

ICS 编号
CCS 编号

团 体 标 准

T/CHES XXX—20XX

液压启闭机活塞杆陶瓷复合涂层 技术规范

Technique specification for ceramic coatings
of hydraulic hoist piston rod

（报批稿）

请将你们发现的有关专利的内容和支持性文件随意见一并返回

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国水利学会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 总则 3

5 粉末 4

6 涂层种类和厚度 4

7 涂层型式试验 5

8 表面预处理 6

9 喷涂施工 6

10 涂层封孔 7

 10.1 封孔剂 7

 10.2 封孔 7

11 质量检验 8

 11.1 表面预处理质量评定 8

 11.2 涂层检验 8

12 验收 8

13 运行维护 8

附录A（规范性）涂层抗拉结合强度试验方法 10

附录B（规范性）涂层抗冲击试验方法 13

附录C（规范性）涂层弯曲试验方法 14

附录D（规范性）涂层孔隙率测试方法 15

 D.1 铁试剂试验法 15

 D.2 电化学测试方法(ECP) 15

 D.3 针孔法 16

附录E（规范性）涂层显微硬度测试方法 17

附录F（规范性）涂层厚度测量方法 19

参考文献 20

前 言

根据中国水利学会团体标准制修订计划安排，本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件共分为13章和6个附录，主要内容包括总则、粉末、涂层种类和厚度、涂层型式试验、表面预处理、喷涂施工、封孔、质量检验、验收及运行维护等。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国水利学会归口。执行过程中如有意见或建议，请寄送至中国水利学会（地址：北京市西城区白广路二条16号，邮编100053），以便今后修订时参考。

本文件主编单位：水利部水工金属结构质量检验检测中心。

本文件参编单位：常州液压成套设备厂有限公司、江苏武进液压启闭机有限公司、长江电力股份有限公司、黄河水利水电开发集团有限公司、水利部综合事业局、中国三峡集团公司流域枢纽管理中心、广东省水利电力勘测设计研究院、四川省水利水电勘测设计研究院、浙江省水利水电勘测设计院、福建省水利水电勘测设计研究院、雅砻江流域水电开发有限公司、郑州国水机械设计研究所有限公司。

本文件主要起草人：王占华 张小阳 沈翔 庄前军 耿红磊 李亚军 于忠敏 孔垂雨 毋新房 李东风 贺小平 胡木生 张怀仁 邱颖 洪伟 邱艳 王崴 张海龙 古文倩 刘细龙 冷伟 黄海杨 张子坚 曹毅 郑莉 李东明 涂从刚 张兵 张宇 方超群 曹世豪 王志颖 焦玉峰 于跃 韦仕龙 蹇万详 梁恒 王颖 王煦 邓玉海 易伟 孟庆丰 李世刚 王志民 杨娟娟 杜子立 张少飞 娄琳。

液压启闭机活塞杆陶瓷复合涂层技术规范

1 范围

本文件规定了液压启闭机活塞杆陶瓷复合涂层的粉末、种类和厚度、型式试验、喷涂施工、封孔、质量检验、验收及运行维护等技术要求。

本文件适用于液压启闭机活塞杆陶瓷复合涂层的粉末检验、涂层种类和厚度选择、涂层型式试验、喷涂施工、质量检验、验收及运行维护。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1479 金属粉末 松装密度的测定

GB/T 1482 金属粉末 流动性的测定

GB/T 4340.2 金属材料 维氏硬度试验 第2部分：硬度计的检验与校准

GB/T 8923.1 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第1部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级

GB/T 10125 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验

GB 11375 金属和其他无机覆盖层 热喷涂 操作安全

GB/T 13288.1 涂覆涂料前钢材表面处理 喷射清理后的钢材表面粗糙度特性 第1部分：用于评定喷射清理后钢材表面粗糙度的ISO 表面粗糙度比较样块的技术要求和定义

