

铜铝接头压接-扩散复合连接工艺及试验

洪丽玲， 辛选荣， 张珂珂， 刘 汀*
(河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471003)



洪丽玲

摘 要: 采用压接-扩散复合连接能够实现 T2 铜/2A50 铝合金异种金属的连接. 这种焊接的工艺为先压接后在 515 ℃扩散 60 min, 然后取出热压并再次扩散 90 min. 利用扫描电镜(SEM)、能谱分析(EDS)、X 射线衍射(XRD)、导电率、抗拉强度等测试方法对 T2 铜/2A50 铝合金接头进行研究. 结果表明, 在结合界面产生了脆性化合物 CuAl₂, 形成了大约 2 mm 的焊缝, 在铜基体与焊缝之间生成了新相, 形成了一条光亮带. 接头的导电性能介于铜与铝合金之间, 能够满足实际要求.

关键词: 压接-扩散复合连接; 铜; 铝合金; 焊缝

中图分类号: TG316.1+6 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2009)01-0085-04

0 序 言

近年来, 随着世界经济保持较稳步的增长、以及中国经济的快速发展, 使得国际用铜量增长. 目前全球年精铜用量基本保持在 16 000~18 000 kt, 仅中国就达 4 000 kt^[1], 国际铜期货市场上的投机炒作, 使得自 2005 年 8 月起铜价迅速攀升, 2006 年更是达到了近乎疯狂的地步^[2]比 2005 年同期翻了两番. 高铜价给电气工程领域以及各相关用铜企业带来巨大的成本压力. 在一些相关产品上以铝代铜, 材料成本降幅可达 89%. 中国作为一个贫铜国家, 部分电气产品或部件以铝代铜将成为必由之路. 随着铜铝异种金属焊接技术水平和焊接质量的不断提高, 以铝代铜的步伐会越来越快. 因此铜铝间焊接技术的应用会愈来愈广泛, 并不断满足用户的使用需要^[3].

铜与铝都是制造导电体的材料, 铜与铝形成连接件可以降低成本, 减轻构件的重量以及发挥各自的优势, 因此, Cu/Al 接头广泛用于电力、化工、电器和制冷工业中. 文中研究的铜铝接头主要用在高压开关, 高压电器上.

文中采用特殊的压接-扩散复合连接的方法, 对 T2 铜/2A50 铝合金异种金属的连接进行了试验研究.

1 试验方法

试验采用的母材为 T2 铜/2A50 铝合金, 尺寸均

为 $\phi 34\text{ mm}\times 16\text{ mm}$ (退火态)园柱体棒料. 采用对接形式连接. 材料的化学成分见表 1.

表 1 T2 铜/2A50 铝合金的化学成分(质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of T2 Cu and 2A50

材料	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	O	Ni	Al
2A50	1.8~2.6	0.4~0.8	0.4~0.8	0.7~1.2	—	—	—	余量
T2	99.9	—	—	—	0.005	0.35	0.006	—

首先用 1 号, 3 号, 5 号金相砂纸打磨待焊表面, 将车削加工的刀痕磨掉, 使表面尽可能光, 再用丙酮擦洗去除油污, 最后进行酸洗. 试验发现采用一定质量分数的铬酐酸洗, 虽可以去除 2A50 表面的自然氧化膜, 但通过酸洗形成的化学转化膜的厚度一般在 0.5~4 μm , 可自然生成的氧化膜仅为 0.4~5 μm ^[4], 而且化学氧化膜更稳定, 更不利于扩散的进行. 所以酸洗时应尽量避免化学转化膜的生成. 较好的酸洗方法是用一定质量分数的 H₂SO₄ 清洗铜, 一定质量分数的 HCl 清洗铝合金.

将酸洗后的试样叠放在一起放到特殊的夹具(图 1)上进行冷压, 压力 3000 MPa. 冷压时以试样产生明显肉眼可见墩粗变形为标准. 冷压的作用是使待连接两表面间空气排出, 使表面微观凸起部位发生塑性变形, 挤破氧化膜, 达到金属基体互相接触的目的. 为了使下一步热压变形集中在待焊表面, 为此采用在铝试样一端加套环的方法控制变形. 冷压后拧紧夹具上的螺钉, 并且确保待焊表面紧密接触, 然后放入已升温至试验温度的普通箱式电阻炉里面进行扩散连接. 试验温度 515 ℃, 保温时间 60 min,

收稿日期: 2008-01-17
*参加此项研究工作的还有王文炎

然后取出热压一次, 压力 2500 MPa. 热压时以试样产生预期的镦粗变形量为标准. 压后再次放入炉中扩散90 min. 为准确测量炉温, 采用热电偶测温.

