

激光熔覆技术在高腐蚀环境下液压支架的试验研究

付祖冈,张自强,孟贺超,程相榜

(郑州煤矿机械集团股份有限公司,河南 郑州 450016)

摘要:基于激光熔覆技术在高腐蚀性煤矿环境下液压支架中的应用情况,选取铁基不锈钢为研究对象,采用 ICP-AES 法测试不锈钢中的化学成分,以金相组织、SEM 图像表征熔覆层的微观结构,通过洛氏硬度法、盐雾试验法研究了化学成分元素对熔覆层硬度和耐腐蚀性能的影响,并探讨了激光熔覆后的加工工艺方案。结果表明,熔覆层与基体分界明显,呈现良好的冶金结合;金相组织结构为灰白色马氏体,呈现树枝状结晶和椭圆、块状分布;随着不锈钢粉末中 Cr、Ni、Co 等抗腐蚀合金元素的增加,熔覆层的耐腐蚀性能逐渐提高;调节不锈钢粉末中元素 B、C 的含量可以改变熔覆层的硬度,但 B 对熔覆层硬度的影响比 C 更明显;为保持良好的耐腐蚀性能,熔覆层硬度控制在 HRC 50~55 为最佳。通过对成本、效率分析研究,认为车-磨-抛光是激光熔覆最优的加工方案。

关键词:激光熔覆;高腐蚀性煤矿环境;液压支架;盐雾试验;加工工艺

中图分类号:TD353;TG174.4

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)05-0155-05

Experimental study of laser cladding technology for hydraulic support in high corrosive environment

FU Zugang, ZHANG Ziqiang, MENG Hechao, CHENG Xiangbang

(Zhengzhou Coal Mining Machinery Group Co., Ltd., Zhengzhou 450016)

Abstract: Based on the application of laser cladding technology on hydraulic support in high corrosive coal mine environment, iron-based stainless steel was selected as the research object. The chemical composition of stainless steel was tested by ICP-AES. The cladding layer was characterized by metallographic and SEM images. The influence of chemical elements on the hardness and corrosion resistance of cladding layer was studied by Rockwell hardness method and salt spray test method. The machining technological process after laser cladding was discussed. The results show that the cladding layer is obviously distinguished from the matrix. The metallurgical bonding occurs between the cladding layer and matrix. In addition, the microstructure of cladding layer is off-white martensite, showing dendritic crystal and elliptical and massive distribution. With the increasing of corrosion resisting alloy element Cr, Ni and Co in the stainless steel powder, the corrosion resistance ability of the cladding layer is improved. The hardness of the cladding layer can be changed by adjusting the content of B and C in the stainless steel powder, but the effect of B on the hardness of the cladding layer is more obvious than C. The best corrosion resistance ability can be acquired by controlling the cladding layer hardness in HRC 50 to 55. Through the study of cost and efficiency, vehicle-mill-polishing is the best solution for laser cladding.

Key words: laser cladding; high corrosive coal mine environment; hydraulic support; salt spray test; technological process

0 引 言

我国作为产煤大国,煤炭资源丰富,但绝大多数煤矿属于井工矿,工作面位于地下数百米甚至上千米,高温高湿强腐蚀的井下环境对在井面上运行

的液压支架的抗腐蚀性能提出了很高要求,而立柱作为液压支架重要的液压传动部件,其稳定性和可靠性是衡量液压支架优劣的关键^[1-3]。

井下大部分立柱的腐蚀主要是由于 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度过高导致的^[4-7],如陕北和宁夏的部分煤矿井下

收稿日期:2017-11-28;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.est.2018.05.025

基金项目:2015 年郑州市重大科技专项资助项目(152PZDZX001)

作者简介:付祖冈(1965—),男,湖北公安人,高级工程师,现任郑州煤矿机械集团股份有限公司总经理。

引用格式:付祖冈,张自强,孟贺超,等.激光熔覆技术在高腐蚀环境下液压支架的试验研究[J].煤炭科学技术,2018,46(5):155-159,228.

