层以来, 激光熔覆金属陶瓷涂层技术得到了世界各国的广泛注意和研究。

涂层中的陶瓷相可以通过 2 种方法“机械外加法”或“原位

合成法”获得。激光熔覆外加陶瓷颗粒增强金属基复合涂层技术由于外加陶瓷相与基体的界面问题, 易导致涂层的开裂, 在很大程度上影响了这项技术在实际生产中的应用。众多学者针对这一问题纷纷进行研究, 以期解决或缓解涂层的开裂, 取得了很大进步。值得注意的是, 随着原位自生复合材料的迅速发展, 许多研究者从中得到启示, 将原位合成技术借鉴到激光熔覆的涂层制备中, 这又成为了新的研究热点, 取得了初步的成功。

1 激光熔覆外加陶瓷复合涂层技术的不足与改进

使用激光熔覆技术能在低级材料上涂覆具有特种功能的特殊材料, 随着技术的发展, 人们对涂层的功能要求越来越高, 显然, 单一的材料不能满足。熔覆材料^[2]从最初选用的镍基、钴基和铁基自熔合金逐步发展到在这些自熔合金中加入各种陶瓷颗粒形成金属陶瓷复合涂层。陶瓷颗粒机械外加的方式一般为将陶瓷相直接加入激光熔池, 或陶瓷相先与金属粉末混合成混

[收稿日期] 2008-04-18

[HTH][基金项目] [HTSS] 山东省自然科学基金项目(Y2007F11)

[HTH][作者简介] [HTSS] 高才(1986-), 女, 山东济南人, 硕士, 研究方向为材料表面改性技术。

合粉末或包覆型粉末,再进行激光熔覆^[3-8]。但这样做,首先会给熔覆工艺带来一定的难度,而且颗粒尺寸由添加的陶瓷颗粒尺寸决定,一般都是几十微米,很少有小于1 μm 的,颗粒的分布状态也难以控制。再者,外加陶瓷相与熔覆合金在高温下很容易发生作用,从而导致陶瓷相的烧损。最棘手的是外加陶瓷相与基体金属的界面问题:由于外加陶瓷相与基体金属的热物性参数差异很大,它们之间的相容性较差,存在明显的界面;而且,外加陶瓷相颗粒与金属基体界面会形成不良反应物和附着物,使该界面成为低强度低韧性的弱界面;此外,外加陶瓷相因表面污染而易导致与基体结合性差,这三方面将导致涂层在应用过程中发生涂层开裂或剥落损坏等现象。

针对涂层的开裂,研究者提出了以下解决或缓解办法:从技术手段上,优化工艺参数,进行预热及后热处理;从合金元素增韧方面,添加镍和钴等韧性相;从细化晶粒方面,添加稀土氧化物或采用部分纳米粉末,对熔覆层进行超声振动或电磁振动等等,都取得了不错的效果,但未从根本上解决这一问题。

对此,研究者曾试过双层涂覆及多层涂覆,或在涂层与基体间引入过渡层,但不能消除基体与涂层间及涂层内部层与层之间性能不匹配的问题。国内外学者便开始探索采用梯度涂层^[9-11],采用叠层熔覆的方法,沿涂层厚度方向,陶瓷相成分含量逐渐增加,金属相成分含量则相应减小,陶瓷颗粒在涂层中的分布规律呈现台阶变化,使金属相与陶瓷相涂层间无明显界面,从而最大程度地削弱或消除涂层中的应力,提高涂层与基体间的结合强度。但是有学者^[12]提出,叠层梯度涂层与过去在涂层和基体之间引入过渡层的方法没有实质性区别,只是增加了过渡层数,其工艺基础依然是陶瓷颗粒在每一层中保持均匀分布,层与层之间组织变化不连续,还会有界面问题;并提出利用激光熔池的流动和凝固行为,依靠TiC颗粒在熔池中不断长大和有规律运动,在激光束一次熔凝过程中可自动实现涂层的连续梯度结构,但其实用性有待进一步研究。