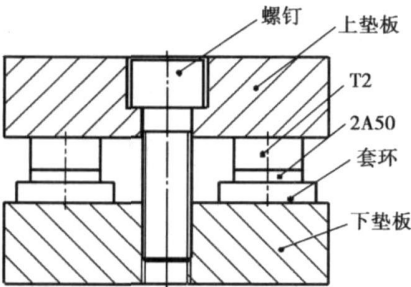


图 1 夹具示意图
Fig. 1 Sketch map of fixture

这一扩散过程在普通箱式电阻炉里进行, 不需要真空或者通保护气体. 焊后用线切割机将 Cu/Al 接头沿垂直结合面的轴线方向切成 6 mm×8 mm×22 mm 的试样, 并制备成金相试样, 进行抛光后分别选用 FeCl 酒精溶液和浓度为 0.5% 氢氟酸溶液两种腐蚀剂进行腐蚀, 在 JSM-5610LV 型扫描电镜下观察接头组织特征; 利用扫描电镜中配有的美国 EDAX 公司的能谱仪对接头进行线、面扫描; D8 ADVANCE 德国布鲁克 X 射线衍射仪能够进行材料的物相结构分析与研究; 采用 ZY9987 型数字式微欧计测量 T2 2A50 接头电阻; 采用涡流电导率分辨仪测 T2 2A50 的电导率.

2 试验结果与分析

根据试验过程, 得到了 Cu/Al 接头(图 2). 从外观上看, 连接良好, 最大变形区发生在连接表面. 利用扫描电镜(SEM)、能谱分析(EDS)、显微硬度、X 射线衍射(XRD)、电导率等测试方法对结合界面附近

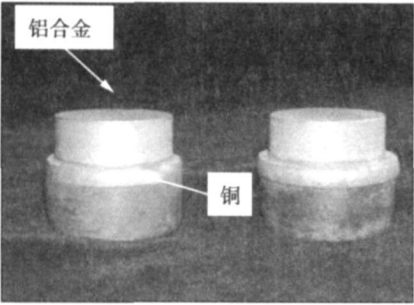
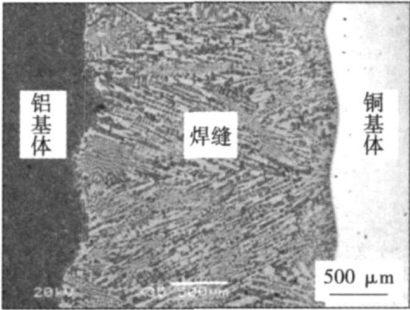


图 2 Cu/Al 接头
Fig. 2 Cu/Al alloy joint

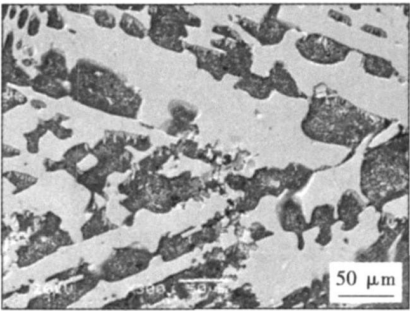
的显微组织进行分析.

2.1 Cu/Al 接头显微组织特征

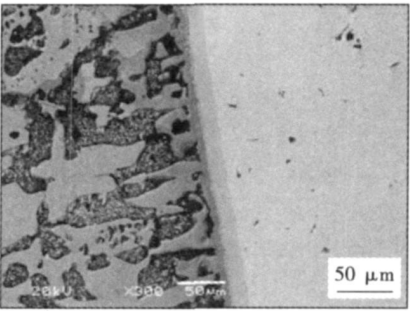
用线切割机将 Cu/Al 接头沿垂直结合面的轴线方向切成 6 mm×8 mm×22 mm 的试样, 并制备成金相试样, 进行抛光后分别选用 FeCl 酒精溶液和浓度为 0.5% 氢氟酸溶液两种腐蚀剂进行腐蚀, 在扫描电镜下进行观察. 图 3 为焊缝组织形貌, 图 3a 为焊



