

# 施工环境对密封剂剥离强度影响研究

赵连红, 刘成臣, 金涛, 何卫平, 王浩伟

(中国特种飞行器研究所 结构腐蚀防护与控制航空科技重点实验室, 湖北 荆门 448035)

**摘要:** **目的** 研究密封剂的施工工艺环境对其剥离强度的影响。**方法** 采用正交实验法, 分别从待密封表面清洗、密封剂厚度、密封剂混合比、密封剂施工温湿环境等 4 个影响因素研究对剥离强度的影响, 找出影响因素的主次关系和各自影响趋势。**结果** 对密封剂剥离强度影响程度由大到小顺序依次为表面清洁度、涂覆厚度、温度/湿度、密封剂混合比。剥离强度与待密封表面清洗程度、密封剂厚度大小成正相关, 与密封剂温/湿环境大小成反相关。**结论** 在密封剂施工工艺环境规范内, 了解各环境因素的影响特点, 能有效提高密封剂的剥离强度大小。

**关键词:** XM22 硫化密封剂; 剥离强度; 施工工艺环境; 正交实验法

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2017.11.013

**中图分类号:** TJ07; T Q433.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2017)11-0064-06

## Influences of Construction Environment on Peel Strength of Sealant

ZHAO Lian-hong, LIU Cheng-chen, JIN Tao, HE Wei-ping, WANG Hao-wei

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structural Corrosion Prevention and Control, China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To study effects of construction process environment on peel strength of sealant. **Methods** The orthogonal experiment was applied to study effects of sealant peel strength through four influencing factors including cleaning of surface to be sealed, thickness of sealant, mixing ratio of sealant and temperature and humidity environment of sealant construction, to find the primary and secondary relationships and influencing trends of influencing factors. **Results** According to the order from large to small, factors influencing peel strength of sealant were: the cleaning of surface to be sealed, thickness of sealant, temperature and humidity environment of sealant construction and mixing ratio of sealant. The peel strength was positively correlated with the degree of sealing of the surface to be sealed and the thickness of the sealant, and inversely related with the sealant temperature and humidity environment. **Conclusion** In the sealant construction process environmental norms, understanding impacts of environmental factors could improve the sealant peel strength effectively.

**KEY WORDS:** XM22 vulcanization sealant; peel strength; construction process environment; orthogonal experiment

XM 系列聚硫密封剂由于具有较好的性能, 在飞行器上广泛应用, 比如航空结构铆接、焊接和螺纹接头、仪表等密封部位, 其密封形式有贴合面密封、间隙密封等。密封剂的施工环境(温/湿度等)和使用环境(燃油、微生物、光照等环境)影响自身的密封

性能。剥离强度是密封剂性能指标的一项重要, 是评价密封剂有效性和可靠性的重要手段<sup>[1-8]</sup>。文中针对密封剂在铝合金材料上应用易出现剥离的问题, 特别是密封剂在施工过程中无法保障施工环境, 导致密封剂剥离强度太小、剥离强度寿命太短等问题进行了研

收稿日期: 2017-06-25; 修订日期: 2017-08-01

作者简介: 赵连红(1988—), 男, 湖北荆门人, 工程师, 研究方向腐蚀环境航空航天材料损伤行为研究。

究。目前，施工环境对密封剂性能影响往往被忽略，导致对密封剂施工工艺环境研究较少，文献[3-4]对密封剂剥离强度影响因素进行了研究，得出环境对于剥离强度影响较大的结论。鉴于此，文中开展待密封表面清洗、密封剂厚度、密封剂混合比、密封剂施工温/湿环境对密封剂剥离强度的影响研究<sup>[9-10]</sup>，为工程技术人员在密封剂施工过程提供参考和借鉴<sup>[11-12]</sup>。

## 1 实验

### 1.1 试验件

试验采用硫化密封剂 XM22，试验件为平板试样，试验件尺寸为 150 mm×75 mm×3 mm，其材料为常用的 LY12 铝合金材料，表面处理采用硫酸阳极，涂层体系采用 S06-1010H 底漆，详见表 1。参照 HB 5249—1993《室温硫化密封剂 180° 剥离强度试验方法》的试验件制备方法<sup>[10]</sup>，使用 XM22 硫化密封剂制备密封剂剥离试验件，如图 1 所示。

