

液压千斤顶活塞杆用激光熔覆研究进展

程相榜, 孟贺超, 张自强

(郑州煤矿机械集团股份有限公司, 郑州 450016)

摘 要: 综述了液压千斤顶活塞杆激光熔覆的研究进展, 包括材料体系、耐蚀性能、耐磨性能、硬度、疲劳性能以及熔覆效率等方面。探讨了活塞杆常用熔覆层耐蚀性能的评价方法、性能参数及影响因素。各种试验结果表明, 熔覆层的稀释和表面缺陷对耐蚀性能有不利影响, 应通过工艺过程控制, 同时完善检测手段; 分析了液压千斤顶活塞杆的磨损机理及评价方法, 重点探讨了常用材料在三体磨粒磨损与二体磨粒磨损工况下的耐磨性能, 发现三体磨粒磨损和二体磨粒磨损对材料的硬度要求不同; 考虑到第二相硬化导致耐蚀性能的降低, 不应刻意通过第二相强化手段提高材料硬度而保证耐磨性能, 应通过结构设计和维护保养避免磨粒磨损, 在此前提下, 保证熔覆层硬度在 450HV 左右是合适的。激光熔覆导致材料疲劳寿命的降低, 主要原因在于残余拉应力和表面缺陷。鉴于加工硬化对熔覆层硬度和应力状态的影响, 应进一步加强在疲劳寿命方面的研究, 以进一步加快应用。为提高熔覆效率, 在保证低稀释率的前提下, 通过降低熔覆层的厚度, 进而提高熔覆效率的方法是一种新的研究方向。

关键词: 活塞杆; 激光熔覆; 腐蚀; 磨损; 疲劳; 熔覆效率

中图分类号: TG174.4; TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)06-0249-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.06.040

Laser Cladding for Piston Rods of Hydraulic Jacks

CHENG Xiang-bang, MENG He-chao, ZHANG Zi-qiang

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

ABSTRACT: The research progress of laser cladding for piston rods of hydraulic jacks, including material system, corrosion resistance, wear resistance, hardness, fatigue property and cladding efficiency, was reviewed. Evaluation methods, performance parameters and influencing factors of corrosion resistance of common cladding layer on piston rods were discussed. Various tests indicated that dilution and surface defect of cladding layer had adverse effect on corrosion resistance. Surface defects should be controlled through cladding processing and detection means should be improved. Wear mechanism and evaluations methods were analyzed, and the emphasis was laid on the wear resistance of common cladding layer under three-body and two-body abrasive wear, respectively. It was found that requirements for coating hardness were different under different wear condition; the coating hardness should not be increased deliberately to guarantee wear resistance in second phase strengthening method since second phase hardening might reduce corrosion resistance. Abrasive wear should be prevented through structural design and maintenance. Under this premise, proper coating hardness should be 450HV. Fatigue life reduction after laser cladding was caused by residual tension stress and surface defect. Due to beneficial effects of work-hardening on stress status and coating hardness, study on fatigue life should be enhanced to accelerate application. It was a new research orientation to improve cladding efficiency by reducing thickness of cladding layer at low dilution rate.

KEY WORDS: piston rods; laser cladding; corrosion; wear; fatigue; cladding efficiency

收稿日期: 2017-01-20; 修订日期: 2017-03-20

Received: 2017-01-20; Revised: 2017-03-20

作者简介: 程相榜 (1984—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为表面处理、焊接工艺。

Biography: CHENG Xiang-bang (1984—), Male, Master, Engineer, Research focus: surface engineering and welding.

液压千斤顶（图 1）广泛应用于工程机械、水利工程、海洋钻井平台、煤矿开采等领域^[1-4]，由于活塞杆长期暴露于大气、海水、矿井等腐蚀环境，表面易发生腐蚀，需对其进行表面处理以提高其耐蚀性能。传统的表面处理技术主要有电镀、热喷涂（等离子喷涂、HVOF 喷涂）等，但制备的涂层存在孔隙且结合强度低，导致活塞杆表面经常发生点蚀、涂层脱落等现象^[5-7]，在往复运动中造成液压千斤顶密封损坏，进而导致漏液等功能异常，影响设备的正常使用。激光熔覆由于具有涂层致密、热输入小、绿色环保等优势^[8-11]，在液压千斤顶活塞杆领域的研究和应用逐渐增多。但激光熔覆存在效率低、熔覆材料选择和涂层性能评价方面缺乏统一标准等问题，制约着激光熔覆在本领域的进一步应用和发展。本文将着重从耐蚀性能、耐磨性能、疲劳性能以及熔覆效率等方面进行综述，并对需要解决的问题进行展望和分析。