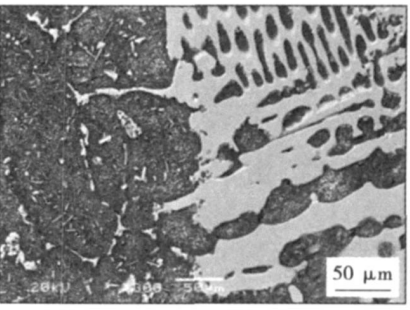
(a) Cu/Al 接头显微组织



(b) 焊缝



(c) 铜侧结合面



(d) 铝侧结合面

图 3 焊缝组织形貌
Fig. 3 Microstructure of weld

缝的整体组成。图中从左到右依次是铝基体、焊缝、铜基体, 焊缝较宽, 大约有 2 mm。图 3c, d 分别是铜侧和铝侧结合界面的扫描形貌, 从图中可以看出在铜基体与焊缝之间存在一条光亮带, 而在铝合金基体与焊缝之间没有。这可能是由于在高温下铜向铝中扩散, 在靠近铝合金基体侧形成了致密的新相化合物层, 其中包括两个过程: 一是两种基体的原子在高温下彼此间发生宏观迁移的过程; 二是相界面处溶质原子达到一定的浓度后, 发生化学反应生成新相。图 3b 为焊缝, 焊缝与铜与铝基体都不相同很可能是产生了新的化合物。

为了进一步分析图 3 中 Cu/Al 接头焊缝的成分, 应用能谱分析对焊缝进行了线、面扫描。图 4 为铜、铝含量分布情况, 上面的曲线代表 Al 原子的分布情况, 曲线大致上呈下降趋势, 直至最后在铜基体一侧降到零, 但在焊缝区铝的含量变化较大, 同样, 从下面的 Cu 原子的曲线分布情况线也可以看出在焊缝区 Cu 原子含量变化也较大, 出现这种情况的可能是焊缝中产生了新相, Al 原子的含量与 Cu 原子的含量存在一定的比例关系。由于试验用的 2A50 铝合金属于 Al-Cu 系列合金, 所以在铝合金基体, 铜仍占一定的含量。图 5 为焊缝区的面扫描位置, 结果显示, 铜的质量分数为 56.91%, 原子分数为 35.93%, 铝的质量分数为 43.09%, 原子分数为 64.07%, 铜铝含量都比较高, 进一步说明铜铝之间形成了化合物。由铜铝二元相图可知, 在温度 515 °C, 铝的含量占 43.09% 的情况下可能产生以化合物 CuAl_2 为基的固溶体 θ 相和以 CuAl 为基的固溶体 η_2 相^[9]。

2.2 Cu/Al 接头 X 射线衍射 (XRD) 分析

利用 X 射线衍射对焊缝及铝合金基体的相组成进行判定。试验时将焊缝区与铝合金基体单独取出, 分别进行 X 射线衍射, 结果如图 6 所示。对铝合金基体的入射角为 2θ 的小角度表面分析图 6a 表明, 铝合金基体主要相是 Al, 此外还存在少量的 CuAl 和 Mg , Al 峰明显高于 CuAl_2 峰。通过测定知 CuAl 含量占 7.6%, Al 占 88.3%。对焊缝的入射角为 2θ 的小角度表面分析图 6b 表明, Al 峰略低于 CuAl_2 峰。通过测定得出 Al 的含量占 43.6%, CuAl_2 的含量占 56.4%。结果说明, 焊缝与铝合金基体都存在金属间化合物 CuAl_2 。但焊缝中 CuAl_2 的含量比铝合金基体的 CuAl_2 含量高很多, 这可能是由于从铜基体扩散过来的 Cu 原子都与 Al 原子相结合形成了 CuAl_2 , 没有单质 Cu 存在。在该试验条件下生成的金属间化合物 CuAl_2 较多, 因而扩散连接界面较宽。Al, Cu 元素在界面上相互扩散, 晶界渗透使铝与铜待连接表面处的原子间间距减

