

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2020.02.008

超音速火焰喷涂 316L 不锈钢涂层在零件尺寸修复中的应用

高继文^{1*}, 高俊国², 南健¹

(1. 国营芜湖机械厂, 安徽 芜湖 241007; 2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 为了解决装备核心零部件因磨损、消除腐蚀等带来的尺寸超差问题, 制作超音速火焰喷涂 316L 不锈钢涂层性能试样, 对试样涂层的形貌、硬度、耐蚀性开展试验检测研究。结果表明, 涂层具有与 25Cr3MoA 接近的硬度和比 30CrMnSiNi2A 更好的耐蚀性能。由此, 提出采用超音速火焰喷涂 316L 不锈钢涂层进行零件尺寸修复, 制定了可行的修理方案和技术路线, 确定了修理工序和参数, 形成了相关技术文件, 用于指导零件尺寸修复, 并在油泵轴和肩轴两类零件上成功应用和装机验证, 其性能良好, 质量安全。

关键词: 尺寸超差; 超音速火焰喷涂; 316L 不锈钢涂层; 尺寸修复

中图分类号: TQ153.11 文献标识码: A

Application of HVOF 316L Stainless Steel Coating in Resizing of Parts

GAO Jiwen^{1*}, GAO Junguo², NAN Jian¹

(1. State-owned Wuhu Machinery Factory, Wuhu 241007, China; 2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to solve the problems of dimension deviation caused by wear and corrosion of core parts of equipment, the high velocity oxygen fuel (HVOF) 316L stainless steel coating performance samples were made, and the morphology, hardness and corrosion resistance of the coatings were tested. The results showed that the coating had a hardness close to that of 25Cr3MoA and better corrosion resistance than 30CrMnSiNi2A. Therefore, the HVOF 316L stainless steel coating was used for part size repair, a feasible repair plan and technical route were developed, the repair process and parameters were determined, and the relevant technical documents was formed to guide the part size repair which had been successfully applied and verified on oil pump shaft and shoulder shaft with good performance and safe quality.

Keywords: dimension deviation; high velocity oxygen fuel (HVOF); 316L stainless steel coating; size repair

收稿日期: 2019-09-15

修回日期: 2019-12-29

通信作者: 高继文(1970—), 男, 安徽芜湖人, 高级工程师, 主要从事航空附件维修与工艺优化设计工作。

email: 690802818@qq.com

基金项目: 装备预研重点领域基金项目(61400040404)

超音速火焰喷涂技术(HVOF)是由美国 James A Browning 公司创造的,并且在 1983 年获得美国专利^[1]。目前,国内对超音速火焰喷涂技术及喷涂的优质涂层也有了较多的研究和应用^[2-7],许多企业和研究机构从国外购买喷涂设备并进行工程实践,逐渐实现了自主研发。

某型飞机大修期间,经过分解、检查、排故,发现有钢制零件出现轻微的磨损超差(图1)和较严重的腐蚀(图2)。针对装备核心零部件因磨损、消除腐蚀等带来的尺寸超差,国营芜湖机械厂联合北京航空材料研究院,借鉴 BMS10-67K《热喷涂粉末》、BAC5851《热喷涂涂层的应用》等国外标准,以 316L 不锈钢粉末作为喷涂材料,开展相关研制验证工作,开发超音速火焰喷涂 316L 不锈钢修复零件尺寸工艺方法及其关键处理技术,并对喷涂后涂层的形貌、硬度、耐腐蚀性进行研究,实现装备核心零部件的自修复应用。



图1 尺寸超差的油泵轴



图2 腐蚀的肩轴

1 零件基本情况与特性分析

1.1 油泵轴

油泵轴超差部位的图样尺寸见图3,零件基材为 25Cr3MoA,硬度为 300~400 HV₃₀₀,表面处理为化学氧化。该零件是液压泵的重要组成部分,中间花键部位与转子配合,两端安装轴承,其中 $\phi 50^{+0.014}_{+0.002}$ mm 尺寸表面与轴承过盈配合,工作时由油泵轴带动轴承和转子旋转运动实现油泵供油供压功能,转速为 (4200 ± 100) r/min。油泵轴在分解、装配及使用过程中 $\phi 50$ 表面出现轻微磨损尺寸超差。由于该零件理论设计与轴承过盈配合,无相对运动,对耐磨需求不高,仅需采用类似材料对其尺寸进行恢复即可。

