

ICS 编号

CCS编号

团 体 标 准

T/CHES ××—20××

液压启闭机活塞杆陶瓷复合涂层技术规范

Technical specification for ceramic coatings
of hydraulic hoist piston rod

(征求意见稿)

20××-××-××发布

20××-××-××实施

中国水利学会 发布

目 次

前言	1
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	3
4 基材	5
5 热喷涂粉末	5
6 涂层系统选择	6
7 表面预处理	7
8 热喷涂工艺	8
9 封孔处理	8
10 质量检验	9
11 验收、标志和包装、储存和运输	10
12 运行维护	11
附录 A陶瓷复合涂层厚度测量方法	12
附录 B抗拉结合强度试验方法	13
附录 C陶瓷复合涂层抗冲击试验方法	18
附录 D陶瓷复合涂层弯曲试验方法	19
附录 E陶瓷复合涂层中性盐雾试验方法	20
附录 F陶瓷复合涂层孔隙率测试方法	22
附录 G陶瓷复合涂层显微硬度测试方法	24

前 言

本标准按照 GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第1部分:标准化文件的结构和起草规则》要求起草。

本标准共九章，主要技术内容有：

- 范围；
- 规范性引用文件；
- 术语和定义；
- 热喷涂粉末；
- 涂层系统选择；
- 表面预处理；
- 热喷涂工艺；
- 封孔处理；
- 质量检验；
- 出厂验收、标志和包装、储存和运输
- 运行维护。

本标准为第1次发布。

本标准批准单位：中国水利学会

本标准解释单位：水利部水工金属结构质量检验检测中心

本标准主编单位：水利部水工金属结构质量检验检测中心

本标准参编单位：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

出版、发行单位：

本标准主要起草人：王占华 沈翔 沈建明 于忠敏 贺小平 李亚军 张小阳 胡木生 张怀仁 孔垂雨 古小七 刘细龙 冷伟 黄海杨 张子坚 曹毅 洪伟 郑莉 李东明 涂从刚 张兵 张宇 耿红磊 方超群 曹世豪 王崴 张海龙 焦玉峰 蹇万详 梁恒 郭宁泊 林立旗 王颖 王煦 邓玉海

本标准审查会议技术负责人：

本标准体例格式审查人：

液压启闭机活塞杆陶瓷复合涂层技术规范

1 范围

本标准规定了水利水电工程液压启闭机活塞杆表面采用超音速火焰喷涂、大气等离子喷涂工艺形成的陶瓷复合涂层的选择、制造、检验、验收及运行维护等有关规定。

本标准适用于水利水电工程液压启闭机活塞杆陶瓷复合涂层的选择、制造、检验、验收及运行维护。

2 规范性引用文件

下列文件对于本标准的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本标准。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。

- GB/T 699 优质碳素结构钢
- GB/T 1031 表面粗糙度 参数及其数值
- GB/T 1184 形状和位置公差 未注公差值
- 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 1591 低合金高强度结构钢
- GB/T 1732 漆膜耐冲击测定法
- GB/T 4340.1 金属维氏硬度试验 第1部分:试验方法
- GB/T 8642 热喷涂 抗拉结合强度的测定
- 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/T 11375 金属和其他无机覆盖层 热喷涂 操作安全
- GB/T 12607 热喷涂涂层命名方法
- 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 第一部分：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 17721 金属覆盖层 孔隙率试验 铁试剂试验
- 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

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 19352-2 热喷涂结构质量要求

GB/T 19356 热喷涂 粉末 成分和供货技术条件

SL 41 水利水电工程启闭机设计规范

SL 105 水工金属结构防腐蚀规范

MH/T 3027 热喷涂涂层结合强度测试

N/B T 47013 承压设备无损检测

NBD 10300 Requirements thermal spray layers

3 术语和定义

3.1

陶瓷复合涂层 ceramic composite coating system

由黏结层和工作层组成的涂层体系。

3.2

黏结层 bond coat

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

3.3

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。

3.4

陶瓷粉末 ceramic powder

无机非金属粉末材料。

3.5

合金粉末 alloyed powder

有两种或两种以上元素经合金化的金属粉末。

3.6

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

燃烧火焰流速度超过音速的粉末火焰喷涂方法。

3.7

大气等离子喷涂 plasma spraying in air

利用等离子射流将喷涂材料加热到塑性或熔化状态，再将它喷射到经预处理的基体表面形成涂层的方法。

3.8

涂层封孔剂 coat sealer

用以渗入和封闭喷涂层孔隙的材料。

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。

3.10

孔隙率 porosity

单位面积上针孔的数量。

3.11

型式试验 type test

验证产品或工艺能否满足技术规范的全部要求所进行的试验。

4 基材

4.1 一般要求

4.1.1 液压启闭机活塞杆材质采用整体钢锻件或钢轧制件进行制造时，材料的力学性能不应低于GB/T 699中钢号35或GB/T 1591中牌号Q355B的规定。

4.1.2 液压启闭机活塞杆选用不锈钢材质进行制造时，可选择304、316或2205。

4.1.3 液压启闭机活塞杆采用碳钢表面堆焊不锈钢工艺进行制造时，堆焊不锈钢厚度加工后应不小于0.5mm。

4.2 表面准备

4.2.1 活塞杆进行机械加工时，活塞杆导向段外圆直径应预留出规定的最小陶瓷复合涂层厚度的尺寸余量，外圆圆度应不低于GB/T1184中9级的规定，外圆母线直线度应不低于0.1mm/1000mm。