GB/T 13288.2 涂覆涂料前钢材表面处理 喷射清理后的钢材表面粗糙度特性 第2部分：磨料喷射清理后钢材表面粗糙度等级的测定方法 比较样块法

GB/T 13288.4 涂覆涂料前钢材表面处理 第4部分：ISO表面粗糙度比较样块的校准和表面粗糙度的测定方法 触针法

GB/T 16825.1 静力单轴试验机的检验 第一部分：拉力和（或）压力试验机测力系统的检验与校准

GB/T 18719 热喷涂 术语 分类

GB/T 18838 涂覆涂料前钢材表面处理喷射清理用金属磨料的技术要求

T/CHES ××—××××

GB/T 18839.2 涂覆涂料前钢材表面处理 表面处理方法 磨料喷射清理

GB/T 19356 热喷涂 粉末 成分和供货技术条件

SL/T 381 水利水电工程启闭机制造安装及验收规范

3 术语和定义

GB/T 18719界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

陶瓷粉末 ceramic powder

无机非金属粉末材料。

[来源：GB/T 18719—2002，5.1]

3.2

合金粉末 alloyed powder

由两种及以上元素经合金化的金属粉末材料。

[来源：GB/T 18719—2002，5.1]

3.3

粘结层 bond coating

为了改善涂层与基体结合性能或其他性能，首先喷涂在基体金属表面上的自熔合金粉末涂层。

[来源：GB/T 18719—2002，5.1，有修改]

3.4

工作层 top coating

在复合涂层体系中直接与环境相接触的表面喷涂层。

[来源：GB/T 18719—2002，5.1，有修改]

3.5

陶瓷复合涂层 ceramic composite coating

由粘结层和工作层组成的复合涂层。

[来源：GB/T 18719—2002，5.1，有修改]

3.6

超音速火焰喷涂 high velocity oxy-fuel spraying

利用超过音速的燃烧火焰流将喷涂材料加热到熔化状态，喷射到经预处理的基体表面或粘结层表面形成涂层的方法。

3.7

大气等离子喷涂 plasma spraying in air

利用等离子射流将喷涂粉末加热到熔化状态，喷射到经预处理的基体（基材、前钢材）表面形成涂层的方法。

[来源：GB/T 18719-2002，4.3]

3.8

涂层封孔剂 coat sealer

用以渗入和封闭喷涂层孔隙的材料。

[来源：GB/T 18719—2002，5.1]

3.9

抗拉结合强度 tensile adhesive strength

抗拉结合强度 R_H 指涂层与基体之间的结合强度，由最大载荷 F_m 与断裂面横截面积 S 之商计算出。

[来源：GB/T 18719—2002，7.1]

3.10

孔隙率 porosity

单位面积上针孔的数量。

4 总则

4.1 液压启闭机活塞杆材质应符合SL/T 381的规定。

4.2 活塞杆陶瓷复合涂层选择应综合考虑液压启闭机工作环境和使用年限。

4.3 活塞杆陶瓷复合涂层喷涂前应制订工艺文件并经型式试验验证。当喷涂材料、设备和工艺发生变化时，应重新进行型式试验，必要时提供第三方型式试验报告。

- 4.4 活塞杆陶瓷复合涂层喷涂操作安全应符合GB 11375的规定。
- 4.5 活塞杆不应与腐蚀性物品混合储运。运输时，活塞杆宜全部回缩于缸筒内。

5 粉末

- 5.1 粉末生产厂家应提供注明生产方法的粉末检验证书。检验证书应包括产品的牌号、批号、检测标准、化学成分、粒度范围、粒度分布、松装密度、流动性和颗粒形态。
- 5.2 粉末生产厂家应按喷涂厂家要求提供粉末显微结构和相的测定结果。
- 5.3 喷涂厂家应对采购的粉末进行检验，检验项目应包括粒度分布、颗粒形态、松装密度和流动性。
- 5.4 粉末粒度分布可采用激光粒度仪或电子显微镜进行测定。
- 5.5 粉末颗粒形态可通过扫描电子显微镜、金相显微镜或不低于200倍的放大镜进行观察。
- 5.6 粉末松装密度应按GB/T 1479的规定进行测定，并以g/cm³表示。
- 5.7 粉末流动性应按GB/T 1482的规定进行测定，并以s/50g表示。
- 5.8 喷涂厂家选择表1推荐的粉末粒度范围时，粉末参数应符合表1的规定；选择GB/T 19356规定的其他粉末粒度范围时，粉末参数由粉末生产厂家和喷涂厂家商定。

