

液压支架立柱绿色再制造技术研究与应用

潘宇量¹, 樊宇^{1*}, 孙智¹, 项武博², 张许阳¹, 陈则阳¹

(1 中国矿业大学材料科学与工程学院, 徐州 221116; 2 山西久鼎伟业环保科技有限公司, 山西 031400)

摘要: 对电镀铬、激光熔覆、包覆焊工艺处理后的 27SiMn 钢涂层的显微硬度、耐磨性、耐腐蚀性进行了测试与比较, 并考量实际生产因素, 对三种工艺的经济效益和环境友好性进行了对比。结果表明, 电镀铬涂层表现出较高的硬度和耐磨性, 但耐腐蚀性较差; 激光熔覆涂层的硬度和耐磨性较低, 但耐腐蚀性较好; 包覆焊涂层硬度为 498.9 HV, 为电镀铬涂层的 0.74 倍, 磨损失重为 0.03862 g, 为电镀铬涂层的 1.34 倍, 腐蚀失重为 0.00126 g, 为电镀铬涂层的 0.12 倍、激光熔覆涂层的 0.76 倍, 在保持较高硬度和耐磨性的同时, 也能拥有优异的耐腐蚀性能。同时, 包覆焊工艺的生产成本极低, 污染极小, 对矿用支架行业拥有长期的经济效益和社会效益, 预测包覆焊工艺会逐渐取代电镀铬、激光熔覆工艺, 成为未来液压支架立柱再制造技术的发展趋势。

关键词: 液压支架立柱; 修复技术; 包覆焊; 耐磨性; 耐腐蚀性。

0 序言

液压支架是一种用于支撑煤矿井下回采工作面顶板及煤壁的设备, 液压支架在煤矿井下生产中发挥着重要的支护作用, 是综合机械化采煤必不可少的设备^[1]。液压支架立柱是液压支架的关键承载部件, 承载综采面顶板作用于液压支架的载荷并传递到底座上^[2]。液压支架立柱的工况条件及其苛刻, 主要是在腐蚀、摩擦、冲击、重载及振动等条件下工作。另外, 整体设备处在各种有毒气体、粉尘及水汽等的包围中, 极易遭受腐蚀。上文提到, 液压支架立柱的主要失效形式是腐蚀与磨损, 因此立柱的外表面处理技术成为影响液压支架使用寿命的关键因素^[3]。纵观液压支架立柱的表面修复工艺的发展历史, 主流技术大致可以分为两代^[4]。第一代为电镀铬及化学镀技术。化学镀技术是在无外加电流的情况下借助合适的还原剂, 使镀液中金属离子还原成金属, 并沉积到零件表面的镀覆方法。电镀铬技术, 目前国内采用最多的方法是先以乳白铬打底层, 再镀硬铬, 或者先以锡青铜打底, 再镀硬铬^[5]。尽管这些镀层具有显微硬度高、摩擦因数小和耐磨性高等优点, 可起到机械保护作用, 但镀层较薄, 极易产生微裂纹和孔隙等缺陷。在使用过程中, 这样的微裂纹或孔隙一旦穿透立柱表面的镀层, 就会形成电化学腐蚀 (如图 1-1a 所示), 造成镀层

鼓泡、起皮甚至脱落, 从而破坏整个密封圈, 导致立柱失效。

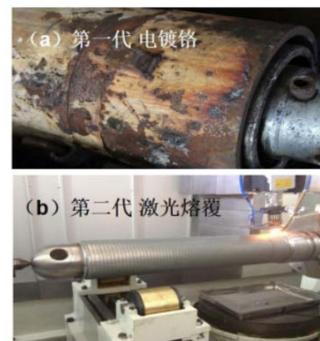


图 1-1 液压支架立柱两代表面处理技术: (a) 电镀铬、(b) 激光熔覆

因而, 在使用过程中, 应当十分注意保护立柱表面镀层的完整, 才能起到较好的保护作用^[6]。否则, 将会缩减立柱使用寿命, 增加液压支架整体维护成本, 严重还将危及液压支架产品的使用安全性, 造成安全事故等。而且, 第一代表面修复技术还会产生大量含重金属离子 (如 Cr^{6+}) 的电镀废水以及各类酸雾废气, 不仅严重危害操作工人的身体健康, 还会对环境造成十分严重的污染。第二代为等离子喷涂与激光熔覆技术, 二者的本质均为粉末加工技术, 尤其是激光熔覆技术 (如图 1-1b 所示), 在近年来逐渐兴起并广泛应用。激光熔覆技术的原理是使用大功