1 激光熔覆材料体系

适宜进行激光熔覆的材料有镍基、钴基、铁基、铜

基、钛基以及金属复合材料、陶瓷等多种体系^[11-14]。液压千斤顶活塞杆材料主要为调质钢，考虑到激光熔覆层与基体材料的冶金相容性以及耐蚀和耐磨性能的要求，文献报道的液压千斤顶活塞杆常用激光熔覆材料体系主要有镍基、钴基和铁基，其主要化学成分如表 1。

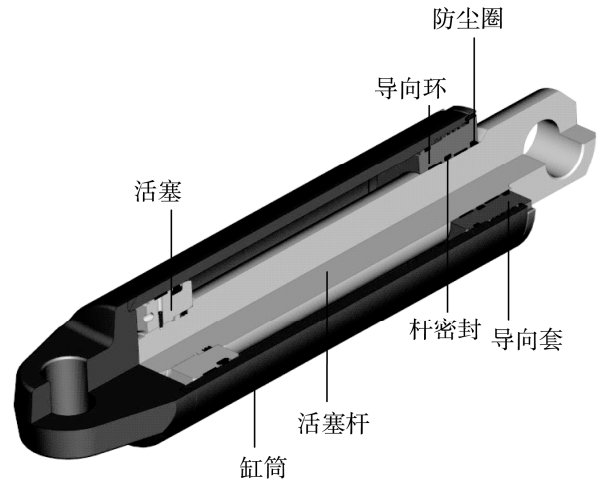


图 1 液压千斤顶示意图
Fig.1 Cross-sectional view of hydraulic jack

表 1 液压千斤顶活塞杆常用激光熔覆材料体系
Tab.1 The common used coating materials for pistons rod of hydraulic jack wt%

Materials	Grade	The main chemical composition				
		Fe	Cr	Ni	Co	Mo
Ni-based	Inconel 625 ^[15,16]	≤5.0	20 ~ 23	Bal.	≤1.0	8 ~ 10
	Stellite 6 ^[15]		27 ~ 32		Bal.	
Co-based	Stellite 21 ^[15-17]		26 ~ 29	2.0 ~ 3.0	Bal.	4.5 ~ 6.0
	Ultimet ^[16-19]	3	26	9	Bal.	5
	Micro-Melt® CCW ^[15,20]	≤2.0	28	10	Bal.	5.5
Fe-based	431L ^[15]	Bal.	16 ~ 18	1.5 ~ 2.5		
	316L ^[15]	Bal.	16 ~ 18	10 ~ 14		2 ~ 3

2 熔覆层耐蚀性能评价

根据文献报道，液压千斤顶活塞杆表面涂层最常见的失效形式是腐蚀^[5-7]，耐蚀性能是激光熔覆层的首要性能指标，研究人员采用了多种方法评价激光熔覆层的耐蚀性能。

2.1 盐雾实验

盐雾实验是最常见的耐蚀性能评价方法，广泛应用于金属材料、电镀层、热喷涂、油漆、防锈剂等耐蚀性能评价^[21-24]。根据 ISO 9227^[25]，盐雾实验分为中性（NSS）、酸性（AASS）和铜加速（CASS）三种。为进一步验证盐雾实验后腐蚀产物对液压千斤顶密封性能的影响，美国汽车工程师协会标准 SAE

J1333^[26]规定在盐雾实验后进行 10000 次油缸偏载全行程实验，然后进行油缸泄露检测。

由于活塞杆用激光熔覆层均为耐蚀合金，材料本身耐盐雾性能好，因此，盐雾实验往往得不到明显结果^[5]。Tuominen J 等人^[15]用盐雾实验研究了涂层厚度为 0.8 ~ 1.0 mm 的 Inconel 625、Stellite 6、Stellite 21、316L、431L 激光熔覆层的耐蚀性能。结果发现，经过 500 h 的 AASS 实验，这几种材料均未发生锈蚀现象，保护等级为 10 级，无法进行材料耐蚀排序。Pajukoski H 等人^[27]用热丝激光熔覆制备了具有不同 Fe 含量（质量分数，全文同）的 Inconel 625，经过 2000 h AASS 实验，Fe 含量为 1.6% 的涂层未发生任何腐蚀，而 Fe 含量为 3.6%、4.4%、6.0%、7.4% 的涂层均发生了不同程度的腐蚀，这是由于高的稀释率导致涂层局部富 Fe。

2.2 盐滴实验

盐雾实验是恒温恒湿实验,但自然界几乎不存在恒温恒湿的腐蚀环境,大多是干湿交替的环境。为模拟干湿交替环境下的腐蚀实验,在 ISO 14993^[28]的基础上, DNV 提出了盐液滴腐蚀实验 (SDCT)^[29]。该实验通过在试样上喷洒人造海水液滴,然后放置在相对湿度为 85%~90%的环境下,待干燥后再次喷洒,依次循环。在干燥过程中,腐蚀介质的浓度逐渐提高,实验较为苛刻。Haukas-Eide O^[30,31]等人指出,硬铬镀层经过 100 h SDCT 发生腐蚀,而激光熔覆 Inconel 625 可经受约 5500 h SDCT。DNV 指出涂层只有经过 4200 h 的 SDCT 才能应用于海洋大气环境^[29], Rexroth 公司采用 PTA 工艺制备的 Enduroq 系列活塞杆用涂层耐 SDCT 性能达 40000 h 以上^[19]。