FU Zugang, ZHANG Ziqiang, MENG Hechao, et al. Experimental study of laser cladding technology for hydraulic support in high corrosive environment[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(5): 155-159, 228.

Cl⁻浓度达到2 000 mg/L, SO₄²⁻达到3 000 mg/L, 远超过MT 76—2011^[8]标准中要求的浓度。传统液压支架镀层为镀乳白铬和硬铬或铜锡合金和硬铬, 难以抵挡穿透能力很强的Cl⁻和SO₄²⁻等有害离子的腐蚀。

近些年来, 激光熔覆技术在煤矿液压支架立柱和千斤顶上的应用越来越多。激光熔覆作为一种材料表面改性技术, 采用高能量的激光束将不锈钢粉末熔融并焊接在基体表面, 使钢材基体表面和熔覆层达到冶金结合^[9-10], 通过车、磨、抛光等加工手段, 使熔覆层达到所需的厚度和粗糙度。激光熔覆层具有结合力好、硬度高、耐蚀性好等特点, 能够满足液压支架立柱耐磨和抗腐蚀的使用要求。

激光熔覆技术主要有铁基合金、镍基合金和钴基合金不锈钢等3种材料体系, 目前我国国内应用最多的为铁基不锈钢。铁基不锈钢粉末对碳钢、不锈钢、合金钢、铸钢等多种基材有较好的适应性, 能获得氧化物含量低、气孔率小的熔覆层。铁基不锈钢中含有的Cr、Ni等合金元素可以使熔覆层表面形成一层钝化膜, 提高熔覆层的耐腐蚀性能^[11-16]。

然而, 国内铁基粉末种类较多, 没有统一的标准, 由于不锈钢粉末选取不当和熔覆工艺差别较大所造成的熔覆层锈蚀问题也客观存在。铁基不锈钢合金具有材料来源广泛、成本低且抗磨性能好的优点, 同时也有熔点高、抗氧化性差, 熔覆层易开裂、易产生气孔等缺点。目前国内对激光熔覆铁基不锈钢合金材料的选取和耐腐蚀性能鲜有研究, 材料中的合金元素成分对熔覆层的耐腐蚀性能、硬度等方面的影响缺乏相关研究和文献报导。

硬度和防腐性是激光熔覆技术应用中比较重要的2个因素, 笔者采用等离子耦合发射光谱仪测试不同不锈钢粉末的化学成分, 采用洛氏硬度测试法和盐雾试验法测试不同不锈钢熔覆层的硬度和耐腐蚀性能, 并对激光熔覆后的加工工艺进行了研究, 探讨了不锈钢粉末中的合金元素对熔覆层硬度、耐腐蚀性能的影响以及激光熔覆的加工方案。

1 试验

1.1 激光熔覆试样的制备

试验所用基体材料为27SiMn, 选用3种铁基不锈钢粉末a、b、c制备a、b、c三种不锈钢熔覆试样。采用激光熔覆技术将不锈钢粉末熔覆在27SiMn材料表面, 加工成长×宽×高为100 mm×100 mm×10 mm的试样, 激光熔覆层净厚度为0.5 mm, 表面粗糙

度≤Ra 0.4。

1.2 激光熔覆工艺参数

采用HighLight10000D型半导体激光器, 额定功率10 000 kW, 设备实际功率8 kW, 喷嘴尺寸为3 mm×24 mm, 激光器光斑3 mm×24 mm, 单道熔覆宽度24 mm, 搭接量6 mm, 实际宽度18 mm, 保护气体Ar₂(纯度99%)。激光熔覆工艺参数见表1。

表1 激光熔覆工艺参数

Table 1 Parameters of laser cladding

激光功率/kW	保护气流量/(L·h ⁻¹)	送粉速度/(g·min ⁻¹)	线速度/(mm·min ⁻¹)	熔覆层厚度/mm
8	4.5	130	650	1.5~2.0