小, 相互吸引产生的范德华力、两种金属渗透到界面实现机械咬合、冶金结合、以及界面反应产物 CuAl_2 实现原子键连接^[9]。

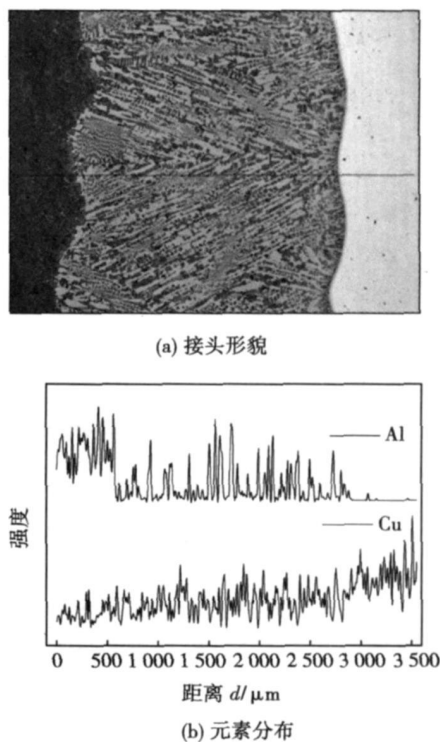


图 4 Cu/Al 接头 Al, Cu 元素的分布情况

Fig. 4 Al/Cu element distribution of Cu/Al alloy joint

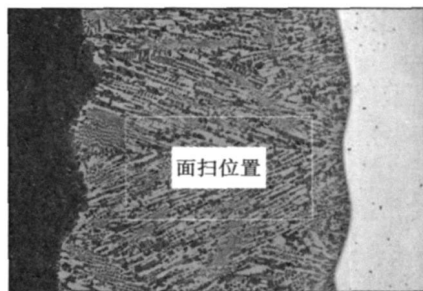


图 5 Cu/Al 接头面扫位置

Fig. 5 Surface scan position of Cu/Al alloy joint

2.3 Cu/Al 接头显微硬度测试

采用数显显微硬度计 HVS-1000 分别对 T2 基体、2A50 基体和焊缝进行显微硬度测定。试验载荷为 0.25 N, 加载时间 10 s, 结果如下: T2 基体的硬度为 7 HV, 2A50 基体的硬度为 9 HV, 焊缝的硬度为 23 HV。焊缝的硬度比 T2 铜、2A50 铝基体的硬度明显的高好几倍, 出现这种情况的原因可能是焊缝产生了金属间化合物, 使显微硬度显著提高。

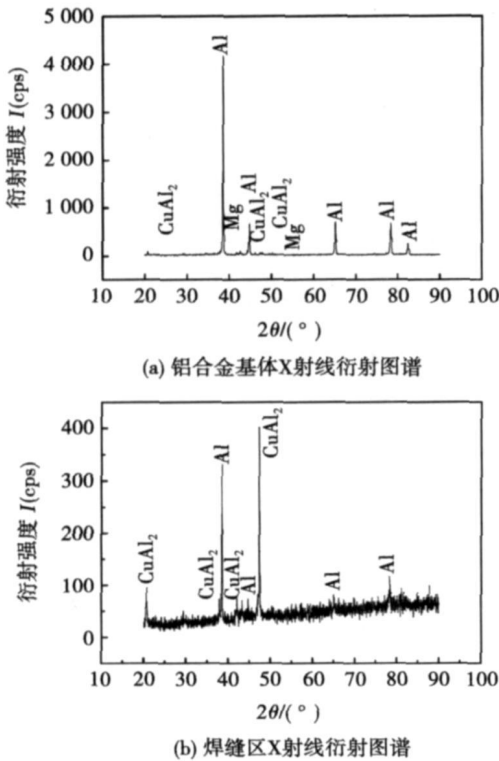


图 6 X 射线衍射图谱
Fig. 6 XRD pattern

2.4 Cu/Al 接头导电性能测试

从 Cu/Al 接头上, 取尺寸为 5 mm × 6 mm × 26.5 mm (其中接头的焊缝在正中间), 采用 ZY9987 型数字式微欧计测得 T2/2A50 接头电阻为 30 μΩ; 采用涡流电导率分辨仪测得 T2/2A50 (φ34 mm × 16 mm) 的电导率分别为 57 MS/m, 18.5 MS/m.

$$C = 1.724 \rho \times 100\%$$

或 $C = \sigma / 58.0 \times 100\%$

式中: ρ 为被检测试样的电阻系数, 单位 μΩ·cm; σ 为被检测试样的电导率, 单位 MS/m; C 为导电率 (%IACS); IACS 为国际退火铜标准.