2.3 点腐蚀实验

由于液压千斤顶用激光熔覆层的常见腐蚀形式是点腐蚀和缝隙腐蚀,文献中常报道点腐蚀实验和缝隙腐蚀实验。Tuominen J 等人^[15]将激光熔覆层从基体材料上取下,按照 ASTM G 48 (方法 C)^[32]测试了激光熔覆涂层的临界点蚀温度 (CPT), Stellite 21 和 Inconel 625 的 CPT 分别为 75 °C 和 85 °C。Rühlicke I^[5]认为适用于海洋环境的涂层 CPT 为 35~40 °C。

采用 ASTM G 48 测试 CPT 较直观,但耗时较长。基于 ASTM G 150^[33], Tsapraailis H 等人^[34,35]用电化学方法研究了 6% FeCl₃ 溶液中 Inconel 625 熔覆层的 CPT, 图 2 为实验示意图, 图 3 是 CPT 为 84 °C 的示例。该结果与 Tuominen J 等人^[15]的研究结果相近。另外,针对不同的 Inconel 625 熔覆层,获得了 CPT 为 74 °C 和 82 °C 的结果,说明熔覆层中存在缺陷或稀释率过大。Tsapraailis H 等人^[17]采用同样的方法比较了 Ultimet (R31233)、Stellite 21 (W73021) 与 Inconel 625 的 CPT, Ultimet 的 CPT 为 64~69 °C, 而直到 110 °C 仍未检测到 Stellite 21 的 CPT。说明在耐点蚀方面, Stellite 21 优于 Inconel 625, 而 Inconel 625 优于 Ultimet。

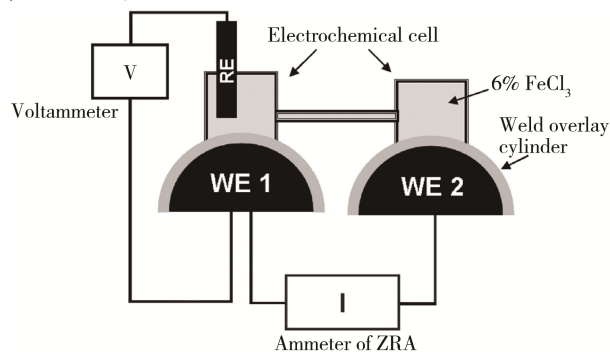


图 2 测试活塞杆 CPT 和 CCT 的示意图

Fig.2 Schematic showing the experimental setup used to measure CPT and CCT on sections of cylinders

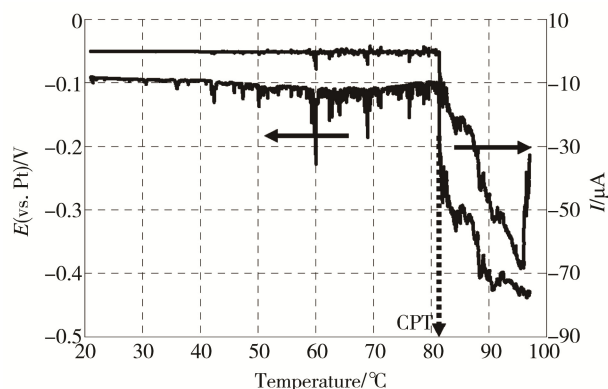


图 3 激光熔覆 Inconel 625 在 6% FeCl₃ 溶液中的 CPT
Fig.3 CPT determination for Inconel 625 coating in 6% FeCl₃

2.4 缝隙腐蚀实验

Tuominen J 等人^[15]按照 ASTM G 48 (方法 D)^[32]测试了激光熔覆层的缝隙腐蚀性能,实验溶液为 6% FeCl₃,实验温度为 60 °C,实验时间为 72 h。结果表明熔覆材料均发生了不同程度的腐蚀, Stellite 21 和 Inconel 625 表现出了最好的耐蚀性能,而 316L 等铁基材料耐缝隙腐蚀性能较差,这是由材料成分决定的。

Tsapraailis H 等人^[34,35]用电化学方法研究了 6% FeCl₃ 溶液中 Inconel 625 熔覆层的临界缝隙腐蚀温度 (CCT),实验示意图如图 2 所示。结果表明激光熔覆 Inconel 625 的 CCT 为 46~50 °C (图 4),该值高于文献报道的 35 °C。Tsapraailis H 等人^[17]采用同样的方法比较了 Ultimet (R31233)、Stellite 21 (W73021) 与 Inconel 625 的 CCT,结果表明 Ultimet 的 CCT 为 18 °C,而直到 110 °C 未检测到 Stellite 21 的 CCT。