4.2.3 表面油脂应采用溶剂法、碱性清洗剂法或加热脱脂法清除表面可见的油脂及其他污物。

5 热喷涂粉末

5.1 一般要求

5.1.1 粉末存放时应干燥，无杂质，应密封于防潮金属、塑料容器中供货。如有特殊包装需要，由供需双方商定。

5.1.2 粉末生产厂家应提供粉末工艺证书，并在证书中标注生产方法，如如熔化法、粘结法、团聚法、雾化法等。

5.1.3 粉末生产厂家应提供粉末相应的检验证书。证书内容应包括供需双方规定的物理和化学分析的检验结果和产品的代号和批号，还应包括粒度测试结果和测试方法。

5.1.4 热喷涂粉末使用前应检验合格。

5.1.5 粉末在使用前应烘干，烘干温度宜在100~200℃范围内。

5.2 粉末检验

5.2.1 粉末样本和取样应是粒度混合均匀的混合物，相应的抽取样本和取样的操作方法和设备应符合GB/T 5314的规定。

5.2.2 粉末的化学成分可选用原子吸收光谱法、火焰发射光谱、X射线荧光分析、化学分析等试验方法进行测定。

5.2.3 粉末粒度范围应进行测定，测定方法、粒度范围、粒度上下限最大允许公差应由粉末厂家与热喷涂涂层生产厂家协定，保证喷涂工艺的重现性。

热喷涂工艺可用的典型粒度范围（以μm计）范例如表1所示。

表1 热喷涂粉末典型粒度范围 μm

粒度范围	范例1	范例2	范例3	范例4	范例5	范例6
上限颗粒直径	22	45	90	45	63	103
下限颗粒直径	5	22	45	5	16	32

5.2.4 粉末粒度分布可采用X射线吸收法和激光束散射法进行测定。

5.2.5 粉末颗粒形状和表面形貌可用扫描电子显微镜进行观察，其图像可与生产厂家提供的货样进行对比而确定其相似程度。

5.2.6 粉末的松装密度应按GB/T 1479的规定进行测定，并以g/cm³表示。

5.2.7 粉末的流动性应按GB/T 1482的规定进行测定，并以s/50g表示。

6 涂层系统选择

6.1 一般要求

6.1.1 活塞杆陶瓷复合涂层设计应考虑启闭机工作环境、使用工况、工作年限。

6.1.2 海洋大气、海水及海淡水交界环境中，活塞杆陶瓷复合涂层设计保护年限应至少不低于5年；普通大气和淡水环境中涂层设计保护年限应至少不低于10年。

6.2 涂层选择

6.2.1 活塞杆陶瓷复合涂层可根据需要设计由单一涂层构成，也可由黏结层和工作层组成。

6.2.2 黏结层应具有较好的耐蚀性，宜选择Ni基、Co基合金和Fe基合金。

6.2.3 工作层应具有较高的耐磨性、抗弯曲强度，宜选择Al₂O₃系列、Cr₂O₃系列、WC系列、Cr₃C₂系列陶瓷粉末。

6.2.4 陶瓷复合涂层系统由供方和需方协商达成。无明确规定时，可根据使用环境按表2进行选择。

表2 陶瓷复合涂层系统设计推荐参考方案

工作环境	黏结层		工作层	
	合金种类	涂层厚度 (μm)	陶瓷粉末 种类	涂层厚度 (μm)
普通大气环境	Ni基合金	100~150	Al ₂ O ₃ 系列	150~250
	Ni基合金	100~150	Cr ₂ O ₃ 系列	150~250
	Ni基合金	100~150	WC系列	150~250

	Ni基合金	100~150	Cr ₃ C ₂ 系列	150~250
	Co基合金	100~150	Al ₂ O ₃ 系列	150~250
	Co基合金	100~150	Cr ₂ O ₃ 系列	150~250
	Co基合金	100~150	WC系列	150~250
	Co基合金	100~150	Cr ₃ C ₂ 系列	150~250
	Fe基合金	120~150	Al ₂ O ₃ 系列	150~250
	Fe基合金	120~150	Cr ₂ O ₃ 系列	150~250
	Fe基合金	120~150	WC系列	150~250
	Fe基合金	120~150	Cr ₃ C ₂ 系列	150~250
海洋大气环境	Ni基合金	100~150	Cr ₂ O ₃ 系列	150~250
	Ni基合金	100~150	Al ₂ O ₃ 系列	150~250
	Ni基合金	100~150	Cr ₃ C ₂ 系列	150~250
	Co基合金	100~150	Cr ₂ O ₃ 系列	150~250
	Co基合金	100~150	Al ₂ O ₃ 系列	150~250
	Co基合金	100~150	Cr ₃ C ₂ 系列	150~250
淡水环境	Ni基合金	100~150	Cr ₂ O ₃ 系列	150~250
	Ni基合金	100~150	Al ₂ O ₃ 系列	150~250
	Ni基合金	100~150	Cr ₃ C ₂ 系列	150~250
	Co基合金	100~150	Cr ₂ O ₃ 系列	150~250
	Co基合金	100~150	Al ₂ O ₃ 系列	150~250
	Co基合金	100~150	Cr ₃ C ₂ 系列	150~250
海水和海淡水交界环境	Ni基合金	100~150	Cr ₂ O ₃ 系列	150~250
	Ni基合金	100~150	Al ₂ O ₃ 系列	150~250
	Ni基合金	100~150	Cr ₃ C ₂ 系列	150~250
	Co基合金	100~150	Cr ₂ O ₃ 系列	150~250
	Co基合金	100~150	Al ₂ O ₃ 系列	150~250
	Co基合金	100~150	Cr ₃ C ₂ 系列	150~250

7 表面预处理

7.1 一般要求

- 7.1.1 活塞杆表面应进行表面预处理。
- 7.1.2 设计文件中应明确规定活塞杆表面预处理清洁度等级和粗糙度范围。
- 7.1.3 活塞杆表面预处理前，应用胶带、橡胶垫、铁皮等对非喷涂区域防护。