1.3 显微组织分析

使用线切割方法制备a、b、c三种试样, 在熔覆层横截面处, 用不同粒度的砂纸由粗到细进行研磨、抛光后, 腐蚀剂用王水。采用Axio Lab A1型金相显微镜观察熔覆层组织。

1.4 硬度及化学成分测定

1) 采用310HRSS-150自动全洛氏硬度计测试激光熔覆层硬度, 加载载荷为50 N, 加载10 s。

2) 使用ICP-AES等离子耦合发射光谱仪方法测试不锈钢粉末中的化学成分含量。

1.5 腐蚀试验

为研究电镀、激光熔覆等表面处理技术在煤矿井下环境的防腐性能, 液压支架行业内一般选用人造气氛腐蚀试验对新型表面处理工艺进行研究。人造气氛盐雾试验中的Cl⁻含量为50 g/L, 煤矿井下Cl⁻含量为0.1~2.0 g/L, 盐雾试验中的离子浓度远大于煤矿井下环境的有害离子浓度, 更能反映表面处理工艺、材料和产品的优劣。

根据ISO 9277和GB/T 10125—1997《人造气氛腐蚀试验—盐雾试验》标准, 本文采用铜加速醋酸盐雾腐蚀试验(CASS试验)^[17-18], 试验条件如下:

1) 溶剂: 采用蒸馏水或去离子水。

2) 溶质: 氯化钠含量为(50±5) g/L, 氯化铜(CuCl₂·H₂O)含量为(0.26±0.02) g/L, 即(0.205±0.015) g/L无水氯化铜。

3) pH值: 用0.5 ml/L的冰乙酸调整溶液pH值的范围为3.1~3.3。

4) 过滤: 为避免堵塞喷嘴, 溶液在使用之前必须过滤。

5) 温度: 盐雾箱内温度为(50±2)℃。

6) 沉降速度为每80 cm²面积上1~2 mL/h。

2 试验结果与讨论

2.1 不锈钢粉末化学成分

铁基不锈钢由于其良好的耐磨防腐特性和成本优势在国内广泛应用,笔者选取 a、b、c 三种不锈钢粉末进行研究。a、b、c 三种不锈钢粉末的化学成分见表 2。分析表 2 可知,3 种粉末中的 Si、Mn、Mo 三种化学元素的含量相当,变化不大;区别主要在 C、Cr、Ni、Co、B 等化学元素。粉末 a 中的 C、Co 含量最高,B 含量最低;粉末 b 中的 C 含量最低,Cr、Ni 含量最高;粉末 c 中 B 含量最高,Cr、Ni、Co 含量最低。

表 2 不锈钢粉末的主要化学成分

Table 2 Chemical composition of different stainless

粉末 种类	质量分数/%							%
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Co	
a	0.25	0.62	0.11	18.26	2.87	0.02	0.89	0.05
b	0.15	0.61	0.15	20.31	3.84	0.02	0.35	0.11
c	0.19	0.64	0.12	16.13	2.16	0.01	0.13	0.93

从表 2 中 3 种粉末的化学成分看,Cr 的含量仅次于 Fe,是不锈钢中的重要元素,一般认为含量在 17% 以上能提高不锈钢的耐蚀性。Cr 不仅使铁基固溶体的电极电位提高,而且吸收铁的电子使铁钝化,从而提高不锈钢的耐蚀性能。Co、Ni 元素不仅能提高不锈钢的强度,保持良好的塑性和韧性,而且对酸碱有较高的耐腐蚀能力,在高温下有防锈和耐热能力。不锈钢中 Mo 元素的存在能提高材料对酸的抗蚀性,能够防止氯离子存在所产生的点蚀倾向。B 和 Si 等元素具有自脱氧和造渣能力,在合金粉末中对不锈钢、合金钢等多种基材有较好的适应性,在激光熔覆中能获得氧化物含量低、气孔率小的熔覆层。

