



南京航空航天大学



硕士研究生学位论文答辩

考虑三维真实粗糙表面的管路密封机理研究

 答辩人：钱进

 指导教师：陈果教授

 专 业：交通运输

目 录

01

研究背景及意义

02

扩口式管路连接件结构力学性能分析

03

粗糙表面接触特性分析及密封性能评判

04

装配状态对管路密封性能影响分析

05

管路连接件密封性能综合试验研究

06

总结与展望

目 录

01

研究背景及意义

02

扩口式管路连接件结构力学性能分析

03

粗糙表面接触特性分析及密封性能评判

04

装配状态对管路密封性能影响分析

05

管路连接件密封性能综合试验研究

06

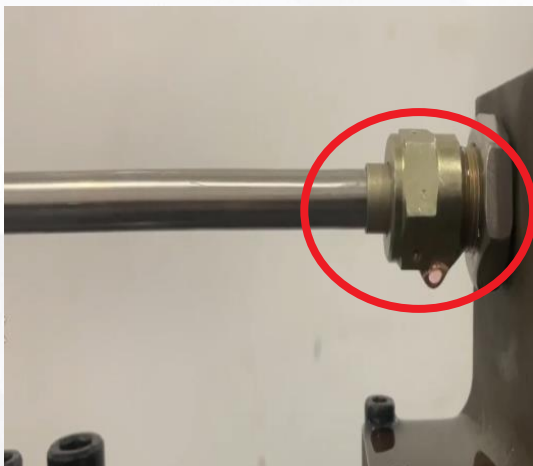
总结与展望

01 研究背景及意义

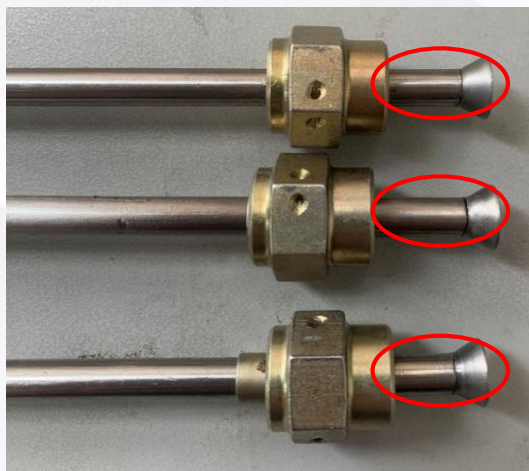


液压管路系统：作为飞机动力传输的主要通道，与高压柱塞泵、阀或活门、作动器等连接，几乎分布在飞机机体各个部分。

管路泄漏



管路系统故障
管路断裂

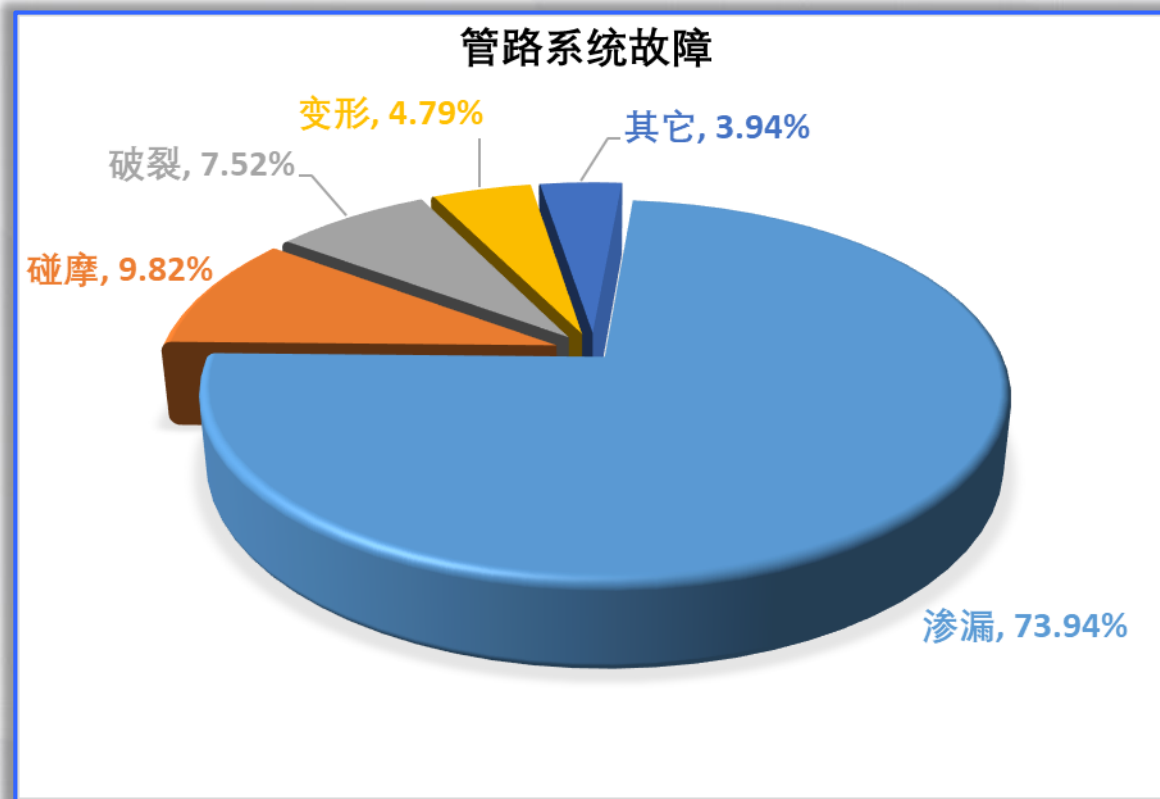


管路碰摩损伤



01 研究背景及意义

据统计，在所有管路系统问题中，管路**渗漏**问题尤为突出，大多数出现的都是“跑、冒、滴、漏”问题，随着当今飞机各方面性能的逐步提升，液压系统对工作压力的要求也越来越高，这就需要采用更高的技术来提升**管路系统密封性能**。