7.2 表面预处理施工

- 7.2.1 表面预处理环境相对湿度不得超过85%或活塞杆表面温度高于露点温度3℃以上。
- 7.2.2 活塞杆表面预处理使用的磨料应干燥、无油，可采用氧化铝、碳化硅或冷硬铸铁, 其技术要求应符合GB/T 18838的规定。
- 7.2.3 活塞杆表面预处理使用的压缩空气应干燥、无油。
- 7.2.4 喷射工艺应符合GB/T 18839.2的规定。
- 7.2.5 活塞杆表面预处理应符合国家环保的有关要求。
- 7.2.6 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。

7.2.7 活塞杆预处理后的表面粗糙度Rz值应在25～40 μ m。

8 热喷涂工艺

8.1 一般规定

- 8.1.1 黏结层、工作层可采用超音速火焰（HVOF）、大气等离子（APS）方法之一进行喷涂。
- 8.1.2 应根据选定的喷涂材料选择相应的喷涂设备、喷枪及喷嘴结构。
- 8.1.3 喷涂施工前，应制定喷涂工艺规范用于指导喷涂施工，工艺规范可依据型式试验和喷涂经验确定。制订的工艺规范中喷涂工艺参数应符合表3的规定。

表3 热喷涂工艺规范应包含的工艺参数

工艺参数	超音速喷涂	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		√
喷涂距离	√	√
喷涂角度	√	√
喷枪移动速度	√	√

8.2 热喷涂施工

- 8.2.1 活塞杆表面预处理检验合格后，方可进行喷涂施工。
- 8.2.2 喷涂前，对不喷涂的部位应进行遮蔽保护。
- 8.2.3 表面预处理与热喷涂黏结层间隔时间不宜超过2小时。
- 8.2.4 喷涂时，喷涂工艺参数应符合相应材料喷涂工艺规范。
- 8.2.5 黏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。

9 封孔处理

9.1 一般规定

- 9.1.1 涂层喷涂后应进行封孔处理。

9.1.2 封孔剂应具有很好的渗透性、耐蚀性、与涂层的适应性、施工环保性能。

9.2 封孔剂施工

9.2.1 封孔剂应在工作层检验完成后尽快施工。

9.2.2 封孔剂可根据活塞杆工作环境由供需双方进行商定。无明确要求时，可按表3进行选择。

表3 封孔剂类型

封孔剂类型			适应环境
有机	石蜡	微晶石蜡系列	工业大气、海洋大气 淡水环境、海淡水环境 海水环境
	热可塑性树脂系列	乙烯树脂系列	
	热硬化性树脂系列	环氧清漆	
	氟树脂系列	聚四氟乙烯树脂	
	高分子	硅树脂等	
无机	硅酸盐系列	水玻璃、硅酸钠	腐蚀性较低的一般大气环境
	溶胶-凝胶系列	氧化铝、二氧化硅	
		二氧化锆、磷酸盐	

9.2.3 封孔剂一般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。

9.2.4 封孔完成后应进行磨削处理。

10 质量检验

10.1 一般规定

10.1.1 当材料、设备、工艺参数发生变化时，应进行型式试验。

10.1.2 出厂前活塞杆陶瓷复合涂层应进行出厂检验。

10.1.3 型式试验和出厂检验项目见表4。

表4 涂层检验项目

序号	检验项目	型式检验	出厂检验
1	涂层外观	√	√
2	涂层厚度	√	√
3	涂层抗拉结合强度	√	
4	涂层表面粗糙度	√	√
5	涂层抗冲击性能	√	
6	涂层抗弯曲性能	√	
7	盐雾试验	√	
8	孔隙率	√	
9	涂层表面硬度	√	
10	活塞杆尺寸精度		√

10.2 表面预处理质量评定

10.2.1 表面预处理结束后应进行质量评定。表面清洁度和表面粗糙度的评定，均应在良好的散射日光下或照度相当的人工照明条件下进行。

10.2.2 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的表面进行目视比较，评定方法按GB/T 8923.1规定执行。

10.2.3 采用比较样块法评定粗糙度时，用S样块按GB/T 13288.2的规定进行评定。比较样块技术要求应符合GB/T 13288.1的规定。

10.2.4 采用仪器法评定粗糙度时，用表面粗糙度仪在40mm的评定长度范围内测五点，取其算术平均值为此评定点的表面粗糙度值。

10.2.5 单根活塞杆表面粗糙度评定部位应不少于5个。

10.2.6 评定点分布应具有均匀性和代表性。

10.3 涂层质量评定

10.3.1 涂层外观应均应一致，无划痕、针孔、脱落、裂纹等缺陷。涂层外观可通过肉眼评定，必要时可通过低倍放大镜进行观测。

10.3.2 涂层厚度应对黏结层厚度和涂层总厚度进行测量。所测得局部厚度要求90%以上达到设计厚度，达不到设计要求的部位，其最小局部厚度不得低于设计值的90%。涂层厚度测量方法见附录A。

10.3.3 涂层系统抗拉结合强度不得低于30MPa。测试方法见附录B。

10.3.4 磨削后的涂层表面粗糙度不大于 $Ra0.4\mu m$ 。涂层表面粗糙度测量时，应使用表面粗糙度仪在陶瓷复合涂层圆周断面选取两个相互保持垂直的部位进行测量。

10.3.5 涂层抗冲击值不低于2J。测试方法见附录C。

10.3.6 涂层经2000次弯曲试验后不应产生裂纹和剥落。测试方法见附录D。

10.3.7 涂层应在封孔后进行盐雾试验。采用中性盐雾试验时，时间不少于2000h；采用乙酸加速试验时，试验时间不少于500h。试件试验后表面不应出现变色、腐蚀、裂纹、脱落等缺陷。测试方法见附录E。