表 1 密封剂剥离强度试验件清单

| 名称             | 编号 | 试片   |       | 防护体系         | 密封剂  |
|----------------|----|------|-------|--------------|------|
|                |    | 材料   | 表面处理  |              |      |
| WXMPB1~WXMPB27 |    | LY12 | 硫酸阳极化 | S06-1010H 底漆 | XM22 |

图 1 密封剂剥离强度试验件

### 1.2 密封剂施工环境和划分方法

针对密封剂在施工过程中常出现的施工环境，结合密封剂施工工艺规范和设计规范<sup>[6]</sup>，分别从待密封表面清洗、密封剂厚度、密封剂混合比、密封剂施工温/湿环境等 4 个施工环境因素，考虑对密封剂剥离强度的影响，依据程度将 4 个环境因素划分为 3 个不同影响水平。

1) 表面清洗：清洗的程度可为未清洗、丙酮擦洗 1 次、丙酮擦洗 3 次。

密封剂涂敷厚度：未达到标准厚度/1 mm、达到标准度厚度/2 mm、超过标准厚度/3 mm。

密封剂混合比分为：基膏 100/硫化膏 7、基膏 100/硫化膏 10、基膏 100/硫化膏 13。

4) 施工环境：温度 21℃/湿度 45%、温度 23℃/湿度 50%、温度 25℃/湿度 55%。

为了充分考虑到每个影响因素对于剥离强度的影响，采用正交实验法<sup>[13-14]</sup>形式开展实验，考虑密封剂施工工艺环境的 4 个影响因素，每个影响因素有 3 个水平，可以采用试验设计方法 L9(3<sup>4</sup>)设计试验。密封剂 XM22 施工工艺环境试验的因素、水平见表 2，

密封剂剥离强度试验件类型及清单见表 3。

表 2 XM22 密封剂施工工艺环境试验的因素水平表

| 水平 | 表面清洁   | 密封剂涂敷厚度/m | 密封剂混合比      | 温度/相对湿度 |
|----|--------|-----------|-------------|---------|
| 1  | 未清洗    | 1         | 基膏100/硫化膏7  | 21℃/45% |
| 2  | 丙酮擦洗1次 | 2         | 基膏100/硫化膏10 | 23℃/50% |
| 3  | 丙酮擦洗3次 | 3         | 基膏100/硫化膏13 | 25℃/55% |

表 3 密封剂剥离强度试验件类型及清单

| 序号 | 试验件编号      | 材料类型 | 表面清洁 | 涂敷厚度 | 密封剂混合比 | 温度/湿度 |
|----|------------|------|------|------|--------|-------|
| 1  | WXMPB1~3   | LY12 | 1    | 1    | 1      | 1     |
| 2  | WXMPB4~6   |      | 1    | 2    | 2      | 2     |
| 3  | WXMPB7~9   |      | 1    | 3    | 3      | 3     |
| 4  | WXMPB10~12 |      | 2    | 1    | 2      | 3     |
| 5  | WXMPB13~15 |      | 2    | 2    | 3      | 1     |
| 6  | WXMPB16~18 |      | 2    | 3    | 1      | 2     |
| 7  | WXMPB19~21 |      | 3    | 1    | 3      | 2     |
| 8  | WXMPB22~24 |      | 3    | 2    | 1      | 3     |
| 9  | WXMPB25~27 |      | 3    | 3    | 2      | 1     |

### 1.3 实验步骤

按照 HB 5249—1993《室温硫化密封剂 180° 剥离强度试验方法》的实验方法，开展 XM22 硫化密封剂的剥离强度实验。为了避免试验样本量太少导致实验数据分散性太大的问题，在实验中每一组试验有 3 个平行试验件，每个试验件有 3 条帆布，每条帆布带需要记录 8 个左右剥离负荷峰值，保证试验样本量。同时对剥离负荷峰值进行置信度分析，剔除异常试验数据，确保试验数据的有效性，最后在每组试验结果中求解剥离强度均值。