表1 粉末粒度范围及参数

粉末种类	粒度范围 (μ m)	粒度分布		颗粒形态	松装密度 (g/cm ³)	流动性 (s/50g)
		粒度范围 (μ m)	占比 (%)			
合金粉末	16~63	16~63	≥75	不规则	>4.0	<22
陶瓷粉末	5~45	5~45	≥75	不规则	>1.6	<35

- 5.9 粉末在使用前应烘干，烘干温度宜在120 ℃~200 ℃范围内，烘干时间应不少于2 h。

6 涂层种类和厚度

- 6.1 陶瓷复合涂层应由粘结层和工作层组成。粘结层应具有耐蚀性，宜选择Ni基合金、Co基合金或Fe基合金粉末涂层。工作层应具有耐磨性、抗弯曲强度，宜选择Al₂O₃系列、Cr₂O₃系列、Cr₃C₂系列和WC系列陶瓷粉末涂层。
- 6.2 粘结层、工作层种类及厚度可根据工作环境按表2进行选择，也可由供方和需方商定。
- 6.3 陶瓷复合涂层总厚度不得低于300 μ m。

表2 涂层种类和厚度

工作环境	粘结层		工作层	
	合金种类	厚度（μm）	陶瓷种类	厚度（μm）
普通大气环境	Ni基或Co基合金	100~150	Al ₂ O ₃ 系列	150~250
			Cr ₂ O ₃ 系列	
			Cr ₃ C ₂ 系列	
			WC系列	
	Fe基合金	120~150	Al ₂ O ₃ 系列	150~250
			Cr ₂ O ₃ 系列	
			Cr ₃ C ₂ 系列	
			WC系列	
海洋大气环境、淡水环境、海水环境和海淡水环境	Ni基或Co基合金	100~150	Al ₂ O ₃ 系列	150~250
			Cr ₂ O ₃ 系列	
			Cr ₃ C ₂ 系列	

7 涂层型式试验

- 7.1 涂层型式试验项目应包括涂层抗拉结合强度、抗冲击性、抗弯曲性、耐盐雾腐蚀性、孔隙率和显微硬度。
- 7.2 涂层抗拉结合强度值应不低于30 N/mm²，试验方法见附录A。
- 7.3 涂层抗冲击值应不低于2 J，试验方法见附录B。
- 7.4 涂层经2000次弯曲试验后不得有裂纹、剥落等缺陷，试验方法见附录C。
- 7.5 涂层经3000 h中性盐雾试验后不应出现变色、生锈、开裂和剥落等缺陷，试验方法应符合GB/T 10125的规定。
- 7.6 涂层孔隙率评定应符合下列规定，试验方法见附录D。
- a) 涂层封孔前可采用铁试剂试验法进行测试，涂层孔隙率应不大于3个/m²或孔隙率面积不超过测试区域面积的3%；
 - b) 涂层封孔后可采用电化学测试方法（ECP）进行针孔测试。工作环境为大气的活塞杆，碳钢基底上所测得涂层相对于饱和Ag/AgCl的电极电位应不低于-0.45 V；工作环境为水下的活塞杆，碳钢基底上所测得涂层相对于饱和Ag/AgCl的电极电位应不低于-0.35 V；
 - c) 工作层中不含导电成份时，涂层封孔后可采用针孔法进行检测，涂层应无针孔。

7.7 涂层表面磨削后的显微硬度应符合下列规定，试验方法见附录E。

- a) 工作层材料为 Al_2O_3 系列时，涂层表面显微硬度应不低于750 HV。
- b) 工作层材料为 Cr_2O_3 和 Cr_2C_3 系列时，涂层表面显微硬度应不低于800 HV。
- c) 工作层材料为WC系列时，涂层表面显微硬度应不低于1100 HV。