因此，研究管路连接件的**密封性能**，降低导管渗漏故障，是飞机在各种工作环境下介质可靠传输最重要的保证。

01 国内外研究现状

粗糙表面接触特性

1. 数学模型模拟

- Hertz接触
- G-W模型
- 分形理论

2. 有限元分析

- 随机数据点模拟
- 真实形貌数据

1

静密封界面泄漏分析

1. 基于均化的思想方法

2. 基于多孔介质思想

3. 基于渗漏通道的描述

- 逾渗理论

2

管路密封性能

1. 挤压式接触密封

2. 结构尺寸偏差

3. 外部工况

- 振动和高温
- 螺栓预紧
- 脉冲流体

3

01 研究现状总结

扩口式管路连接件结构力学性能分析

针对管路连接件结构特征，螺栓预紧力和拧紧力矩的**转化关系**以及材料间的**摩擦系数**需要进行仿真和试验验证，以提高有限元建模的准确性。

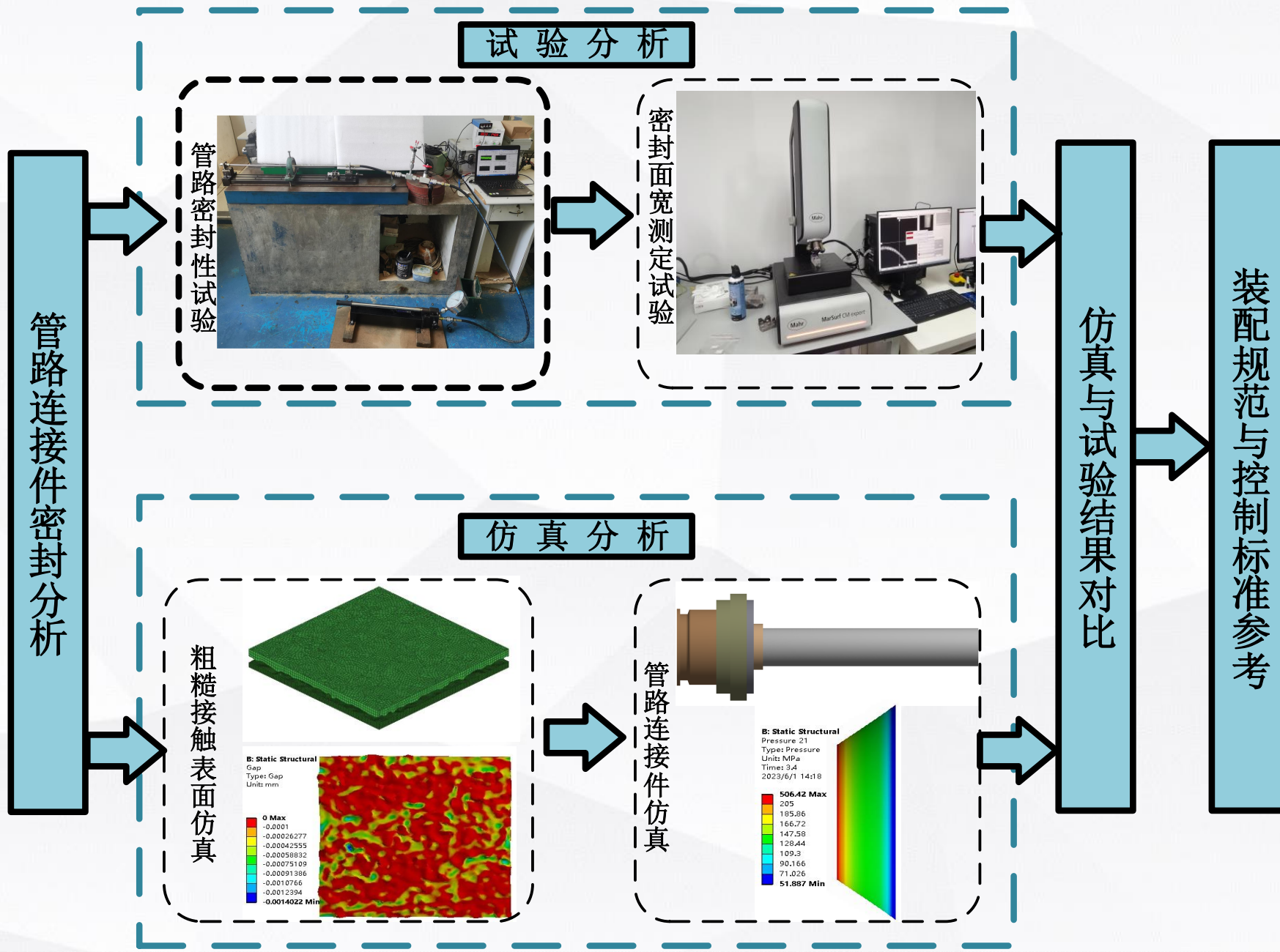
粗糙表面接触特性分析及密封性能评判

管路连接件密封性能分析中，不能有效确定扩口管和管接头**接触部位达到密封时所需要的接触应力大小**，从而得到评判管路密封性能的指标。

装配状态对管路密封性能影响分析 管路连接件密封性能综合试验研究

航空标准中制定的装配偏差控制范围没有明确针对不同的管道尺寸和型号。**不同尺寸**对应的装配偏差范围需进行详细的**仿真和试验研究**，并在现在标准基础上进行适当改进和调整。