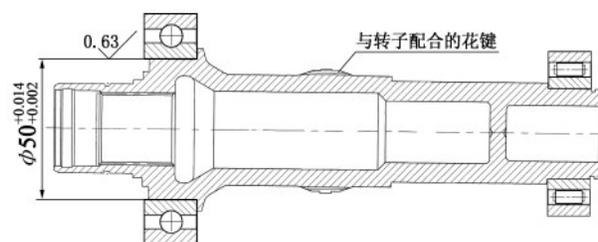


图3 油泵轴超差部位图样尺寸

1.2 肩轴

肩轴腐蚀部位的图样尺寸见图4,肩轴材料为 30CrMnSiNi2A,该零件是安装导弹发射挂梁的重要组成部分,飞机安装导弹飞行时,其 $\phi 58$ mm 和 $\phi 60$ mm 区域为装配使用区,配合精度要求高,与导弹发射精准度有关,一次性发射,无耐磨需求;不安装导弹飞行及地面停放时, $\phi 58$ mm 和 $\phi 60$ mm 区域为裸露在外,腐蚀严重,为了消除腐蚀层通常采用打磨、抛光等磨削方法,这样会经常带来尺寸超差,所以需要在恢复尺寸的同时提高其耐腐蚀能力。

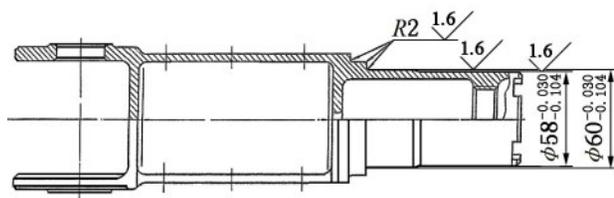


图4 肩轴腐蚀部位的图样尺寸

1.3 特性分析

国营芜湖机械厂联合北京航空材料研究院,针对该项目开展了相关工作,确定了上述零件修复技术条件及特性指标。采用的超音速火焰喷涂 316L 不锈钢工艺和修复后的零件应至少满足以下要求:

- (1) 涂层外观:涂层表面应连续、均匀,无散裂、片状剥落、碎屑,无气泡,无可见裂纹;
- (2) 涂层硬度 >300 HV₃₀₀;
- (3) 涂层结合强度 >40 MPa;
- (4) 涂层孔隙率 $<2\%$;
- (5) 弯曲性能:厚度 0.02~0.075 mm 的涂层绕直径 $\phi 12.7$ mm 圆柱弯曲 180° 后涂层无剥落;
- (6) 零件修复后尺寸满足图纸要求:a. 油泵轴修复后恢复尺寸 $\phi 50^{+0.014}_{+0.002}$ mm,粗糙度不劣于 Ra0.63 μm ; b. 肩轴零件修复后恢复尺寸 $\phi 58^{-0.030}_{-0.104}$ mm 和 $\phi 60^{-0.030}_{-0.104}$ mm,粗糙度不劣于 Ra1.6 μm 。

2 零件尺寸修复应用与涂层性能评价

通过对国内外相关标准的分析和前期研制经验,综合相关资料^[8-14],确定采用超音速火焰喷涂316L不锈钢涂层技术及工序,来完成油泵轴、肩轴的尺寸修复,并对涂层进行性能评价。

2.1 零件尺寸修复

制定修复工艺路线如图5所示。

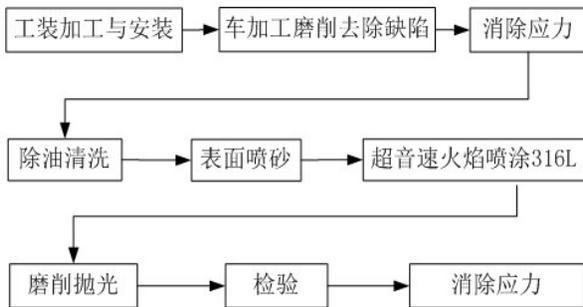
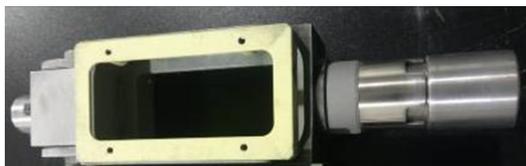


