

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2013.06.007

液压支架立柱 27SiMn 激光熔覆铁基合金涂层的性能

杨庆东, 苏伦昌, 董春春, 杜学芸, 杨帆, 张林清

(山东能源机械集团大族再制造有限公司, 山东 新泰 271222)

摘要: 采用 CO₂ 激光器在液压支架立柱母材 27SiMn 表面制备了 JG-2、JG-3 铁基合金熔覆层, 分别对其微观组织、成分分布、显微硬度、耐磨性、耐蚀性等进行测定与分析。结果表明: JG-2、JG-3 熔覆层无裂纹, 与基体呈冶金结合, 组织均匀, 为较发达的细密枝晶组织; JG-2 熔覆层的主要组成相为 α -(Fe, Ni) 固溶体、Fe₄Ni₃ 等, JG-3 熔覆层的主要组成相为 α -Fe、Fe-Cr、FeCr_{0.29}Ni_{0.16}C_{0.06} 等; JG-3 熔覆层的平均硬度为 609 HV₁₀, JG-2 熔覆层的平均硬度为 542 HV₁₀; JG-3 熔覆层的磨损失重约为 JG-2 熔覆层的 1/2、立柱母材 27SiMn 的 1/4; 极化曲线及参数显示, JG-2 熔覆层的耐腐蚀性能更好。

关键词: 液压支架立柱; 激光熔覆; 铁基合金

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2013)06-0042-06

Properties of Fe-based Alloy Cladding Layers on Hydraulic Support Column Steel 27SiMn

YANG Qing-dong, SU Lun-chang, DONG Chun-chun, DU Xue-yun, YANG Fan, ZHANG Lin-qing
(Shandong Energy Machinery Group Han's Re-manufacturing Co., Ltd., Xintai 271222, Shandong)

Abstract: Cladding layers of JG-2 and JG-3 were prepared on hydraulic support column base steel (27SiMn) surface by using a CO₂ laser. The microstructure, phase, microhardness, wear characteristics and corrosion performance of the layers were all investigated and studied. The results show that the crack-free layers have strong metallurgic bond with the substrates, and the microstructures with well-developed dendrite are uniform. The main phases of JG-2 layer are composed of α -(Fe, Ni), Fe₄Ni₃, while the main phases of JG-3 layer are mainly composed of α -Fe, Fe-Cr and FeCr_{0.29}Ni_{0.16}C_{0.06}. The average hardness of JG-3 layer is 609.50 HV₁₀, and that of JG-2 layer is 542.5 HV₁₀. The wear weight loss of JG-3 layer is the smallest, about 1/2 times JG-2 layer and a quarter 27SiMn. According to polarization curves and parameters, the corrosion resistance of JG-2 cladding layer is better.

Key words: hydraulic support column; laser cladding; Fe-based alloys

0 引 言

立柱是液压支架的主要承载部件, 承受顶板作用于液压支架的载荷并传递到底座上, 且长期处于井下开采的特殊环境中。据相关统计分析, 煤矿事故有相当大比例是因液压支架失效而引发^[1]。因此全面提升立柱表面的耐磨、耐蚀、抗冲击性能, 延长立柱使用寿命, 对液压支架有重要意

义。历年来, 对于激光熔覆不锈钢基的研究很多, 但对将激光熔覆用于液压支架立柱修复和防护的研究相对较少。解文正^[2]等以液压支架用 27SiMn 钢为基体, 激光熔覆 Ni60 合金粉末成形的熔覆层具有很高的显微硬度(660~797 HV₁₀)和较强的耐腐蚀性能。韩文静^[3]等以单体液压支柱缸体用钢 27SiMn 为基体, 激光熔覆 Ni60A+

收稿日期: 2013-08-26; 修回日期: 2013-10-30

作者简介: 杨庆东(1968-), 男(汉), 山东滕州人, 工程师, 本科; 研究方向: 激光熔覆技术应用及企业管理

网络出版日期: 2013-11-07 14:55; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20131107.1455.003.html>

引文格式: 杨庆东, 苏伦昌, 董春春, 等. 液压支架立柱 27SiMn 激光熔覆铁基合金涂层的性能 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(6): 42-47.