8 表面预处理

- 8.1 活塞杆表面预处理前，应采用溶剂法、碱性清洗剂法或加热脱脂法清除表面油脂及其他污物，并用胶带、橡胶垫或铁皮等对非预处理区域进行遮蔽保护。
- 8.2 表面预处理过程中，工作环境的空气相对湿度应低于85%或基体金属表面温度不低于露点以上3℃。
- 8.3 活塞杆表面预处理使用的磨料和压缩空气应干燥、无油。磨料可采用氧化铝或碳化硅，其技术要求应符合GB/T 18838的规定。
- 8.4 喷射工艺应符合GB/T 18839.2的规定。
- 8.5 活塞杆表面预处理应符合环保的有关规定。
- 8.6 活塞杆预处理后的表面清洁度等级应达到GB/T 8923.1中规定的Sa3级。
- 8.7 活塞杆预处理后的表面粗糙度Ra值应在25 μm~40 μm范围内。

9 喷涂施工

- 9.1 粘结层、工作层可采用超音速火焰喷涂（HVOF）或大气等离子（APS）喷涂方法进行喷涂。
- 9.2 超音速火焰喷涂（HVOF）和大气等离子（APS）喷涂工艺文件项目应符合表3的规定。

表3 喷涂工艺文件项目

项目	超音速火焰喷涂	大气等离子喷涂
燃料及压力流量	√	—
工作电流	—	√
工作电压	—	√
氧气压力和流量	√	—
送粉气体类型、流量及压力	√	√
粉末牌号和粒度	√	√
送粉速率	√	√
冷却方式	√	√
主离子气类型	—	√
主离子气流量及压力	—	√

副离子气体类型	—	√
副离子气流量及压力	—	√

表3 喷涂工艺文件项目（续）

项目	超音速火焰喷涂	大气等离子喷涂
喷涂距离	√	√
喷涂角度	√	√
喷枪移动速度	√	√
注：“√”表示包含；“—”表示不包含。		

- 9.3 喷涂前如发现基体金属表面被污染或返锈，应重新处理达到原要求的表面清洁度等级。活塞杆表面预处理检验合格后，方可进行喷涂施工。
- 9.4 喷涂前，应对非喷涂部位进行遮蔽保护。
- 9.5 空气相对湿度超过85%或基体金属表面温度低于露点以上3℃时，不应进行喷涂施工。
- 9.6 喷涂时，喷涂工艺参数应符合工艺文件要求。
- 9.7 粘结层喷涂完成后应进行厚度检验，检验合格后方可进行工作层的喷涂施工。

10 涂层封孔

10.1 封孔剂

- 10.1.1 封孔剂应具有高渗透性，与涂层相适应并在工作环境中耐腐蚀。
- 10.1.2 封孔剂种类可按表4选择，也可由供需双方根据工作环境商定。

表4 封孔剂种类

封孔剂种类		工作环境
热熔性	微晶石蜡系列、乙烯树脂系列、聚四氟乙烯树脂、硅树脂、酚醛树脂、环氧树脂等	普通大气、海洋大气、淡水、海淡水交界、海水
非热熔性	水玻璃、硅酸钠、氧化铝、二氧化硅、二氧化锆、磷酸盐、环氧清漆等	普通大气

10.2 封孔

- 10.2.1 空气相对湿度超过85%时，不应进行封孔施工；工作层喷涂结束8 h内应完成封孔施工。
- 10.2.2 非热熔性封孔剂可采用喷涂或刷涂方法进行施工，热熔性封孔剂应采用高温烘烤固化的方式进行施工。

10.2.3 活塞杆封孔完成后应进行磨削处理，磨削后外径尺寸偏差应符合SL/T 381的规定。

11 质量检验

11.1 表面预处理质量评定

11.1.1 表面清洁度和表面粗糙度的评定，均应在散射日光下或照度相当的人工照明条件下进行。

11.1.2 表面清洁度等级评定时，应用GB/T 8923.1中的照片与被检基体金属表面进行目视比较，评定方法应符合GB/T 8923.1的规定。

11.1.3 表面粗糙度评定应采用比较样块法或仪器法按以下要求执行：

- a) 采用比较样块法评定粗糙度时，应用样块按GB/T 13288.2的规定进行评定。比较样块应符合GB/T 13288.1的规定。
- b) 采用仪器法评定粗糙度时，应用符合GB/T 13288.4规定的表面粗糙度仪在活塞杆表面按每米1个评定点的原则进行测量。
- c) 单根活塞杆评定点应不少于5个。
- d) 评定点分布应具有均匀性和代表性。

