

等离子熔覆多元镍基涂层-基体的力学性能研究

郝金龙¹, 张梦月², 李洋², 金国², 吕长生³

(1.中车长春轨道客车股份有限公司工程技术部, 长春 130062; 2.哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院, 哈尔滨 150001; 3.陆军航空兵驻哈尔滨地区军代室, 哈尔滨 150001)

摘要:目的 在 FV520B 不锈钢基体上, 采用等离子熔覆技术制备多元镍基涂层, 研究不同成分配比涂层-基体协同作用下的力学性能。**方法** 通过扫描电子显微镜分析涂层的表面及界面形貌, 并对涂层-基体进行了拉伸及高温压缩性能测试, 得到各涂层的抗拉强度及高温变形抗力, 对比分析组织、相分布特征及涂层成分对涂层-基体系统力学性能的影响。**结果** 等离子熔覆涂层组织致密, 界面处呈现良好的冶金结合, 这种结合方式可提高涂层-基体的综合力学性能; 涂层-基体协同作用可显著提高材料的抗拉强度及变形抗力, 且涂层的成分、组织及相分布特征是影响涂层-基体协同形变行为的关键因素。其中, Ni60+20%Ti 涂层材料的抗拉伸性能最好, 抗拉强度高达 921 MPa, 较基体材料提高了 19.6%。Ni60+30%Ti+10%WC 涂层-基体的高温力学性能最好, 高温变形抗力达 687.87 MPa。**结论** 等离子熔覆多元镍基涂层使基体材料的抗拉强度有所提高, 且高温变形抗力提高显著。

关键词: 等离子熔覆; 镍基涂层; 拉伸; 高温压缩; 力学性能

中图分类号: TG174.442 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2017)08-0055-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.08.009

Mechanical Property of Plasma Cladded Multivariate Nickel-based Coating and Substrate

HAO Jin-long¹, ZHANG Meng-yue², LI Yang², JIN Guo², LYU Chang-sheng³

(1.Engineering Technology Department of CRRC Changchun Railway Vehicles Co. Ltd, Changchun 130062, China;

2.College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

3.Army Aviation Stationed in Harbin Military Representative Office, Harbin 150001, China)

ABSTRACT: The work aims to study mechanical property under synergistic effect of coating-substrate in different composition proportion by preparing multi-element nickel-based coating on FV520B stainless steel substrate by adopting plasma cladding technology. Surface and interface morphology of the coatings were observed by using scanning electron microscope (SEM), tensile and high temperature compression property of the coating-substrate were tested. Tensile strength and high temperature deformation resistance of each coating were obtained. Influences of structure, phase distribution characteristics and coating composition on mechanical properties of the coating-substrate system were analyzed. Plasma cladded coatings featured in dense microstructure and good metallurgical bonding on interface, the bonding mode could improve comprehensive mechanical property of the coating-substrate; synergistic effect of the coating-substrate could improve tensile strength and deformation resistance significantly, and composition, structure and phase distribution characteristics of the coatings were key factors influencing synergistic deformation behavior of the coating-substrate. The coating

收稿日期: 2017-02-15; 修订日期: 2017-03-15

Received: 2017-02-15; Revised: 2017-03-15

作者简介: 郝金龙 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为焊接。

Biography: HAO Jin-long (1985—), Male, Master, Research focus: welding.

通讯作者: 金国 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为表面科学与技术。

Corresponding author: JIN Guo (1977—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface science and technology.

Ni60+20%Ti exhibited the best tensile strength, which was up to 921 MPa, 19.6% higher than that of substrate material. The coating Ni60+30%Ti+10%WC exhibited the best high temperature mechanical properties, the high temperature deformation resistance was up to 687.87 MPa. Tensile strength of the plasma cladded multi-element nickel-based coating on the substrate improves, and the high temperature deformation resistance improves significantly.