2 原位合成技术与激光熔覆技术的结合

1976年,前苏联学者合成TiB₂增强铜基(TiB₂/Cu)功能梯度材料时,提出了原位复合材料(In-situ composites)的构想。20世纪80年代中期,美国Lanxide公司和Drexel大学先后报道了各自研制的原位Al₂O₃/Al和TiC/Al复合材料及其相应的制备工艺^[13],从此真正开始了原位反应复合材料的大规模研究。原位合成技术的基本原理是:在一定条件下,通过元素之间或元素与化合物之间的物理化学反应,在金属基体内部原位形核、长大出一种或多种陶瓷增强相,从而起到强化基体的作用。

由于原位自生复合材料的增强相与金属基体具有良好的浸润性能、良好的界面结合性能和增强相的弥散分布特征^[14-15],近年来,人们将原位自生技术与激光熔覆技术有机地结合起来,使增强相与基体的界面问题得到了很好的解决。从界面精细结构的角度来说,陶瓷相与基体之间具有了直接原子结合的界面结构,界面平直、无反应物或析出相的出现,所得材料的性能明显优于外加陶瓷颗粒法。武晓雷等^[16]利用激光熔覆制备了2类TiC_p/Ni合金涂层,与自生TiC_p涂层不同,在外加TiC_p涂层

的TiC_p与Ni合金界面处存在界面结晶相。利用纳米硬度仪,发现外加TiC_p近界面区域的加载曲线存在位移突进(pop-in)现象,界面硬度和弹性模量较低,而自生TiC_p近界面区域的加载曲线不存在pop-in现象,界面硬度和弹性模量较高并呈现连续梯度分布特征,这表明自生TiC_p界面具有高的刚度和强韧性。

3 激光熔覆原位自生陶瓷复合涂层研究进展

目前,铁基材料(钢、铸铁)占据工程构件材料组成的主导地位。一般来说,它们的涂层金属基常选用镍基合金和铁基合金。镍基合金主要是因为其熔点较低,自熔性良好,耐高温性能及韧性都很好,且与陶瓷相有一定的润湿性;而铁基合金的选用主要是因为其来源广泛,价格低廉,与被强化的基体成分接近,相容性好且抗磨性和耐蚀性较好。在钛、铝、铜等有色金属基体上,涂层金属基常选用钛、铝、铜基合金。TiC和TiB₂颗粒具有高硬度、高弹性模量,而且热力学性能稳定,是理想的陶瓷增强相。TiC多用在耐磨涂层,而TiB₂多用在高温涂层或导电涂层。

3.1 铁基复合涂层

3.1.1 反应体系与机理分析

根据研究表明,制备原位自生复合涂层主要利用以下几个反应式:Ti + C = TiC、V + C = VC、Ti + 2B = TiB₂、5Ti + B₄C = 4TiB + TiC、3Ti + B₄C = 2TiB₂ + TiC、TiB₂ + Ti = 2TiB等。

Ti-C及V-C体系:一般往自行研制的FeCSiB激光熔覆专用粉末(含有一定量的Ni、Mo、Co合金元素)中单独或复合添加Ti、V、Zr、Nb等强碳化物形成元素,对铁基材料进行激光熔覆,形成原位自生的铁基复合涂层^[17-19]。其主要机理是:在激光辐射作用下,TiC和VC的Gibbs生成自由能均为负值,从热力学角度分析,生成TiC和VC的反应是可行的。在随后快速凝固的条件下,由于强碳化物形成元素与碳强烈的结合能力和形成碳化物的较高熔点,即使添加极少量的强碳化物形成元素,它也将与熔体中的C反应生成较为稳定的碳化物颗粒,而且相对于其它产物,热力学性质更为稳定。由于碳化物,如TiC、VC、NbC、ZrC均是面心立方点阵结构,并具有相近的晶格常数,因而复合添加强碳化物形成元素往往可以互溶形成复合碳化物,并且复合添加会促进增强相的形成。例如,在相同的激光熔覆条件下,复合添加Nb、Ti得到的熔覆层组织中颗粒的面积比例与单独添加Nb大体相当,但是复合添加得到的颗粒更为细小,数目更多^[20]。以上的制备方式一般为通过纯钛粉、钒粉等与石墨直接反应形成,为克服添加单质元素成本较高和易氧化烧损的缺点,而且易于促进碳化物颗粒的形成,文献[21]采用廉价钛铁、钒铁、铁粉、石墨为原料,制备出了原位自生的铁基复合涂层。