11.2 涂层检验

11.2.1 活塞杆出厂前应进行涂层外观、厚度和表面粗糙度检验。

11.2.2 涂层外观应均匀一致，无划痕、针孔、脱落、裂纹等缺陷。可通过目视检测，必要时可采用不低于5倍的放大镜进行观测。

11.2.3 涂层厚度检验时，所测得涂层最小局部厚度应不低于设计厚度。测量方法见附录F。

11.2.4 涂层表面粗糙度宜在Ra0.2~0.4 μm范围内。检测时，应在活塞杆长度方向上按每米1个评定点进行测量。单根活塞杆检测评定点应不少于3个。

12 验收

12.1 活塞杆装配前，应对陶瓷复合涂层进行验收。

12.2 验收时，喷涂厂家应提供涂层喷涂工艺文件、粉末检验证书、粉末进货检验记录、表面预处理检验记录和质量检验报告。

13 运行维护

13.1 液压启闭机运行期间，应对活塞杆外露段涂层进行定期维护。维护时，宜将活塞杆全行程运行不少于1次，并在活塞杆涂层表面涂刷液压防锈油。表面有灰尘、污垢或生物附着时，应及时清除。

13.2 活塞杆外露段涂层维护周期可按下列要求执行：

- a) 工作环境为普通大气环境时，每3个月维护一次；
- b) 工作环境为海洋大气环境时，每2个月维护一次；
- c) 工作环境为淡水环境时，每2个月维护一次；
- d) 工作环境为海淡水、海水环境时，每1个月维护一次。

13.3 活塞杆外露段涂层表面有锈蚀时，应对锈蚀部位进行处理，严重时返厂处理。

附录 A

(规范性)

涂层抗拉结合强度试验方法

A.1 涂层抗拉结合强度应按公式 (A.1) 进行计算:

$$R_H = \frac{F_m}{S} \quad (\text{A.1})$$

式中:

R_H ——抗拉结合强度, N/mm^2 ;

F_m ——最大载荷, N ;

S ——断裂面横截面积, mm^2 。

A.2 拉伸试验机应符合GB/T 16825.1的规定,并能满足静态加载条件,准确度不低于 $\pm 1\%$ 。夹具系统应能保证试样在夹持和加载时保持同心,夹具系统结构示意图见图A.1。

A.3 试样分为A和B两种形式以及 $\Phi 25 \text{ mm}$ 和 $\Phi 40 \text{ mm}$ 两种尺寸,应根据抗拉结合强度和试验机能力选择试样尺寸。规定如下:

- a) 试样A如图A.2所示,应由基体块和加载块组成,在基体块的前端喷涂涂层,加载块应与平整的涂层表面粘结在一起;
- b) 试样B如图A.3所示,应由两个加载块和一个基体圆片所组成,基体圆片的一面喷涂涂层,基体圆片两面分别与加载块粘结在一起。

A.4 试样基体块或基体圆片材料强度应不低于45号钢。

A.5 在制备试样时,应避免产生任何弯曲载荷。试样制备方法和喷涂条件应与实际工件保持一致。喷涂时,试样侧面应无涂层,喷涂好的涂层应经磨削后再与加载块进行粘结。

A.6 应按照粘结剂的使用要求进行涂层或基体圆片与加载块的粘结。粘结剂固化过程中,试样应与夹持件进行连接,并保持垂直于涂层的方向加载。

A.7 试样数量应不少于3个。

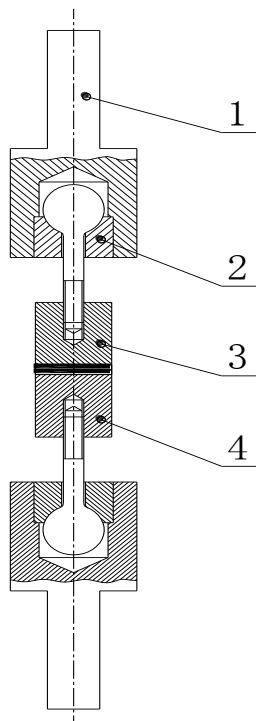
A.8 试验应在 $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 的环境温度下进行。