20% WC 合金粉末,制备的熔覆层耐磨性比基体材料有较大提高,且有很高的显微硬度(48 HRC)和较强的耐腐蚀性能。但是,实际应用中过高的硬度会对立柱表面的后续加工产生不利影响。而且试验用试块的形状结构简单、对称性好,在试块上得到的试验结果不能等同于零件上的实际使用效果。

文中结合煤矿液压支架立柱的工作环境特点,综合考虑立柱的防腐、耐磨及表面可加工性能,以其缸体用钢 27SiMn 为基体,优化激光熔覆工艺,采用专门研制的 JG-2、JG-3 铁基合金粉末

制备了 2 种熔覆层试样,分别对它们的微观组织、显微硬度、成分分布、耐磨性、耐腐蚀性等进行了分析研究,旨在得到能够适度提高立柱表面硬度,更好增强其耐磨、耐腐蚀性的合金粉末材料,以延长液压支架立柱的使用寿命并降低生产成本。

1 试验材料与方法

试验用基材为液压支架立柱缸体用钢 27SiMn,其化学成分如表 1 所示。熔覆粉末为专门研制的 JG-2、JG-3 铁基合金粉末,粒度为 $-149\sim 45\ \mu\text{m}$,主要化学成分如表 2 所示。

表 1 27SiMn 的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of 27SiMn ($w/\%$)

Element	C	Si	Mn	V	Ni	Cu	S	P
Content	0.24-0.32	1.10-1.40	1.10-1.40	0.07-0.12	≤ 0.30	≤ 0.30	≤ 0.040	≤ 0.040

表 2 铁基合金粉末的主要化学成分(质量分数/%)

Table 2 Chemical composition of iron-based alloys powders ($w/\%$)

Element	Cr	Mn	B	Si	Mo	Ni	C	Fe
JG-2	16.0-19.0	0.5-1.0		0.5-1.1	2.0-3.0	22-30	0.05-0.09	Bal.
JG-3	15.0-17.0	0.3-0.7	0.5-1.1	1.0-1.5	1.5-1.9	3.5-4.0	0.10-0.15	Bal.

用万瓦 CO₂ 激光器进行多道激光熔覆,送粉器为自主研发的组合式重力送粉装置。搭接率为 30%,激光扫描速率 3 mm/s,离焦量为 300 mm,光斑 3 mm,激光输出功率为 7 200 kW。将熔覆后的试块沿垂直于扫描方向线切割成 10 mm×10 mm×10 mm 大小。经砂纸打磨并抛光后,用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀制成金相试样,在图像分析仪尼康 ME600 和 KYKY2800B 型电子显微镜下观察熔覆层的显微组织结构,采用 JXA-8230 型电子探针及其附带能谱仪 350 进行成分分析,用 FM-700/SVDMR 型自动显微硬度计检测试样硬度分布,用 D/Max2500PC 型 X 射线衍射仪进行物相分析。在 CETR-UMT-3MO 摩擦磨损试验机上进行磨损试验,试块大小为 $\Phi 20\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$,法向载荷为 100 N,相对滑动速度 1 mm/s,持续时间 2 h,磨损前后用丙酮超声清洗 15 min。采用 5% NaCl 溶液,用 PARSTAT2273 型电化学工作站测定极化曲线(辅助电极为铂电极,参比电极为饱和甘汞电极,开路电位 $-2\sim -1\ \text{V}$,扫描速率 5 mV/s)。

2 结果与讨论

2.1 熔覆层物相分析

图 1 是 JG-2、JG-3 熔覆层的 X 射线衍射图。JG-2 熔覆层主要组成相为 $\alpha-(\text{Fe},\text{Ni})$ 固溶体、Fe₄Ni₃ 等。JG-3 熔覆层的主要组成相为 $\alpha\text{-Fe}$ 、Fe-Cr、FeCr_{0.29}Ni_{0.16}C_{0.06} 等。因激光熔覆是一个快速加热、快速凝固的典型非平衡态过程,熔池中存在特殊的物理冶金与化学冶金过程,析出的 C、Fe、Cr、Ni 等元素很容易形成多种强化相与非平衡相。