率激光束聚集极高的能量，瞬间将零件表面预置的合金粉完全熔化，同时使被加工件表面熔化，两者形成冶金结合，从而获得致密的熔覆层。经过精加工后，熔覆层的厚度一般达到 0.5-1 mm，是电镀层的 5~10 倍，且不同于电镀层与基材之间所形成的机械结合，熔覆层与基材间是呈更为牢固的冶金结合。由于激光束能量集中密实的特点，能量绝大部分是用于熔化粉末，只有少部分能量用于熔化基材，因而对基材表面形成微熔，而且基体热影响区极小，约为 0.1~0.2 mm，从而有效地保证了基体材料的性能和形状不发生改变^[7]。经此技术处理后的立柱性能远优于第一代的技术，目前受到广泛的关注，但是，第二代表面修复技术都是采用合金粉末作为原材料，粉末制作的周期较长且成本较高，且在熔覆的过程中由于加热快，冷却快，焊接速度快，也会产生微裂纹、气孔以及残余应力等缺陷^[4]。另外，在生产过程中，粉末的使用导致空气中的浮颗粒物增多，严重危害操作工人的身体健康。近年来，我国环境受到严重污染，环境治理刻不容缓。国家环保局下令重点整治各地工业污染。提倡绿色工业生产理念，为此国家环保部出台史上最严《中华人民共和国环境保护法》。因此技术落后、高污染、高能耗的电镀铬必将逐步被新工艺所取代。十九大报告提出“建立健全绿色低碳循环发展的经济体系，构建市场导向的绿色技术创新体系，推

进资源全面节约和循环利用”。作为矿山机械关键部件，液压支架立柱传统电镀铬与激光熔覆技术普遍存在对环境不友好和成本偏高等问题。寻求高质量、长寿命、低成本的液压支架立柱绿色再制造技术成为煤炭行业发展的重中之重。因此，我们提出一种新的绿色再制造技术，将其称之为包覆焊技术，其核心思想为：以不锈钢管替代电镀层（电镀铬技术）或合金粉末（激光熔覆技术）作为立柱表面耐磨耐蚀材料，通过冷挤压产生塑性变形使不锈钢管与基层碳钢有机融合成一体。而其核心技术为：不锈钢选材、卷筒焊接与复合工艺技术（组合、镶熔与成型），如图 1-2 所示。

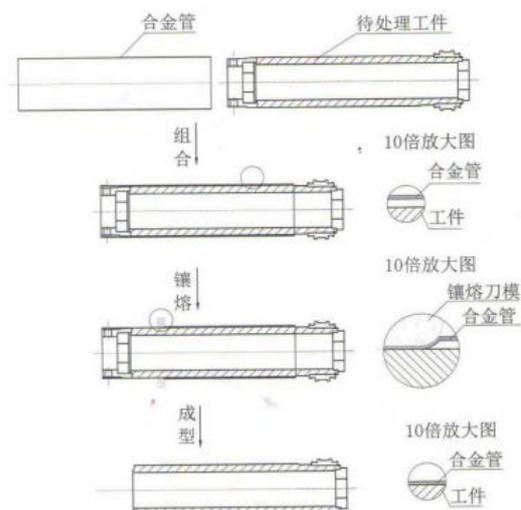


图 1-2 包覆焊核心思想与示意图

包覆焊在全生产过程中完全没有使用任何化学制品，也没有产生任何污染物，能耗极低，生产流程短，效率高，符合绿色生产的社会发展主题。在全国同行业内具有超前

性，提升立柱的制造技术水平同时降低制造成本，符合市场和行业需求，对矿用支架行业拥有长期的经济效益和社会效益。新的包覆焊技术是否能取代现有的电镀铬、激光熔覆等技术，成为本课题研究的重点问题。