01 总体流程图



目 录

01

研究背景及意义

02

扩口式管路连接件结构力学性能分析

03

粗糙表面接触特性分析及密封性能评判

04

装配状态对管路密封性能影响分析

05

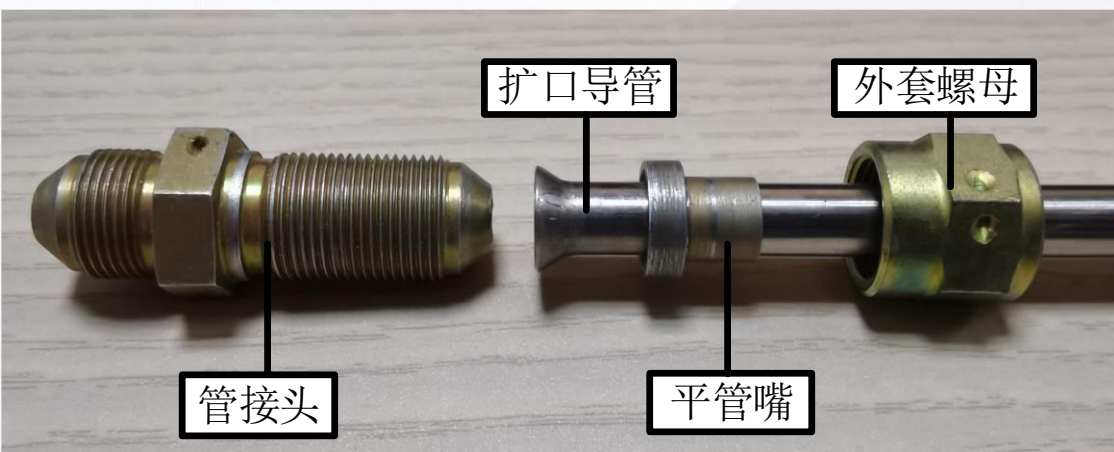
管路连接件密封性能综合试验研究

06

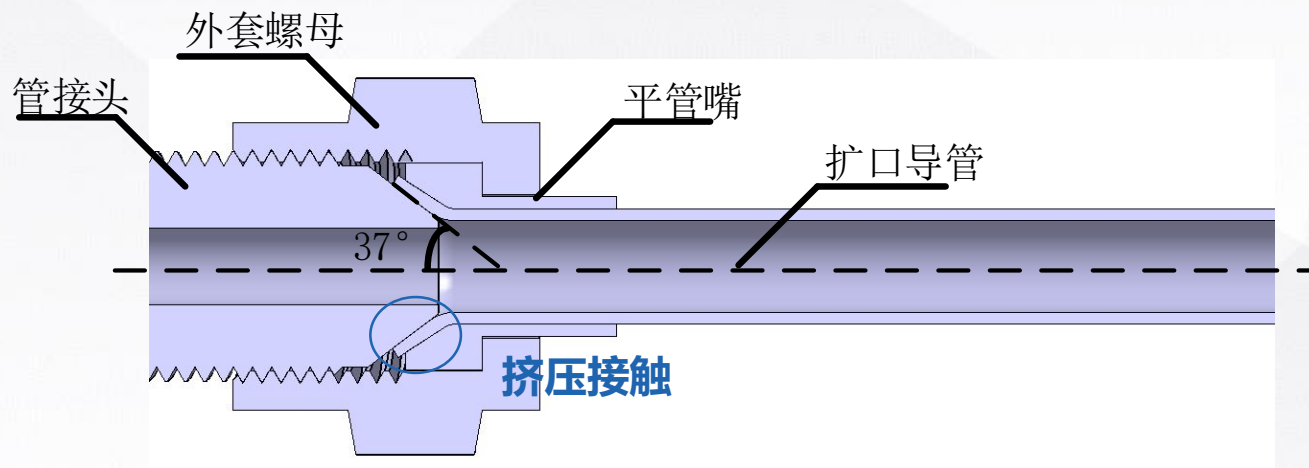
总结与展望

02 扩口式管路连接件结构

实物图

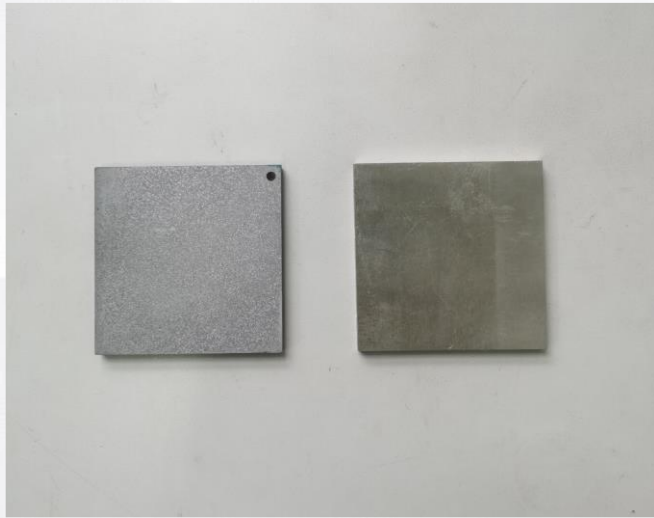


Catia图

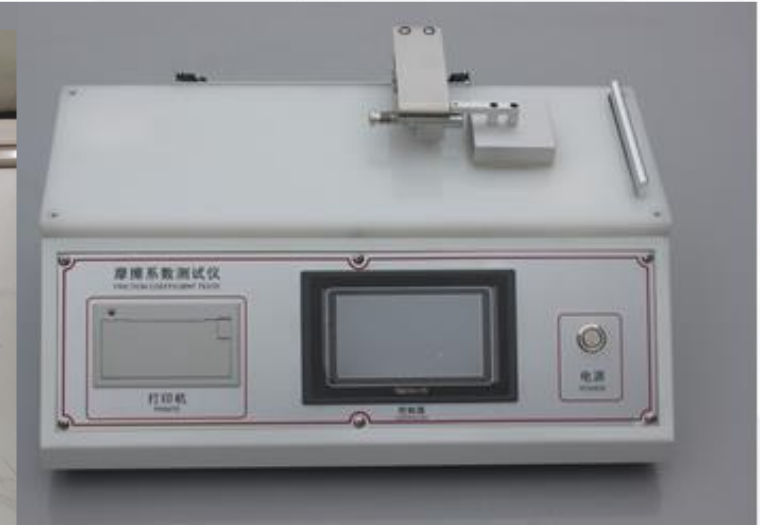
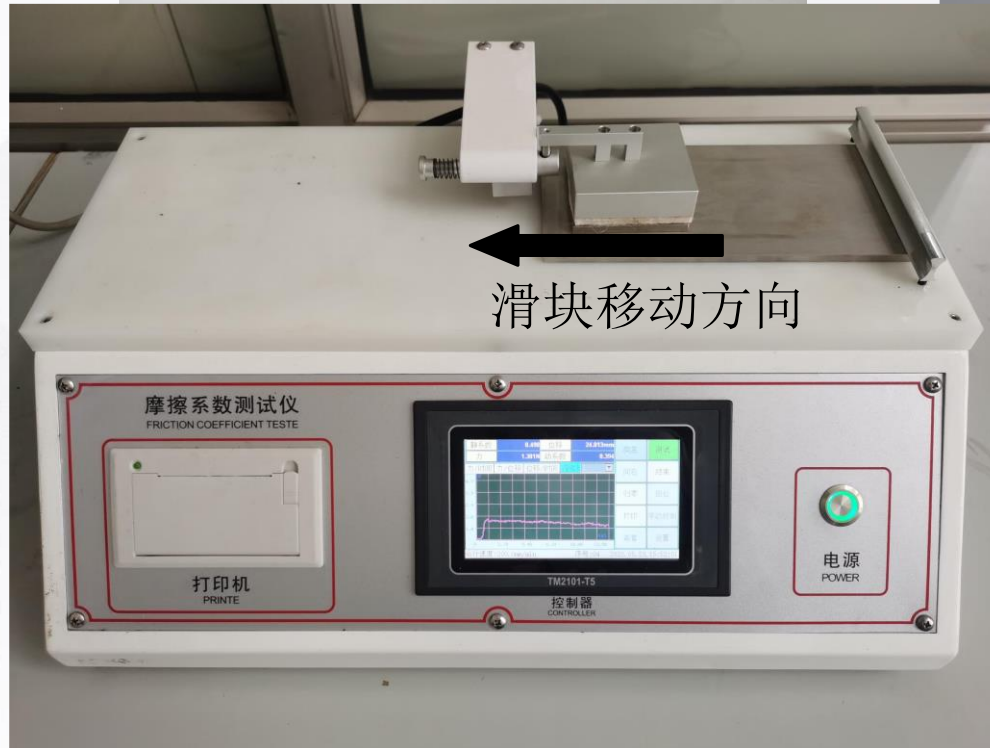


第1尺寸系列材料为1Cr18Ni9Ti扩口式管路连接件正常工作压力约为21MPa，并且根据GJB 638A-97中相关规定，对于压力管路的导管、接头等部分的试验压力应在正常工作压力21MPa的2倍即42MPa压力下开展后续研究。

02 材料摩擦系数测定



滑块试验件



摩擦系数测试仪

通过施加与接触表面水平缓慢增大的外力 F 的过程中使二者从相对静止转为相对滑动的状态，当两物体有相对运动趋势，但还没有相对运动时，此时施加的外力大小等于**最大静摩擦力大小**；当两物体产生匀速相对运动时，此时外力大小等于**滑动摩擦力大小**。

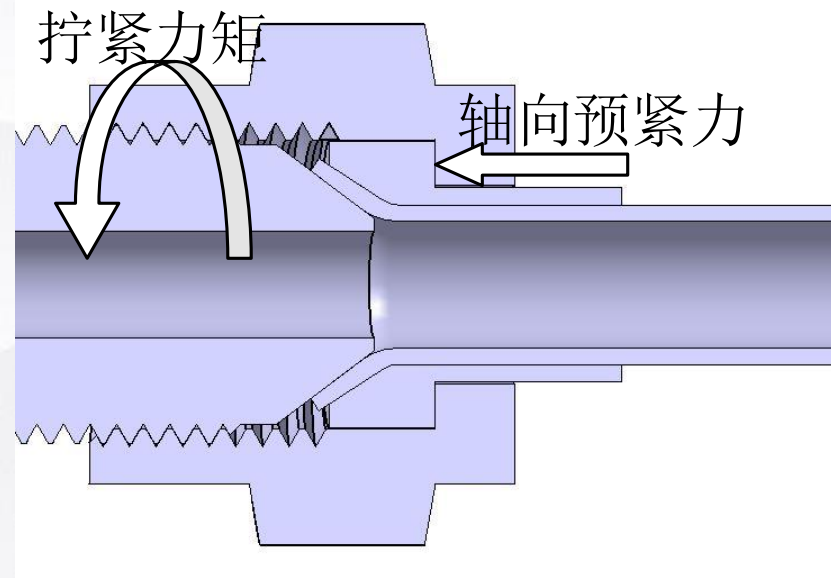
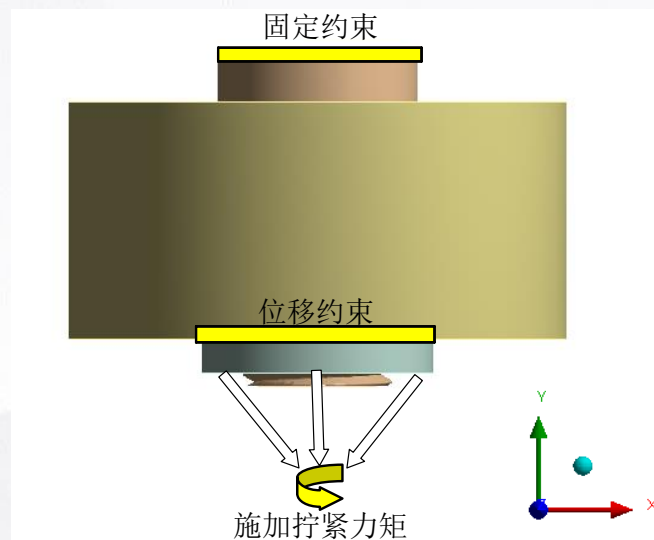
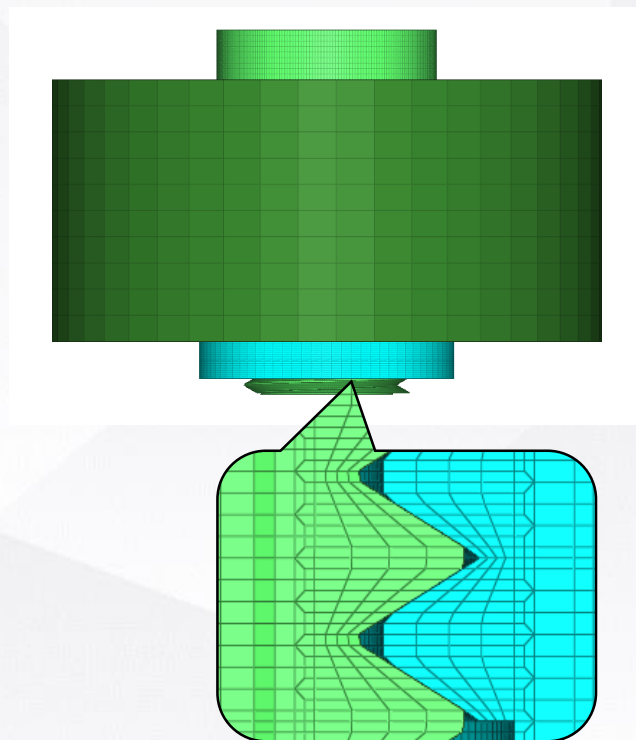
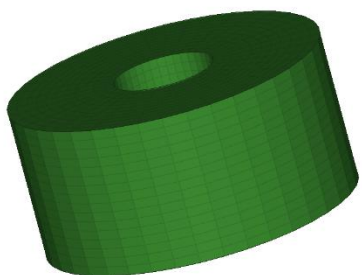
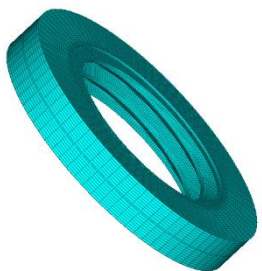
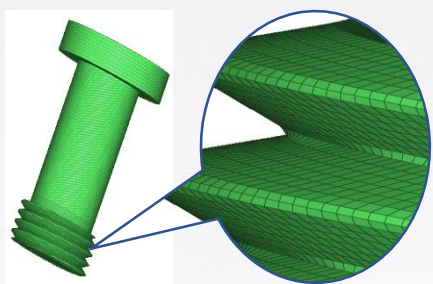
02 材料摩擦系数测定