图 2 剥离试验

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 剥离强度计算

依据 HB 5249—1993《室温硫化密封剂 180°剥离

强度试验方法》检测剥离负荷峰值,然后求解剥离强度值大小,再者对有效的负荷峰值求均值后计算剥离强度,公式为:

$$\sigma_B = P(-)/b \quad (1)$$

式中:  $\sigma_B$  为 180°剥离强度, kN/m;  $P(-)$  为剥离负荷峰值的均值, N;  $b$  为试样宽度, mm。

剥离负荷峰值进行置信度分析,首先负荷峰值需满足正态分布  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ , 取  $\alpha=0.5$ , 即置信水平为  $1-\alpha=0.95$ , 可求出一个尽可能小的区间  $[\theta_1, \theta_2]$  使满足  $P\{\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2\} = 1-\alpha$ 。通过统计学方法求出剥离负荷峰值的均值  $\mu$  和对应的置信区间, 方法见式 (2) 和式 (3)。

由于  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ,  $X(-) \sim N(\mu, \sigma^2/n)$ ,  $E X(-) = \mu$ ,

$D X(-) = \sigma^2/n$ , 则变量  $Z$  服从标准正态分布, 即:

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}} \sim N(0,1) \quad ,$$

$$P\left\{\bar{X} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{\alpha/2} \leq \mu \leq \bar{X} + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{\alpha/2}\right\} = 1-\alpha \quad (2)$$

则区间为:

$$\left[\bar{X} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{\alpha/2}, \bar{X} + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{\alpha/2}\right] \quad (3)$$

按照上式对试验件负荷峰值进行置信度分析,剔除了异常数据,得出每一组数据的剥离负荷峰值的均值  $\mu$  和对应的置信区间, 具体见表 4。

表 4 WXMPB 试验件剥离负荷峰值可信度分析

| 试件编号     | 平均剥离负荷<br>峰值/N | 置信度   | 置信区间       | 总平均剥离<br>负荷峰值/N | 总平均剥离<br>强度/(kN·m <sup>-1</sup> ) |
|----------|----------------|-------|------------|-----------------|-----------------------------------|
| WXMPB-1  | X1-1           | 10.62 | (95%,2.17) | 12.60           | 0.50                              |
|          | X1-2           | 9.68  | (95%,1.93) |                 |                                   |
|          | X1-3           | 17.51 | (95%,4.32) |                 |                                   |
| WXMPB-2  | X2-1           | 26.98 | (95%,5.15) | 22.82           | 0.91                              |
|          | X2-2           | 22.98 | (95%,3.67) |                 |                                   |
|          | X2-3           | 18.49 | (95%,5.14) |                 |                                   |
| WXMPB-3  | X3-1           | 19.54 | (95%,1.65) | 17.9            | 0.71                              |
|          | X3-2           | 14.27 | (95%,1.08) |                 |                                   |
|          | X3-3           | 18.64 | (95%,1.21) |                 |                                   |
| WXMPB-4  | X4-1           | 8.66  | (95%,1.54) | 10.8            | 0.43                              |
|          | X4-2           | 12.19 | (95%,1.03) |                 |                                   |
|          | X4-3           | 11.61 | (95%,1.28) |                 |                                   |
| WXMPB-5  | X5-1           | 12.68 | (95%,4.63) | 9.93            | 0.40                              |
|          | X5-2           | 8.79  | (95%,0.61) |                 |                                   |
|          | X5-3           | 8.30  | (95%,1.83) |                 |                                   |
| WXMPB-6  | X6-1           | 14.62 | (95%,4.42) | 11.71           | 0.47                              |
|          | X6-2           | 12.33 | (95%,4.15) |                 |                                   |
|          | X6-3           | 8.17  | (95%,4.79) |                 |                                   |
| WXMPB-7  | X7-1           | 5.35  | (95%,0.70) | 5.34            | 0.21                              |
|          | X7-2           | 7.04  | (95%,1.75) |                 |                                   |
|          | X7-3           | 3.64  | (95%,0.72) |                 |                                   |
| WXMPB-8  | X8-1           | 7.28  | (95%,2.56) | 5.41            | 0.22                              |
|          | X8-2           | 5.38  | (95%,0.90) |                 |                                   |
|          | X8-3           | 3.58  | (95%,2.35) |                 |                                   |
| WXMPB-9  | X9-1           | 4.93  | (95%,1.55) | 6.02            | 0.24                              |
|          | X9-2           | 8.26  | (95%,4.60) |                 |                                   |
|          | X9-3           | 4.87  | (95%,1.51) |                 |                                   |
| WXMPB-10 | X10-1          | 5.19  | (95%,2.15) | 5.84            | 0.23                              |
|          | X10-2          | 7.23  | (95%,2.25) |                 |                                   |
|          | X10-3          | 5.09  | (95%,0.74) |                 |                                   |
| WXMPB-11 | X11-1          | 4.97  | (95%,1.35) | 6.15            | 0.25                              |
|          | X11-2          | 8.74  | (95%,1.94) |                 |                                   |
|          | X11-3          | 5.15  | (95%,1.13) |                 |                                   |