KEY WORDS: plasma cladding; nickel-based coating; tension; high temperature compression; mechanical properties

随着航空航天等行业的发展,人们越来越多地将材料应用到高温^[1]、高压^[2]、高速重载^[3]等苛刻的工况下,并要求其长时间工作^[4-6]。材料的表面性能直接影响工件的使用寿命,先进的表面工程技术可以在金属材料的表面制备满足要求的复合涂层,从而提高工件的综合服役性能^[7-8]、延长零件的使用寿命^[9-10]。

大量案例表明表面涂层失效的主要原因往往不是涂层自身性能不足,而是不同状况下服役时涂层-基体的界面不匹配性和形变不协同性^[11]。涂层与基体之间往往通过界面应力来协调变形,若两者间出现应变失配,引起的界面应力集中将导致工件提早达到服役寿命^[12]。因此,研究涂层-基体不同于基体材料的力学性能,可以建立起这种结构完善的失效准则、强度理论和寿命理论^[13-14]。

本文利用等离子熔覆技术在FV520B基体上制备了多元镍基涂层,研究涂层与基体界面在热-力作用下的变化,分析其微观组织、拉伸性能及高温压缩性能等,旨在为后续研究提供一定借鉴。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料及涂层制备

本试验基体材料选用厚度为 10 mm 的 FV520B 钢板。选用 Ni60 粉末为涂层基体材料,加入 Ti、WC 配制成不同成分的涂层材料。涂层材料化学成分分配比见表 1。

表 1 涂层材料化学成分分配比

Tab.1 Composition of chemical composition of coating materials							
	wt%						
	A	B	C	D	E	F	G
Ni60	100	90	80	70	60	50	40
Ti		10	20	30	30	30	30
WC					10	20	30

本试验采用同步送粉方式利用等离子熔覆技术制备上述成分的涂层,在熔覆过程中,保持电流 100 A、保护气体流量 500 L/min、离子气体流量 200 L/min 不变。

1.2 涂层性能检测

采用 QUANTA 200 型扫描电子显微镜观察熔覆

层组织形貌。采用 HXS-1000Z 型显微硬度计测试涂层硬度,载荷 500 g,加载时间 10 s。采用 Instron5500R 电子万能材料试验机进行拉伸试验,试验速度 2 mm/min,刚度 5000 N/mm,图 1 为本拉伸试验试样示意图,实验时夹具夹在试样左右两端进行拉伸。选用 GLEEBLE3500 热模拟试验机测试高温压缩变形抗力,图 2 为高温压缩变形抗力试验试样示意图。

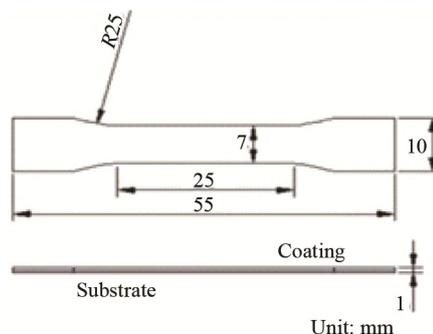


图 1 拉伸试验试样示意图
Fig.1 Schematic diagram of tensile test

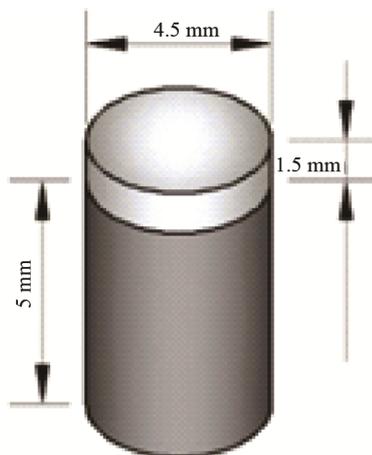


图 2 高温压缩试验试样示意图
Fig.2 Schematic diagram of high temperature compression

2 结果与讨论

2.1 涂层显微组织

图 3 为熔覆层组织的 SEM 图。从图中可以看出涂层与基体之间存在白亮带,为沿热流方向生长出来的平面晶,表明涂层与基体呈良好的冶金结合。图 3a 显示 Ni60 (A) 涂层组织为均匀细小等轴晶。由图