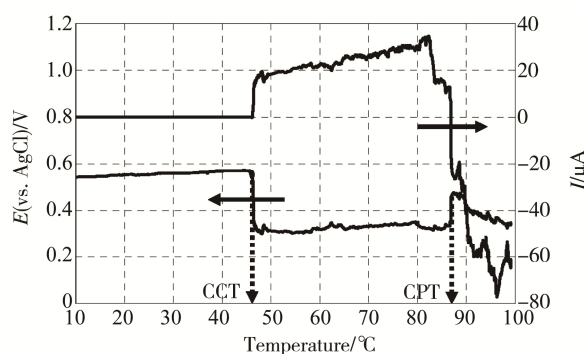


图 4 激光熔覆 Inconel 625 在 6% FeCl₃ 溶液中的 CCT
Fig.4 CCT determination for Inconel 625 coating in 6% FeCl₃

由上可知,影响激光熔覆层耐蚀性能的主要因素为熔覆缺陷和材料成分。与盐雾实验、盐滴实验耗时较长相比,点蚀、缝隙腐蚀试验耗时较短,且更适用于耐蚀合金。尽管活塞杆用激光熔覆材料种类较多,但目前尚缺乏不同腐蚀环境下材料选择规范。建议以现有工艺为参照,进行耐蚀性能的对比研究,以确定熔覆层的材料选择和耐蚀性能指标。

3 耐磨性能评价

根据图1液压千斤顶示意图可知,活塞杆与密封组成摩擦副。由于密封为聚氨酯等高分子材料,硬度较低,由密封直接摩擦造成的活塞杆表面磨损较小。活塞杆表面磨损主要为磨粒磨损,由磨粒进入密封与活塞杆之间导致^[29]。根据磨粒的运动情况,磨粒磨损分为三体磨粒磨损和二体磨粒磨损,前者为磨粒在密封和活塞杆之间运动,而后者为磨粒镶嵌于密封中,并沿活塞杆表面直线运动。

Tuominen J等人^[15]按照ASTMG 65(方法D)^[36]测试了激光熔覆层的耐三体磨粒磨损性能。结果表明,低硬度的431L表现出了最好的耐磨性能,而具有较高硬度的Stellite 21和Stellite 6耐磨性能最差。低硬度材料由于塑性较好,磨损机理为微观犁沟机制。相对于干砂磨损实验,湿砂磨损实验^[37]更符合活塞杆的受力工况,但尚未见到类似文献报道。Tuominen J等人^[15]用划痕实验^[38]研究了激光熔覆层的耐磨性能。结果表明,硬度越高,耐划痕实验性能越好。较高硬度的Stellite 21和Stellite 6耐磨性能优于低硬度的Inconel 625、431L和316L。由此可见,三体磨粒磨损和二体磨粒磨损对材料的硬度要求不同,同一硬度材料很难同时满足两种不同的磨损机制。因此,有必要针对液压千斤顶的具体受力工况,合理选择激光熔覆层的硬度和耐磨性能。

传统的硬铬和陶瓷涂层硬度均较高,约为800~1000HV,因此往往要求活塞杆表面涂层新工艺能达到高硬度。无涂层的双相不锈钢327和Inconel 625活塞杆,在长期使用过程中均未发生锈蚀现象,但在活塞杆行程中部出现明显的抛光现象,在长度方向出现一些划痕^[6-7]。这是由于二者的硬度(约250~300HV)较低,在往复运动过程中与密封发生摩擦抛光作用。因此,Christian B等人^[6]建议活塞杆表面硬度应该达到600HV以上。

为提高激光熔覆层的硬度,常在熔覆材料中添加第二相颗粒形成复合涂层。虽然通过第二相硬化可大幅提高激光熔覆层的硬度,但却可能导致耐蚀性能的降低,这是由于第二相腐蚀电位与激光熔覆本体差异较大而加速腐蚀。Verdi D等人^[39]在Inconel 625中添加20%的 Cr_3C_2 ,可以使激光熔覆层的硬度提高95%,同时耐磨性能得到提高。Abioye T E等人通过在Inconel 625中添加WC,使熔覆层的硬度从220~280HV增加到540~690HV^[40],同时使自腐蚀电位从-222 mV降低到-295 mV,钝化电位消失,说明耐腐蚀性能降低^[41]。Wang Q Y等人^[42]通过调整工艺参数得到沉淀硬化的激光熔覆层,使Hastelloy C22的硬度从250HV提高到385HV,但自腐蚀电流密度从 $2.45 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 增加到 $3.4 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 。Bartkowski D