图5 修复工艺路线

(1)工装加工与安装:上述两种零件的工装如图6所示;



(a) 油泵轴两端加工装



(b) 肩轴两端加工装

图6 工装实物图

(2)车加工磨削去除缺陷:通过机械加工的方式对零件表面缺陷进行磨削去除,考虑零件强度,确定磨削深度应不大于0.2 mm;

(3)消除应力:磨削去除缺陷后,进行消除应力处理,处理温度为180 ~ 200 ℃,处理时间≥4 h回火;

(4)除油清洗:选用工业丙酮,清洗喷涂部位,彻底去除油污;

(5)表面喷砂:选用的喷砂工艺为54目白刚

玉,气压0.4 ~ 0.5 MPa,距离160 ~ 190 mm;

(6)超音速火焰喷涂316L不锈钢:喷涂设备为DJ2700型,喷涂粉末确定采用Metco公司的Diamalloy 1003型;

在喷涂正式零件前,应先根据确定的工艺参数进行零件材料性能试样的喷涂,在试样涂层性能测试合格后,对上述两个零件进行喷涂。在喷涂过程中,零件基体温度低于110 ℃。为了便于涂层后续磨削,喷涂时至少保证单边0.05 mm的余量,上述零件磨削后最终尺寸及喷涂控制尺寸见表1。

表1 零件最终尺寸与喷涂控制尺寸

零件名称	磨削后外径尺寸/mm	喷涂控制尺寸/mm
油泵轴	$\phi 50^{(-0.030)}_{(-0.104)}$	≥ 50.15
肩轴	$\phi 58^{(-0.030)}_{(-0.104)}$	≥ 58.15
肩轴	$\phi 60^{(-0.030)}_{(-0.104)}$	≥ 60.15

喷涂完成后,对涂层外观进行检查。涂层表面连续、均匀,无散裂、片状剥落、碎屑,无气泡,无可见裂纹。

(7)磨削抛光:利用工装两端的顶针孔找准零件中心轴线控制同轴度(跳动小于0.01 mm)进行涂层磨削,磨削分为粗磨、精磨和抛光,涂层磨削使用磨削砂轮或抛光带,材料均为金刚石。喷涂后的零件通过磨削保证零件尺寸和表面粗糙度,经过磨削和抛光后的零件见图7。

(8)检验:当零件加工完成后,按图样对零件尺寸和表面粗糙度进行测量检验,检验结果见表2,满足图样要求。

表2 零件尺寸及粗糙度检验结果

零件名称	修复后直径尺寸/mm	表面粗糙度/ μm
油泵轴	50.01;50.01;50.01	< 0.4
肩轴	57.95;57.96;57.95	< 0.8
肩轴	59.96;59.97;59.95	< 0.8

(9)消除应力:检验合格后的零件去除工装,对其进行消除应力处理,消除应力温度为 190 ± 10 ℃,时间>4 h回火。

2.2 涂层性能评价

在喷涂正式零件前,首先根据确定的工艺参数进行25Cr3MoA、30CrMnSiNi2A钢性能试样的喷涂。采用Metco公司的Diamalloy 1003型喷涂粉末,其微

观形貌见图8,化学成分要求见表3,Diamalloy 1003粉末粒度分布(质量):粒度大于或等于 $53\ \mu\text{m}$ (筛孔为270目)的粉末 $<5\%$;粒度大于或等于 $45\ \mu\text{m}$ (筛孔为325目)的粉末 $<25\%$;粒度小于 $45\ \mu\text{m}$ 的粉末 $\geq 70\%$ 。