A.9 测试时,应保证涂层表面与试样轴保持垂直,将装有夹持件的试样插入拉力试验机的夹钳中,以恒速平稳地进行加载,直到发生断裂,加载速度应不超过 $1000\text{N/s} \pm 100\text{N/s}$ 。

A.10 试验结果评价应按下列规定执行:

- a) 测量基体块或基体圆片的直径时,测量精度应精确到 0.1 mm 。根据测量结果计算出涂层粘结表面的试样横截面积;

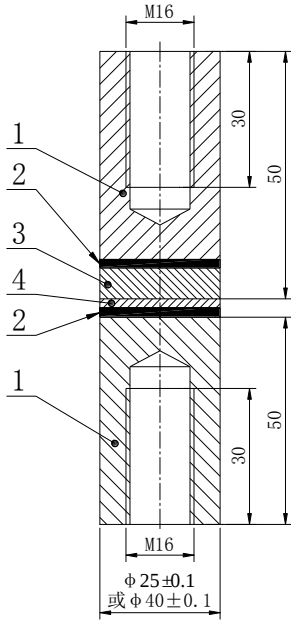
- b) 只有涂层与基体金属结合面发生断裂或涂层本身发生断裂的基体块方可用于计算抗拉结合强度；
- c) 当断裂发生于粘结剂层但抗拉结合强度计算结果不低于3 0N/mm²时，可判定涂层抗拉结合强度为合格。



- 1——夹持件；
2——接头；
3——加载块；
4——基体块。

图A.1 夹具系统结构

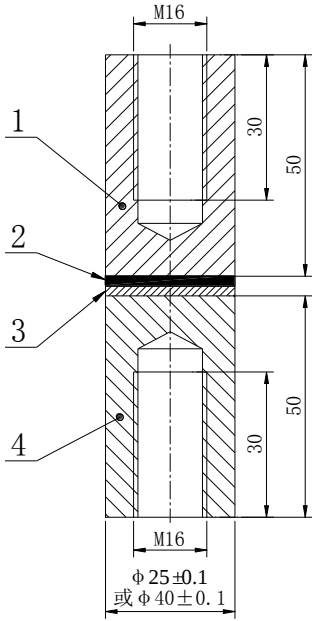
单位为毫米



- 1——加载块;
- 2——粘结剂层 ;
- 3——涂层;
- 4——基体块。

图A. 2 试样A

单位为毫米



- 1——加载块;
- 2——粘结剂层;
- 3——基体圆片;
- 4——基体块。

图A. 3 试样B

附 录 B

（规范性）

涂层抗冲击试验方法

- B.1 冲击试验器（机）的工作行程应不小于1 m。
- B.2 冲击试验器（机）配置的冲击钢球规格应为直径 $40\text{ mm}\pm 0.2\text{ mm}$ 、质量 $263\text{ g}\pm 4\text{ g}$ 。
- B.3 抗冲击试验的陶瓷复合涂层活塞杆试样规格应为直径 $60\text{ mm}\pm 0.2\text{ mm}$ 、长度 $250\text{ mm}\pm 2\text{ mm}$ 。
- B.4 试验时，应将试样放置于冲击试验器（机）铁砧上并固定好，根据供需双方约定的涂层抗冲击值调整钢球高度，然后将钢球松开，以自由落体的方式下落冲击试样。
- B.5 用不低于40倍放大镜对冲击位置进行观察，涂层表面应无裂纹、掉块、变形等缺陷。观察结果无法确定时，可以增加冲击次数。

附录 C

(规范性)