等人^[43]在Stellite 6中添加30%WC,使自腐蚀电位从-597 mV降低到-771 mV。

根据磨粒磨损的经验^[29,44],当材料硬度大于1.3倍磨粒硬度时,只发生轻微的磨粒磨损。以自然界广泛存在的石英砂(约1200HV)为磨粒为例,只有当材料硬度达到1600HV才能避免磨粒磨损,这是很难实现的。另外,根据Tuominen J等人^[15]的研究结果,三体磨粒磨损和二体磨粒磨损对涂层硬度的要求是不同的,很难找到能同时耐二种机理磨损的涂层材料。因此,从千斤顶的设计(尤其是防尘圈)和液压液的使用保养上采取措施,避免磨粒进入,是避免或减轻磨粒磨损的有效手段。从使用案例上看,许多液压千斤顶活塞杆的涂层材料硬度均较低,远低于硬铬硬度。Eaton公司采用激光熔覆制备的活塞杆涂层硬度约450HV^[45],Rexroth公司采用PTA工艺制备的活塞杆用涂层硬度约320HV^[19]。因此,将液压千斤顶活塞杆激光熔覆层硬度确定在450HV左右是合适的。

为适当提高耐磨性,可以通过加工硬化的手段提高涂层硬度。如Tuominen J等人^[15]研究了划痕实验后的涂层硬度,发现除易加工硬化的钴基材料外,镍基和铁基材料也发生了加工硬化,如Stellite 21和Stellite 6的硬度增加比例分别为19.7%和22.7%,而Inconel 625、431L和316L的硬度增加比例分别达65.8%、70.6%和97.2%。另外,熔覆层的表面硬度也高于断面硬度,说明发生了加工硬化,导致表面硬度增加。Tuominen J等人^[46]的研究表明,通过磨削-抛光可使Stellite 6熔覆层的硬度从493HV提高到775HV,使Inconel 625熔覆层的硬度从257HV提高到490HV。Killian M L等人^[20]公开了一种耐磨涂层方法,对激光熔覆涂层进行加工硬化处理,可以获得硬度达392~698HV的耐磨涂层。根据公开的示例,通过加工硬化,使Inconel 625硬度从约300HV增加到450HV,且自腐蚀电位和耐海水腐蚀速度不降低,因此获得的涂层既耐磨又耐蚀。与第二相硬化相比,加工硬化不降低材料的耐蚀性能,具有较好的使用前景。

4 疲劳性能

液压千斤顶对寿命要求较高,如高端液压支架用千斤顶要求有十年以上的使用寿命。在使用过程中,活塞杆经常处于拉压、偏载、扭转等苛刻受力状态,对激光熔覆后活塞杆的疲劳寿命有较高要求。Tuominen J等人^[15]用四点弯曲法研究了激光熔覆后的疲劳性能,发现激光熔覆Stellite 21的S355和熔覆Inconel 625的42CrMo4疲劳寿命均低于未熔覆的对应材料,且熔覆Stellite 21的疲劳寿命下降更多,疲劳寿命的下降与涂层的应力状态和表面气孔等缺陷

有关,而且通过后续热处理也不能提高激光熔覆层的疲劳寿命^[47]。Alam M M等人^[48]在 S355 基体上熔覆了 Stellite 21,并用四点弯曲法研究了熔覆层厚度为 0.75 mm 时的疲劳性能,当应力为 319 MPa 时,疲劳寿命从未熔覆的 303000 次降到 98112 次,疲劳寿命的降低主要是表面气孔引起的,而被夹杂物填满的气孔很难通过渗透等检验手段发现。Hutasoit N 等人^[49]发现激光熔覆降低了材料的疲劳寿命,这是由于熔覆层中存在残余拉应力,同时增加激光熔覆层厚度导致拉应力增加,进一步降低疲劳寿命。Köhler H 等人^[50]认为应优化应力状态以获得高的疲劳强度。

鉴于表面缺陷对熔覆层耐蚀性能和疲劳寿命的影响,Killian M 等人^[51]公开了一种激光熔覆活塞杆缺陷无损检测方法。

5 提高激光熔覆效率的方法

熔覆效率是制约激光熔覆产业化的重要因素。为提高激光熔覆的生产效率,常用方法有降低激光波长、提高激光功率以及采用复合热源进行熔覆等^[8-9]。Tuominen J 等人^[52]采用 15 kW 光纤激光器,获得了厚度为 2.5~4.2 mm、稀释率为 3%~11%的 Inconel 625 熔覆层,熔覆效率达 13.1~15.6 kg/h。Brückner F 等人^[10]采用激光熔覆(8 kW)+感应加热(12 kW)复合热源熔覆 Inconel 625,得到了 14~16 kg/h 的熔覆效率。Nowotny S 等人^[53]采用感应加热辅助激光熔覆(9 kW)Stellite 21,得到了 14.3 kg/h 的熔覆效率。