静摩擦系数 $\mu_s = \frac{F_s}{mg}$ F_s 为拉动滑块运动最大拉力 动摩擦系数 $\mu_k = \frac{F_k}{mg}$ F_k 为拉动滑块匀速运动时的拉力均值

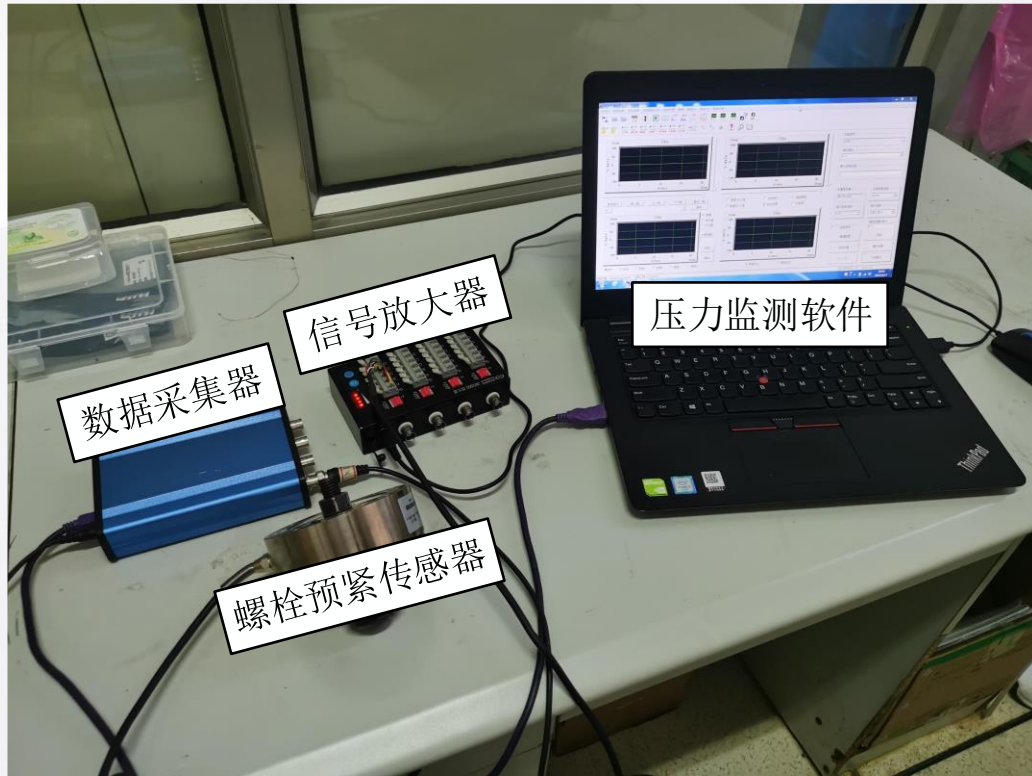
材料	1Cr18Ni9Ti和45#钢	45#钢和45#钢
静摩擦系数均值 $\bar{\mu}_s$	0.149	0.158
动摩擦系数均值 $\bar{\mu}_k$	0.144	0.150

02 扭拉关系理论分析与试验验证

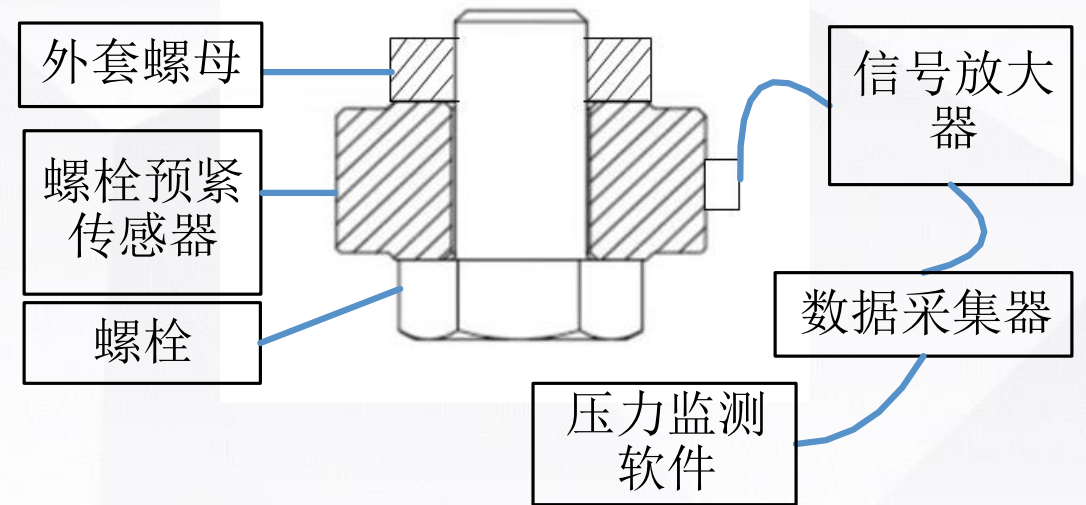
由于管路宏观建模仿真分析中，外套螺母和管接头螺纹连接部分仿真较为繁琐，于是单独将**螺栓扭拉关系仿真试验**作为一个分析重点，从而对管路连接件仿真中的螺纹连接部分进行简化，研究轴向预紧力与拧紧力矩之间的转化关系，可以使用**轴向预紧力代替拧紧力矩**，加快仿真效率。