Ti-B体系:由热力学计算及相关实验结果可知,TiB₂是Ti和B在原位反应中生成的稳定化合物,而室温下的TiB是一种亚稳相。然而,激光熔覆是一个远远偏离平衡态的过程,激光的高能量密度诱发了原位反应中亚稳相TiB的生成。张维平等^[22]利用Fe-Ti-B体系在中碳钢表面制备出原位自生TiB₂-TiB/Fe复合涂层。

Ti-B₄C体系:杜宝师等^[23]选用B₄C和钛铁为陶瓷相反应生

成体系, FeCrSiB 自熔合金为熔覆层金属基体, 其中 B_4C 和钛铁比例根据标准化学反应用量配比: 8% B_4C 、29.7% TiFe、62.3% FeCrSiB (质量分数), 制备了原位自生 TiB_2 -TiC/FeCrSiB 复合涂层。

3.1.2 组织结构和性能

利用上述的反应体系, 已成功制备出了成形良好、组织均匀细化、大量陶瓷颗粒均匀弥散分布的复合涂层。由于激光熔覆过程中形成的熔池内部存在强烈的流体对流, 导致熔覆层中陶瓷颗粒呈梯度分布, 硬度从基体到表面也呈梯度分布, 熔覆层上部陶瓷含量较高, 因而硬度较高。总体上, 由于增强相的存在, 熔覆层硬度相对基体显著提高。张维平等^[24]还进一步研究了涂层组织较基体显著细化的原因: 晶粒细化行为与激光熔覆非平衡快速凝固过程中的传热与传质、原位自生细小硬质颗粒促进非均质形核以及粘结金属基体中强烈的位错运动细化亚结构密切相关。

3.2 镍基复合涂层

3.2.1 反应体系

Ti-C 体系: 董奇志等^[25]使用 Ti 粉、C (石墨) 粉和 Ni 粉, 按 $Ti + C = TiC$ 进行粉末配比, 成功制备出了原位自生 TiC/Ni 基复合涂层。TiC 含量在 8% ~ 14% 时, 由于颗粒在熔覆层深度范围内分布均匀, 表面硬度适中, 可以获得无裂纹的涂层。武晓雷等^[26]以 Ni60A、Ti 和石墨的混合粉末为原料, 粉末配比为 $w(Ti):w(C)=4:1$, $w(Ni60A):w(Ti+C)=8.5:1.5$, 经激光熔覆在 5CrMnMo 钢表面制备出原位自生 TiC/Ni 基金属陶瓷层。杨森等^[27]利用同步送粉激光熔覆 Ni60B、Ni 包石墨和纯 Ti 粉获得原位自生 TiC/Ni 基涂层。

Ta_2O_5 -C、 B_2O_3 -C 及 Nb_2O_5 -C 体系: 晁明举等^[28-30]分别采用熔覆粉末 $Ni60 + (Ta_2O_5 + C)$ 且按化学反应式 $Ta_2O_5 + 7C = 2TaC + 5CO \uparrow$ 的摩尔比进行配比; 熔覆粉末 $Ni60 + (B_2O_3 + C)$ 且按化学反应式 $2B_2O_3 + 7C = B_4C + 6CO \uparrow$ 的摩尔比进行配比; 熔覆粉末 $Ni60 + (Nb_2O_5 + C)$ 粉末且按化学反应式 $Nb_2O_5 + 7C = 2NbC + 5CO \uparrow$ 的摩尔比进行配比, 在 A3 钢表面成功地制备出原位生成 TaC/Ni、 B_4C /Ni、NbC/Ni 基激光熔覆层。以 TaC/Ni 复合涂层为例, 通过改变 $(Ta_2O_5 + C)$ 的含量, 对熔覆层进行形貌观察和硬度测量, 确定 $(Ta_2O_5 + C)$ 含量为 20% 时可获得表面连续、光滑、硬度高的熔覆层。