续表 4

|          |       |       |             |                |       |      |
|----------|-------|-------|-------------|----------------|-------|------|
| WXMPB-12 | X12-1 | 6.13  | (95%,1.63)  | [4.50,7.76]    | 5.17  | 0.21 |
|          | X12-2 | 5.07  | (95%,0.96)  | [4.11,6.03]    |       |      |
|          | X12-3 | 4.31  | (95%,1.51)  | [2.80,5.82]    |       |      |
| WXMPB-13 | X13-1 | 66.38 | (95%,5.79)  | [60.58,72.17]  | 63.61 | 2.34 |
|          | X13-2 | 48.62 | (95%,4.93)  | [43.69,53.55]  |       |      |
|          | X13-3 | 77.02 | (95%,3.09)  | [73.93,80.11]  |       |      |
| WXMPB-14 | X14-1 | 73.92 | (95%,1.70)  | [72.22,75.56]  | 73.61 | 2.76 |
|          | X14-2 | 77    | (95%,1.88)  | [75.12,78.88]  |       |      |
|          | X14-3 | 71.12 | (95%,2.43)  | [68.69,73.55]  |       |      |
| WXMPB-15 | X15-1 | 60.48 | (95%,8.30)  | [52.18,68.78]  | 68.16 | 2.56 |
|          | X15-2 | 55.95 | (95%,11.16) | [44.79,67.11]  |       |      |
|          | X15-3 | 89.86 | (95%,11.33) | [78.53,101.19] |       |      |
| WXMPB-16 | X16-1 | 60.26 | (95%,4.55)  | [55.71,64.81]  | 62.20 | 2.49 |
|          | X16-2 | 57.51 | (95%,3.56)  | [53.95,61.07]  |       |      |
|          | X16-3 | 68.84 | (95%,5.61)  | [63.23,74.48]  |       |      |
| WXMPB-17 | X17-1 | 49.28 | (95%,8.87)  | [40.41,58.15]  | 40.51 | 1.62 |
|          | X17-2 | 45.47 | (95%,5.08)  | [40.37,50.55]  |       |      |
|          | X17-3 | 26.79 | (95%,13.51) | [13.28,40.30]  |       |      |
| WXMPB-18 | X18-1 | 74.30 | (95%,3.64)  | [70.66,77.94]  | 74.01 | 2.96 |
|          | X18-2 | 71.11 | (95%,2.30)  | [68.81,73.41]  |       |      |
|          | X18-3 | 76.63 | (95%,4.49)  | [72.14,81.12]  |       |      |
| WXMPB-19 | X19-1 | 51.27 | (95%,11.11) | [40.16,62.38]  | 43.90 | 1.76 |
|          | X19-2 | 51.87 | (95%,14.55) | [37.32,66.42]  |       |      |
|          | X19-3 | 28.57 | (95%,3.97)  | [24.60,32.54]  |       |      |
| WXMPB-20 | X20-1 | 39.01 | (95%,3.33)  | [35.68,42.34]  | 54.69 | 2.19 |
|          | X20-2 | 56.61 | (95%,9.06)  | [47.55,65.67]  |       |      |
|          | X20-3 | 68.45 | (95%,7.89)  | [60.56,76.34]  |       |      |
| WXMPB-21 | X21-1 | 28.83 | (95%,2.95)  | [25.88,31.78]  | 30.13 | 1.21 |
|          | X21-2 | 43.55 | (95%,12.03) | [31.52,55.58]  |       |      |
|          | X21-3 | 18.01 | (95%,3.35)  | [14.66,21.36]  |       |      |
| WXMPB-22 | X22-1 | 41.64 | (95%,4.29)  | [37.35,37.35]  | 38.09 | 1.52 |
|          | X22-2 | 33.83 | (95%,4.18)  | [29.65,38.01]  |       |      |
|          | X22-3 | 38.80 | (95%,7.58)  | [31.22,46.38]  |       |      |
| WXMPB-23 | X23-1 | 52.74 | (95%,3.50)  | [49.24,56.24]  | 44.96 | 1.8  |
|          | X23-2 | 39.59 | (95%,2.88)  | [36.71,42.47]  |       |      |
|          | X23-3 | 42.54 | (95%,2.36)  | [40.19,44.90]  |       |      |
| WXMPB-24 | X24-1 | 26.98 | (95%,4.58)  | [22.40,31.56]  | 31.02 | 1.24 |
|          | X24-2 | 26.27 | (95%,6.99)  | [19.28,33.26]  |       |      |
|          | X24-3 | 39.81 | (95%,6.85)  | [32.96,46.66]  |       |      |
| WXMPB-25 | X25-1 | 75.78 | (95%,9.30)  | [66.48,85.08]  | 68.56 | 2.74 |
|          | X25-2 | 60.36 | (95%,5.54)  | [54.82,65.90]  |       |      |
|          | X25-3 | 69.53 | (95%,25.01) | [44.52,94.54]  |       |      |
| WXMPB-26 | X26-1 | 79.32 | (95%,4.04)  | [75.28,83.36]  | 78.43 | 3.14 |
|          | X26-2 | 71.14 | (95%,10.17) | [60.97,81.31]  |       |      |
|          | X26-3 | 84.85 | (95%,6.66)  | [78.19,91.51]  |       |      |
| WXMPB-27 | X27-1 | 50.96 | (95%,7.25)  | [43.71,58.21]  | 54.19 | 2.17 |
|          | X27-2 | 71.28 | (95%,7.28)  | [64.00,78.56]  |       |      |
|          | X27-3 | 40.34 | (95%,8.48)  | [31.86,48.82]  |       |      |