通过提高激光功率、辅助加热等方法在提高熔覆效率的同时,往往导致基体受热过大、涂层厚度较大(0.5 mm 以上)。如果能够降低熔覆层的厚度,在相同送粉量的情况下可以增加熔覆面积,从而相应提高熔覆效率,但必须控制稀释率以保证得到所需化学成分的熔覆层。基于同轴送粉熔覆,Schopphoven T^[16]提出了一种高速熔覆的方法。优化同轴送粉器使粉末和激光聚焦直径小于 1 mm,在粉末到达基体之前,激光与粉末相互作用使粉末温度接近熔点,从而降低形成熔池时间,提高激光利用效率,提高熔覆速度,降低熔覆层厚度。通过工艺优化,使用 4 kW 激光器成功制备了熔覆层厚度为 10~250 μm 的 Inconel 625,熔覆速度达 200 m/min,熔覆效率达 500 cm²/min(即 3 m²/h)。尽管熔覆层厚度低、熔覆效率高,但熔覆层稀释率仍低于 1%,可保证熔覆层的耐蚀性能。该方法为提高熔覆效率提供了一种新思路。

6 结论

1)耐蚀性能是液压千斤顶活塞杆激光熔覆层最重要的性能指标,但针对不同的使用环境缺乏相应的

检测标准。在特定的使用环境下,建议以现有工艺为参照,进行耐蚀性能的对比研究,以确定熔覆层的材料选择和耐蚀性能指标。

2)根据液压千斤顶活塞杆的磨损机理,不应刻意提高激光熔覆层的硬度以保证其耐磨性能,应通过千斤顶的设计优化和维护保养,避免发生磨粒磨损。在提高硬度方面,应优先选用加工硬化的方法,慎重选择第二相硬化的方法。

3)表面缺陷对耐蚀性能和疲劳性能有不利影响,应加强工艺过程控制,同时完善检测手段以尽早发现表面缺陷。

4)鉴于加工硬化可以在不降低耐蚀性能的前提下提高涂层硬度,同时考虑到加工硬化对涂层应力状态的影响,建议在加工硬化对疲劳寿命的影响方面进一步开展相关研究,以保证激光熔覆后的疲劳寿命。

5)从应用的角度出发,必须提高激光熔覆的效率,但增加激光功率、辅助其他热源等方式获得的涂层厚度较大,同时设备投资较大。在保证低稀释率的前提下,通过降低熔覆层的厚度进而提高熔覆效率的方法比较经济。

参考文献:

- [1] WANG Q J, CHUNG Y W. Encyclopedia of Tribology [M]. New York: Springer, 2013: 1709—1718.
- [2] 路芳亭,任中伟.国内外大型液压缸活塞杆防腐技术的发展与现状[J].水利电力机械,2007,29(10):132—133.
LU Fang-ting, REN Zhong-wei. Current Situation and Development of Anticorrosion Technology in Home and Abroad Large-scaled Hydraulic Cylinders Piston Rods[J]. Water Conservancy & Electric Power Machinery, 2007, 29(10): 132—133.
- [3] 刘混田.液压支架立柱维修与再制造技术[J].矿山机械,2017,45(4):10—14.
LIU Hun-tian. Maintenance and Remanufacturing Technology of Column of Roof Support[J]. Mining & Processing Equipment, 2017, 45(4): 10—14.
- [4] 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):2533—2538.
SHEN Wei-guo, FANG Yan, 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): 2533—2538.
- [5] RUHLICHE I. Piston Rod Coatings in Offshore Utilization[J]. Thermal Spray Bulletin, 2012, 64(1): 22—26.
- [6] CHRISTIAN B, JOHNSON R, ESPALLARGAS N. Hydraulic Cylinders for Offshore Splash Zone Operation: A Review of Piston Rod Failure Cases and Alternative Concepts[C]// Proceedings of the ASME 2009 28th International Conference on Ocean. Honolulu: Offshore and