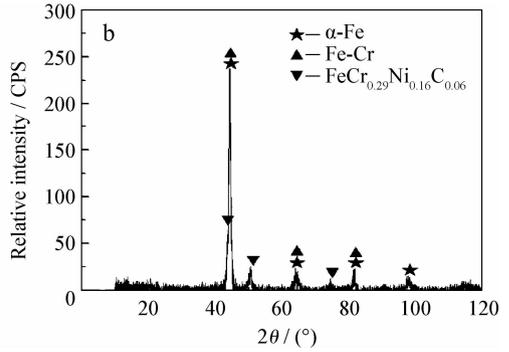
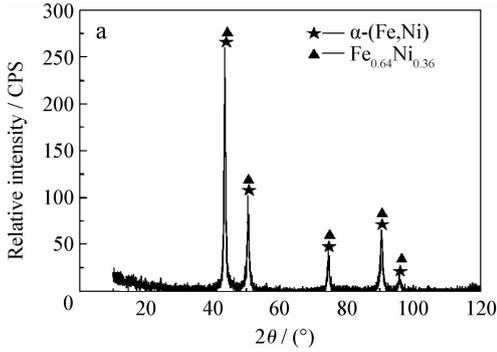
2.2 熔覆层的显微组织形态

图 2 为 JG-2、JG-3 熔覆层的金相照片。由图可见,熔覆层均无裂纹,组织呈细小致密的枝晶状。由于 G/R 的大小控制组织凝固特征,冷却速率 dT/dt 则决定组织大小^[4],在 7 200 kW 的大激光功率下,极大的 dT/dt 使得奥氏体来不及长大就进入马氏体转变区,故激光熔覆层的组织较为细小、均匀,主要组织均为马氏体和少量残余奥氏体。在熔池底部,由于温度梯度最大、凝固速率最

小, G/R 极大, 故晶体形核速度远大于生长速度, 形成以界面为核心的平面生长组织薄层, 熔覆层与基材间有一条清晰无夹杂的白亮条带, 说明熔覆层与基体呈良好的冶金结合; 离开界面 G/R 逐渐变小, 中部晶粒得以生长, 沿逆热流方向形成较发达的枝晶组织, 其二次枝晶臂较底部更发达。熔覆层顶部的枝晶生长方向与扫描方向的夹角较小, 其微观组织呈等轴晶形态^[5]。

图3为JG-2、JG-3熔覆层中上部的显微形

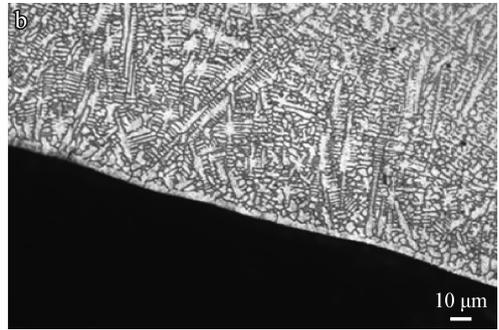
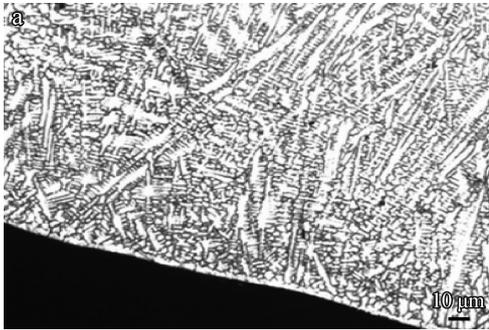
貌, 可见熔覆层组织由枝晶和枝晶间构成。对图3所示区域进行能谱分析, EDS分析结果见表3。枝晶组织主要含有Fe、Cr、Ni、C、Si及少量的Mo, 枝晶间组织主要含Fe、Cr、Ni等。结合XRD分析结果, 认为JG-2熔覆层细密的树枝晶为 α -(Fe, Ni)固溶体和 $Fe_{0.64}Ni_{0.36}$ 化合物, 其间为固溶体与Cr的共晶组织; JG-3熔覆层树枝晶组织主要为 α -Fe固溶体、Fe-Cr和 $FeCr_{0.29}Ni_{0.16}C_{0.06}$ 化合物, 其枝晶间为 α -Fe固溶体、Fe-Cr的共晶组织。