2.2 剥离强度分析

通过对表 4 中的取剥离负载峰值和剥离强度取均值, 求出正交实验法中 9 组施工环境下的剥离强度均值, 见表 5。

表 5 剥离强度均值表

| 试验件<br>编号 | 剥离负<br>载峰值<br>/N | 剥离强<br>度/<br>(kN·m) | 剥离强<br>度均值<br>(kN·m) | 试验件<br>编号 | 剥离<br>负载<br>峰值<br>/N | 剥离<br>强度<br>(kN·<br>m) | 剥离强<br>度均值<br>(kN·m) |
|-----------|------------------|---------------------|----------------------|-----------|----------------------|------------------------|----------------------|
| WSMPB-1   | 12.60            | 0.50                | 0.706                | WSMPB-15  | 68.76                | 2.56                   | 2.55                 |
| WSMPB-2   | 22.82            | 0.91                |                      | WSMPB-16  | 62.20                | 2.49                   |                      |
| WSMPB-3   | 17.9             | 0.71                |                      | WSMPB-17  | 40.51                | 1.62                   | 2.356                |
| WSMPB-4   | 10.84            | 0.43                | 0.433                | WSMPB-18  | 74.01                | 2.96                   |                      |
| WSMPB-5   | 9.93             | 0.40                |                      | WSMPB-19  | 43.90                | 1.76                   |                      |
| WSMPB-6   | 11.71            | 0.47                |                      | WSMPB-20  | 54.69                | 2.19                   | 1.72                 |
| WSMPB-7   | 5.34             | 0.21                | 0.23                 | WSMPB-21  | 30.13                | 1.21                   |                      |
| WSMPB-8   | 5.41             | 0.22                |                      | WSMPB-22  | 38.09                | 1.52                   |                      |
| WSMPB-9   | 6.02             | 0.24                |                      | WSMPB-23  | 44.96                | 1.8                    | 1.52                 |
| WSMPB-10  | 5.84             | 0.23                | 0.23                 | WSMPB-24  | 31.02                | 1.24                   |                      |
| WSMPB-11  | 6.15             | 0.25                |                      | WSMPB-25  | 68.56                | 2.74                   |                      |
| WSMPB-12  | 5.17             | 0.21                |                      | WSMPB-26  | 78.43                | 3.14                   | 2.68                 |
| WSMPB-13  | 64.01            | 2.34                | 2.76                 | WSMPB-27  | 54.19                | 2.17                   |                      |
| WSMPB-14  | 74.01            | 2.76                |                      |           |                      |                        |                      |