2.2 激光熔覆层的性能

2.2.1 不同熔覆层的显微组织分析

图 1a、图 1b、图 1c 分别为粉末 a、b、c 激光熔覆后的金相显微组织全貌。3 种不锈钢粉末的组织结构类似,其中灰白色为马氏体,呈树枝状结晶和椭圆、颗粒形状分布,碳化物呈细长的块、条状分布于马氏体上。熔覆层的这种组织结构具有很高的耐磨性^[19]。图 1d 为熔覆层的扫描电镜图,从图中可看出熔覆层与基体的分界明显,激光束能使不同熔点的元素同时熔化,从而获得均匀的熔覆层。熔覆层的组织表明它与基体材料具有优良的结合力,由于

激光加热速度快、变形小、稀释率低,熔覆层元素不易被基体稀释,具有很高的实用价值^[20]。

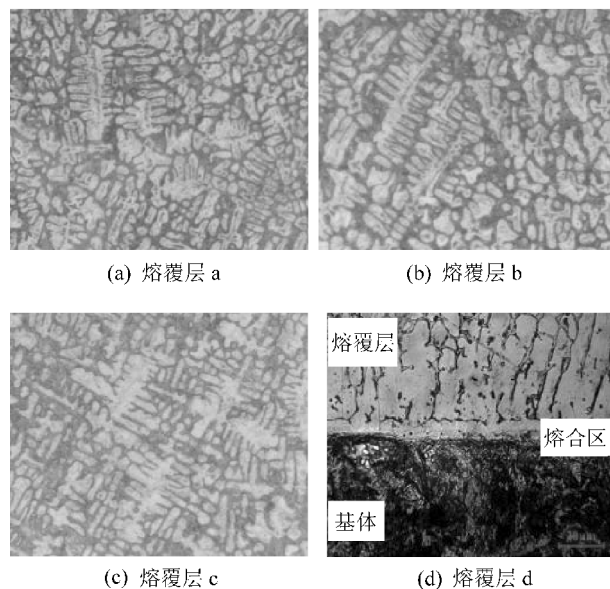


图 1 熔覆层 a、b、c 的金相组织和熔覆层 a 的 SEM 图像
Fig.1 Metallurgical structure of cladding layer a, b, c, and

SEM image of cladding layer a

2.2.2 不同熔覆层的显微硬度分析

不锈钢粉末中的合金元素不同,会影响熔覆层的硬度,表 3 为不同熔覆层的显微硬度。可见,粉末 c 的硬度最高,粉末 a 次之,粉末 b 的硬度最低。结合表 2 和表 3 进行分析,粉末 b 中的 Cr、Ni 含量最高,B 含量适中,C 含量最低,硬度是 3 种粉末中最低的,表明 B、C 对硬度的影响比 Cr、Ni 更明显;粉末 c 中的 B 含量最高,Cr、Ni 最低,但硬度却是最高,说明 B 含量对硬度的影响最明显;粉末 a 中的 C 含量是最高的,但硬度在三者中处于中间位置,说明 C 对熔覆层的硬度也有影响,但没有 B 对硬度的影响明显。试验结果说明,不锈钢粉末中 C 和 B 元

表 3 不同熔覆层的显微硬度

Table 3 Microhardness of different cladding layers

粉末种类	硬度/HRC	平均硬度/HRC
a	53.32	54.47
	54.89	
	55.21	
b	50.25	51.52
	51.32	
	52.98	
c	59.51	58.59
	58.82	
	57.46	

素的含量会影响熔覆层的硬度,但B元素对熔覆层硬度的影响更大。

2.2.3 不同熔覆层的耐腐蚀试验

防腐蚀性能是衡量熔覆层材料优劣的关键因素,对不同不锈钢粉末熔覆层进行盐雾耐腐蚀试验,结果如图2所示。可见,粉末c的耐腐蚀性能最差,盐雾试验2天出现红色锈蚀;粉末a和粉末b的耐腐蚀性能较好,盐雾试验15天无任何锈蚀。结合表3和图2进行分析,粉末c的平均硬度最高为HRC 58.59,但耐腐蚀性最差;粉末a和粉末b的硬度在HRC50~55的范围内,这2种粉末都有良好的耐腐蚀性能。结合表2和图2可看出,粉末c中的Cr、Ni、Co元素含量最低,耐蚀性最差;粉末a和粉末b中的Cr、Ni、Co含量较高,耐蚀性能较好。表明提高不锈钢粉末中的Cr、Ni、Co含量能够提高不锈钢熔覆层的耐蚀性能。