02 扭拉关系理论分析与试验验证



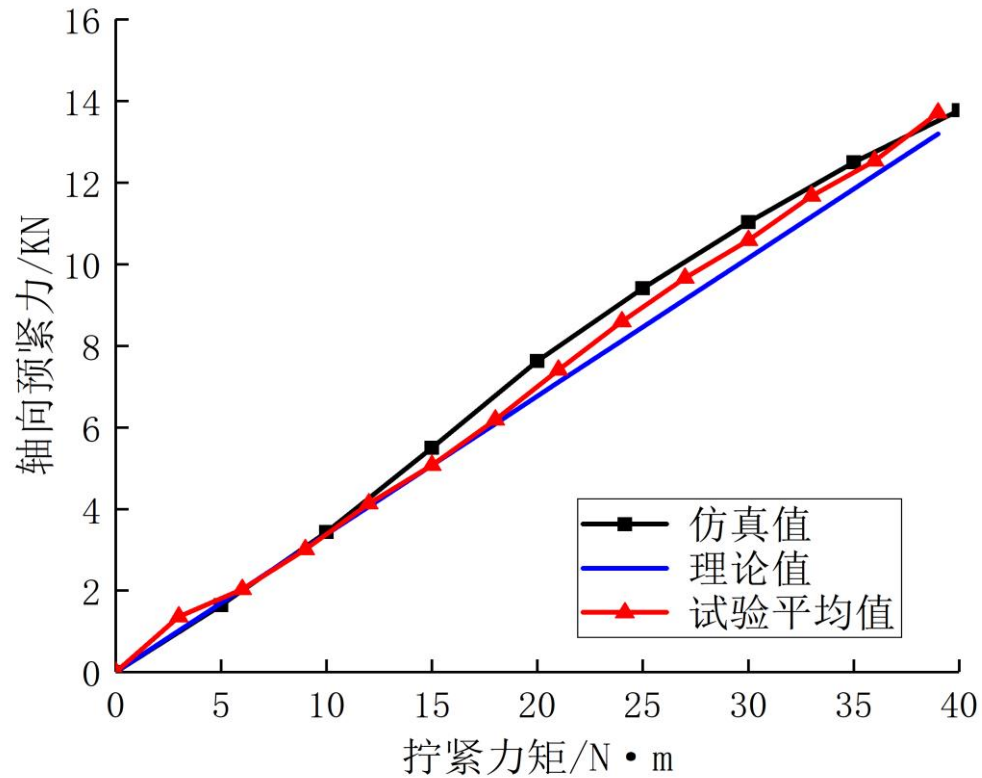
试验现场图



试验装置连接示意图

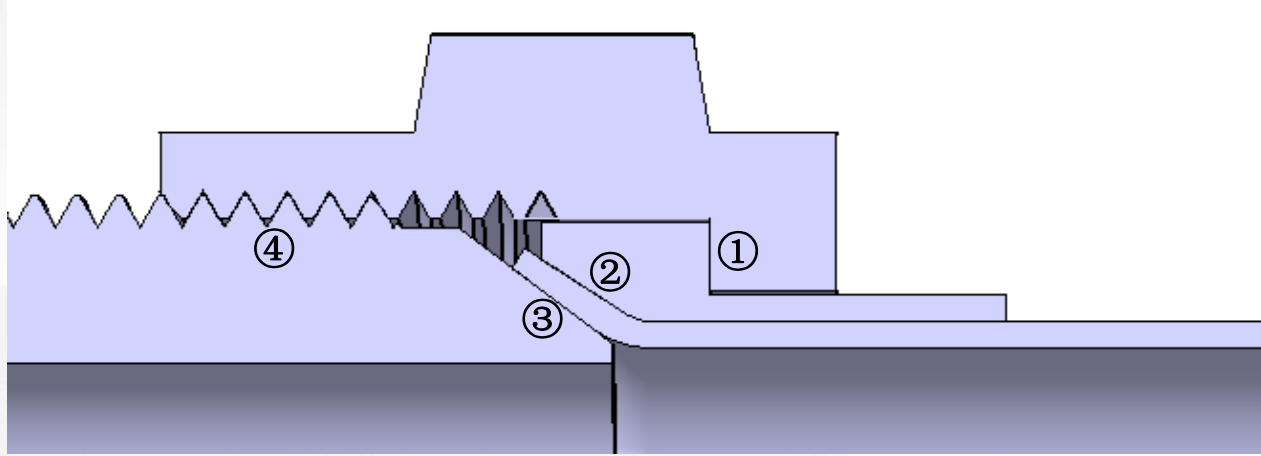
1. 固定螺栓在夹具上并安装压力传感器；
2. 将螺栓传感器与应变放大器、数据采集器及计算机相连；
3. 使用电子力矩扳手施加力矩，每增加一次力矩记录一次对应轴向力。

02 扭拉关系理论分析与试验验证



当力矩数值大小在**15N·m**以内时，三者的结果吻合，当力矩数值在**15 N·m~40N·m**时理论值略小于试验平均值，仿真值略大于试验平均值，最大偏差为别为**5.43%**与**2.99%**，验证了仿真分析结果以及理论公式的有效性和可靠性。

02 扭拉关系理论分析与试验验证



- ①平管嘴与外套螺母圆环形接触对
- ②扩口导管外部与平管嘴内部接触对
- ③扩口导管扩口部分与管接头外锥面的接触对
- ④管接头与外套螺母之间的螺纹接触对

摩擦力矩为

$$T = T_1 + T_4 = \frac{1}{2} F \left[\mu_1 d_1 + \frac{P / \pi + \mu_4 d_4 / \cos \beta}{1 - P \mu_4 / (\pi d_4 \cos \beta)} \right]$$

管路连接件尺寸d ₀ /mm	扭拉关系理论公式
4	F=543.078T
6	F=462.298T
8	F=400.151T

1 扩口式管路连接件结构

介绍了扩口管的结构组成以及工作状态，管路的密封原理。

2 材料摩擦系数测定

测定了管路连接件接触部位的材料摩擦系数，为后续仿真参数设置奠定了基础。

3 扭拉关系理论分析与试验验证

采用普通螺栓进行相应的理论计算、有限元仿真以及螺栓预紧力试验进行研究。在此基础上，进行了管路连接件螺纹部位扭拉关系的理论计算分析，得到了管路连接件的轴向预紧力与拧紧力矩的转化公式。

目 录

01

研究背景及意义

02

扩口式管路连接件结构力学性能分析

03

粗糙表面接触特性分析及密封性能评判

04

装配状态对管路密封性能影响分析

05

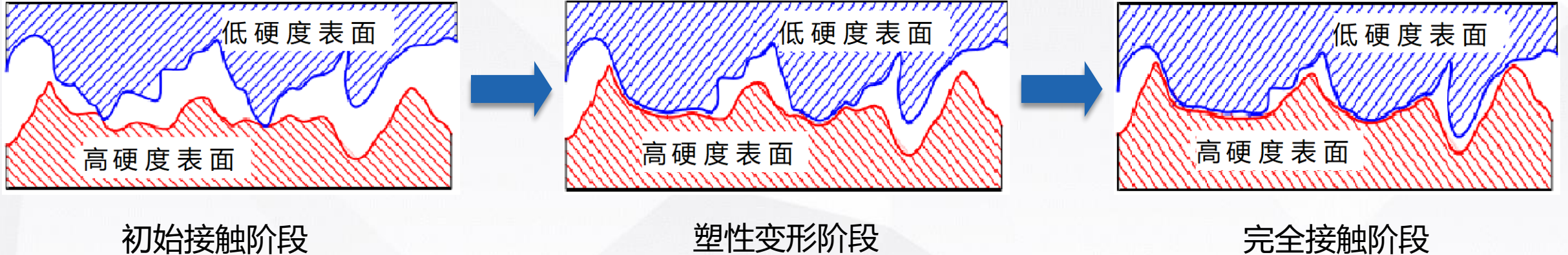
管路连接件密封性能综合试验研究

06

总结与展望

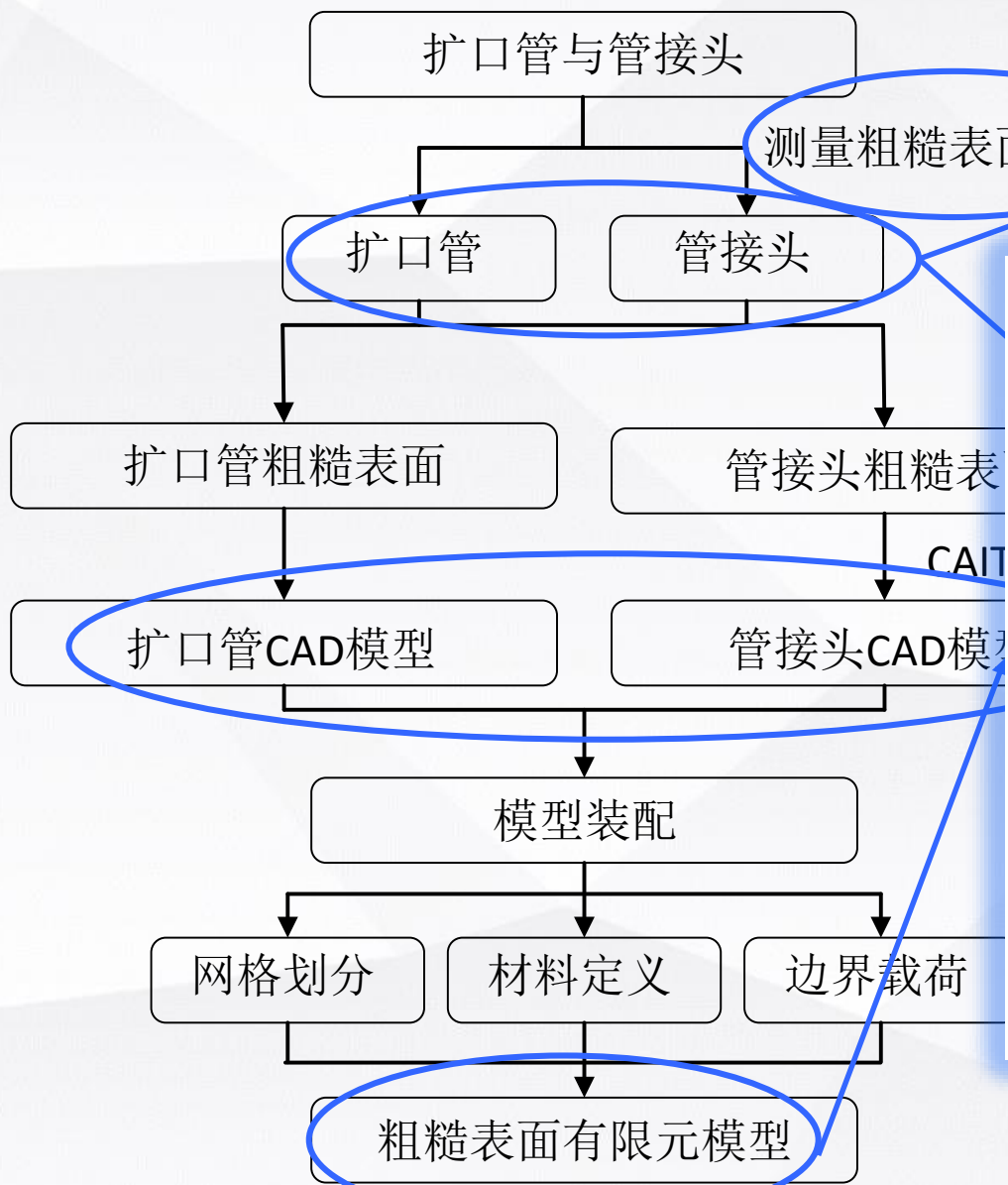
03 接触表面特性分析

针对真实管路连接件接触部位，其表面其实是**粗糙不平**的，在外套螺母及管接头螺纹副之间施加拧紧力矩产生轴向预紧力将扩口管与管接头接触面不断挤压产生**塑性变形**，最终将接触面上的微小间隙填补实现密封作用。