(a) 磨削和抛光后的油泵轴



(b) 磨削和抛光后的肩轴

图7 磨削和抛光后的零件

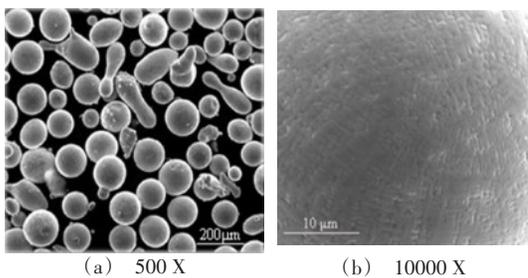


图8 Diamalloy 1003型喷涂粉末微观形貌

表3 Diamalloy 1003粉末化学成分

化学成分	Fe	Ni	Cr	C	Mo	Si
含量/ wt. %	余量	10~14	15~19	0~0.1	1.5 ~3.5	<1.0

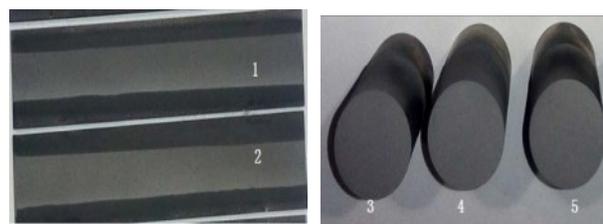
2.2.1 性能试样喷涂及涂层性能评价

根据技术指标要求,开展25Cr3MoA、30CrMn-SiNi2A钢性能试样喷涂,喷涂后的性能试样见图9。

涂层性能评价:

①外观:由图9可见,涂层表面连续、均匀,无散裂、片状剥落、碎屑,无气泡,无可见裂纹;

②涂层硬度:对试样涂层硬度进行检测,数据见表4,满足大于 $300\ \text{HV}_{300}$ 的要求;



(a) 25Cr3MoA喷涂, 试样1、2 (b) 30CrMnSiNi2A喷涂, 试样3、4、5

图9 喷涂后的性能试样

表4 试样涂层显微硬度结果(HV_{300})

试样编号	1	2	3	4	5	平均值
硬度值	439	442	418	454	420	435

③涂层结合强度:对试样涂层结合强度进行检测,数据见表5,满足大于 $40\ \text{MPa}$ 的要求;

表5 试样涂层结合强度结果(MPa)

试样编号	1	2	3	4	5	平均值
结合强度值	79	74	75	77	75	76

④涂层孔隙率:涂层的典型形貌如图10所示,金相评价结果见表6,经测算,涂层孔隙率 $<2\%$;

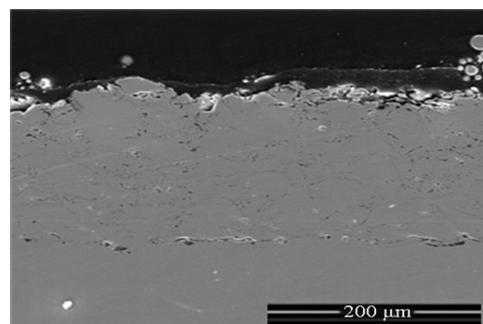


图10 超音速火焰喷涂316L不锈钢涂层形貌

表6 试样涂层金相评价结果

试样编号	1	2	3	4	5	平均值
孔隙率/%	0.13	0.14	0.16	0.15	0.08	0.132

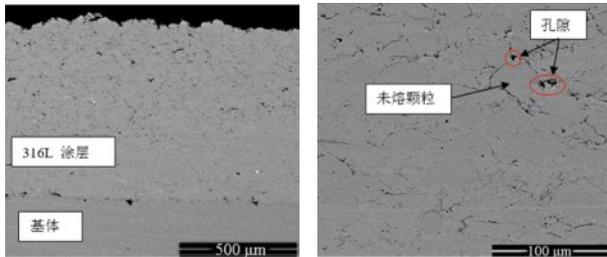
⑥弯曲性能:见图11,厚度 $0.025\sim 0.075\ \text{mm}$ 的涂层绕直径 $\phi 12.7\ \text{mm}$ 圆柱弯曲 180° 后的形貌,涂层无剥落。

2.2.2 涂层组织评价

沿涂层深度方向切取试样,磨制抛光后将断口在丙酮溶液中超声清洗后,使用扫描电子显微镜(型号FEI-Quanta600, $10\sim 20000\times$)观察到超音速火焰喷涂316L不锈钢典型的涂层组织,其显微形貌见图12。