$$\rho = 30 \times 0.5 \times 0.6 \div 3.396 = 3.396 (\mu\Omega \cdot \text{cm})$$
$$C_1 = 1.724 \rho \times 100\% = 1.724 \div 3.396 = 50.8\%$$

式中: C_1 表示接头导电率.

$$C_{T2} = \sigma / 58.0 \times 100\% = 57 / 58 \times 100\% = 98.3\%$$

式中: C_{T2} 表示 T2 铜的导电率.

$$C_{2A50} = \sigma / 58.0 \times 100\% = 18.5 / 58 \times 100\% = 31.9\%$$

式中: C_{2A50} 表示 2A50 铝合金的导电率.

$$C_{T2} > C_1 > C_{2A50}, \text{ 满足使用要求.}$$

3 结 论

(1) 采用压接—扩散复合连接的方法能够实现非真空条件下, 无中间层的铜与铝的连接, 连接所需的压力较小, 焊缝区产生了金属间化合物 CuAl₂, 实现了冶金结合, 但使 CuAl₂ 扩散层变厚, 出现了 2 mm 的焊缝.

(2) Cu/Al 接头的焊缝由铜侧结合面, 中间焊缝, 铝侧结合面三部分组成. 在铜基体与焊缝之间出现了光亮带, 形成了致密的新相化合物层.

(3) 接头导电性能良好, 能够满足实际要求.

参考文献:

[1] 辛选荣. 中国铜资源与铜锻工艺现状及展望[J]. 锻造与冲压, 2005, 7: 18—24.
Xin Xuanrong. China's copper and copper resources of the status quo and prospects of forging[J]. Forging & Metalforming, 2005, 7: 18—24.

[2] 李建新. 电工行业对铜的需求及铜替代发展状况[J]. 市场透视 2007, 6: 16—19.
Li Jianxin. Electrical equipment industry demand for copper and copper development of alternative[J]. Market Analysis And Forecast, 2007, 6: 16—19.

[3] 温立民, 刘 燕, 杨永强, 等. 铝铜异种金属冷压焊及其焊缝接头显微组织和性能[J]. 焊接技术, 2007, 36(3): 18—20.
Wen Limin, Liu Yan, Yang Yongqiang, et al. Research on Al-Cu heterogeneous metal cold pressure welding and its joint microstructure and performances[J]. Welding Technology, 2007, 36(3): 18—20.

[4] 许振明, 徐孝勉. 铝和镁的表面处理[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2005.

[5] 谢 军, 吴卫东, 叶成钢, 等. Al/Cu 薄膜真空扩散连接技术[J]. 强激光与粒子束, 2004 16(5): 607—610.
Xie Jun, Wu Weidong, Ye Chenggang, et al. Vacuum diffusion bonding technology of aluminium/copper films[J]. High Power Laser and Partiel Beams, 2004, 16(5): 607—610.

[6] 赵裕民, 曾悦坚, 张炳范. 铜—铝扩散焊时金属间化合物的行为[J]. 天津大学学报, 1984(增刊): 18—28.
Zhao Yumin, Zeng Yuejian, Zhang Bingfan. The behaviour of intermetalcompound phashs at the copper-Aluminium diffusion bond[J]. Transactions of Tianjin University, 1984(supplement): 18—28.

作者简介: 洪丽玲, 女, 1983 年出生, 硕士研究生. 研究方向为锻焊工艺研究. 发表论文 2 篇.

Email: lililing.1983@163.com

Zhenjiang 212003 Jiangsu, China). p73—76

Abstract Different from the relationship of heat input and welding speed at melting welding, which submits inverse ratio, the relation is quite complex for friction stir welding. This paper studies the relation of welding speed and heat input at aluminum alloy friction stir welding based on thermogenesis of friction and plastic deforming. The result shows that welding speed and heat input relationship is nonlinear and shows a complex shape, which means welding speed, depending on various ranges of parameter, contributes variably to heat input. When rotary speed to welding speed ratio is constant, with the increase of welding speed, heat input and the mechanical behavior of the joint decreasing is not linear. Thus, heat input should not be measured by rotary speed to welding speed ratio.