表 5 给出 9 组不同施工环境对应剥离强度值, 通过比较, 第 5, 6, 9 组剥离强度值远大于其他 6 组。通过对比分析, 表面清洁度、涂敷厚度、温度/湿度对密封剂剥离强度影响较大, 并且表面清洁度高、涂敷厚度大、温/湿度低所对应的剥离强度值最大。通过文献[13]和文献[15]的方法, 对正交实验的结果分析处理, 得出各因素对密封剂剥离强度的影响强弱程度。表 6 为正交实验结果分析表, 表 7 为方差分析表。

通过表 6 和表 7 分析可以得到, 就上述影响密封剂剥离强度 4 个因素中, 对于剥离强度影响程度由大到小顺序依次为: 表面清洁度>涂覆厚度>温度/湿度>密封剂混合比。对密封剂剥离强度而言, 表面清洁度越好对应的剥离强度越大, 密封剂厚度越厚对应的剥离强度越大, 温/湿度(范围为(23±2)℃, 50%±5%)越小对应的剥离强度越大, 与李咏在聚硫密封剂剥离强度测定影响因素分析结论一致<sup>[3]</sup>。

表 6 密封剂剥离强度 L9(3<sup>4</sup>)正交实验结果

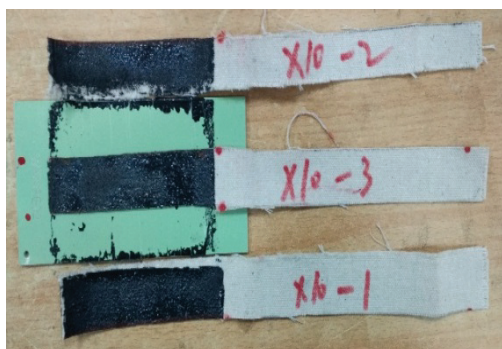
| 实验组            | 表面清洁     | 涂敷厚度     | 密封剂<br>混合比 | 温度/湿度    | 结果<br>数据 |
|----------------|----------|----------|------------|----------|----------|
| 1              | 1        | 1        | 1          | 1        | 0.706    |
| 2              | 1        | 2        | 2          | 2        | 0.433    |
| 3              | 1        | 3        | 3          | 3        | 0.23     |
| 4              | 2        | 1        | 2          | 3        | 0.23     |
| 5              | 2        | 2        | 3          | 1        | 2.75     |
| 6              | 2        | 3        | 1          | 2        | 2.356    |
| 7              | 3        | 1        | 3          | 2        | 1.72     |
| 8              | 3        | 2        | 1          | 3        | 1.52     |
| 9              | 3        | 3        | 2          | 1        | 2.68     |
| K <sub>1</sub> | 1.37     | 2.655    | 4.581      | 6.135    |          |
| K <sub>2</sub> | 5.336    | 4.705    | 3.345      | 4.511    |          |
| K <sub>3</sub> | 5.92     | 5.266    | 4.7        | 1.98     |          |
| R              | 1.516667 | 0.870333 | 0.451667   | 0.843667 |          |

表 7 密封剂剥离强度方差分析

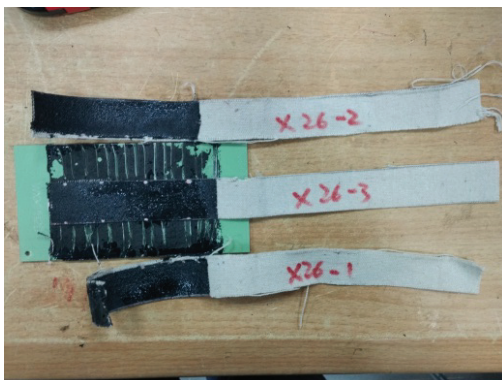
| 方差来源 | 高差平方和 | 自由度 | 均方    | F     | p      |
|------|-------|-----|-------|-------|--------|
| 1    | 4.086 | 2   | 2.043 | 10.88 | 0.084  |
| 2    | 1.26  | 2   | 0.63  | 3.356 | 0.2296 |
| 4    | 2.9   | 2   | 1.46  | 7.788 | 0.114  |
| 误差   | 0.375 | 2   | /     | /     | /      |
| 总和   | 8.64  | 8   | /     | /     | /      |