10.3.8 涂层孔隙率在封孔前可采用铁羟试剂法进行测试，要求涂层孔隙率应不大于3个/ cm^2 。涂层封孔后可采用电化学测试方法（ECP）进行针孔测试。采用电化学测试方法时，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-0.45V。测试方法见附录F。

10.3.9 涂层表面硬度或显微硬度应在磨削后进行测试。工作层材料为 Al_2O_3 系列时，涂层表面硬度不低于750HV，工作层材料为 Cr_2O_3 、 Cr_2C_3 系列时，涂层表面硬度不低于800HV；工作层材料为WC系列时，涂层表面显微硬度不低于1100HV。涂层表面硬度不宜大于1200HV。型式试验试件的涂层硬度应在加工完成后采用显微硬度计进行检测。测试显微硬度时，测点中超过1200HV的测点比例应不超过80%。测试方法见附录G。

10.3.10 活塞杆尺寸精度应在磨削后进行测试。活塞杆尺寸精度应符合SL381和图纸设计要求。

11 陶瓷复合涂层活塞杆出厂验收、标志和包装、储存和运输

11.1 出厂验收

11.1.1 涂层加工完后应进行验收，涂层各项性能检验应符合本标准的规定。

11.1.2 涂层验收时，加工单位应提供设计文件及设计修改通知、热喷涂粉末材质证明、表面预处理检验记录、出厂质量检验报告。

11.1.3 涂层工艺发生变化时，应委托第三方对涂层型式试件进行检验和试验，提供第三方检验报告。

11.2 标志和包装

11.2.1 每件活塞杆应在明显部位标有生产厂家的标志和产品编号。

11.2.2 活塞杆独立包装时，包装前非陶瓷复合涂层金属外露部分涂防锈油。

11.2.3 活塞杆包装物强度应与活塞杆重量相适应，并应在包装物上标有明显的起吊点位置。包装物应能保证在吊装、搬运和运输过程中不损伤活塞杆，并有防止冲击、剧烈振动和雨淋而损坏的措施。

11.3 储存和运输

11.3.1 活塞杆宜在室内仓库储存，场地应平整，不得重压，防止扭曲变形；需露天裸放时，应有防雨、防锈、防风沙等措施；严禁与腐蚀性物品混储。

11.3.2 活塞杆在运输时应全部缩于缸筒内，不宜在外露的活塞杆位置垫铺硬物进行固定。

12. 陶瓷复合涂层活塞杆运行维护

12.1 一般要求

12.1.1 活塞杆伸出端应设防尘圈，宜设刮污圈，寒冷地区应设刮冰圈。

12.1.2 陶瓷复合涂层活塞杆安装运行后应进行定期运行维护。

12.2 运行维护内容

12.2.1 检查活塞杆防尘圈、刮污圈、刮冰圈有无破损、老化现象。有明显破损老化时应及时更换。

12.2.2 检查活塞杆外露段表面有无灰尘、污垢及生物附着。有灰尘、污垢、生物附着时，应用刮污圈及时清除。采用其它工具清除时，应避免损伤涂层。

12.2.3 将活塞杆外露段运行全行程不少于3次，或者在活塞杆表面涂刷液压防锈油，保证活塞杆表面有油脂存在。

12.2.4 检查活塞杆活塞杆外露段表面有无锈点。出现锈点时，应用砂纸除锈，并涂防锈油。

12.3 运行维护周期及频次

12.3.1 运行环境为腐蚀性较轻的大气环境时，宜每3个月维护活塞杆一次；

12.3.2 运行环境为海洋大气环境时，宜每2个月维护活塞杆一次；

12.3.3 运行环境为淡水环境时，宜每2个月维护活塞杆一次；

12.3.4 运行环境为海淡水、海水环境时，宜每1个月维护活塞杆一次；

12.3.5 运行频次较低的深孔弧形工作闸门活塞杆维护宜不少于每6个月一次。

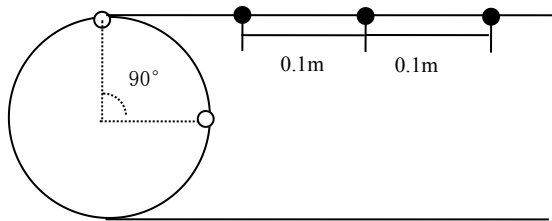
附录A 涂层厚度测量方法

A.1 使用的测厚仪精度应不低于 $\pm 5\%$ 。

A.2 测厚仪的调节。

测量前应先在标准块上对仪器进行系统调节，以确保其测量精度。然后分别在标准样块和预处理后的无涂层基底上进行置零比较，其读数差为修正值。

A.3 测量时，在每个部位沿长度方向每隔0.1m应测量三个数据，求取三个数据的平均值，作为该评定点局部厚度。在活塞杆同一断面沿圆周选取两个部位作为评定点，两个部位相互垂直。圆周方向评定点位置关系及长度方向测量位置示意图见A3.1。



图A3.1 圆周方向评定点位置关系及长度方向测量位置示意图

A.4 沿长度方向每隔1000mm选取一个断面位置进行局部厚度测量。当活塞杆长度小于2m时，应沿着长度方向每隔500mm选取一个断面位置进行局部厚度测量。

附录B 抗拉结合强度试验方法

（规范性附录）

1 适用范围

本方法适用于测定热喷涂涂层的强度或热喷涂涂层与基体材料之间的抗拉结合强度。

2 抗拉结合强度定义

拉力试验所获得的强度，由最大载荷 F_m 与断裂面横截面积 S 之商计算。即

$$R_H = \frac{F_m}{S}$$

式中：

R_H — 抗拉结合强度，单位为牛每平方米(N/mm²)；

F_m — 最大载荷，单位为牛(N)；

S — 断裂面横截面积，单位为平方毫米(mm²)