图 11 涂层弯曲后形貌



(a) 100X (b) 500X

图 12 316L 不锈钢涂层显微形貌

由图12(a)可见,零件基体与涂层为机械结合,涂层和基体分界明显。外层涂层孔隙率略高于内层涂层,这是由于涂层厚度的增加是通过多遍喷涂获得的,后续的喷涂过程可对前面喷涂获得的涂层起到夯实的作用,增加了涂层的致密度。利用显微硬度计(型号 Struers Duramin, 10~20000X)分别对涂层距界面不同位置的显微硬度进行了测试:距界面600 μm的图层,硬度为408 HV₃₀₀;距界面500 μm的图层,硬度为421 HV₃₀₀;距界面400 μm的图层,硬度为446 HV₃₀₀;距界面300 μm的图层,硬度为450 HV₃₀₀;距界面200 μm的图层,硬度为432 HV₃₀₀;距界面100 μm的图层,硬度为448 HV₃₀₀。结果如图13所示,显微硬度测试表明:界面附近涂层高于表面涂层,涂层中间显微硬度约为420~460 HV₃₀₀。25Cr3MoA 钢不同热处理状态下的硬度值为300~430 HV₃₀₀,说明超音速火焰喷涂316L 不锈钢涂层具有与25Cr3MoA 接近的硬度。将涂层组织进一步放大,形貌见图12(b),大部分粉末颗粒在喷涂过程中变形充分,涂层均匀,其组织致密,金相分析涂层孔隙率为0.05%~0.19%。然而还有极少量的较大尺寸的未熔颗粒聚集,便会出现孔隙,工程应用过程中,要稳定控制好工艺参数,避免大尺寸颗粒聚集。

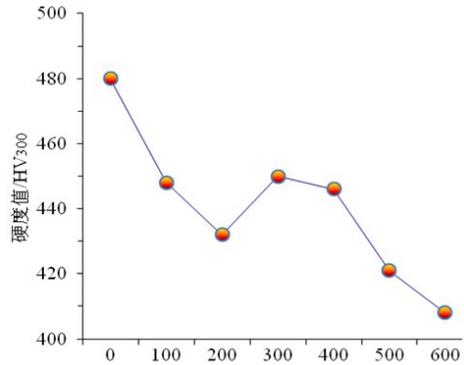


图 13 涂层距界面不同位置的显微硬度

2.2.3 涂层厚度对结合强度的影响

制作拉伸试样,梯度喷涂涂层厚度(分别为200、225、250、500、550、600 μm),通过力学拉伸机(型号 Instron 5882,精度5N)开展结合强度拉伸试验,研究涂层厚度对结合强度的影响,测试结果见表7。

表 7 316L 不锈钢涂层结合强度

试样编号	涂层厚度/ μm	结合强度/ MPa	平均值/ MPa	断裂位置
1	200	84	85	胶断
2	225	85		
3	250	86		
4	500	26	27	涂层/基 体界面断
5	550	25		
6	600	30		

当316L 不锈钢涂层厚度为200~250 μm时,涂层的结合强度在85 MPa 以上,断裂方式均为胶断;但当涂层厚度增加到500~600 μm时,涂层的结合强度只有30 MPa 左右,测试时涂层失效部位是涂层/基体界面。出现这种现象,相关资料认为主要与涂层的内应力有关。测试结果与相关资料结论一致:涂层喷的越厚,涂层内应力越大,结合强度越弱。当试件涂层内应力大于界面结合强度时,涂层就出现了直接剥落现象。所以在油泵轴、肩轴尺寸修复时最大厚度控制在0.5 mm 以内。

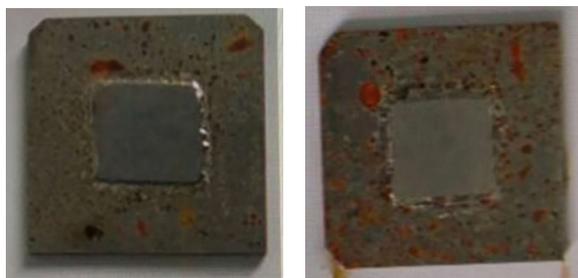
2.2.4 涂层的耐蚀性能评价

在材料为30CrMnSiNi2A 的板片上超音速火焰喷涂316L 不锈钢涂层,涂层尺寸20 mm×20 mm×0.5 mm,见图14。按照 GJB150.11A-2009 国军标环境试验方法进行盐雾对比试验(盐雾试验箱型号 YW-5720),24 h、48 h 后的外观见图15,涂层表面未出现明显的腐蚀,而30CrMnSiNi2A 高强钢出现了较