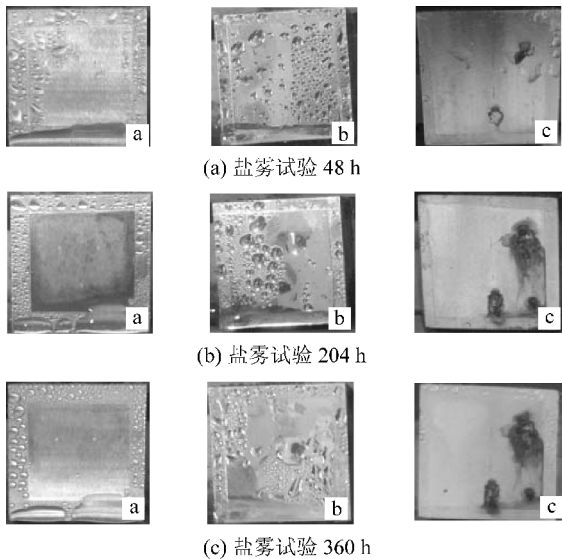


图2 不同熔覆层的酸性盐雾腐蚀试验

Fig.2 Acid-Salt spray testing of different cladding layers

粉末c制备的熔覆层并没有大面积腐蚀,只是在焊缝搭接处腐蚀严重,表明在激光熔覆过程中,焊道搭接处的合金成分变化较大,Cr、Ni等合金成分含量较低导致锈蚀严重。粉末c和另外2种粉末化学成分的最大差别是B元素含量最高,B元素能提高钢材的淬透性,具有淬硬倾向,虽然提高了熔覆层的硬度,在激光熔覆的搭接处会导致Cr、Ni等合金成分的降低,牺牲了熔覆层的耐蚀性能。

2.3 激光熔覆加工方案

目前,激光熔覆后比较成熟的3种加工方案见表4。由表4可知,方案1是车直接抛光,该方案的

加工效率最高,加工成本最低,但由于激光熔覆层硬度较高,在车床加工过程中存在让刀和颤纹,给后续的抛光带来很大难度,粗糙度很难控制,成品质量不稳定;方案2在方案1的基础上增加精车工序,这种加工方式能消除一刀加工带来的问题,精车后工序表面粗糙度更高,但相比方案1,方案2中活柱的加工效率降低68%,成本增加29%,中缸加工效率降低73%,成本增加28%;方案3是采用磨削代替精车,加工效率略高于方案2,但磨床加工成本低于车床,因此成本比方案2更低,磨削后表面粗糙度更小,也更有利于抛光。综合考虑成品质量稳定性和生产组织方式,选用方案3,即车-磨-抛光作为激光熔覆层的加工工艺方案^[21]。

表4 不同加工方案的成本和效率分析

Table 4 Analysis results for cost and efficiency for different technological process

零部件	项目	方案1	方案2	方案3
活柱 φ420 mm× 3 380 mm	相对加工时 间/(min·件 ⁻¹)	100	168	127
	相对加工成 本/(元·件 ⁻¹)	100	129	109
中缸 φ450 mm× 3 125 mm	相对加工时间/ (min·件 ⁻¹)	100	173	132
	相对加工成本/ (元·件 ⁻¹)	100	128	107