3b、3c 可以看出，在涂层材料中加入 Ti 之后，出现了均匀分布的黑色块状物质，说明加入 Ti 后形成的物质在涂层中以块状分布。分析图 3d 可知，随着 Ti 含量的继续增加，涂层中黑色块状物质增多，且出现了大量的黑色枝晶，这是由于加入大量的 Ti 后，熔

覆时产生碳化钛第二相，并以树枝晶的形式存在。图 3e、3f、3g 是在熔覆粉末中继续加入 WC 后的组织形貌，可以观察到第二相呈现白色的亮块，均匀地分布在偏聚的枝晶之间，而且随着 WC 含量的增加，涂层组织中的白亮组织也增多。

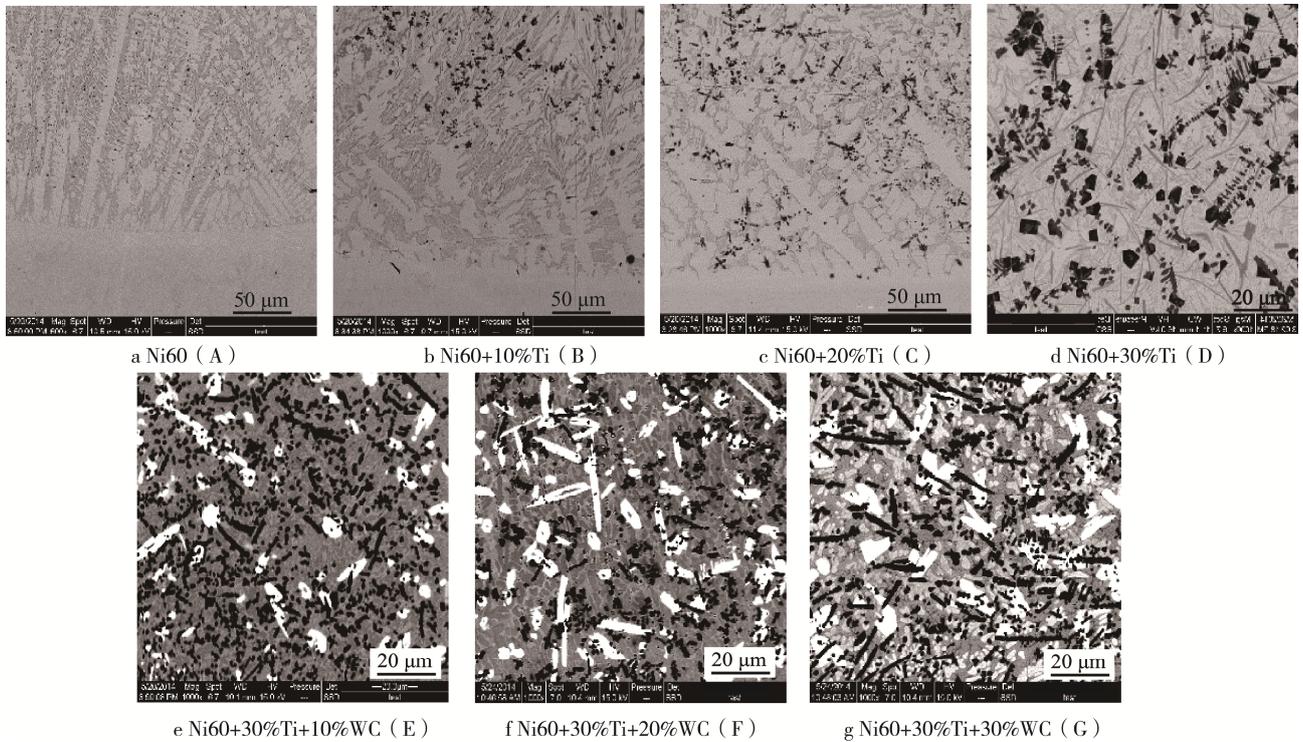


图 3 熔覆层 SEM 照片
Fig.3 SEM of cladding layer

2.2 拉伸性能分析

图 4 为 Ni60(A)、Ni60+20%Ti(C)、Ni60+30%Ti+20%WC(F) 三种涂层的拉伸应力-应变曲线。以 Ni60+30%Ti+20%WC(F) 涂层为例分析整个拉伸破坏过程，过程可分为三个阶段。oa 阶段，随着拉伸应力的增加，基体及涂层均首先发生弹性变形。ab 阶段，基体材料及涂层的变形程度进一步增加，发展到塑性变形阶段，进一步变形达到其应变极限，b 点时达到材料的抗拉强度。