Ti-B 体系: 利用 TiB_2 较强的耐高温性能和优良的化学稳定性, 刘硕等^[31]选取自熔性良好、具有耐高温性能的 Ni 基合金 (10%Fe、8%Ti、2%B, 余量为 Ni) 为涂层材料, 在 45 钢表面制备出 TiB_2 陶瓷颗粒增强 Ni 基复合涂层。

TiO_2 - B_2O_3 -Al 体系: 为改善 Ni-Cr-Al 热障涂层抗磨粒磨损的能力, 从而使涂层满足高温、高速粉尘流磨损环境下的性能要求, 魏仑等^[32]在 40Cr 钢上采用激光熔覆 TiO_2 、 B_2O_3 、Al 和热障合金 Ni-Cr-Al 粉末混合物的预置层, 在熔覆过程中发生如下反应: $4Al + 3TiO_2 = 2Al_2O_3 + 3Ti$, $2Al + B_2O_3 = Al_2O_3 + 2B$ 和 $Ti + 2B = TiB_2$, 从而生成 TiO_2 、 B_2O_3 、 Al_2O_3 及 TiB_2 陶瓷颗粒增强镍基复合涂层, 其中后两种为原位自生的亚微米颗粒。

3.2.2 组织结构和性能

利用上述反应体系制备出的镍基复合涂层, 陶瓷颗粒尺寸在几十纳米至几百纳米, 弥散分布, 原位自生陶瓷与基体的交界

面洁净, 无界面反应物及非晶结构, 涂层无裂纹, 具有较高的显微硬度及耐磨性。李晶等^[33]在楔横轧模具钢 55Mn 表面采用同轴送粉 CO_2 激光熔覆 WC-TiC_p/镍基合金复合粉末, 在增碳、钎条件下可获得成形好、无裂纹、与基体冶金结合的熔覆层。熔覆层微观组织特征为: γ -(Fe, Ni) 基体上均匀分布着大量从液态析出的富含 Ti、W、Zr 的复合碳化物颗粒相。熔覆层表层颗粒尺寸最大, 约为 7 ~ 8 μm , 颗粒数量最少, 约为 3 500 个/ mm^2 ; 熔覆层中部析出颗粒最多, 约为 42 100 个/ mm^2 , 尺寸约为 1 ~ 3 μm ; 熔覆层底部析出颗粒最小, 约为 1 ~ 2 μm , 颗粒数量约为 16 800 个/ mm^2 。激光熔覆后模具钢表面形成 3 个不同的硬度分布区域, 激光熔覆层硬度为 427HV_{0.2}, 热影响区硬度为 740HV_{0.2}, 基体的硬度为 250HV_{0.2}, 这样的硬度分布兼顾了模具的使用要求和后续加工。激光熔覆处理后的试样摩擦因数降低 30%, 耐磨性提高 1 倍。

3.3 钛基、铝基、铜基复合涂层

由于钛基体化学活性较高, 高温下钛和外加陶瓷相极易发生剧烈的反应, 界面反应相将导致材料的某些性能下降, 为此, 张松等^[34-35]在 Ti6Al4V 表面采用 Cr_3C_2 和 Ti 合金粉末通过原位结晶置换反应生成 TiC/Ti 基涂层。在激光辐照熔融过程中, Cr_3C_2 和 Ti 之间可能发生如下化学反应: $2Ti + Cr_3C_2 \rightarrow 2TiC + 3Cr$, 由化学反应热力学可知, 该反应在高温下 (1 600K) 的自由能变化 $\Delta G = -61.43 kJ$, 因此, 合金粉末经激光辐照生成 TiC 颗粒并分离出 Cr 原子为一自发反应过程。原位生成的微米及亚微米级的 TiC 弥散均匀地分布于复合材料的基体中, 界面附近 TiC 颗粒分布呈梯度变化, 没有界面反应相生成, 其界面平直清晰。原位自生熔覆层可明显改善 Ti6Al4V 合金的表面硬度和摩擦磨损性能。