1 实验方法

选择 27SiMn 钢作为实验基材。27SiMn 具有较高的强度和耐磨性，淬透性较高，冷

变形塑性中等，切削加工性能良好，焊接性能尚可，其主要化学成分见表 1-1，力学性能见表 1-2。

表 1-1 立柱材料 27SiMn 钢主要化学成分表 (wt.%)

元素	C	Si	Mn	V	Ni	P	S
含量/%	0.26~0.32	1.10~1.40	1.10~1.40	0.07~0.12	≤0.30	≤0.04	≤0.04

表 1-2 27SiMn 钢力学性能

硬度/HBS	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%	冲击吸收功/J
≤217	≥980	≥835	≥12	≥40	≥39

激光熔覆工艺所用粉末 Ni25 及包覆焊工艺所用包覆层 205 不锈钢的化学成分见表 1-3 和表 1-4。

表 1-3 Ni25 粉末主要化学成分表 (wt.%)

元素	C	Cr	Si	B	Fe	Ni
含量/%	<0.1	<0.5	2.5~3.5	1.3~1.6	<6.0	Bal.

元素	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
含量/%	0.12	≤0.75	14.0	18.0	1.5	≤0.06	≤0.03

表 1-4 205 不锈钢主要化学成分表 (wt.%)

采用 ZQ-80 智能自动金相切割机对 27SiMn 钢板进行切割，分别截取 15×15×10 mm、19×10×10 mm、10×20×1 mm 的方块作为基材，然后委托国内一工厂以铜锡合金作为打底层，镀层厚度为 25 μm，再在表面镀铬，厚度为 35 μm，镀层厚度达 60 μm，从而制成镀铬试样（其中 10×20×1 mm 尺寸的方块进行所有面的镀铬处理）。其中，15×15×10 mm 尺寸的方块用于制备硬度试样：依次使用 80 #、200 #、400 #、600 #、800 #、1000 #、1200 #、1500 #、2000 # 金相砂纸磨制带镀层的一面，注意保证均匀用力，尽量减少损伤；然后使用金相抛光机抛光呈镜面，用无水乙醇清洗表面并吹干后立即使用 4% 硝酸酒精（体积分数）作为化学腐蚀剂腐蚀镜面，当观察到表面开始变暗

后，再用无水乙醇冲洗掉表面腐蚀剂，吹干

后制成硬度试样（注意制好的样应立即进行金相观察和硬度测试或放进干燥箱内进行密封保存以防止表面被空气氧化）；根据 GB/T 12444-2006，将 19×10×10 mm 尺寸的方块用于制备磨损试样：将 19×10 mm 尺寸的那一面使用砂纸（80 #、200 #、400 #、800 #、1000 #、1500 #）打磨平整，清洗干燥后，制成磨损试样；根据 JBT7901-2001，将 10×20×1 mm 尺寸的方块用于制备腐蚀试样，除锈，再将各表面打磨平整，用酒精清洗表面，晾干后制成腐蚀试样。

委托国内某工厂对 27SiMn 钢板进行激光熔覆处理。熔覆材料选用 Ni25，熔覆厚度为 2 mm。设备采用波长为 980 nm，光斑尺寸为 12×3 mm 的 LASERTEL 4 kW 大功率

半导体激光器。然后采用线切割对钢板进行切割,切割尺寸与后续的制样方案同镀铬试样保持一致,从而获取激光熔覆工艺的硬度试样、磨损试样及腐蚀试样。

委托国内某工厂对外径为 100 mm、内径为 90 mm,高为 195 mm 的圆柱筒进行包覆焊处理,包覆层选用厚度为 1 mm 的 205 不锈钢板。然后采用线切割对钢板进行切割,切割尺寸及后的制样方案同镀铬样保持一致,从而获取包覆焊工艺的硬度试样、磨损试样及腐蚀试样。