3 仪器设备

拉伸试验机应符合 GB/T 16825 的规定，并能满足静态加载条件，准确度不低于±1%。夹具系统应能保证试样在夹持和加载时保持同心，夹具系统结构形式见图1。

4 试样

4.1 形状

为了在试验中测定抗拉强度，本标准规定了A和B两种形式以及Φ25mm和Φ40mm两种尺寸的试样，根据试样抗拉结合强度的大小和试验机的能力选择不同的试样尺寸。

试样 A(见图2)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。

试样 B(见图3)由两个加载块和一个基体材料圆片所组成，在圆片的一面带有热喷涂涂层，然后将圆片与两个加载块粘结在一起。

4.2 制备

在制备试样时，要避免产生任何弯曲载荷，柱形结合组件应插入适当的夹具内组装，试样应与涂层端面垂直。在试验低强度基体材料时，必须相应地改变螺纹长度和直径，必要时可以使用具有内螺纹的套筒来与基体块连接。

基体块由规定的基体材料制成，其平面端带有规定的涂层。喷涂时要保证喷涂材料不沉积于试样的侧面上。加载块由其他高强度金属制成。

试样制备方法应与实际工件的制备方法一样，喷涂条件应与实际工件的喷涂条件一样，然后涂层要经过处理为后续的粘结准备条件。应保证涂层表面与试样轴的垂直度。

将一个加载块与基体块上的喷涂涂层粘结(试样A)，或将两个加载块与一个带有涂层的圆片从两面粘结在一起(试样 B)。

粘结程序以及粘结后试样如何放置直至粘结剂完全固化的整个过程，都要遵从粘结剂生产厂的规范。为使粘结剂固化，试样组件的各部应在夹持装置中保持垂直，并进行垂直加载。制备试样的具体情况应是试验报告的组

成部分。

4.3 试样数量

试样数量应不少于三个。

5 测试程序

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，加载速度不超过 $1000 \text{ N/s} \pm 100 \text{ N/s}$ 。