马乃恒等^[36]利用 Al-Ti-C 粉末在 ZL104 合金表面原位合成了 TiC/Al 基涂层, TiC 颗粒分布均匀, 而且尺寸细小 (约 800nm)。这使得 TiC 的体积分数很难定量测定, 于是文献^[37]使用计算机图像处理的方法, 将表面未腐蚀试样的 SEM 图片先用 office 软件处理成黑白对比强烈的图片, 再在 Photoshop 下通过对不同灰度像素比例的测定而求得 TiC 体积分数, 与通过计算求得的结果相比, 既可靠又简便。此外马乃恒等^[38]依据组织及结构的分析, 揭示了经高能球磨活化的 Al、Ti 和 C 粉末在激光条件下的合成反应过程及机制: 首先在过渡区原始粉末所有的 Ti 都参与了 $3Al + Ti \rightarrow Al_3Ti$ 反应, 形成了块状的 Al_3Ti /Al 组织, 所有的 C 元素都包裹在了这种块状的组织中, 随后发生了 $Al_3Ti + C \rightarrow TiC + 3Al$ 反应而形成 TiC_p /Al 复合材料。

利用激光熔覆技术, 郭晓琴等^[39]选用工业纯度的 Cu 粉、Ti 粉和 B_4C 粉, 其成分配比 (摩尔分数) 为: 72% Cu、14% Ti、14% B_4C , 在纯铜表面成功地原位合成了 TiB_2 /Cu 基涂层。熔覆层中 TiB_2 颗粒细小均匀、分布致密, 涂层与铜基体形成了较好的冶金结合。经过电弧烧蚀实验, 激光熔覆 TiB_2 /Cu 复合材料表面烧蚀较轻, 烧蚀坑较小, 且较平坦, 没有喷溅, 其抗电弧烧蚀性能远远优于纯铜。为了提高铝合金的耐磨性, 董世运等^[40]利用铜合金体系存在液相分离现象等冶金性质, 在铝合金表面设计了自生铜基复合材料体系, 并采用激光熔覆技术对其进行了验证和优化。设计的较理想材料体系为 Cu-16Ni-6Fe-8Co-7Mo-4Cr-3Si, 由其得到的激光熔覆复合材料中存在大量的自生球形硬质

颗粒增强体,其熔覆涂层具有良好的耐磨性,其耐磨性甚至优于汽车发动机缸盖阀门座圈 QZ5 铸铁合金。

4 结论与展望

4.1 结论

激光熔覆外加陶瓷颗粒增强金属基复合涂层中的外加陶瓷相与基体的界面问题将导致涂层在应用过程中发生开裂或剥落损坏等现象,而靠增加涂层的层数、引入过渡层或梯度涂层来解决这一问题,其实际效果不甚理想。原位自生技术与激光熔覆技术的有机结合,可形成激光熔覆原位自生陶瓷颗粒增强金属基复合材料涂层,使陶瓷相与基体的界面问题得到了很好的解决。而且,原位自生陶瓷相颗粒细小,分布弥散均匀,这使得熔覆层组织晶粒细小,综合性能优良,硬度、耐磨性等都比基体有显著提高。

4.2 今后的研究方向

从微观层面来说:根据已有的研究,对原位反应体系的设计和反应机制的揭示,一般是在热力学和动力学分析的基础上,根据激光辐照过程中可能发生的反应,设计合理的粉末配比,并选择合适的激光熔覆工艺,以生成所期望的陶瓷相颗粒。且根据熔覆层的组织结构和性能检测结果,验证并进一步深入揭示原位反应机制。

因为原位反应的过程是在激光辐照的条件下进行,而在当前的检测条件下在线观察原位反应并揭示反应机制短期内是无法实现的,因此,已知的反应体系和反应机制理论与实际的检测观察结果的相互验证和补充是相当重要的,还需要进一步研究:一方面,利用现代更微观、更先进的材料分析测试方法对熔覆层的界面情况、成分、物相组织结构、精细结构和熔覆层的力学和物化性能等进行精确的检测和分析;另一方面,热力学计算中使用的基本热力学参数都是常温常压下的,而激光熔覆是一个高温过程,因此需要推导各物相在高温下的热力学参数,对反应进行高温下的热力学分析,确保其计算的可靠性。采取检测实验和热力学理论相结合的方式揭示原位反应机制,从而设计合理原位反应体系。