bc 阶段，涂层和基体抵抗变形的能力已经达到极限，萌生出裂纹以满足变形的要求，在材料内部裂纹相互连接、长大，基体和涂层均发生断裂。基体材料的抗拉强度大约 770 MPa，表面熔覆 Ni60(A) 时，抗拉强度较基体提高了 15.8%，达 892 MPa，这表明涂层在材料受到拉伸力时，可以起到阻挡作用，增强了材料的拉伸性能。比较几种涂层的抗拉强度，成分为 Ni60+20%Ti(C) 的涂层抗拉伸性能最好，抗拉强度为 921 MPa，较基体材料提高了 19.6%；加入 WC 后，Ni60+30%Ti+20%WC(F) 成分的涂层抗拉强度为 898 MPa，强度提升也较大。

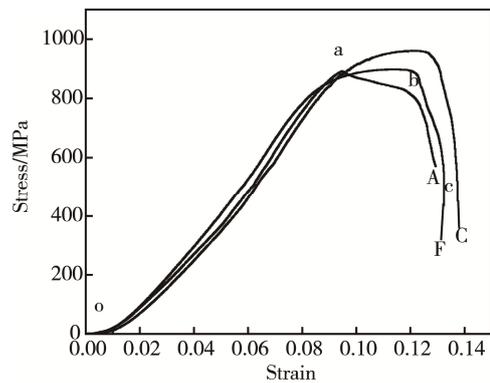


图 4 拉伸应力-应变曲线
Fig.4 Tensile stress-strain curve

图 5 为 Ni60(A)、Ni60+20%Ti(C)、Ni60+30%Ti+20%WC(F) 三种涂层的拉伸断口形貌图，左侧为涂层，右侧为基体。从图 5a 可以看出 Ni60(A) 涂层在拉伸过程中沿界面处与基体产生了开裂。图 5b 为加入 Ti 后的拉伸断口形貌，基体和涂层界面处并没有明显裂纹存在，其基体和涂层的匹配性和协同性好于 Ni60(A) 涂层，基体上存在明显的韧窝，属于典型的韧性断裂。图 5c 为加入 WC 后的拉伸断口形貌，