2.4 激光熔覆在8.8 m 液压支架中的应用

激光熔覆技术本质上属于焊接,虽然铁基不锈钢粉末a和b的耐腐蚀性能均比较好,但粉末a的C含量较高,熔覆工艺性较b差,因而选用粉末b作为实际应用的激光熔覆用粉末。

前期,激光熔覆技术已经在8.8 m超大采高液压支架上成功应用,使用铁基不锈钢粉末b制备的立柱和千斤顶熔覆层硬度为HRC 50~55,在经过6万次压架试验后,激光熔覆层表现良好,未出现脱落等问题,活塞杆和中缸外径变化0.01 mm,表现出良好的耐磨性能,立柱密封也未出现漏液、渗液等问题。试验结果说明激光熔覆技术可以满足8.8 m超大采高液压支架的使用要求。

3 结 论

1) SEM图像显示激光熔覆层的稀释率低,熔覆层与基体有很明显的分界;金相组织显示3种不锈钢粉末的组织相似,灰白色的马氏体呈树枝状结晶

和椭圆、颗粒形状分布。

2) 不锈钢粉末中 C 和 B 元素的含量都会影响熔覆层的硬度,但 B 元素对熔覆层硬度的影响更大,随着 B 元素含量增加,熔覆层硬度越高;降低不锈钢合金粉末中 C、B 元素的含量,提高 Cr、Ni、Co 的含量可以提高熔覆层的耐腐蚀性能。硬度范围在 HRC 50~55 范围内的熔覆层具有良好的防腐性能。

3) 通过对激光熔覆层不同加工方案的效率和成本进行对比,选用车-磨-抛光作为最优工艺方案。

4) 采用粉末 b 制备的激光熔覆立柱已在 8.8 m 超大采高液压支架上成功应用。当前,激光熔覆技术没有统一的行业标准和国家标准,导致不同企业熔覆的产品质量参差不齐,造成了不良的市场影响,推动建立激光熔覆技术标准是以后研究的方向。

参考文献 (References):

- [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): 16-19.
WANG Zhihua. Corrosion mechanism and protection techniques of columns of hydraulic supports [J]. Mining & Processing Equipment, 2011, 39(9): 16-19.
- [2] 马峰, 陈华辉, 潘俊艳. 煤矿综采设备的腐蚀机理及其防腐措施[J]. 煤矿机械, 2015, 36(7): 210-212.
MA Feng, CHEN Huahui, PAN Junyan. Corrosion mechanism of fully mechanized coal mining equipment and anti corrosion measures [J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(7): 210-212.
- [3] 郭爱军, 鲍崇高, 谷丽东, 等. 煤矿机械工程材料应用存在的问题及对策[J]. 煤矿机械, 2014, 35(12): 19-21.
GUO Aijun, BAO Chonggao, GU Lidong, et al. Problems and countermeasures of coal mine mechanical engineering materials application [J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(12): 19-21.
- [4] 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.
YANG Qingdong, SU Lunchang, DONG chunchun, et al. properties of Fe-based alloy cladding layers on hydraulic support column steel 27SiMn [J]. China Surface Engineering, 2013, 26(6): 42-47.
- [5] 孙晋明, 喻尊璞. 我国煤矿防腐方法剖析[J]. 煤炭科学技术, 1994, 22(6): 7-10.
SUN Jinming, YU Zunpu. Deep analysis on anti corrosion methods used in China coal mines [J]. Coal Science and Technology, 1994, 22(6): 7-10.
- [6] 任怀伟. 液压支架关键零部件材料性能分析及工艺研究[J]. 煤矿开采, 2015, 20(4): 1-4.