从宏观层面来说:激光熔覆原位自生涂层的实际应用问题。研究者在实验室里成功制备出了高硬度和无裂纹的激光熔覆原位自生复合涂层,但实验室与实际的生产和工作条件有一定的差别,表现在:在激光熔覆过程中,大中型零部件表面的激光熔池冷却速度远大于实验室条件下小试样或小型实际零件表面的激光熔池冷却速度,因而会在激光光斑周围形成更高的温度梯度,导致熔覆层有更大的残余应力和裂纹倾向,同时由于大中型零部件体积偏大,难以预热和后热,加剧了熔覆层的开裂倾向。再者,大中型零部件在使用过程中,可能遭受到拉伸、弯曲、扭转、冲击、疲劳等各种应力的复合作用,这种复杂的叠加应力在实验室条件下难以模拟。

在今后的研究中,借鉴以前研究者建立的激光熔覆的物理及数学模型,采用 ANSYS 有限元分析软件模拟基体和激光束相互作用的温度场,借助数值模拟技术模拟熔覆层的应力场分布,为熔覆过程的工艺参数调整和优化提供理论依据。充分考虑实

际生产中可能遇到的问题,利用计算机数值模拟和过程仿真技术,模拟实际生产中的条件,找到使熔覆层在具有高的强度和硬度的同时也具有更为优良的塑性和韧性的方法,以防止熔覆层在激光熔覆的过程中和在零部件使用过程中开裂。

[参 考 文 献]

- [1] 高红玉,李运钢. 金属基复合材料的研究进展[J]. 河北化工, 2006, 29(6):51-54
- [2] 刘福田,李兆前,黄传真,等. 金属陶瓷复合涂层的材料体系[J]. 陶瓷学报, 2002, 23(2): 106-111
- [3] 董刚,白万金,张九渊,等. 激光熔覆 Ni 基金属/SiC 涂层耐冲刷性能的研究[J]. 表面技术, 2004, 33(2): 36-37,42
- [4] 李会山,杨洗陈,王惠滨,等. 铝合金表面激光熔覆 SiC 复合涂层工艺研究[J]. 表面技术, 2005, 34(6): 60-61
- [5] Zhang D W, Zhang X P. Laser cladding of stainless steel with Ni-Cr₃C₂ and Ni-WC for improving erosive-corrosive wear performance [J]. Surf Coat Techn, 2004, (3): 1-5
- [6] 何宜柱,斯松华,徐锐,等. Cr₃C₂ 对激光熔覆钴基金属涂层组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2004, 31(9): 1 143-1 148
- [7] 郭桂芳,陈芙蓉,李林贺. 激光熔覆技术在钛合金表面改性中的应用[J]. 表面技术, 2006, 35(1): 66-69
- [8] 花国然,黄因慧,赵剑峰,等. 激光熔覆纳米 Al₂O₃ 等离子喷涂陶瓷涂层[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14 (2): 199-203
- [9] 李强,陈彦斌,欧阳家虎,等. 激光熔覆耐磨涂层的研究现状与展望[J]. 宇航材料工艺, 1997, 22(1): 13-18
- [10] Nagarathnam K, Komvopoulos K. Microstructural and microhardness characteristics of laser-synthesized Fe-Cr-W-C coatings [J]. Metall. Mater. Trans. A., 1995, 26 (8): A2 131-2 139
- [11] 陈方明,朱诚意. 梯度功能材料的研究现状及发展[J]. 电镀与涂饰, 2000, 19(6): 42-48
- [12] 裴宇韬. 激光熔覆 TiC_p/Ni 合金自生梯度涂层及其自生机制[J]. 金属学报, 1998, 34(9): 987-991
- [13] 欧阳柳章,罗承平,隋贤栋,等. 原位合成金属基复合材料[J]. 中国铸造装备与技术, 2002, 37(2): 6-8
- [14] 岳云龙,公衍生,沈强,等. 原位(in-situ)反应合成技术在制备金属基复合材料中的应用[J]. 硅酸盐通报, 2002, 23(4): 45-55
- [15] 李奎,汤爱涛,潘复生,等. 金属基复合材料原位反应合成技术现状与展望[J]. 重庆大学学报, 2002, 25(9): 155-160
- [16] 武晓雷,洪友士. 激光熔覆 TiC_p/Ni 合金涂层中的界面结构及界面硬度与弹性模量分布[J]. 金属学报, 2000, 36(3): 282-286
- [17] 贾俊红,刘文今,钟敏霖,等. Fe-C 合金表面激光熔覆制备颗粒增强复合材料层的研究[J]. 应用激光, 1999, 19(5):198-200
- [18] Zhang Q M, He J J, Liu W J, et al. Microstructure characteristics of ZrC-reinforced composite coating produced by laser cladding [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 162 (2): 140-146
- [19] 张锦英,马明星,刘文今,等. 钎-钛对激光熔覆铁基原位生成颗粒增强复合涂层组织的影响[J]. 金属热处理, 2003, 28(8): 1-4
- [20] 马明星,刘文今,钟敏霖,等. 钎对激光熔覆铁基原位合成颗粒增强复合涂层组织的影响[J]. 应用激光, 2006, 26(3): 145-147,186
- [21] 杜宝帅,李清明,王新洪,等. 激光熔覆原位自生 TiC-VC 颗粒增强 Fe 基金属陶瓷涂层[J]. 焊接学报, 2007, 28(4): 65-68