试验是在环境温度下进行。

系列试验的试验条件应保持一样。

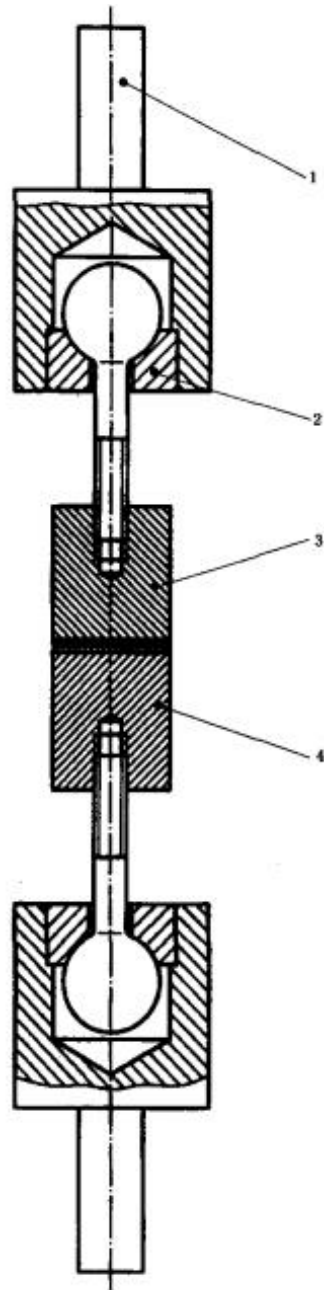
6 试验结果评价

测量基体块的直径，测量精确到 0.1 mm 。由此，计算出喷涂涂层粘结表面的试样横截面积。

只有喷涂涂层与基体金属结合面发生断裂，或喷涂涂层本身发生断裂的基体块才可用于计算，当断裂出现在粘结剂层时，该试样不应用于计算平均抗拉结合强度。

在热喷涂加工的常规监督中断裂也可位于粘结剂层，只要数据已满足最低结合强度要求即为合格。

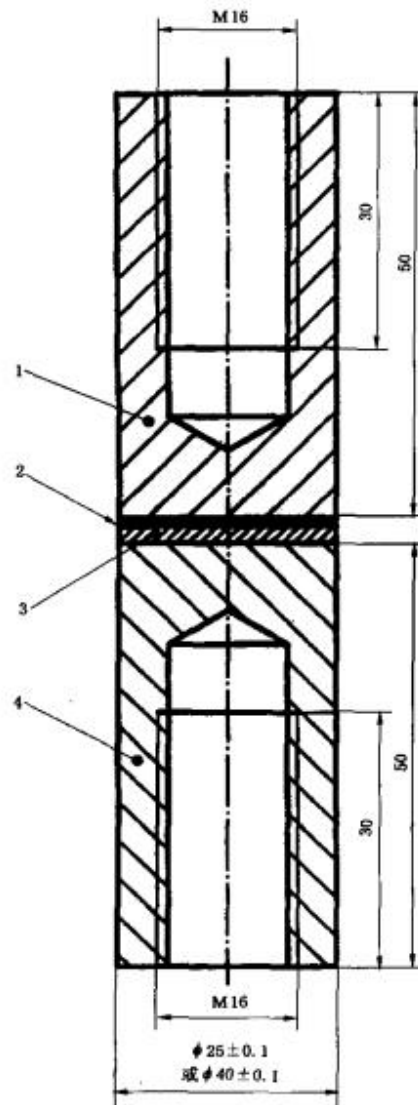
应计算抗拉结合强度 R_H 的统计平均值。



- 1—夹持件；
2—接头；
3—加载块；
4—基体块。

图1 试样A的安装示意图

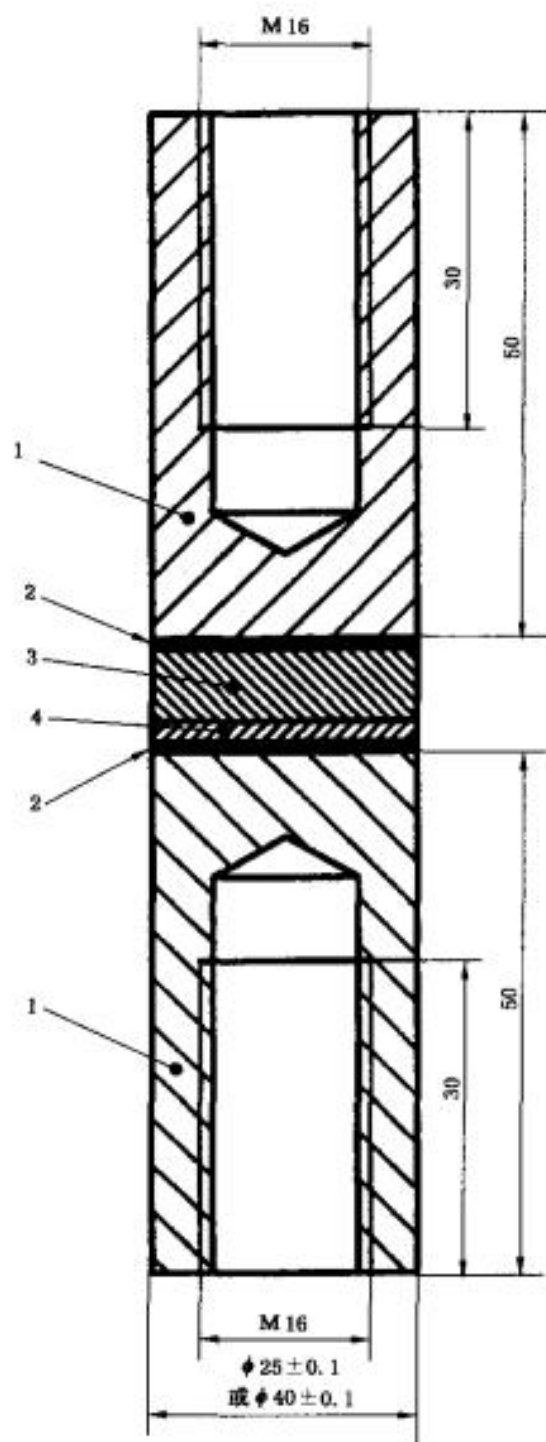
单位为毫米



- 1—加载块；
- 2—粘结剂层；
- 3—喷涂涂层；
- 4—基体块。

图2试样A示意图

单位为毫米



- 1——加载块；
- 2——粘结剂层；
- 3——基体片；
- 4——喷涂涂层。

图3 试样B示意图

附录C 陶瓷复合涂层抗冲击试验方法

（规范性附录）

1 冲击试验器（机）

- 1.1 冲击试验器（机）工作行程应不小于1m。
- 1.2 冲击试验器配置的冲击钢球规格应为直径 $40\text{mm}\pm 0.2\text{mm}$ 、质量为 $263\text{g}\pm 4\text{g}$ 。

2 试样规格

抗冲击试验陶瓷复合涂层活塞杆试样规格应为直径 $60\text{mm}\pm 0.2\text{mm}$ 、长度为 $250\text{mm}\pm 2\text{mm}$ 。

3 放大镜

用于观察试样涂层表面的放大镜倍数不低于40倍。

4 测试程序

将试样放置于冲击器（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。

用放大镜对冲击位置进行观察，当对观察结果不确定时，可以增加冲击次数。

5 结果评定

放大镜观察下，涂层表面不得有裂纹、掉块、变形等缺陷。

附录D 陶瓷复合涂层弯曲试验方法

（规范性附录）

1 材料试验机

材料试验机工作平台宽度应不小于1200mm。

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1000mm。

2 试件规格

试件直径为 $50\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ 、长度为 $1100\text{mm} \pm 2\text{mm}$ 。

3 放大镜

用于观察试样涂层表面的放大镜倍数不低于40倍。

4 测试程序

试验环境温度应在 $10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 之间。

将试件按长度等分标识出中点位置，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5mm，进行反复加载—卸载弯曲疲劳性能试验至2000次。

5 结果评定

用40倍放大镜观察试件表面，其陶瓷复合涂层不得有裂纹、剥落等缺陷。

附录E 陶瓷复合涂层中性盐雾试验方法

（规范性附录）

1 氯化钠溶液配制

本试验所用的氯化钠试剂采用化学纯或化学纯以上的试剂。在温度为 $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 时电导率不高于 20 MS/cm的蒸馏水或去离子水中溶解的氯化钠，配制成浓度为 $50\text{g/L} \pm 5\text{g/L}$ 。所收集的喷雾液浓度 应为 $50\text{g/L} \pm 5\text{g/L}$ 。在 25°C 时，配制的溶液密度在 $1.0255 \sim 1.0400$ 范围内。

2 盐溶液pH调整

根据收集的喷雾溶液的pH值，调整盐溶液到规定的pH值。

2.1 中性盐雾试验

试验溶液的pH值应调整至使盐雾箱收集的喷雾溶液的pH值在 $6.5 \sim 7.2$ 之间。pH 值的测量应在 $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 用酸度计测量，也可用测量精度不大于0.3的精密pH试纸进行日常检测。溶液pH值可用盐酸或氢氧化钠进行调整。

喷雾时溶液中二氧化碳损失可能导致溶液pH发生变化。应采取相应措施，例如，将溶液加热到 35°C ，才送入仪器或者由新的沸腾水配制溶液，以降低溶液中的二氧化碳，可避免溶液pH发生变化。