随后针对各工艺试样进行硬度测试、耐磨性测试及耐蚀性测试。使用 TMVS-1S 显微维氏硬度计进行硬度测试,试验力设置为 100 N,保持时间设置为 10 s。

使用 M2000A 型磨损实验机进行耐磨性测试,试验载荷为 200 N,转速控制在 200 r/min,磨损时间控制在 2 h,磨损试样为上试样,GCr15 轴承钢对磨环为下试样,利用失重法评价试样的耐磨性能,计算其相对磨损率,如公式(1)所示:

$$v = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \quad (1)$$

2 实验结果

2.1 显微硬度比较

$$R = \frac{8.76 \times 10^7 \times (M_1 - M_2)}{St\rho}$$

由图 2-1 可

以看出,电镀铬涂层具有最高的显微硬度,达到 676.3 HV,激光熔覆涂层显微硬度最低,而包覆焊涂层显微硬度介于二者之间。电镀铬涂层表面的显微硬度最高,达到 676.3 HV。这主要是由于在电镀铬工艺的生产过程中,镀层表面反应生成的含水氧化铬硬度极高,从而使涂层表现出较高的表面显微硬度。激光熔覆涂层的表面显微硬度极低,仅为 292.9 HV,未达到电镀铬涂层硬度的一半。尽管激光熔覆工艺可以获得细小的

式中: v ——相对磨损率;

m_1 ——试验前的试样质量, g;

m_2 ——试验后的试样质量, g。

根据 JBT7901-2001《金属材料实验室均匀腐蚀全浸试验方法》设计腐蚀试验方案,试验时间控制在 72 h。利用失重法评价试样的耐腐蚀性能,计算其腐蚀速率,如公式(2)所示:

(2)

式中: R ——腐蚀速率, mm/a;

M_1 ——试验前的试样质量, g;

M_2 ——试验后的试样质量, g;

S ——试样的总面积, mm²;

t ——试验时间, h;

ρ ——材料密度, kg/m³。

熔覆层组织,有助于提高涂层的强度硬度,但是这种细晶强化效果有限,而 Ni25 合金粉末中含碳量较低,约为 0.1%,而基体材料 27SiMn 的碳含量也较低,偏低的碳含量限制了碳化物的形成,而碳化物在材料中通常在作为硬质相而存在的,它对材料强度和硬度的影响比细小的熔覆层组织所带来的细晶强化效果要大得多,因而最终涂层的显微硬度呈现整体偏低的状态,然而在井下这种工况条件及其苛刻的地方,如此低硬度的涂层显然无法满足长时间的高压工作,容易出现失效的情况。而包覆焊涂层的表面显微硬度不高,为 498.9 HV,约为电镀铬涂层的 0.74 倍,但却是激光熔覆层的 1.71 倍,主要原因是 205 不锈钢含碳量约为 0.12%,具有稳定的奥氏体组织,其强度和硬度受含碳量限制,均表现出不高的状态,但是相比起激光熔覆涂层中过少的碳化物硬质相,却又有所优势,因而其表面显微