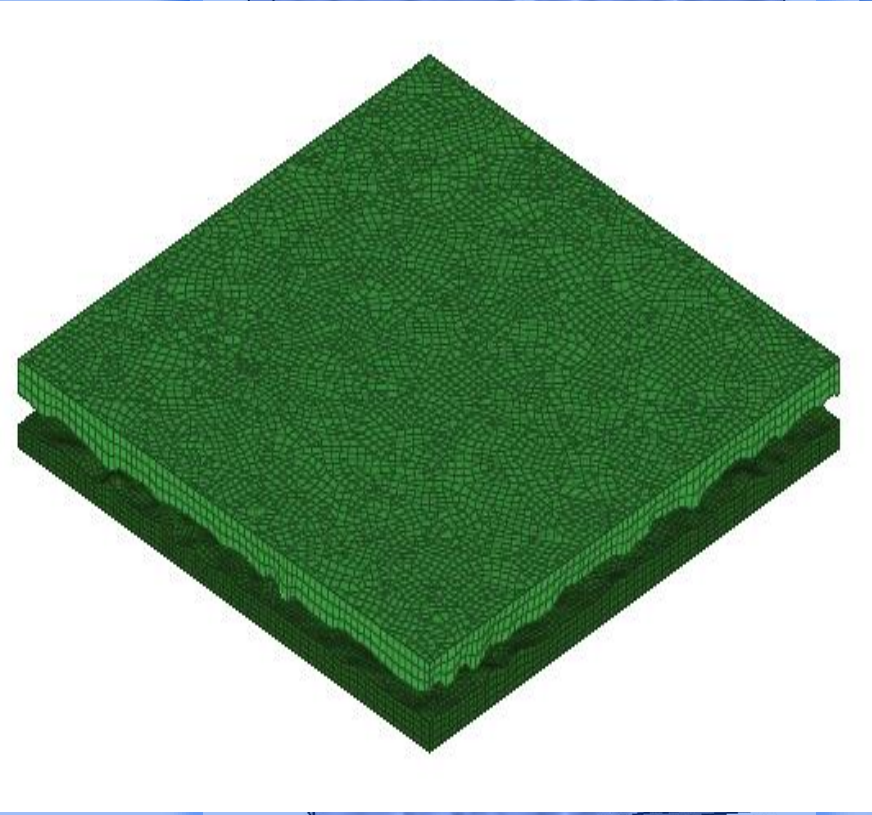
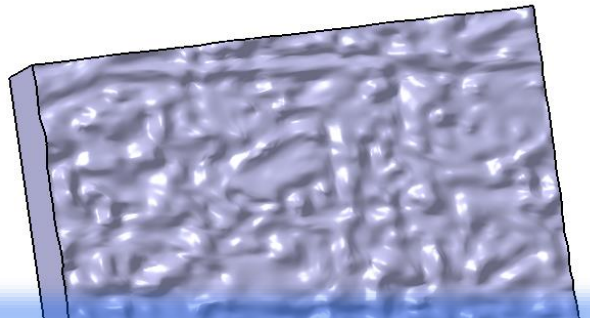


目的：需获取当**表面接触应力**达到多少时，才能使得表面不能形成泄漏通道从而**实现密封**。

03接触表面特性分析



测量粗糙表面数据



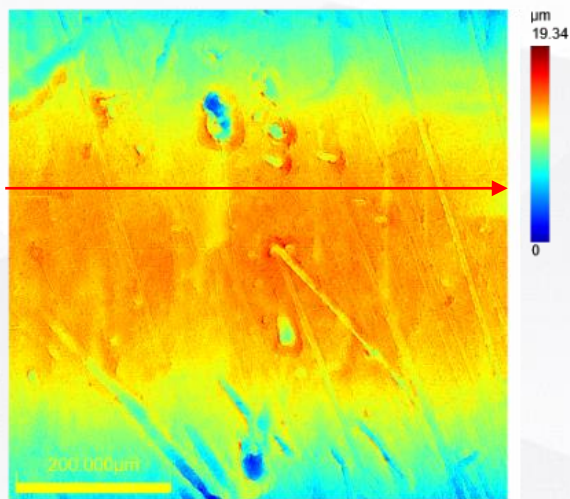
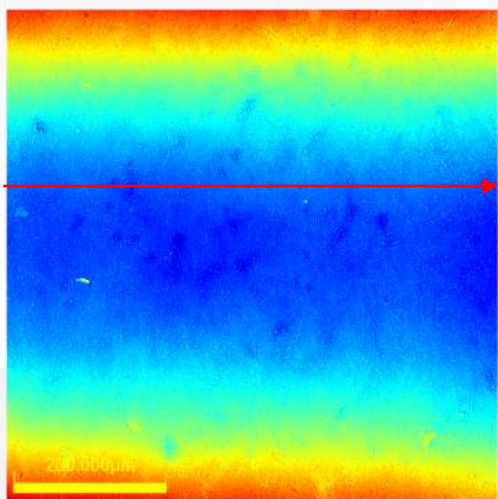
管接头表面

03 真实形貌获取

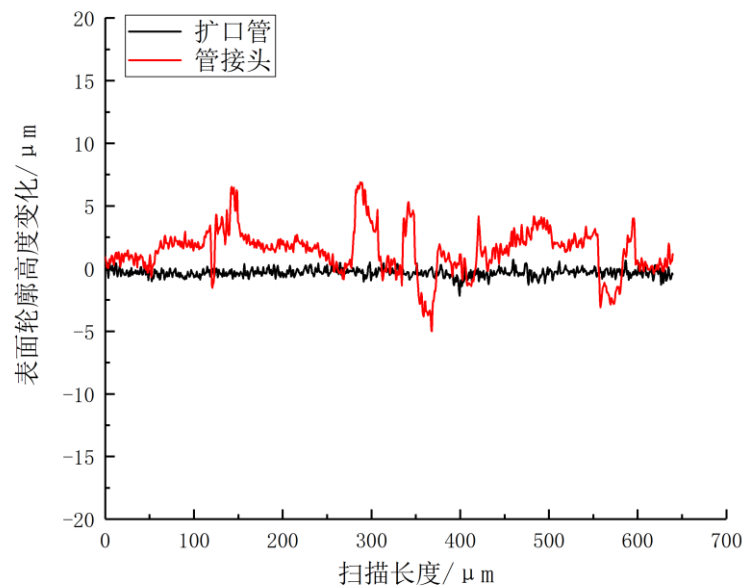
扩口管表面

管接头表面

将样品采用激光共聚焦显微镜对切割下的表面进行扫描，扫描区域大小为 $0.625\text{mm}\times 0.625\text{mm}$ 。并获取表面形貌的点云数据。提取某一截面上的二维轮廓，扩口管接触表面较为平整，而管接头接触面较为粗糙。