(a) JG-2 (b) JG-3

图1 熔覆层 X 射线衍射图谱

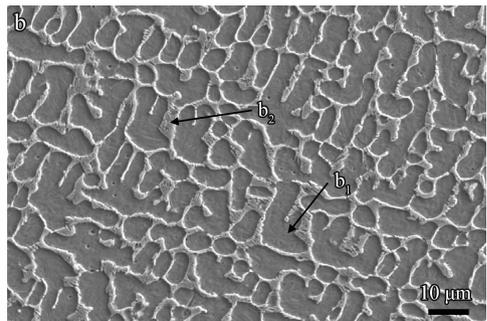
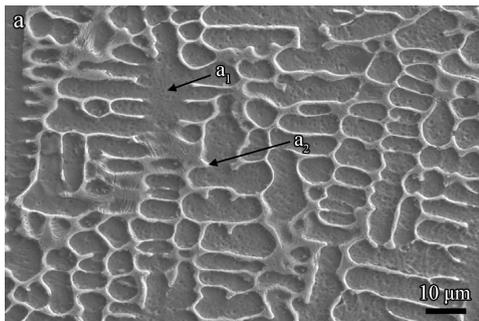
Fig. 1 XRD analysis of the laser cladding layers



(a) JG-2 (b) JG-3

图2 熔覆层的金相组织

Fig. 2 Microstructure of the laser cladding layers



(a) JG-2 (b) JG-3

图3 熔覆层中上部显微组织

Fig. 3 Microstructure of the upper-middle part in cladding layers

表 3 能谱分析结果(质量分数/%)

Table 3 EDS results of the cladding layers ($w/\%$)

Element	Fe	Mo	Cr	Ni	Si	C
a ₁	66.52	1.28	18.34	12.82	1.81	0.97
a ₂	60.24	0.65	24.15	10.63	1.38	1.71
b ₁	74.45	1.38	11.68	3.18	1.35	0.41
b ₂	79.91	1.07	17.45	3.12	1.27	1.18

2.3 涂层的显微硬度分布

图 4 为 JG-2、JG-3 熔覆试样的显微硬度分布,熔覆层、过渡区、基体热影响区和基体的硬度呈梯度分布。熔覆层厚度均约为 0.80 mm,硬度分布较为均匀,底部硬度无明显降低。JG-3 熔覆层平均硬度为 609 HV₁₀,其中最高硬度为 686 HV₁₀。JG-2 熔覆层的平均硬度为 542 HV₁₀,其中最高硬度为 577 HV₁₀,而立柱缸体母材 27SiMn 的平均硬度仅为 335 HV₁₀。

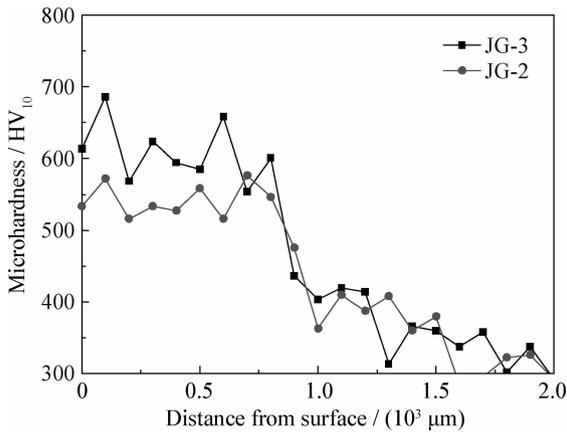


图 4 熔覆层显微硬度分布

Fig. 4 Microhardness of the cladding layers

JG-2、JG-3 熔覆层显微硬度均能显著提高基材表面硬度,这是因为:① 激光熔覆的快速冷凝带来的细晶强化作用使 JG-2、JG-3 熔覆层组织细小、结构致密;② C、Si 与 Fe、Cr、Ni 等形成的细小化合物增强了对熔覆合金层的弥散强化作用^[6],能提高熔覆层的形核率,使组织更加致密,加之 JG-2、JG-3 粉体材料中的合金元素大量固溶带来的强化作用都能促使熔覆层硬度的提高。