- REN Huaiwei. Analysis of key components' material property of powered support and technique [J]. Coal Mining Technology, 2015, 20(4): 1-4.
- [7] 纪正君, 张海英. 煤矿液压支架立柱(活塞杆)表面耐腐蚀处理工艺研究[J]. 煤矿机械, 2016, 37(4): 89-90.
JI Zhengjun, ZHANG Haiying. Research about technology of corrosion treatment process of coal mine hydraulic support column (piston rod) [J]. Coal Mine Machinery, 2016, 37(4): 89-90.
- [8] MT 76—2011, 液压支架用乳化油、浓缩液及其高含水液液压 [S].
- [9] 王斌修, 李成彪. 激光熔覆技术研究现状及展望[J]. 机床与液压, 2013, 41(7): 192-193.
WANG Binxiu, LI Chengbin. Research status and prospects of laser cladding [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(7): 192-193.
- [10] HEMMATH I, OCELI K V, HOSSON J Th M De. The effect of cladding speed on phase constitution and properties of AISI 431 stainless steel laser deposited coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205: 5235-5239.
- [11] 高东强, 王蕊, 陈威, 等. 激光熔覆改善材料性能的研究进展[J]. 热加工工艺, 2017, 46(12): 14-18.
GAO Dongqiang, WANG Rui, CHEN Wei, et al. Research progress of improving material properties by laser cladding [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(12): 14-18.
- [12] 程相榜, 孟贺超, 张自强. 液压千斤顶活塞杆用激光熔覆研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 249-255.
CHENG Xiangbang, MENG Hechao, ZHANG Ziqiang. Laser Cladding for Piston Rods of Hydraulic Jacks [J]. Surface Technology, 2017, 46(6): 249-255.
- [13] 董世运, 马运哲, 徐滨士, 等. 激光熔覆材料研究现状[J]. 材料导报, 2006, 20(6): 5-9.
DONG Shiyun, MA Yunzhe, XU Binshi, et al. Current status of material for laser cladding [J]. Materials Review, 2006, 20(6): 5-9.
- [14] 尹燕, 李海龙, 张瑞华, 等. 单体液压支柱激光熔覆层的组织与摩擦学特性[J]. 热加工工艺, 2015, 44(10): 101-104.
YIN Yan, LI Hailong, ZHANG Ruihua, et al. Microstructure and tribological properties of laser cladding layer on hydraulic support [J]. Hot Working Technology, 2015, 44(10): 101-104.
- [15] 申卫国, 方艳, 董玲, 等. 液压支架激光熔覆不锈钢合金涂层的实验研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(18): 2537-2538.
SHEN Weiguo, FANG Yang, DONG Ling, et al. Experimental study of stainless steel alloy coating fabricated by laser cladding onto hydraulic support [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(18): 2537-2538.
- [16] 高中堂, 谭金强, 郭卫, 等. 镍基和铁基激光熔覆材料对熔覆层组织及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(20): 161-164.

(下转第 228 页)