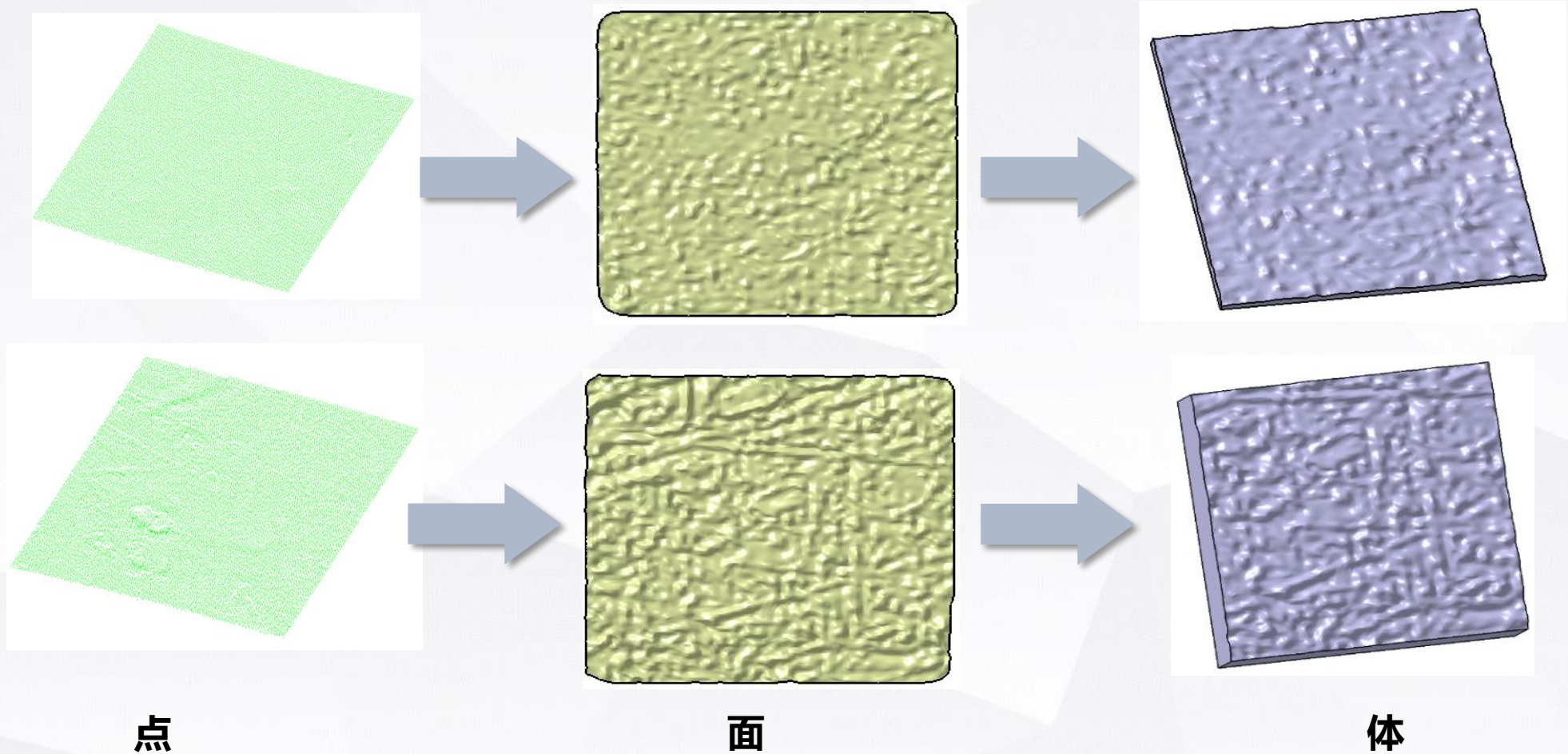


表面高度云图



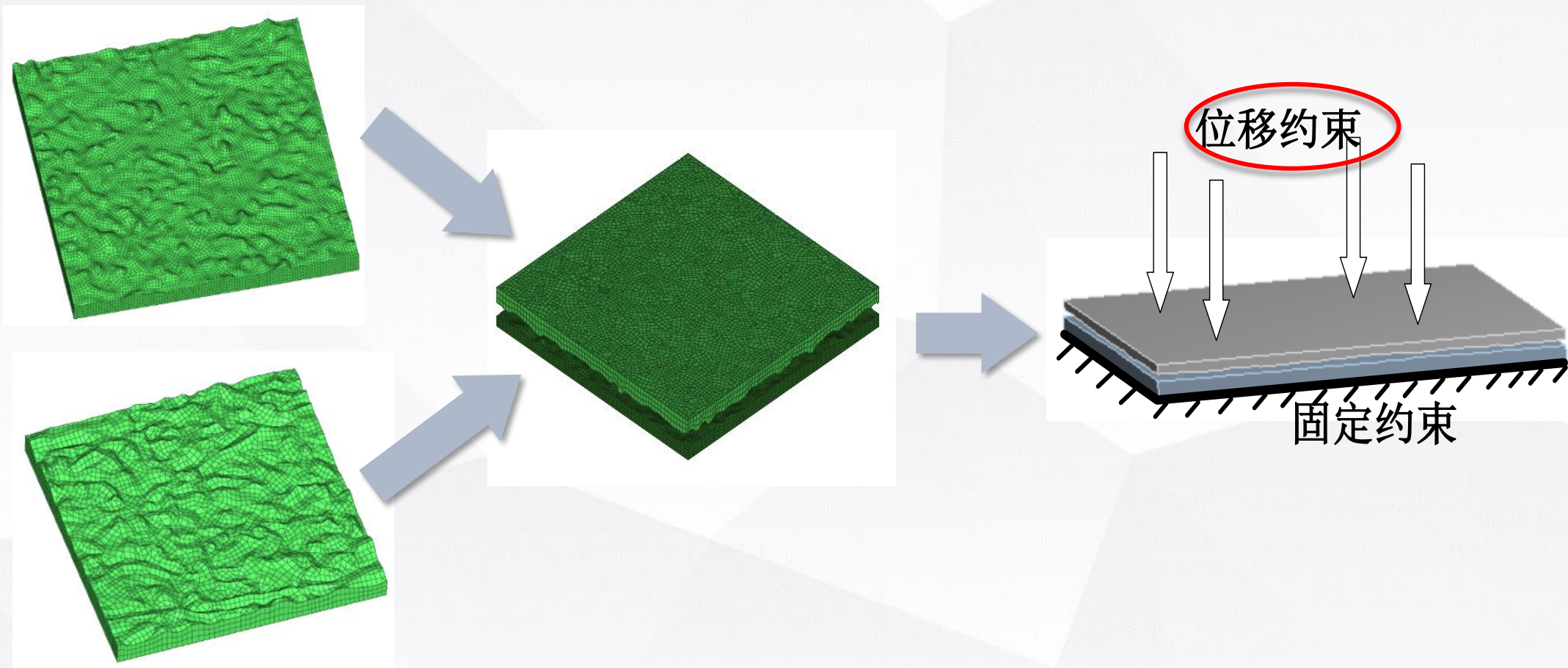
03 有限元建模

在CATIA软件中导入扫描得到的点云数据进行逆向建模，根据点-面-体顺序得到最终三维实体模型。并且由于受到点云数据大小的影响，选取了 $50\mu\text{m}\times 50\mu\text{m}$ 区域的点云数据进行逆向建模。

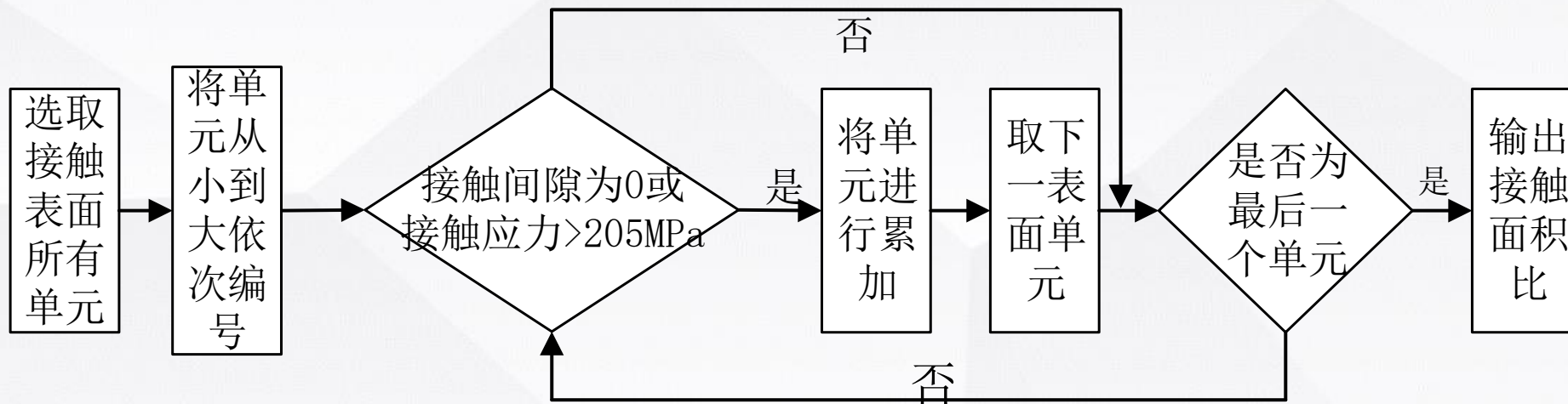


03 有限元建模

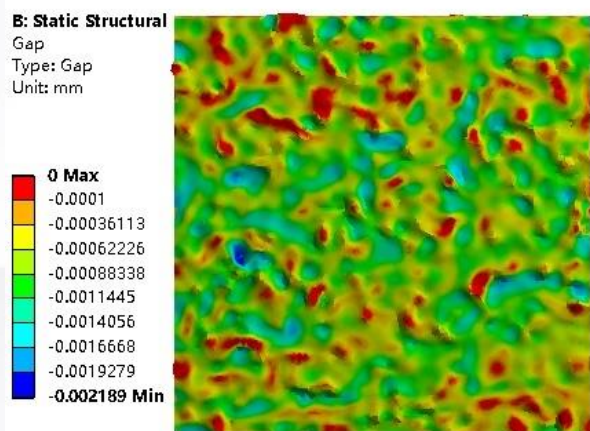
在Hypermesh软件中进行网格划分得到的有限元模型，然后在Workbench软件设置接触和边界条件。接触对之间采用摩擦接触。扩口管表面材料设置为1Cr18Ni9Ti，管接头表面材料设置为45#钢。