(下转第 75 页)

机界面也可根据该值来显示当前各工位的状态。为了满足断电重启后可依据断电前各工位的状态继续执行操作,不必从头开始执行的要求,应使用断电保持寄存器作为标志位。此外,标志位还用于在程序中标记某工艺过程的完成情况,例如甩干过程是否完成等,从而保证了断电重启后后续工艺起始点判断的准确性。

该程序实现了浸涂工艺生产流程的自动化,可以控制浸涂和甩干的时间,可以设定工件在甩干位和浸涂位进行处理的循环次数,并且可以记忆各工位的状态,从而实现在异常情况下,即断电重启后,可依据断电前各工位的状态继续执行操作,不必从头开始执行。此外,可通过人机界面生产线的状态进行监视,并且可通过人机界面进行手动控制和程序参数的修改。

4 人机界面的应用

人机界面又称可编程终端。一般的人机界面都支持对 PLC 内部数据区域的显示和写入操作,比如显示和改变 PLC 内部某辅助继电器的开关状态或是某个寄存器的值。市场上的人机界面主要分为可显示图形、动画的高级人机界面和只能显示文本数据的人机界面两类^[1],合适的选择和使用人机界面可极大地增强人机的交互性。

在程序设计的过程中,应划分出专门的区域用于人机界面和 PLC 的接口的设计,该接口应包含要通过人机界面进行显示和修改的 PLC 内部数据区域。

浸涂生产线自动控制系统人机界面设计如图 8 所示。

以手动控制为例,图 9 为通过人机界面进行手动控制的界面。按动与控制屏上的动作指示相应的按钮,通过改变与输出 J11 ~ J71 相关联的辅助继电器的状态,从而达到对浸涂设备进

行手动控制的目的。

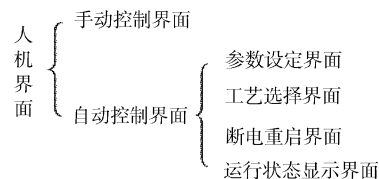


图 8 人机界面设计

Figure 8 Design of man-machine interface

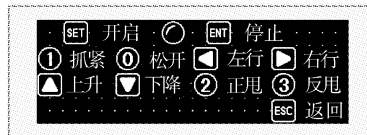


图 9 手动控制界面

Figure 9 Manual control interface

5 结 语

该系统自改造起至今已运行满 1 年,运行情况稳定。原来该生产线至少要 5 人才能工作,改造后只需 3 人便可以进行生产,且生产效率和产品质量的稳定性与改造前相比都有了很大的提高。此外,通过使用人机界面配合 PLC 程序增强了人与系统的交互性,可根据需要随时修改工艺流程和参数,提高了生产线处理不同产品的能力。