涂层弯曲试验方法

- C.1 试验机工作平台宽度应不小于1200 mm。
- C.2 试验机应配有两个支辊或V形槽和一个弯曲压头装置，两支辊或V形槽间距为1000 mm。
- C.3 弯曲试件应为直径 $50\text{ mm} \pm 0.2\text{ mm}$ 、长度 $1100\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$ 。
- C.4 试验环境温度应在 $10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 之间。
- C.5 试验时，应将试件按长度等分，并标识出中点位置，然后放置在两支辊上或V形槽中，使用试验机压头对准试件中点进行加载，使其变形大于或等于5 mm，进行反复加载-卸载弯曲疲劳性能试验至2000次。
- C.6 应用不低于40倍放大镜观察试件表面，涂层不得有裂纹、剥落等缺陷。

附录 D

(规范性)

涂层孔隙率测试方法

D.1 铁试剂试验法

D.1.1 适合于封孔前涂层贯穿孔的测试。

D.1.2 试验所用化学试剂应为分析纯级试剂，试验用水应为电导率小于等于20 us/cm的蒸馏水或去离子水。

D.1.3 氯化钠凝胶试剂和铁氰化物试剂配制应符合下列规定：

- a) 氯化钠凝胶试剂配制时，将50 g氯化钠和1 g非离子型润湿剂（如乳化剂0P-10）溶于水温为90 °C的1 L水中，然后将50 g明胶和琼脂溶于氯化钠溶液中。使用时，应将溶液加热到35 °C以上，使冷却过程中产生的凝胶再液化后方可使用；
- b) 铁氰化物试剂配制时，将10 g铁氰化钾溶于1 L水中，用盐酸溶液或5%的氢氧化钠溶液调整pH至 6.0 ± 0.2 。

D.1.4 试验用试纸应选用滤纸等材料，且在试验前应避免污染。

D.1.5 用于确定试纸上显示蓝色斑痕面积的柔性塑料模板尺寸应不小于10 mm×10 mm。

D.1.6 测试时应按下列步骤进行：

- a) 应用三氯乙烷等溶剂对试样表面进行清洗和脱脂；
- b) 先将试纸浸入氯化钠凝胶溶液，沥干后浸入铁氰化钾溶液。干燥后将试纸和未处理的试纸进行对比，若试纸出现蓝色斑痕或外观有明显变化，则证明试纸被铁污染，试纸应弃用；
- c) 将试纸浸入氯化钠凝胶溶液，试纸充分润湿后，取出试纸后约停1 min，沥去过量的溶液；
- d) 将浸润过的试纸贴在清洁过的被测涂层表面上，试纸应与涂层表面紧密贴合，不得留有气泡。试纸与涂层表面保持接触时间应不少于10 min。试验过程中如试纸变干，应适当滴加氯化钠凝胶溶液润湿。试验过程中试纸不应移动；
- e) 从涂层表面上揭下试纸并浸入铁氰化钾溶液中；
- f) 检查试纸上出现的蓝色斑点数量。

D.1.7 结果评定时，孔隙率可用试验区域内单位面积出现的孔隙数量表示，即 $X \text{孔}/\text{cm}^2$ ；或以试纸上蓝点的面积与试纸的面积比值计算的百分数表示，即X%。

D.2 电化学测试方法(ECP)

- D.2.1 适用于测试封孔后活塞杆表面金属氧化物陶瓷涂层的孔隙。
- D.2.2 检验涂层针孔时，封孔剂或密封油可不清除。
- D.2.3 测试部位应选择距离活塞杆涂层端部起始位置不少于150 mm的位置。
- D.2.4 电化学测试溶液应为0.5%NaCl水溶液，氯化钠化学试剂应为分析纯级试剂。
- D.2.5 测试用参比电极应为饱和Ag/AgCl。
- D.2.6 电位测量应选用数字直流电压表，其精度应达到0.1级。
- D.2.7 测试时，活塞杆陶瓷复合涂层表面润湿面积应不少于10 cm²。
- D.2.8 测试时间应不少于10 h。

D.3 针孔法

- D.3.1 适用于封孔后的工作层针孔测试。工作层中包含导电成分时不适用该方法。
- D.3.2 测试时，工作层厚度与针孔仪选用检测电压关系应符合表D.1的规定。

表D.1 工作层厚度与检测电压关系

工作层厚度 (μm)	100	150	200	250	300	350	400
检测电压 (kV)	1.0	1.2	1.5	1.7	2.0	2.2	2.4

附录 E

(规范性)