2.2 铜加速乙酸盐雾试验（CASS）

在按2.1制备的盐溶液中加入适量的冰乙酸，以保证盐雾箱收集的溶液pH为 $3.1 \sim 3.3$ 范围内，如除配制的溶液pH为 $3.0 \sim 3.1$ ，则收集的溶液pH值通常在 $3.1 \sim 3.3$ 范围内。溶液pH值可以用冰乙酸或氢氧化钠调整。在乙酸溶液基础上加入氯化铜（ $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ），其浓度为 $0.26\text{g/L} \pm 0.02\text{g/L}$ 。

3 盐雾箱

盐雾箱的容积应不小于 0.4m^3 ，因为较小的容积难以保证喷雾的均匀性。对于大容积的箱体，需要确保在盐雾试验期间，满足盐雾的均匀分布。箱顶部要避免试验时聚积的溶液滴落到试样上。

4 试样

陶瓷复合涂层试件直径 $100\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ ，长度为 $400\text{mm} \pm 2\text{mm}$ 。

5 试验条件

5.1 中性盐雾试验箱内温度： $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ；铜加速乙酸试验箱内温度 $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，整个试验过程中，整个试验箱的箱内温度变化应尽可能小。

5.2 在盐雾箱内已按计划放置好试样，并确认盐雾收集速度和条件在规定范围内后，才开始进行试验。

5.3 盐雾沉降的速度，经24h喷雾后，每 80cm^2 的面积上为 $1 \sim 2\text{ml}$ ；氯化钠溶液的浓度： $50\text{g/L} \pm 5\text{g/L}$ 。pH值的范围是：中性盐雾试验为 $6.5 \sim 7.2$ ；铜加速乙酸盐雾试验为 $3.1 \sim 3.3$ 。

5.4 用过的盐雾不得再用。

5.5 试验期间的温度和压力应温度在规定范围内。

6 试验周期

陶瓷复合涂层中性盐雾试验周期不少于2000h，铜加速乙酸试验时间不少于500小时。如设计文件或供需双方另有约定，应按设计要求或供需双方约定的周期进行试验。

在规定的试验周期内，喷雾不得中断，只有当需要短暂观察试样时才能打开盐雾箱。

如果试验终止取决于开始出现腐蚀的时间，应经常检查试样，因此，这些试样不能同要求预定试验周期的试样一起试验。

7 试验后试样处理

试验结束后取出试样，为减少腐蚀产物的脱落，试样在清洗前放在室内自然干燥0.5 h~1 h, 然后用温度不高于40℃的清洁流动水轻轻清洗以除去试样表面残留的盐雾溶液，接着在距离试样约300 mm处用气压不超过200kPa的空气立即吹干。

8 试验结果评价

涂层经2000h试验后不应出现变色、腐蚀、裂纹、脱落等缺陷。当供需双方另有约定试验时间时，涂层评价可包含：

- a) 验后的外观；
- b) 除去表面腐蚀产物后外观；
- c) 腐蚀缺陷的数量及分布（即：点蚀、裂纹、气泡、锈蚀或有机涂层划痕处锈蚀的蔓延程度等），可按照 ISO 8993和ISO 10289 所规定的方法以及 ISO 4628-1、ISO 4628-2、ISO 4628-3、ISO 4628-4、ISO 4628-5、ISO 4628-8中所述的有机涂层的评价方法进行评定；
- d) 开始出现腐蚀的时间；
- e) 质量变化；
- f) 显微形貌变化；
- g) 力学性能变化。

附录F 陶瓷复合涂层孔隙率测试方法

（规范性附录）

1 铁试剂试验法

铁羟基试验法适合于封孔前涂层贯穿孔的测试。

1.1 试剂和材料

1.1.1 纯度

试验所用化学试剂必须是分析纯级试剂，试验用水应为电导率不超过20us/cm的蒸馏水或去离子水。

1.1.2 试剂溶液配制

1.1.2.1 氯化钠试剂

将50g氯化钠和1g非离子型润湿剂（如乳化剂0P-10）溶于1L热水（90℃）中，再将50g明胶和琼脂溶于上述热氯化钠溶液中，溶液冷却后会产生凝胶，使用时需加热到35℃使凝胶再液化。

1.1.2.2 铁氰化物试剂

将10g铁氰化钾溶于1L水中，用盐酸溶液（1+9）或5%（m/m）氢氧化钠溶液调整pH至 6.0 ± 0.2 。溶液随用随配。

1.1.3 试纸

试验用纸应在试验时具有一定强度，如滤纸。试纸在试验前不应受任何污染。

1.1.4 可选用器具

制备一块具有正方形孔（尺寸不小于10mm×10mm）的平整柔性塑料薄板（模板），用于确定试纸上显示蓝色斑痕的面积。

1.2 测试步骤

1.2.1 预处理

用适当溶剂如三氯乙烷对试样表面进行清洗和脱脂。

1.2.2 试纸处理

1.2.2.1 铁污染试验

试纸不应被铁污染。先将试纸浸入氯化钠溶液，沥干，然后再浸入铁氰化钾溶液，将干燥后的试纸和未处理的试纸进行对比，若出现蓝色斑痕或白色纸外观有轻度变化，则证明纸被铁污染。

1.2.2.2 制备

剪适当尺寸的试纸，浸入氯化钠凝胶溶液，试纸充分润湿后，取出试纸，约停1min，滴去过量的溶液。

1.2.2.3 试纸应用

将浸润过的试纸贴在清洁过的被测涂层表面上，试纸与涂层表面紧密贴合，不应留有气泡，以使氯化钠溶液与暴露的基体金属发生反应。试纸与试验面保持接触10min。试验中如试纸变干，应适当滴加氯化钠

溶液润湿，但不能移动试纸。

1.2.2.4 试纸显色

从试验面上揭下试纸并立即浸入铁氰化钾溶液中，使试纸上对应涂层有贯穿孔处显现蓝色斑痕。

1.2.3 孔隙计数

检查显色试纸试验面积内出现的蓝色斑点数量。

1.3 试验结果

孔隙率用试验区域内单位面积出现的孔隙数量表示，即X孔/cm²。

2 电化学测试方法(ECP)