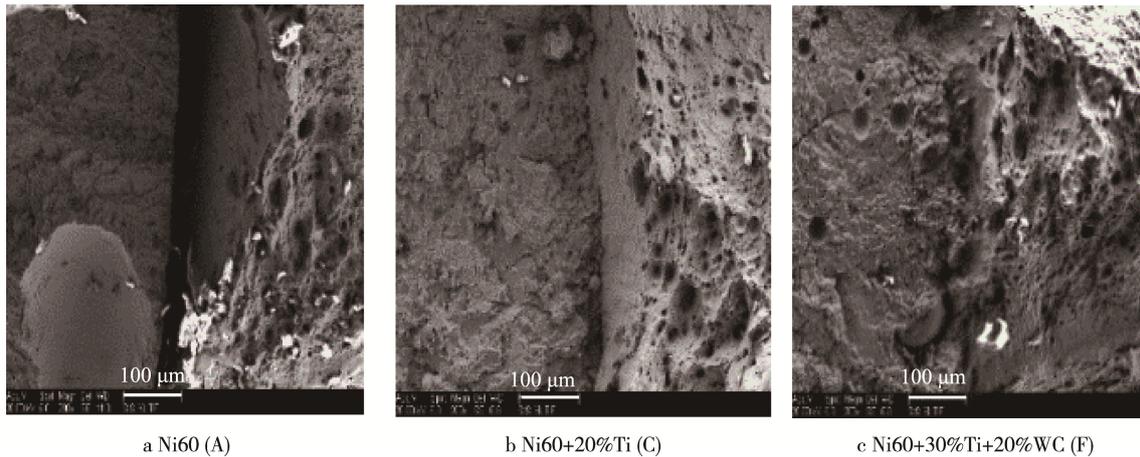


图5 拉伸试验后断口形貌图

Fig.5 Fracture morphology of tensile after stretching test

相比于图 5a、5b，界面处无明显界限，且断口处存在大量韧窝，说明此涂层与基体的匹配性及拉伸过程中的协同变形性较好。

综上，各成分配比涂层较基体材料的抗拉强度均有提高，其中，Ni60+20%Ti 涂层由于小枝晶的作用，对抗拉强度的提升效果更明显，抗拉伸性能最好。

2.3 高温压缩变形抗力分析

图 6 为基体及 Ni60 (A)、Ni60+30%Ti (D)、Ni60+30%Ti+10%WC (E) 涂层在 600 °C 下的高温压缩过程应力-应变曲线。首先,以 E 涂层为例进行分析。oa 阶段，斜率较大，即形变量较小时，变形抗力随形变量的增加迅速上升。达到一定形变量后的 ab 段，斜率变小，说明随着形变量增加，变形抗力上升减缓。b 点之后，随着形变量的增加，曲线斜率持续减小，变形抗力变化趋于平稳。这是由于高温形变过程中加工硬化、动态回复和动态再结晶过程等高温软化机制的交替作用。图 6 曲线形成的原因是在载荷作用下，合金首先发生弹性变形，然后出现加工硬化，随着形变量的增加，变形功转变成的热逐渐积累，使得合金产生流变软化作用。当软化作用和加工硬化基本相当时，变形抗力保持稳定^[15]。

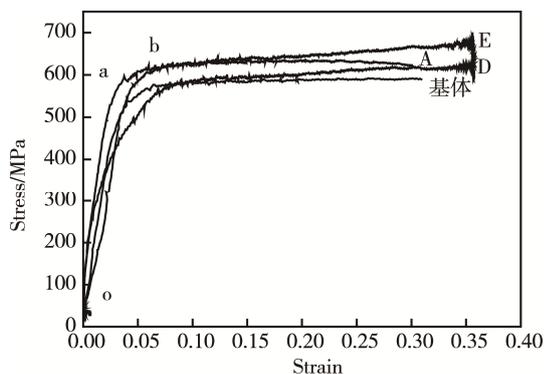


图6 高温压缩应力-应变曲线

Fig.6 Hot compression stress-strain curve

表 2 为基体及 Ni60 (A)、Ni60+30%Ti (D)、Ni60+30%Ti+10%WC (E) 涂层热压缩过程中的最大变形抗力。在纯基体的压缩变形中，随变形量的增加，合金的变形抗力迅速增加到 580 MPa，而后缓慢增加到 592.33 MPa。Ni60 涂层的变形抗力较基体稍有提升，达到 636.96 MPa。Ni60+30%Ti 涂层的变形抗力为 627.72 MPa，Ni60+30%Ti+10%WC (E) 涂层的高温变形抗力最大，达 687.87 MPa。