在上述试验结果中, 密封剂在丙酮擦洗 3 次、超过标准厚度/3 mm、基膏 100/硫化膏 13、温度 21℃/湿度 45%条件下剥离强度值最大(相对)。依据试验结果, 忽略表面处理、底涂等因素的影响, 试验件表面光洁度越好, 剥离强度越大。剥离强度大小虽然与涂覆厚度成正相关, 但是在设计密封剂涂覆厚度还需要考虑密封剂其他性能指标以及自身质量等因素, 在合理厚度范围内建议使用厚度较大的。剥离强度大小与施工温度/湿度大小环境负相关, 建议在施工工艺环境范围内选择较小温度/湿度环境。密封剂混合比对于剥离强度的影响较小, 相对于前面 3 个影响因素可以忽略不计, 分析结果可以消除密封剂在施工过程中均匀程度不好控制和检测导致密封剂性能无法评估的顾虑。图 3 为剥离强度试验件两组典型的实验照片, WXMPB10 试验件的剥离强度值为 0.23, 其剥离的形式为图 3a 形式, 试验件表面光滑很少沾附密封胶。WXMPB26 试验件的剥离强度值为 2.68, 其剥离的形式为图 3b 形式, 试验件表面大量沾附密封胶。WXMPB26 的剥离强度值远大于 WXMPB10, 且 WXMPB26 的剥离强度大于其撕裂强度, 导致在破坏过程中产生密封剂撕裂现象, 而 WXMPB10 的剥离强度远小于其撕裂强度, 导致密封胶在试验件表面剥离而未发生撕裂现象。





a WXMPB10 试验件



b WXMPB26 试验件

图3 剥离强度试验件剥离照片

### 3 结论

通过待密封表面清洗、密封剂厚度、密封剂混合比、密封剂施工温/湿环境4个施工环境的正交实验,分析工艺环境对密封剂XM22剥离强度的影响,得到如下结论。

1) 对密封剂剥离强度大小影响程度由大到小顺序依次为:表面清洁度>涂覆厚度>温度/湿度>密封剂混合比。同时,剥离强度与待密封表面清洗程度、密封剂厚度大小成正相关,与密封剂温/湿环境大小负相关。

2) 通过密封剂正交试验法能快速区分主次影响

因素,可以推广到研究多因素、多层次复杂试验问题,具有试验样本量少、试验均衡分散、数据计算简单、水平整齐可比等优点。

3) 通过工艺环境对密封剂剥离强度影响研究,为工程技术人员在密封剂施工过程提供参考和借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 张洪燕,曹寿德,王景鹤,等.高性能橡胶密封剂[M].北京:化学工业出版社,2007:216-231,281-297.
- [2] 宋英红,杨亚飞,吴松华.航空聚硫密封剂的发展现状分析[J].中国胶粘剂,2013(2):21-23.
- [3] 李咏,杨晓飞.聚硫密封剂剥离强度测定影响因素分析[J].化学工程与装备,2013(8):205-206.
- [4] 曹寿德,庄素芬.环境条件对聚硫型密封剂性能的影响[J].航空材料,1983(4):26-30.
- [5] 关永安,廖尔清.底涂剂对密封剂粘附性的影响[J].粘接,2001,22(3):33-34.
- [6] HB 5249—93,室温硫化密封剂 180°剥离强度试验方法[S].
- [7] 赵耀辉,罗俊杰,蔡建,等.浅析军品密封包装的密封技术要求及试验方法[J].包装工程,2016,37(13):77-80.
- [8] 潘广萍,吴松华,柳莹.提高聚硫密封剂粘接性能的研究[J].粘接,2008,29(1):22-24.
- [9] 索军营,文友谊,李帆.环境温湿度条件对聚硫密封胶性能的影响[J].中国胶粘剂,2015(4):20-22.
- [10] 李咏.密封剂 180°剥离强度测量不确定度的评估[J].粘接,2013,24(6):50-52.
- [11] 张向宇.胶黏剂分析与测试技术[M].北京:化学工业出版社,2004:281-297.
- [12] 吴松华,益小苏,秦蓬波.过梅丽聚硫密封剂在航空煤油中的老化机理[J].航空材料学报,2007,27(6):79-82.
- [13] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等.正交试验设计和分析方法研究[J].实验技术与管理,2010,27(9):52-55.
- [14] 黄颂,李枝端.Excel在L9(34)正交试验数据处理改进中的应用[J].中国药房,2007(8):1752-1753.
- [15] 滕海英,祝国强,黄平.正交试验设计实例分析[J].药学服务与研究,2008,8(1):75-76.