电化学测试方法适用于测试封孔后活塞杆表面的金属氧化物涂层。

电化学测量方法检验涂层针孔不需要清除封孔剂或密封油。电化学测试方法测量部位应选择经常在缸体里润滑的活塞杆端进行，距离活塞杆涂层端部起始位置不少于150mm。

电化学测试溶液为0.5%NaCl水溶液，测试时间不少于10h。测试时，活塞杆陶瓷复合涂层表面润湿面积不少于10cm²。

表F.1 ECP试验10小时后的孔隙评估标准

条件	条件描述	相对于饱和Ag/AgCl的电极电位 (V)
干燥	每年连续浸润两天时间的次数少于两次	——
规律性干湿交替	每年连续浸润两天时间的次数多于两次	-0.45
浸润表面	每年连续浸润一周时间的次数多于两次	-0.35
备注	1. 为碳钢基底上所测得电位，电位越高，涂层质量越好，电位越低，说明涂层密封性越不好； 2. 测试时，应去除液压油； 3. 电位测试基于缝隙腐蚀机理。	

3 针孔法

针孔仪测试涂层针孔法适合于封孔后的陶瓷涂层，面层中包含金属成分时，不适用该方法。每根活塞杆出厂前均应进行针孔测试。测试时，应根据工作层涂层厚度不同选择合适的电压，涂层厚度与针孔仪选择电压见表F.2。

表F.2涂层厚度与检测电压关系

涂层厚度 (μm)	100	150	200	250	300	350	400	500	600	800	1000
电压 (kV)	1.0	1.2	1.5	1.7	2.0	2.2	2.4	2.9	3.3	4.0	4.7

附录G 显微硬度测试

(规范性附录)

1 范围

本方法适用于活塞杆表面陶瓷涂层显微硬度测试。

试验力范围在 $0.09807\text{N} \leq F < 1.961\text{N}$ 。

2 原理

将顶部两相对面具有规定角度的正四棱锥体金刚石压头用一定的试验力压入试样表面，保持规定时间后，卸除试验力，测量试样表面压痕对角线长度(见图1)。

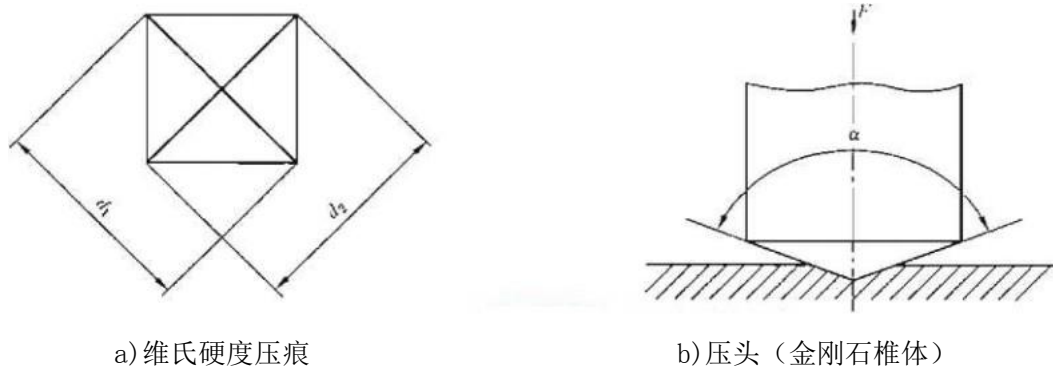


图1 试验原理

3 测试仪器

3.1 硬度计

显微硬度计应符合GB/T 4340.2规定，在要求的试验力范围内施加规定的试验力。

3.2 压头

压头应是具有正方形基面的金刚石锥体，并符合GB/T 4340.2的规定。

3.3 维氏硬度计压痕测量装置

维氏硬度计压痕测量装置应符合GB/T 4340.2相应要求。

4 试样

4.1 试样表面应平坦光滑，试验面上应无氧化皮及外来污物，尤其不应有油脂。除非在产品标准中另有规定。试样表面的质量应保证压痕对角线长度的测量精度，建议试样表面进行表面抛光处理。

4.2 制备试样时应使由于过热或冷加工等因素对试样表面硬度的影响减至最小。

4.3 由于显微维氏硬度压痕很浅，加工试样时建议根据材料特性采用抛光/电解抛光工艺。

4.4 试样或试验层厚度至少应为压痕对角线长度的1.5倍，见附录A。试验后试样背面不应出现可见变形压痕。

4.5 对于在曲面试样上试验的结果，应使用附录B表B.1～表B.6进行修正。

4.6 对于小截面或外形不规则的试样，可将试样镶嵌或使用专用试台进行试验。

5 试验程序

5.1 试验一般在10℃~35℃室温下进行，对于温度要求严格的试验，室温应为23℃±5℃。

5.2 在0.098 07N≤F<1.961N范围选择试验力。

5.3 试台应清洁且无其他污物（氧化皮、油脂、灰尘等）。试样应稳固地放置于钢性试台上以保证试验过程中试样不产生位移。

5.4 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。从加力开始至全部试验力施加完毕的时间应在2s~8s之间。压头下降速度应在15 μm/s~70 μm/s之间。试验力保持时间为10s~15s。在整个试验期间，硬度计应避免受到冲击和振动。

5.5 任一压痕中心到试样边缘距离，至少应为压痕对角线长度的3。两相邻压痕中心之间的距离，至少应为压痕对角线长度的6倍。如果相邻压痕大小不同，应以较大压痕确定压痕间距。

5.6 应测量压痕两条对角线的长度，用其算术平均值按表2计算维氏硬度值。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%，如果超过5%；则应在试验报告中注明。硬度计放大系统应能将对角线放大到视场的25%~75%。