表 2 高温变形抗力

Tab.2 High temperature deformation resistance

试样	基体	A	D	E
变形抗力/MPa	592.33	636.96	627.72	687.87

结合图 6 可以看出，等离子熔覆涂层可以明显提高基体材料的高温变形抗力。当原子排列方式发生变化（即发生相变）时，变形抗力也会发生变化。此外，变形抗力还受点阵畸变程度和组织影响，点阵畸变程度愈大，变形抗力愈大，组织越细小、均匀，其变形抗力也随之增大。由表 2 知，Ni60+30%Ti (D) 涂层的高温变形抗力比 Ni60 (A) 涂层材料低，这是由于加入 Ti 后，Ni60+30%Ti (D) 涂层的点阵畸变可能增大。如图 7a、7d 所示，经过高温压缩后的 Ni60 (A) 涂层，柱状晶被压碎成了均匀小晶粒，且热压缩时，涂层受力比较均匀，枝晶的压缩过程缓慢，新生成的晶粒均匀分布，这种组织对提高高温变形抗力的作用更显著，使该涂层的变形抗力高。结合图 8a 线扫描可以看出，Ni60+30%Ti (D) 涂层的 Ti 和 Cr 元素发生了少量的扩散，压缩后的界面处产生了微量的小裂纹，这是因为碳化钛第二相硬度较大，压缩时断裂速度较快，容易沿垂直枝晶的方向产生裂纹，因此这种材料的抗高温压缩性能比 Ni60 涂层稍差。加入 WC 后变形抗力又有所提升，这是由于生成的枝晶与 WC 第二相在高温时发生相变，相变之后组织的变形抗力