为严重的表面腐蚀,表明了超音速火焰喷涂316L不锈钢涂层的耐腐蚀性能优于30CrMnSiNi2A钢。



图14 涂层盐雾试验样件



(a) 24 h后的外观

(b) 48 h后的外观

图15 盐雾测试后表面外观

3 结论

国营芜湖机械厂和北京航空材料研究院结合生产应用实际和对性能试样超音速火焰喷涂316L不锈钢涂层的形貌、硬度、耐蚀性的试验检测研究,制定了可行的修理方案和技术路线,确定了修理工序和参数,用于指导零件尺寸修复工作,较好解决了装备核心零部件因磨损、消除腐蚀等带来的尺寸超差问题。通过超音速火焰喷涂316L不锈钢涂层在上述两类零件尺寸修复中的成功应用和装机验证,证实其性能良好,质量安全,涂层具有与25Cr3MoA接近的硬度和比30CrMnSiNi2A更好的耐蚀性能,在航空维修领域中推广使用,应用前景广阔,经济、军事效益显著。应用过程中以下关键技术需要重点关注:(1)要稳定控制好工艺参数,避免大尺寸颗粒聚集,适用于配合耐磨需求不高的尺寸修复;(2)建议最大喷涂厚度在0.5 mm以内,通过机械加工保留0.2 mm厚度精加工余量,这样既能保证尺寸修复也能保证足够强度;(3)在喷涂过程应注意对零件温度的监控,为了避免粉末氧化,喷涂能量较低,零件温度上升要慢,整个喷涂过程零件

温度应低于110℃。

参考文献

- [1] 张六泉. Inconel 690合金HVOF喷涂WC-10Co4Cr涂层高温微动磨损特性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
- [2] 陈焕涛, 陈文龙, 张晓锋, 等. HVOF和APS喷涂WC-10Co-4Cr涂层性能研究[J]. 材料研究与应用, 2017, 11(1):30-33.
- [3] Ding X, Cheng X D, Yu X, et al. Structure and cavitation erosion behavior of HVOF sprayed multi-dimensional WC-10Co4Cr coating [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, (28):487-494.
- [4] 周夏凉, 陈小明, 吴燕明, 等. HVOF制备纳米WC-10Co4Cr涂层的微观组织及抗冲蚀性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2018, 23(2):124-129.
- [5] 李洪波, 韩金成, 顾勇飞, 等. Ti10钢表面HVOF喷涂WC-10Co4Cr涂层的耐磨性研究[J]. 燕山大学学报, 2016, 40(1):22-28.
- [6] 王大锋, 张波萍, 贾成厂, 等. WC粉末粒度对超音速火焰喷涂WC-CoCr涂层组织性能的影响[J]. 粉末冶金工业, 2017, 27(2):58-65.
- [7] 王进春, 孔德军. 超音速火焰喷涂WC-12Co涂层高温摩擦-磨损性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(3):608-616.
- [8] 余俊. 粉末冶金316L不锈钢的制备及性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
- [9] 郭孟秋, 张兴华, 阙民红, 等. 超音速火焰喷涂316L不锈钢涂层性能研究[J]. 失效分析与预防, 2013, 8(4):216-221.
- [10] 吴文恒, 吴凯琦, 肖逸凡, 等. 雾化压力对3D打印用316L不锈钢粉末性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2017, 35(2):83-88.
- [11] 孔祥吉, 刘超, 况春江, 等. 316L不锈钢粉末微注射成形的烧结过程有限元模拟研究[J]. 粉末冶金工业, 2017, 27(6):27-33.
- [12] 翟敏, 安浩. 超音速火焰喷涂与电镀铬的工艺研究[J]. 中国科技纵横, 2018, (2):81-83.
- [13] 王升伟. 超声速火焰喷涂技术在航空修理领域的应用研究[C]//武哲. 中国航空学会:航空装备维修技术及应用研讨会论文集, 北京:航空知识杂志社, 2015:596-604.
- [14] 高继文, 刘洲. 镀铬活塞杆表层裂纹分析与解决[J]. 电镀与精饰, 2019, 41(5):43-48.