- Arctic Engineering, 2009: 79039.
- [7] CHRISTIAN B, JOHNSEN R, ESPALLARGAS N. Premature Failure of Riser Tensioner Piston Rods Exposed to Offshore Splash Zone Operation-Status and Review of Critical Multi-degradation Factors[C]// Proceedings of the Corrosion 2009 Annual Conference and Exhibition. Atlanta: [s. n.], 2009: 09199.
 - [8] BIRGER E M, MOSKVITIN G V, POLYAKOV A N, et al. Industrial Laser Cladding: Current State and Future[J]. Welding International, 2011, 25(3): 234—243.
 - [9] KAIERLE S, BARROI A, NOELKE C, et al. Review on Laser Deposition Welding: from Micro to Macro[J]. Physics Procedia, 2012, 39: 336—345.
 - [10] BRUCKNER F, NOWOTNY S, LEYENS C. Innovations in Laser Cladding and Direct Metal Deposition[J]. Spie Lase, 2012, 8239: 181—192.
 - [11] TUOMINEN J. Engineering Coatings by Laser Cladding—The Study of Wear and Corrosion Properties[D]. Tampere: Tampere University of Technology, 2009.
 - [12] 张德强, 张吉庆, 郭忠娟. 45[#]钢表面激光熔覆自熔性镍基碳化钨粉末[J]. 表面技术, 2015, 44(11): 66—70.
ZHANG De-qiang, ZHANG Ji-qing, GUO Zhong-juan. Laser Cladding of Self-fluxing Ni-based WC Powder on 45[#] Steel Surface[J]. Surface Technology, 2015, 44(11): 66—70.
 - [13] 吴王平, 王晓杰, 王智尧, 等. 激光熔覆陶瓷涂层研究[J]. 陶瓷学报, 2017, 38(2): 13—19.
WU Wang-ping, WANG Xiao-jie, WANG Zhi-yao, et al. Laser Cladding Ceramic Coating[J]. Journal of Ceramics, 2017, 38(2): 13—19.
 - [14] 韩文静, 宋进朝, 刘学功, 等. 煤矿机械应用激光熔覆技术的研究与实践[J]. 电镀与精饰, 2016, 38(8): 18—22.
HAN Wen-jing, SONG Jin-chao, LIU Xue-gong, et al. Research and Practice of Laser Cladding Technology Applied on Coal Mining Machinery in China[J]. Plating and Finishing, 2016, 38(8): 18—22.
 - [15] TUOMINEN J, NAKKI J, PAJUKOSKI H, et al. Wear and Corrosion Resistant Laser Coatings for Hydraulic Piston Rods[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(2): 022009.
 - [16] SCHOPPHOVEN T, GASSER A, WISSENBAACH K, et al. Investigations on Ultra-high-speed Laser Material Deposition as Alternative for Hard Chrome Plating and Thermal Spraying[J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2): 022501.
 - [17] TSAPRILIS H, TUGGLE J R, WATERS S A, et al. High Corrosion Resistant Metallic Coatings for Oil field Applications Exposed to Aggressive Environments[C]// Proceedings of the Corrosion 2010 Annual Conference and Exhibition. San Antonio: [s. n.], 2010: 10265.
 - [18] MARIUS V. Piston Rod Comprising a Covering Layer Consisting of a Cobalt Alloy: DE, 112005001756[P]. 2007-06-28.
 - [19] ENDUROQ. Surface Technologies for Large Hydraulic Cylinders[EB]. [2013-10-01]. <http://www.boschrexroth.com/>.
 - [20] KILLIAN M L, AHMAD A, HIGDON C. Wear-resistant Coating System and Method: US, 20100173172[P]. 2010-07-08.
 - [21] 曹强, 汤智慧, 程宗辉, 等. 300M 钢刷镀镉性能及在某型飞机起落架修理中的应用[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 39—44.
CAO Qiang, TANG Zhi-hui, CHENG Zong-hui, et al. Performance of Electric-brush Plating Cadmium on 300M Steel and Application in Landing Gear Repair for a Certain Type of Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(1): 39—44.
 - [22] 冯驰, 黄运华, 申玉芳, 等. 不同表面状态对 6061 铝合金耐蚀性能的影响研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 100—104, 128.
FENG Chi, HUANG Yun-hua, SHEN Yu-fang, et al. Effect of Surface Status on the Corrosion Resistance of 6061 Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 100—104, 128.
 - [23] 阮红梅, 吴坤培, 王俊, 等. 气相防锈技术在电器设备防腐中的应用[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 32—37.
RUAN Hong-mei, WU Kun-pei, WANG Jun, et al. Application of the Vapor Phase Corrosion Inhibitor in the Electrical Equipment Corrosion [J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 32—37.
 - [24] 陈川, 黄海军, 王俊, 等. 我国湿热海上风电大气区金属重防腐涂料的性能研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 89—94.
CHEN Chuan, HUANG Hai-jun, WANG Jun, et al. Performance of Metal Heavy-duty Coating in Atmospheric Zone of Humid-Hot Sea[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 89—94.
 - [25] ISO 9227, Corrosion Tests in Artificial Atmospheres—Salt Spray Tests[S].
 - [26] SAE J1333, Hydraulic Cylinder Rod Corrosion Test[S].
 - [27] PAJUKOSKI H, NAKKI J, THIEME S, et al. High Performance Corrosion Resistant Coatings by Novel Coaxial Cold and Hot-wire Laser Cladding Methods[J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(1): 012011.
 - [28] ISO 14993, Corrosion of Metals and Alloys—Accelerated Testing Involving Cyclic Exposure to Salt Mist, ‘Dry’ and ‘Wet’ Conditions[S].
 - [29] DNV. Guideline for Qualification of Wear and Corrosion Protection Surface Materials for Piston Rods[R]. Norway: Det Norske Veritas, 2009: 3295.
 - [30] HAUKASEIDE O, LONVIK K, FISCHER K. Qualification of Wear and Protective Surface Coating for Hydraulic Piston Rods[C]// Proceedings of the Corrosion 2006 Annual Conference and Exhibition. San Diego: [s. n.], 2006: 06026.
 - [31] HAUKASEIDE O, LONVIK K, FISCHER K. Guideline for Material Selection and Qualification of Wear and Corrosion Protective Hard Face Coatings for Piston Rods[C]// Proceedings of the Corrosion 2007 Annual