- 2010, 27(4): 35-38.
- [6] 曾梅,戴爱军,赵蒙,等.木质素改性水煤浆添加剂研究现状及发展趋势[J].洁净煤技术,2014,20(5):49-52.
ZENG Mei, DAI AiJun, ZHAO Meng, *et al.* Research status and development trend of modified lignin additives for coal water mixture [J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(5): 49-52.
- [7] 张菲菲.水煤浆添加剂研究进展浅析[J].煤炭技术,2016,35(2):302-304.
Zhang Feifei. Research progress of water coal slurry additives [J]. Coal Technology, 2016, 35(2): 302-304.
- [8] 段清兵.中国水煤浆技术应用现状与发展前景[J].煤炭科学技术,2015,43(1):129-133.
DUAN Qingbin. Application status and development prospect of coal water mixture technology in China [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 129-133.
- [9] 许杰,丁立明,刘铭,等.基于萘系添加剂的复配试验研究[J].广东化工,2015,42(23):1-2.
XU Jie, DING Liming, LIU Ming, *et al.* Study on the compound test based on naphthalene series additives [J]. Guangdong Chemical, 2015, 42(23): 1-2.
- [10] 戴财胜,高旭丽.木质素制神华煤水煤浆添加剂[J].煤炭学报,2012,37(06):1034-1038.
DAI Caisheng, GAO Xuli. The synthesis of coal water slurry additive for Shenhua coal from lignin [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6): 1034-1038.
- [11] 孙美洁,郑剑平,楚天成,等.分散剂对褐煤水煤浆稳定性的影响研究[J].煤炭科学技术,2015,43(7):136-140.
SUN Meijie, ZHENG Jianping, CHU Tiancheng, *et al.* Study on dispersant affected to stability of lignite coal water slurry [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(7): 136-140.
- [12] 孟献梁,王红林,吴国光,等.聚羧酸系水煤浆分散剂对高灰煤泥成浆性的研究[J].煤炭科学技术,2013,41(10):121-124.
MENG XianLiang, WANG Honglin, WU Guoguang, *et al.* Study on polycarboxylate series dispersant of coal water slurry affected to slurry ability of high ash slime [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(10): 121-124.
- [13] 王玥,杨东杰,楼宏铭,等.脂肪族磺酸盐分散剂对低阶煤制浆性能的影响[J].煤炭转化,2009,32(4):52-57.
WANG Yue, YANG Dongjie, LOU Hongming, *et al.* Influence of sulfonated acetone-formaldehyde resin applied as dispersant on low rank coal-water slurry [J]. Coal Conversion, 2009, 32(4): 52-57.
- [14] 段清兵.分级研磨低阶煤高浓度水煤浆制备技术与应用[J].煤炭科学技术,2012,40(10):113-115,103.
DUAN Qingbin. Application of high concentration coal water slurry preparation technology with graded grinding low rank coal [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(10): 113-115, 103.
- [15] GB/T 18856.2—2008,水煤浆试验方法第2部分:浓度测定[S].
- [16] GB/T 18856.4—2008,水煤浆试验方法第4部分:表观黏度测定[S].
- [17] 胡学寅.新型水煤浆添加剂的开发前景[J].能源技术,2002,23(2):62-63.
HU Xueyin. Developing foreground on new type addition of coal-water slurry [J]. Energy Technology, 2002, 23(2): 62-63.
- [18] 张晓梅,邓成刚,唐军,等.萘系高效减水剂添加剂的合成及作用机理研究[J].安徽理工大学学报:自然科学版,2004,24(1):67-70.
ZHANG Xiaomei, DENG Chenggang, TANG Jun, *et al.* Synthesis and working mechanism of the additive for beatnaphaline sulfonated-base super plasticizer [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science, 2004, 24(1): 67-70.
- [19] 周春明,曹青,常宏宏.分散剂结构对水煤浆性能的影响[J].日用化学工业,2015,45(7):404-408.
ZHOU Chunming, CAO Qing, CHANG Honghong. Influence of dispersant structure on the performance of coal-water slurry [J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2015, 45(7): 404-408.
- [20] 王宇飞,严捍东,全志龙.脂肪族磺酸盐减水剂合成方法综述和分析[J].材料导报,2012,26(19):81-85.
WANG Yufei, YAN Handong, QUAN Zhilong. Review and analysis of synthetic method of sulfonated aliphatics series water-reducer [J]. Materials Review, 2012, 26(19): 81-85.

(上接第159页)

- GAO Zhongtang, TAN Jinqiang, GUO Wei, *et al.* Effect of Ni-based and Fe-based laser cladding materials on microstructure and property of cladding layer [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(20): 161-164.
- [17] GB/T 10125—1997,人造气氛腐蚀试验:盐雾试验[S].
- [19] ISO 9227, Corrosion tests in artificial atmospheres—salt spray tests[S].
- [18] 黄振东.钢铁金相图谱[M].北京:中国科技文化出版社,2005.
- [20] HEMMATI I, OCEH K V, HOSSON J Th M De. Microstructural characterization of AISI 431 martensitic stainless steel laser-deposited coatings [J]. Journal of Materials Science, 2011, 46: 3405-3414.
- [21] 刘晋平.激光熔覆修复液压支架立柱活柱工艺研究[J].能源与节能,2017(8):124-125.
LIU Jinping. Research on the process of repairing movable column of hydraulic support by laser cladding technology [J]. Energy and Energy Conservation, 2017(8): 124-125.