硬度不高，但是也不算过低，完全满足立柱在使用时对硬度的要求。

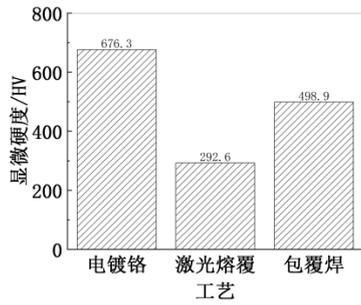


图 2-1 各工艺下涂层的显微硬度对比

1.2 耐磨性比较

由图 2-2 可以看出，激光熔覆涂层的磨损量和相对磨损率分别为 0.09207 g、0.00647，均为最高值，这意味着该种涂层的耐磨性能最差。而电镀铬涂层的磨损量和相对磨损率分别为 0.02873 g、0.00202，仅为激光熔覆涂层的 0.31 倍，表现出极高的耐磨性能，主要是因为电镀铬涂层的表面显微硬度为 676.3 HV，涂层的高硬度在很大程度上保证了高耐磨性。包覆焊涂层磨损量和相对磨损率分别为 0.03862 g、0.00271，约为激光熔覆涂层的 0.42 倍，电镀铬涂层的 1.34 倍，表现出不俗的耐磨性能。激光熔覆涂层过低的硬度和耐磨性在面对井下各种磨损时，无法满足长时间的工作，而过早失效；电镀涂层在硬度和耐磨性方面的优异表现，完全可以满足液压支架立柱在工况条件极其恶劣的井下长时间工作的要求，但是立柱表面的硬度和耐磨性并不是越高越好，包覆焊涂层在该方面不俗的性能同样可以满足液压支架立柱的工作需求。

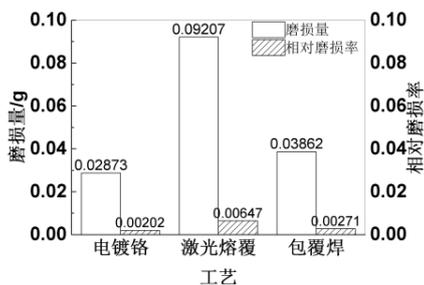
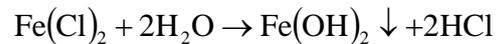
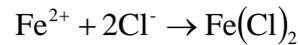


图 2-2 各工艺下涂层的磨损量及相对磨损率对比

1.3 耐蚀性比较

由图 3-4 可以看出，电镀铬涂层的腐蚀速率最高，达到 $3.69 \times 10^{-3} \text{ mm/a}$ ，表现为极差的耐腐蚀性能。虽然电镀铬涂层的硬度高达 676.3 HV，同时耐磨性也表现良好，但是在盐酸溶液的腐蚀条件下，由于 H^+ 本身就具有强烈的腐蚀性，另外，电镀铬涂层的孔隙及微裂纹等缺陷很多，溶液中的 Cl^- 会很快地渗入其中，从而到达基体，形成电化学腐蚀：电镀铬涂层作为阳极，基体材料 27SiMn 作为阴极失去电子产生 Fe^{2+} ，并发生如下反应：



反应形成的 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 沉淀在腐蚀处，不断堆积，从而产生自催化作用，导致腐蚀处的腐蚀反应加剧，形成的腐蚀产物越多，引起的膨胀力越大，当膨胀力大到一定程度时，就会造成镀层隆起，导致液压支架立柱失效。激光熔覆涂层的腐蚀速率为 $0.59 \times 10^{-3} \text{ mm/a}$ ，仅为电镀铬涂层的 0.16 倍，耐腐蚀性能表现良好。包覆焊涂层的腐蚀速率为 $0.45 \times 10^{-3} \text{ mm/a}$ ，为电镀铬涂层的 0.33 倍，激光熔覆涂层的 0.76 倍，耐腐蚀性能表现最好。主要原因是，不同于电镀铬涂层厚度仅有 $50 \sim 70 \mu\text{m}$ ，激光熔覆涂层和包覆焊涂层均较厚，一般能达到 $0.5 \text{ mm} \sim 2 \text{ mm}$ ，尽管激光熔覆涂层在加工过程中也会不可避免地产生孔隙和微裂纹，但是这些缺陷相比电镀铬涂层已经少得多；而包覆焊工艺由于加工过程的特殊性，成型的外表面甚至完全没有孔隙和微裂纹等缺陷，因而这两种涂层在腐蚀试验中由于溶液中的 Cl^- 在短时间内无法通过渗入涂层的孔隙和微裂纹的方式到达基体，从而导致电化学腐蚀无法形成，只能依靠 H^+ 的腐蚀性对涂层表面进行腐蚀，因此腐蚀速率较低，表现出优异的耐腐蚀性。