合金粉末中 Si、C 等元素的含量越大(见表 2)生成的硬质相越多,熔覆层硬度越高,所以预涂 JG-3 的熔覆层可能因为含有更高体积分数的硬质增强相而具有较高的硬度。实践证明 JG-2、

JG-3 熔覆层的高硬度都能适应立柱表面的后续车削加工,而 JG-2 的硬度值适应性更好,但是 JG-2 粉体中贵金属 Ni 等的含量大,成本相对较高。

2.4 熔覆层的耐磨性

图 5 是立柱母材 27SiMn、JG-2 熔覆层、JG-3 熔覆层 3 种试样的磨损失重结果。可见,JG-3 熔覆层的磨损失重最小,大约是 JG-2 熔覆层的 1/2,27SiMn 的 1/4。显然 JG-3、JG-2 熔覆层都能显著提高立柱缸体母材表面的耐磨性,这首先得益于 JG-2、JG-3 熔覆层的较高硬度,而且组织中组成网络结构胞状晶的小颗粒对于提高其断裂韧度有积极作用,再者,优化的激光功率和扫描速度可有效提高耐磨性^[7]。

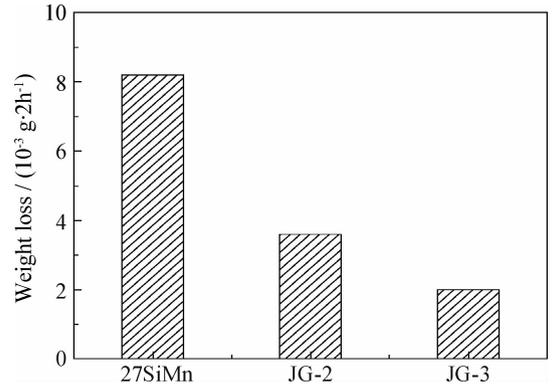


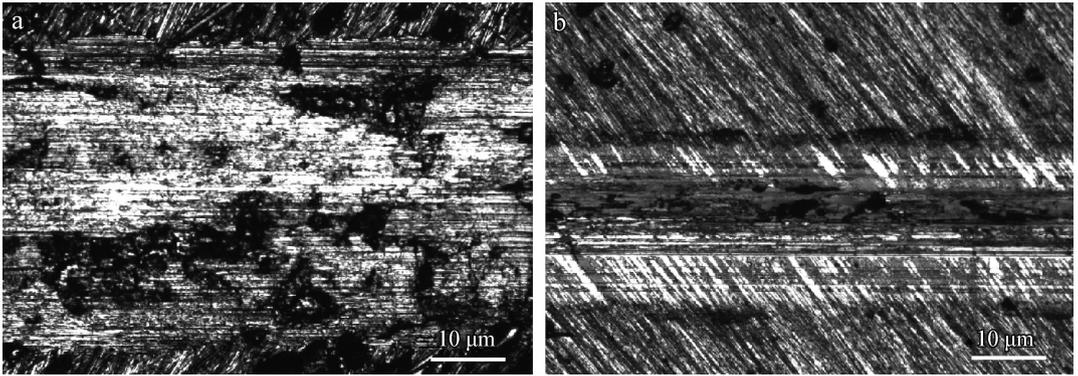
图 5 试样的磨损失重

Fig. 5 Wear weight loss of the samples

图 6 为磨损表面形貌,JG-2 熔覆层出现了局部脱落,而 JG-3 磨痕比较规整,直接说明 JG-3 熔覆层的耐磨性能更好。究其原因,JG-3 熔覆层的 Mo、Si 含量更大(见表 3),特别是在基体中固溶的 Mo 能降低碳化物在晶界上形成连续网状的倾向,减少残余奥氏体量,相对地增加了表面层的耐磨性,还能使钢的硬度整体保持稳定,增强了对磨损的抗力;而且 JG-3 熔覆层表面硬度较 JG-2 熔覆层高也能在一定程度上提升其耐磨性。