涂层显微硬度测试方法

- E.1 适用于活塞杆表面陶瓷涂层显微硬度测试。
- E.2 显微硬度测试所需试验力F的范围应为：0.09807 N≤F<1.961 N。
- E.3 显微硬度计应符合GB/T 4340.2的规定。
- E.4 压头应为具有正方形基面的金刚石锥体，并应符合GB/T 4340.2的规定。
- E.5 维氏硬度计压痕测量装置应符合GB/T 4340.2的规定。
- E.6 试样加工应符合下列规定：
- a) 试样表面应经抛光处理，其表面应平坦光滑，无氧化皮、油脂及污物；
 - b) 试样应在10℃～35℃条件下进行加工制备，且应根据材料特性进行机械抛光或电解抛光；
 - c) 试样陶瓷涂层厚度应为压痕对角线长度的1.5倍及以上，测试后的试样背面不应出现可见压痕。
- E.7 测试应在10℃～35℃室温下进行。
- E.8 测试步骤应按下列步骤进行：
- a) 在0.09807 N≤F<1.961 N范围选择试验力；
 - b) 将试样稳固地放置于钢性试台上，试验过程中试样不应产生位移；
 - c) 使压头与试样表面接触，垂直于试验面施加试验力，加力过程中不应有冲击和振动，直至将试验力施加至规定值；
 - d) 压头下降速度应在15～70 μm/s之间；
 - e) 从加力开始至全部试验力施加完毕的时间应在2～8 s之间。试验力保持时间应在10～15 s之间；
 - f) 在整个试验期间，硬度计应避免受到冲击和振动。
- E.9 任一压痕中心到试样边缘距离，应为压痕对角线长度的3倍及以上。两相邻压痕中心之间的距离，应为压痕对角线长度的6倍及以上。如果相邻压痕大小不同，应以较大压痕确定压痕间距。
- E.10 显微维氏硬度值可由试验力与测试面积比值乘以常数进行计算，计算公式如下：

$$HV = 0.1891 \frac{F}{d^2} \quad (E.1)$$

式中：

HV——维氏硬度，单位为HV；

T/CHES ××—××××

F ——最大载荷，单位为N；

d ——两压痕对角线 d_1 、 d_2 的平均值。

E. 11 在平面上压痕两对角线长度之差，应不超过对角线长度平均值的5%，否则，则应在报告中注明。

附录 F

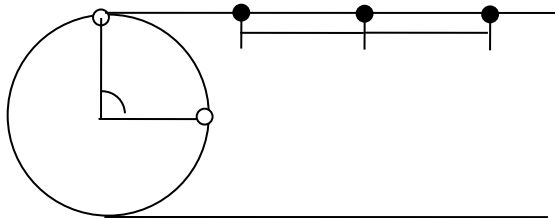
(规范性)

涂层厚度测量方法

F.1 涂层测厚仪精度应不低于 $\pm 5\%$ 。

F.2 测量前，应用标准块对测厚仪进行校准，确认测厚仪精度满足要求。

F.3 测量时，沿活塞杆长度方向宜每隔1 m选取一个基准面进行检测，单根活塞杆检测基准面应不少于3个。每个基准面内应在活塞杆同一断面沿圆周方向选取两个部位作为评定点，且两个部位至活塞杆轴心半径应相互垂直。每个评定点应选取3个测点进行检测，测点之间的距离应为0.1 m，求取三个数据的平均值作为该评定点局部厚度。圆周方向评定点位置关系及长度方向测量位置示意图见F.1。



图F.1 圆周方向评定点位置关系及长度方向测量位置示意图

F.4 涂层局部厚度应不小于设计文件规定的厚度。

参 考 文 献

- [1] GB/T 1732 漆膜耐冲击测定法
 - [2] GB/T 4340.1 金属维氏硬度试验 第1部分：试验方法
 - [3] GB/T 8642 热喷涂 抗拉结合强度的测定
 - [4] GB/T 10125 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验
 - [5] GB/T 17721 金属覆盖层 孔隙率试验 铁试剂试验
-