[参 考 文 献]

- [1] 宋伯生. PLC 编程实用指南[M]. 北京:机械工业出版社,2006. 515-517

(上接第 66 页)

- [22] 张维平,刘硕,邹龙江. $\text{TiB}_2\text{-TiB/Fe}$ 金属陶瓷复合涂层原位合成及显微分析[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(6): 798-801
- [23] 杜宝帅,邹增大,王新洪,等. 激光熔覆原位自生 $\text{TiB}_2\text{-TiC/FeCoSiB}$ 复合涂层研究[J]. 应用激光, 2007, 27(4): 269-272
- [24] 张维平,刘硕,季首华,等. 激光熔覆金属陶瓷细晶复合涂层晶粒细化行为研究[J]. 材料工程, 2004, 30(8): 12-16, 24
- [25] 董奇志,张晓宇,胡建东,等. 激光熔覆 Ni 基 TiC 强化复合涂层中内生 TiC 颗粒的生长机理[J]. 应用激光, 2001, 21(4): 237-239
- [26] 武晓雷,陈光南. 激光形成原位 TiC 颗粒增强涂层的组织与性能[J]. 金属学报, 1998, 34(12): 1 284-1 288
- [27] 杨森,刘文今,钟敏霖. 送粉法激光熔覆制备 TiC 颗粒强化 Ni 基合金复合涂层的研究[J]. 应用激光, 2003, 23(5): 265-267
- [28] 王文丽,晁明举,王东升,等. 原位生成 TaC 颗粒增强镍基激光熔覆层[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 277-282
- [29] 牛薪,晁明举,周笑薇,等. 激光熔覆原位生成 B_4C 颗粒增强镍基复合涂层的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(11): 1 583-1 588
- [30] 牛薪,晁明举,王文丽,等. 原位生成 NbC 颗粒增强镍基激光熔覆层[J]. 中国激光, 2006, 33(7): 987-992
- [31] 刘硕,张维平. 激光熔覆制备颗粒增强 Ni 基复合涂层的组织结构[J]. 焊接学报, 2005, 26(2): 13-16
- [32] 魏仑,陈庆华,龙晋明,等. 激光熔覆原位自生复相陶瓷颗粒增强涂层[J]. 激光技术, 2002, 26(4): 246-249
- [33] 李晶,钟敏霖,刘文今,等. 55Mn 钢表面激光熔覆原位析出颗粒增强 Ni 基复合涂层的组织与性能[J]. 金属热处理, 2006, 31(11): 8-12
- [34] 张松,张春华,康煜平,等. 钛合金表面激光熔覆原位生成 TiC 增强复合涂层[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(6): 1 026-1 030
- [35] 张松,张春华,吴维毅,等. Ti6Al4V 表面激光熔覆原位自生 TiC 颗粒增强钛基复合材料及摩擦磨损性能[J]. 金属学报, 2001, 37(3): 315-320
- [36] 马乃恒,方小汉,梁工英,等. 激光熔覆原位合成 TiC_p/Al 复合材料[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(6): 843-846
- [37] 马乃恒,张振国,梁工英,等. 激光熔覆原位合成 TiC_p/Al 复合材料中 TiC 体积分数的定量测定[J]. 热加工工艺, 2001, 30(4): 60-62
- [38] 马乃恒,王浩伟,梁工英,等. 激光熔覆原位合成 TiC/Al 复合材料的化学反应机制[J]. 热加工工艺, 2003, 32(5): 27-29
- [39] 郭晓琴,王金凤,华红艳,等. 激光熔覆对 Cu 抗烧蚀性能的影响[J]. 铸造技术, 2006, 27(9): 975-977
- [40] 董世运,张幸红,赫晓东,等. 激光熔覆铜基自生复合材料设计及其涂层研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(2): 160-164