- Conference and Exhibition. Tennessee: [s. n.], 2007: 07694.
- [32] ASTM G48, Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution[S].
- [33] ASTM G150, Standard Test Method for Electrochemical Critical Pitting Temperature Testing of Stainless Steels[S].
- [34] TSAPRAILIS H, IANUZZI M, TOSSEY B, et al. Testing of High Corrosion Resistant Metallic Coatings for Tensioner Risers and Piston Rods Exposed to Marine Environments[C]// Proceedings of the Corrosion 2009 Annual Conference and Exhibition. Atlanta: [s. n.], 2009: 09289.
- [35] TSAPRAILIS H, GARFIASMESIAS L F. Rapid Evaluation of Metallic Coatings on Large Cylinders Exposed to Marine Environments[J]. Corrosion, the Journal of Science and Engineering, 2011, 67(12): 126002-1—126002-9.
- [36] ASTM G65, Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus[S].
- [37] ASTM G105, Standard Test Method for Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests[S].
- [38] ASTM G132, Standard Test Method for Pin Abrasion Testing[S].
- [39] VERDI D, GARRIDO M A, MUNEZ C J, et al. Cr₃C₂ Incorporation into an Inconel 625 Laser Cladded Coating: Effects on Matrix Microstructure, Mechanical Properties and Local Scratch Resistance[J]. Materials & Design, 2015, 67: 20—27.
- [40] ABIOYE T E, FOLKES J, CLARE A T, et al. Concurrent Inconel 625 Wire and WC Powder Laser Cladding: Process Stability and Microstructural Characterization[J]. Surface Engineering, 2013, 29(9): 647—653.
- [41] ABIOYE T E, FARAYIBI P K, MCCARTENY D G, et al. Effect of Carbide Dissolution on the Corrosion Performance of Tungsten Carbide Reinforced Inconel 625 Wire Laser Coating[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 89—99.
- [42] WANG Q Y, ZHANG Y F, BAI S L, et al. Microstructures, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Hastelloy C22 Coating Produced by Laser Cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 553: 253—258.
- [43] BARTKOWSKI D, MLYNARCZAK A, PIASECKI A, et al. Microstructure, Microhardness and Corrosion Resistance of Stellite-6 Coatings Reinforced with WC Particles Using Laser Cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 68: 191—201.
- [44] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 305—310.
- WEN Shi-zhu, HUANG Ping. Principles of Tribology (2nd Edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 305—310.
- [45] UMOR F. Laser Cladding Protection of Hydraulic Cylinders [EB]. [2016-02-01]. <http://www.eaton.com/>.
- [46] TUOMINEN J, NAKKI J, PAJUKOSKI H, et al. High Performance Wear and Corrosion Resistant Coatings by Novel Cladding Techniques[C]// Proceedings of the Twenty Eighth International Conference on Surface Modification Technologies. Finland: [s. n.], 2014: 105—117.
- [47] TUOMINEN J, NÄKKI J, POUTALA J, et al. Fatigue Behavior of Laser Clad Round Steel Bars[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(1): 012006.
- [48] ALAM M M, POWELL J, KAPLAN A F H, et al. Surface Pore Initiated Fatigue Failure in Laser Clad Components[J]. Journal of Laser Applications, 2013, 25(3): 032004.
- [49] HUTASOIT N, LUZIN V, BLICBAAU A, et al. Fatigue Life of Laser Clad Hardfacing Alloys on AISI 4130 Steel Under Rotary Bending Fatigue Test[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 72: 42—52.
- [50] KOHLER H, PARTES K, KORNMEIER J R, et al. Residual Stresses in Steel Specimens Induced by Laser Cladding and Their Effect on Fatigue Strength[J]. Physics Procedia, 2012, 39: 354—361.
- [51] KILLIAN M, AHAMD A. Non-destructive Test Evaluation of Welded Claddings on Rods of Hydraulic Cylinders Used for Saltwater, Brackish and Freshwater Applications: US, 8166821[P]. 2012-05-01.
- [52] TUOMINEN J, NAKKI J, PAJUKOSKI H, et al. Laser Cladding with 15 kW Fiber Laser[C]//Proceedings of the 13th Nolamp Conference. Trondheim: [s. n.], 2011: 27—29.
- [53] NOWOTNY S, BRUECKMER F, THIEME S, et al. High-performance Laser Cladding with Combined Energy Sources[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(S1): S17001.