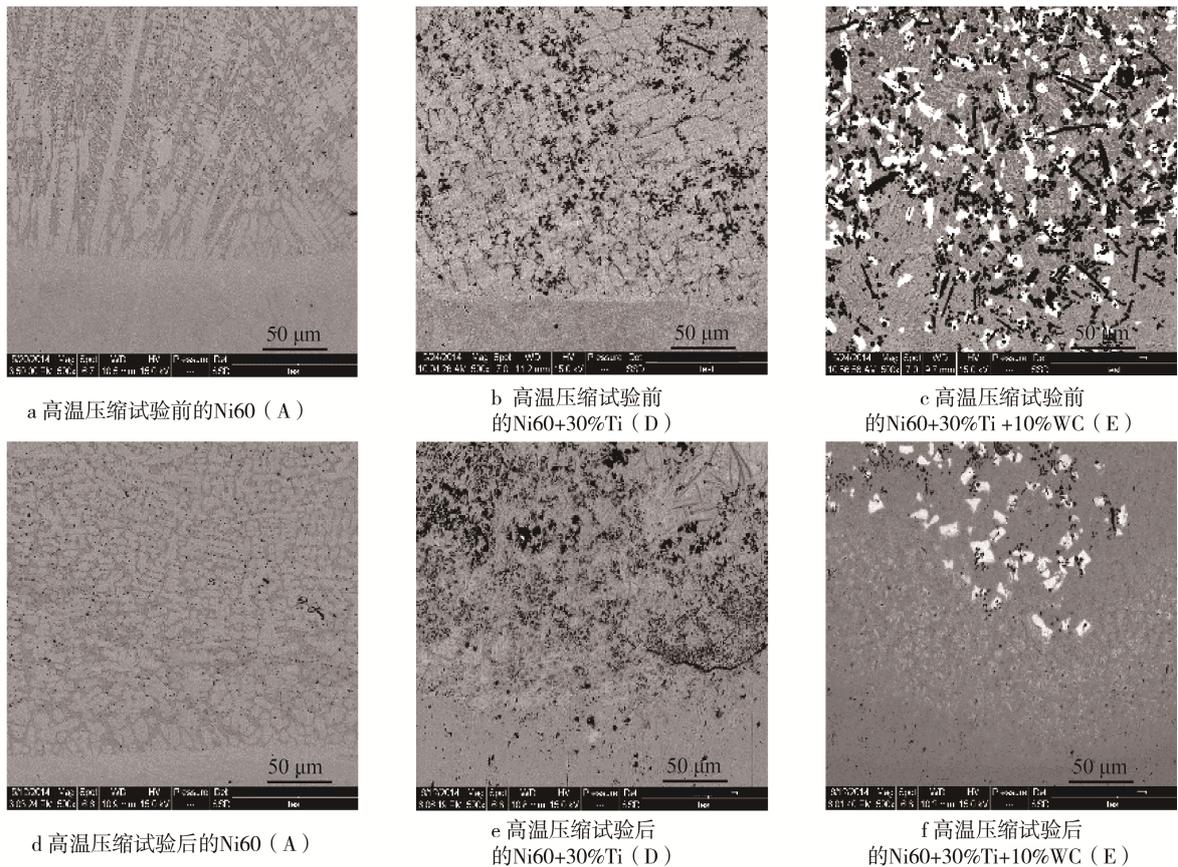


图 7 高温压缩试验前后界面对比

Fig.7 The interface comparison before (a), (b), (c) and after (d), (e), (f) the High temperature compression test

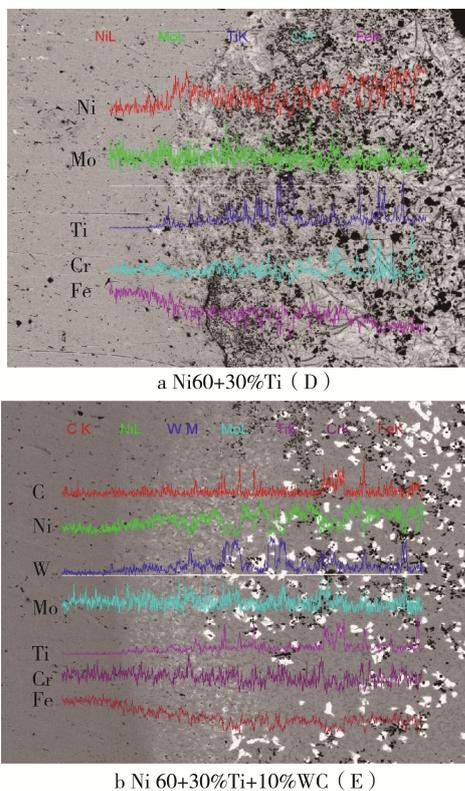


图 8 界面线扫描

Fig.8 Interface line scanning

势必发生变化，结合图 8b 线扫描可以看出，热压缩过程中碳化钛产生了扩散，而 WC 第二相几乎不产生扩散，且压缩后界面处结合良好，说明少量 WC 第二相的存在，可以阻碍碳化钛枝晶的断裂，而且可以承担热压缩的一部分力，所以这种材料的最大变形抗力较纯基体材料提高了 16.1%，改善效果较明显。另外，该涂层的组织细小，内部加入了更多的异类原子使涂层内点阵畸变程度提高。同时，加入 WC 后，形成硬质相的弥散分布，进一步提高了变形抗力。综上所述，Ni60+30%Ti+10%WC (E) 涂层的材料高温变形抗力最大，高温力学性能最好。

3 结论

1) 等离子熔覆涂层可提升基体材料的抗拉强度，说明制备的涂层在材料受到拉伸力时，能够起到阻挡作用，抗拉伸能力较强。其中 Ni60+20%Ti (C) 涂层材料的抗拉伸性能最好，其抗拉强度可达到 921 MPa，且界面处涂层和基体的匹配性及协同变形性较好。

2) 镍基涂层可以明显提高基体材料的高温变形抗力。Ni60+30%Ti+10%WC (E) 涂层的高温变形抗力较大，高温力学性能比较好，且高温压缩时界面变形性良好。

参考文献:

- [1] MA Q, LI Y, WANG J, et al. Microstructure Evolution and Growth Control of Ceramic Particles in Wide-band Laser Clad Ni60/WC Composite Coatings[J]. *Materials & Design*, 2015, 92: 897-905.
- [2] 马超. 激光熔覆镍基复合涂层组织与性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
MA Chao. Microstructure and Properties of Laser Cladding Ni-based Composite Coatings[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [3] 徐滨士, 方金祥, 董世运, 等. FV520B 不锈钢激光熔覆热影响区组织演变及其对力学性能的影响[J]. *金属学报*, 2016, 52(1):1-9.
XU Bin-shi, FANG Jin-xiang, DONG Shi-yun, et al. Heat-affected Zone Microstructure Evolution and Its Effects on Mechanical Properties for Laser Cladding FV520B Stainless Steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(1):1-9.
- [4] MA Q, LI Y, WANG J. Effects of Ti Addition on Microstructure Homogenization and Wear Resistance of Wide-band Laser Clad Ni60/WC Composite Coatings[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2016, 64: 225-233.
- [5] 顾盛挺. 激光熔覆颗粒增强复合涂层的力学性能及损伤破坏机理研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
GU Sheng-ting. Study on Mechanical Properties and Damage Mechanism of Laser Cladding Particles Reinforced Composite Coatings[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012.
- [6] 周泽华, 丁莹, 王泽华, 等. 反应等离子熔覆原位合成 WC 增强铁基合金涂层的工艺优化[J]. *机械工程材料*, 2016, 40(10): 24-29.
ZHOU Ze-hua, DING Ying, WANG Ze-hua, et al. Optimization of In-situ Synthesis of WC Reinforced Iron-based Alloy Coating by Plasma Cladding[J]. *Mechanical Engineering Materials*, 2016, 40(10): 24-29.
- [7] NATARAJAN S, ANAND E E, AKHILESH K S, et al. Effect of Graphite Addition on the Microstructure, Hardness and Abrasive Wear Behavior of Plasma Sprayed NiCrBSi Coatings[J]. *Materials Chemistry & Physics*, 2016, 175: 100-106.
- [8] SONG G M, SLOOF W G, PEI Y T, et al. Interface Fracture Behavior of Zinc Coatings on Steel: Experiments and Finite Element Calculations[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(7): 4311-4316.
- [9] JIN G, LI Y, XIAO Q, et al. Effect of Magnetic Field on Properties and Element Distribution of Ni-based WC Composite Coatings[J]. *Materials & Manufacturing Processes*, 2015, 31(9): 1253-1260.
- [10] 邵锦钟, 王慧萍, 罗醒, 等. 激光熔覆颗粒增强双相化合物基复合涂层的研究[J]. *热加工工艺*, 2016(18): 161-166.
SHAO Jin-zhong, WANG Hui-ping, LUO Xing, et al. Investigation on Dual-phase Compound Matrix Composite Coatings Reinforced by Ceramic Particles Fabricated by Laser Cladding[J]. *Hot Working Technology*, 2016(18): 161-166.
- [11] 金绍彤, 杜晓东, 钟一鸣, 等. 送粉方式对 WC 颗粒增强铁基熔覆层的影响[J]. *表面技术*, 2016, 45(10): 96-102.
JIN Shao-tong, DU Xiao-dong, ZHONG Yi-ming, et al. Effect of Powder Feeding Method on WC Particles Reinforced Fe-based Cladding Layer[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(10): 96-102.
- [12] 王成杰. 铁基碳化钨等离子熔覆层的制备及其性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
WANG Cheng-jie. Study on Preparation and Performance of Fe-based WC Plasma Cladding Layer[J]. Xuzhou: China Mining University, 2015.
- [13] 姚远. Ni60 合金激光熔覆层组织和力学性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
YAO Yuan. Structure Evolution and Mechanical Properties of Ni60 Alloy Laser Cladding[J]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- [14] ROJACZ H, HUTTERER M, WINKELMANN H. High Temperature Single Impact Studies on Material Deformation and Fracture Behavior of Metal Matrix Composites and Steels[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2012, 562(1): 39-45.
- [15] 吴臣武, 陈光南, 张坤, 等. 涂层/基体体系的界面应力分析[J]. *固体力学学报*, 2006, 27(2): 203-206.
WU Chen-wu, CHEN Guang-nan, ZHANG Kun, et al. Interfacial Stress Analysis of Coating/Matrix System[J]. *Journal of Solid Mechanics*, 2006, 27(2): 203-206.