2.5 熔覆层的耐蚀性测定与分析

矿用液压支架立柱表面腐蚀的主要形态是防护层鼓泡、脱落。图 7 为试样在 5%NaCl 溶液中的极化曲线,对阳极极化曲线进行塔菲尔(Tafel)拟合的数据结果如表 4 所示。因为自腐蚀电位值越正、自腐蚀电流密度越小,耐腐蚀性能就越好,表 4 的参数说明,2 者熔覆层都能对基体起到很好的防腐作用。极化曲线显示,在腐蚀进程中 JG-2、



(a) JG-2 (b) JG-3

图6 试样的磨损形貌

Fig. 6 Wear morphologies of the samples

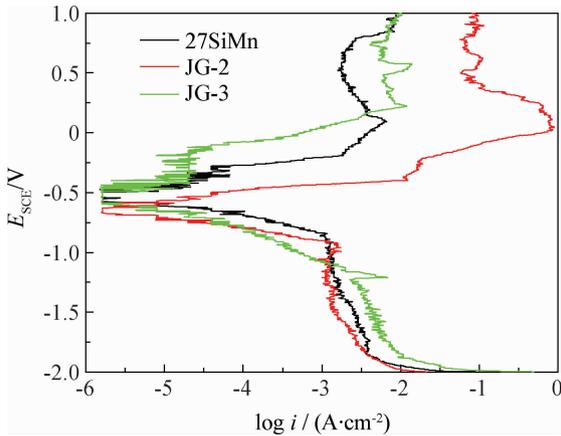


图7 熔覆层在5%NaCl中的极化曲线

Fig. 7 Polarization curves of cladding layers in 5%NaCl

表4 熔覆层的自腐蚀电位和自腐蚀电流密度

Table 4 Self-corrosion potential and current density of the cladding layers

Samples	E_{SCE}/V	Current density/ ($10^{-5} A \cdot cm^{-2}$)
27SiMn	-0.640	4.83
JG-2	-0.535	2.78
JG-3	-0.593	3.97

JG-3 熔覆层均产生了钝化趋势,而 JG-2 熔覆层的钝化明显且钝态区域更加稳定。就 JG-2 合金粉末来说,它含有更多的 Cr、Ni 元素(见表 2),更容易形成钝化膜,此种钝化膜致密、完整不易被破坏,能对腐蚀的发展起到很强的阻碍作用,促使 JG-2 熔覆层对提高立柱耐蚀性能的效果更好。随着腐蚀进程发展,5%NaCl 溶液中的活性阴离

子 Cl^- 能够优先吸附在钝化膜上,与钝化膜中的阳离子(如 Cr^{3+}) 结合形成可溶性氯化物,致使腐蚀速率上升。而后发生了点蚀过程即二次钝化现象^[8],此时生成的表面膜能维持一段时间,可能进一步减缓腐蚀进程,对熔覆层的防腐效果起到促进作用。

在 5%NaCl 溶液中,JG-2、JG-3 熔覆层的 f/s 界面上除了发生化学溶解反应外,还存在着与电位密切相关的电化学溶解反应,而且高电位下的电化学溶解速度远大于化学溶解速度。若熔覆层的显微组织细小均匀,则晶界上的杂质含量少、成分偏析小,就能有效减小原电池效应对腐蚀进程的影响^[9],故此 JG-2、JG-3 熔覆层凭借比较稳定的电化学性能作阴极,得到保护,基体则作为阳极被首先腐蚀。采矿环境下,立柱缸体表面熔覆层上的裂纹、划痕等缺陷都将会给腐蚀提供便利通道,此外,由于激光熔覆工艺快速加热快速冷却,基体往往存在很大热应力出现变形,变形后的基体内部存在内应力,导致基体与涂层交界处容易发生应力腐蚀^[9],严重时甚至呈蜂窝状。所以表面熔覆层的均匀及连贯、完整性是提高耐蚀性的关键因素。

3 结论

(1) JG-2 熔覆层的主要组成相为 α -(Fe,Ni) 固溶体、 Fe_4Ni_3 等,JG-3 熔覆层的主要组成相为 α -Fe、Fe-Cr、 $FeCr_{0.29}Ni_{0.16}C_{0.06}$ 等。