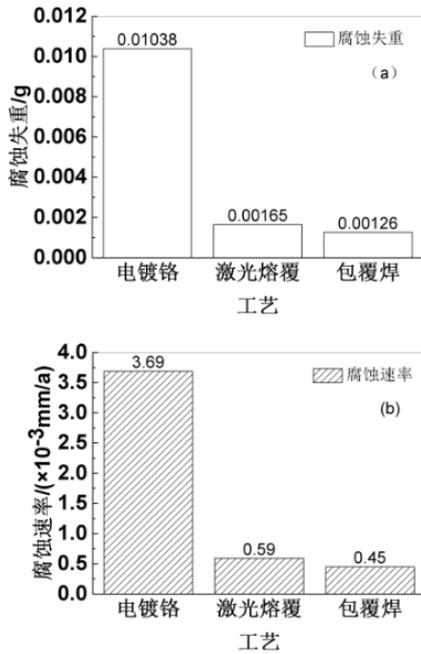


图 2-3 各工艺下涂层的腐蚀失重量对比 (a) 及腐蚀速率对比 (b)

3 实际生产因素考量

3.1 经济效益比较

表 3-1 各工艺设备投入及成本对比

工艺	设备/万元	每吨原料费/万元	每 m ² 成本/元
电镀铬	50~80	5.5~6 (电镀液)	450~550
激光熔覆	150~200	13~15 (粉末)	4750~5300
包覆焊	50~70	1.8~2.2 (不锈钢)	280~350

通过对厂家的调查询问,计算三种工艺的设备投入及成本等,计算方式如下:镀铬设备按全自动镀硬铬生产线,激光熔覆设备主要考虑激光器和送粉装置,包覆焊设备主要考虑卷曲装置、镶熔装置和焊接设备进行

计算;电镀铬原料费参考电镀液价格,激光熔覆原料费参考粉末价格,包覆焊原料费参考不锈钢价格;成本计算按每年 250 天,每天 20 小时,每小时生产 1.2 m²,并考虑人员工资、设备折旧与维护管理、电费、辅助工序成本以及地域差距等,所得结果如表 3-1 所示。

由表 3-1 可以看出,电镀铬工艺的设备投入不高,原料费和成本也较低,经济效益良好;而激光熔覆工艺的设备价格高昂,是电镀铬工艺的 3~4 倍,原料费甚至超过电镀铬工艺的两倍,成本达到电镀铬工艺的十倍多,经济效益偏低;反观包覆焊工艺,设备投入最低,原料费和成本也极低,表现出极佳的经济效益。

3.2 环境污染情况比较

电镀铬工艺在生产过程中由于电镀液的使用,会产生大量含重金属离子(如 Cr⁶⁺)的电镀废水以及各类酸雾废气,它们毒性极强,不仅会严重危害操作工人的身体健康,还容易污染地表水和地下水以及空气,从而危害到工厂附近人群的健康,可通过消化道、呼吸道、皮肤和黏膜侵入人体,铬对人体的毒害为全身性的,对皮肤黏膜的刺激作用,引起皮炎、湿疹,气管炎和鼻炎,引起变态反应并有致癌作用。由此可见,电镀铬工艺给人身安全和环境都带来十分严重的危害。激光熔覆工艺在生产过程中,由于粉末的使用,会产生大量含金属颗粒的悬浮颗粒物,从而造成严重的空气污染,对车间里工作人员的身体危害很大。包覆焊工艺所用的包覆层为不锈钢,在生产全过程中由于没有使用任何化学制品,因此不会产生任何污染物(如电镀废水、酸雾废气、颗粒悬浮物等),对人体完全无害,对环境也十分友好,且能耗极低,生产流程短,效率高,符合绿色生产的社会发展主题。

4 结论

本文以液压支架立柱为研究对象,分析比较了电镀锌、激光熔覆、包覆焊三种技术的立柱表面防护层的硬度、耐磨性、耐腐蚀性等使用性能,并综合考虑经济效益、环境污染情况等实际生产因素,研究结果如下:

- (1) 电镀锌涂层的表面显微硬度最高,相对磨损率最低,表现出极佳的耐磨性;激光熔覆涂层的硬度极低,耐磨性也不佳;包覆焊涂层的表面硬度达到 498.9 HV,是激光熔覆的涂层的 1.71 倍,相对磨损量为 0.00271,是激光熔覆的涂层的 0.42 倍,耐磨性表现良好;电镀锌涂层的耐腐蚀性最差,腐蚀失重高达 0.01038 g,腐蚀速率为 3.69×10^{-3} mm/a;而激光熔覆涂层的腐蚀速率为 0.59×10^{-3} mm/a,仅为电镀锌涂层的 0.16 倍,包覆焊涂层的腐蚀速率为 0.45×10^{-3} mm/a,仅为电镀锌涂层的 0.12 倍,均表现出优异的耐腐蚀性能。
- (2) 对比分析三种工艺设备投入、成本等经济效益问题,以及环境污染情况等社会问题,电镀锌工艺经济效益较高,但会产生电镀废水以及各类酸雾废气,对环境的污染十分严重;激光熔覆工艺的设备投入及成本费均偏高,还会使空气中的悬浮颗粒物增多,造成严重的空气污

染;而包覆焊工艺的设备投入较低,成本低廉,表现出极优的经济效益,而且生产过程中没有使用任何化学制品,无电镀废水、酸雾废气、颗粒悬浮物的产生,对人体完全无害,对环境也十分友好。

- (3) 综合考虑三种工艺使用性能、经济效益、环境友好性等方面,包覆焊工艺表现出明显的优势:一方面,不同于电镀锌涂层高硬度、高耐磨性却低耐腐蚀性及激光熔覆涂层的高耐腐蚀性却低硬度、低耐磨性的特点,包覆焊涂层在拥有较高硬度、耐磨性的同时,也能拥有极高的耐腐蚀性;另一方面,包覆焊工艺避免了电镀锌工艺和激光熔覆工艺的污染严重、成本较高、缺陷较多的问题,其生产成本极低,工人操作难度不大,在全生产过程中完全没有使用任何化学制品,也不会产生任何污染物,能耗极低,生产流程短,效率高,符合绿色生产的社会发展主题,在提升立柱的制造技术水平的同时降低了制造成本,符合市场和行业需求,对矿用支架行业拥有长期的经济效益和社会效益,预测包覆焊工艺完全可以取代电镀锌、激光熔覆工艺,成为未来液压支架立柱绿色再制造技术的发展趋势。

参考文献

- [1] 贾清华, 孟飞. 浅谈激光熔覆技术在液压支架立柱修复中的应用[J]. 同煤科技, 2018, 159(1): 17-19.
- [2] 许兴波, 黎文强, 丁紫阳, 王腾飞, 韩光普. 液压支架立柱表面修复技术的研究[J]. 中州煤炭, 2015, 235(7): 95-97.
- [3] Dong Z, Wang S, Chang H. Mechanisms and Kinematics of Hydraulic Support for Top-Coal Caving[J]. International Journal of Mining Science and Technology. 2001, 11(2): 155-158.
- [4] 郭跃. 激光包覆焊焊接制备复合层研究[D]. 中国矿业大学, 2017.
- [5] 胡景波. 电镀技术在床上煤矿机械制造业中的应用及进展[J]. 电镀与环保, 1991(1): 6-10.
- [6] 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.

- [7] 高宇. 激光熔覆技术在液压支架立柱再制造中的应用[J]. 煤矿现代化, 2018, 143(2): 84-85+88.

作者简介: 潘宇量, 男, 1996 年出生, 中国矿业大学本科毕业; Email: 1726163370@qq.com.

通讯作者: 樊宇, 男, 1983 年出生, 中国矿业大学 博士 副教授; Email: fanyu@cumt.edu.cn

仅供交流



江苏船舶微信公众号



江苏船舶网上投稿系统