Key words: friction stir welding; welding speed; heat input

Interface microstructure and wear properties of TiC-Ni-Mo coatings prepared by in-situ fabrication of laser cladding HE Qingkun, WANG Yong, ZHAO Weimin, CHENG Yiyuan (College of Mechanical and Electronic Engineering, China Petroleum University, Dongying 257061, Shandong China). p77—80, 100

Abstract: TiC-Ni-Mo composite coating was prepared by in-situ fabrication of laser cladding. The interface microstructure and wear properties of the coating was investigated by means of EPMA, TEM and wear tests. The results show that adding 5% Mo into the coating could improve uniformity, rigidity, wear resistance, refine TiC grains, reduce friction coefficients and exist orientation relationship: $(001)_{\text{TiC}} // (1\bar{1}1)_{\gamma\text{-Ni}}$. The rigidity and wear resistance of coating decrease with the content of 10 % Mo. There are many directional dislocations inside TiC phase and dislocation tangles inside γ -Ni binder phase. The wear mechanism of the coating is anti-wear action of reinforcing phases. The wear morphology is short and shallow furrows.

Key words: laser cladding; in-situ fabrication; interface; wear resistance

Study on welded metal properties of high carbon cast self-shielded flux cored wire with Nb and Mo WANG Qingbao¹, BAI Bo¹, LIU Jingfeng¹, LIAN Jing² (1. Welding Research Institute, Central Research Institute Building & Construction, MCC, Beijing 100088, China; 2. Heilongjiang Provincial Installation Engineering Company, Harbin 150000, China). p81—84

Abstract: The paper studied the microstructures morphology, and the discrimination in hardness and wearability of welded metal with the addition of Nb, Mo by optical microscope and SEM. The results showed that the number of primary carbide, macrohardness and wearability were increased with the increasing the contents of Nb, Mo. Nb only resulted in NbC to strength welded metal, and but this strengthen was better; Mo not only resulted in Mo₂C but also in the primary carbide and matrix, but this strengthen was weaker than that

of Nb. In order to get better wear resistance and economic benefit, it should optimize the contents of alloys and strengthen both carbide and matrix.

Key word primary carbide; strengthen; matrix; wearability

Experimental study on compression-diffusion composite connection of Cu/Al joint HONG Liling, XIN Xuanrong, ZHANG Keke, LIU Ting, WANG Wenyao (School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan China). p85—88

Abstracts: Cu and Al alloy were bonded by compression-diffusion composite connection technology. The welding technics procedure was: Cu and Al alloy be compressed firstly, then diffused on 515 °C for 60 min, and diffused 90 min again before hot-pressed. The microstructure was researched by various test methods, such as SEM, EDS, micro-hardness test, XRD and so on. The experiment results indicated that brittle compound CuAl₂ appeared in the interface and a new component was created between Cu & welding which looks like a bright belt. Electric performance of joint was between Cu and Al alloy, that could be satisfied with practical application.

Key words: compression-diffusion composite connection; copper; aluminum alloy; weld

Finite element simulation of temperature field for submerged arc strip overlaying on thick plate WANG Zhifeng¹, CHEN Peiyin¹, WU Wei¹, CHEN Yan¹, ZHANG Jianmin², Bao Heng² (1. Harbin Welding Institute, Harbin, 150080, China; 2. China First Heavy Industries, Qiqihar 161042, Heilongjiang China). p89—92

Abstract: A thermal source for submerged arc overlaying is designed based on its principle and heat source model of Goldak, and a fortran subroutine is compiled to implement the translation of thermal source in the FEA software MSC. MARC. Finite element simulation of temperature field of submerged arc strip overlaying on thick plate was established. The simulation results are in good accordance with the actual thermal cycle curve, which proved the model is correct.

Key words: submergen arc overlay welding; heat source model; heat source temperature field; thermal cycle curve

Oxidation resistance of reactive plasma cladding high-chromium iron-base composite coating WANG Limei (School of Information and Control Engineering, Weifang University, Weifang 261061, Shandong China). p93—95, 104

Abstract The sucrose was used as a carbonaceous precursor to prepare composite powders of Fe-Cr-C-W-Ni by the precursor carbonization-composition process. And the powders were fused to form a high-chromium iron-base coating on the surface of hardened and tempered grade C steel ($C \leq 0.35\%$) with the optimum reactive plasma cladding process. SEM, XRD and EDS were employed to