(2) JG-3 熔覆层的平均硬度为 609 HV₁₀, JG-2 熔覆层的平均硬度为 542 HV₁₀。

(3) JG-3 熔覆层的磨损失重约是 JG-2 熔覆

层的 1/2,是基体 27SiMn 的 1/4。

(4) 极化曲线显示,JG-2、JG-3 熔覆层都能对基体起到很好的防腐作用,而 JG-2 熔覆层的防腐性能更佳。

综上所述,JG-3 合金粉末能达到提升立柱综合性能的使用要求,而且能达到降低成本的目的。采用优化工艺将 JG-3 合金粉末熔覆于新或旧立柱表面可获得新型不锈钢立柱产品。

参考文献

- [1] 王志华. 液压支架立柱的腐蚀机理及其防护 [J]. 矿山机械, 2011, 39(9): 16-18.
- [2] 解文正, 李春强, 杨志伟, 等. 激光熔覆技术在液压支架上的应用研究 [J]. 煤矿机械, 2010, 31(10): 106-108.
- [3] 韩文静, 张培训, 汤其建. 单体液压支柱缸体激光熔覆 Ni60A+20%W 性能 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 340-343.

- [4] 吴培桂, 陈莹莹, 张光钧. 激光熔覆添加纳米 WC/Co 合金粉末涂层的组织与抗裂性能 [J]. 金属热处理, 2011, 36(6): 1-6.
- [5] 黄祖凤, 张冲, 唐群华, 等. WC 颗粒对激光熔覆 Fe-CoCrNiCu 高熵合金涂层组织与硬度的影响 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(1): 13-19.
- [6] 斯松华, 袁晓敏, 何宜柱. 激光熔覆镍基金属陶瓷涂层的组织性能研究 [J]. 中国激光, 2002, 29(8): 759-762.
- [7] 尹紫光. 高硬度材料激光熔覆镍基合金技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- [8] 宋光铃, 曹楚南, 林海潮. 不锈钢过钝化-二次钝化的研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 1994, 8(3): 208-215.
- [9] 樊丁, 李强, 张建斌. 激光熔覆 FeNiCrAl 的组织与腐蚀性能 [J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(2): 13-16.

作者地址: 山东新泰东都镇东都路
 山东能源机械集团大族再制造有限公司
 Tel: (0538) 7861 620
 E-mail: shannengdazu@163.com

271222

 • 学术动态 •

2013 年中国机械工程学会年会在合肥隆重召开

2013 年 11 月 6 日上午,由中国机械工程学会、合肥市人民政府主办,安徽省机械工程学会等 6 家单位联合承办的以“创新驱动发展 建设制造强国”为主题的 2013 年中国机械工程学会年会在合肥开幕。来自全国机械行业相关部门的专家学者以及制造产业的企业家、技术负责人等 800 余人参加了此次盛会。

全国人大常委会原副委员长、中国机械工程学会荣誉理事长路甬祥,中国工程院院长、中国机械工程学会理事长周济,中国科学技术学会常务副主席、书记处第一书记申维辰,中国机械工业联合会执行副会长薛一平,合肥市常务副市长韩冰,中国机械工程学会监事长宋天虎,中国机械工程学会副理事长包起帆、卢秉恒、李新亚、林忠钦、郭东明、谭建荣、蔡惟慈、杨海成,中国机械工程学会监事李忠海、朱森第、王玉明,中国机械工程学会副理事长兼秘书长张彦敏等领导出席会议并为获奖代表颁奖。

会上举行了隆重的颁奖仪式,2013 年度中国机械工业科学技术奖共评出特等奖 1 项,一等奖 34 项,二等奖 125 项,三等奖 218 项。中国机械工程学会副理事长郭东明宣读了“中国机械工程学会表彰奖励决定”,授予路甬祥(中国科学院)、温诗铸(清华大学)中国机械工程学会科技成就奖,授予梁秀兵(中国人民解放军装甲兵工程学院)、袁成清(武汉理工大学)、温广瑞(新疆大学)、彭小强(中国人民解放军国防科学技术大学)、高亮(华中科技大学)、孙标(西安陕鼓动力股份有限公司)等 6 位同志中国机械工程学会青年科技成就奖。中国机械工程学会周济理事长为获奖者颁发奖牌和证书。

(摘自中国机械工程学会表面工程分会信息网)