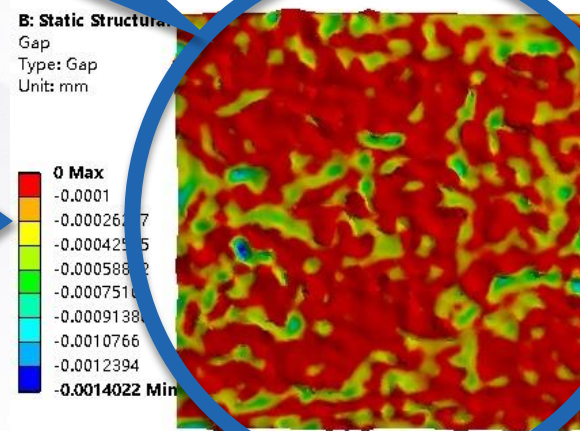
03 有限元建模



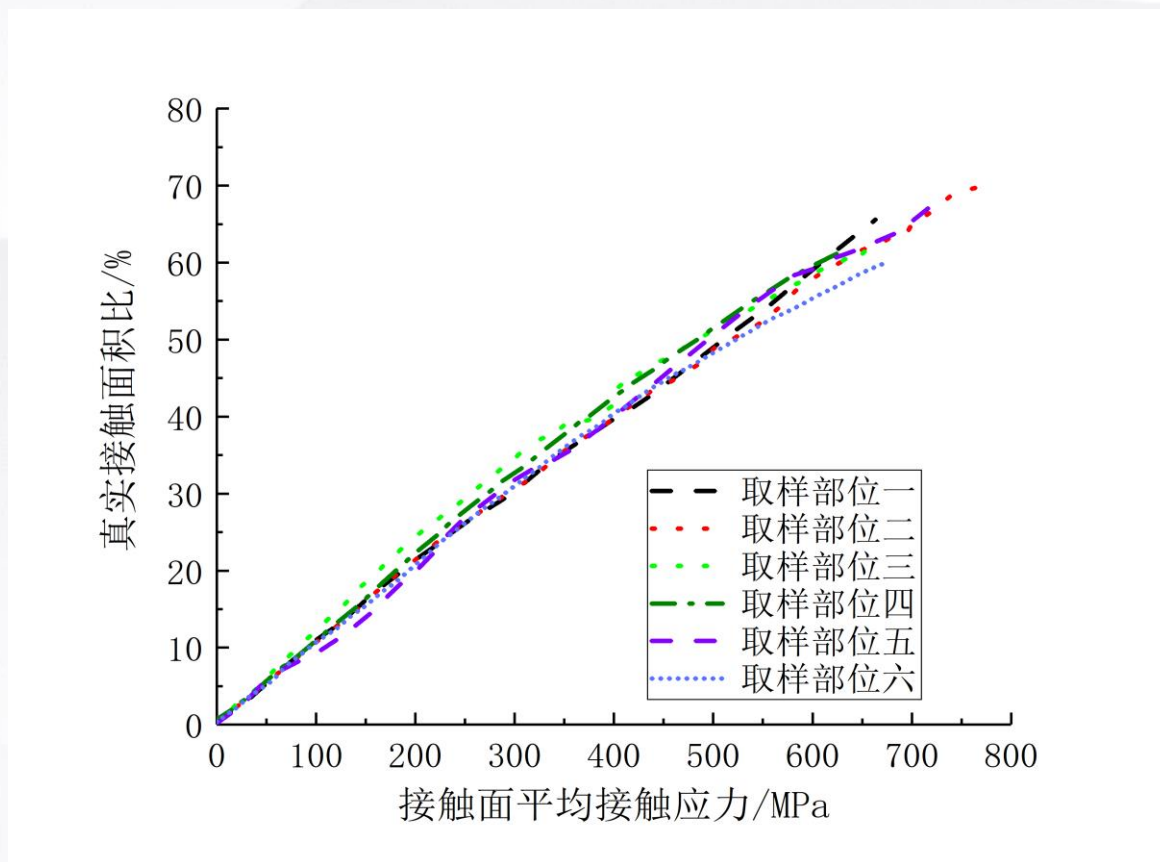
提取出真实接触面积占比



表面接触应力逐渐增大



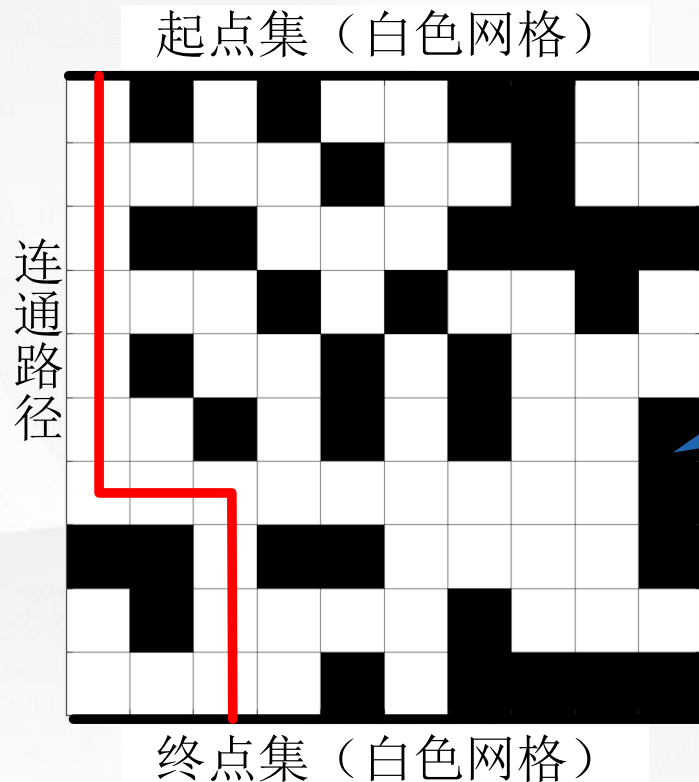
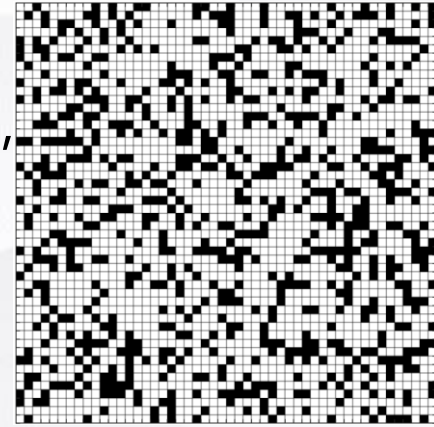
03 有限元建模



通过对扩口管和管接头接触部位的粗糙表面有限元模型仿真结果可知，在逐渐增加位移载荷的过程中，真实接触面积占比逐渐增加。在开始施加位移载荷时同时发生弹性与塑性变形，随着载荷的增加，发生塑性变形区域越来越大，形成真实接触区域部分也逐渐增加，并且真实接触面积比与接触面平均接触应力大小之间近乎为正比关系。

03 接触表面栅格化模型模拟

研究人员针对接触部位的密封机理进行了大量研究，但由于粗糙表面具有不确定性和随机性，并且涉及微观层面的多种交叉学科，大大增加了机理分析的难度。通过对接触表面**通过构建栅格泄漏模型进行转化**，将扩口管接触表面区域离散为一定量的二维正方形网格。通过改变网格总体数量以及黑白网格数量之比来得到逾渗阈值即临界**真实接触面积比**。



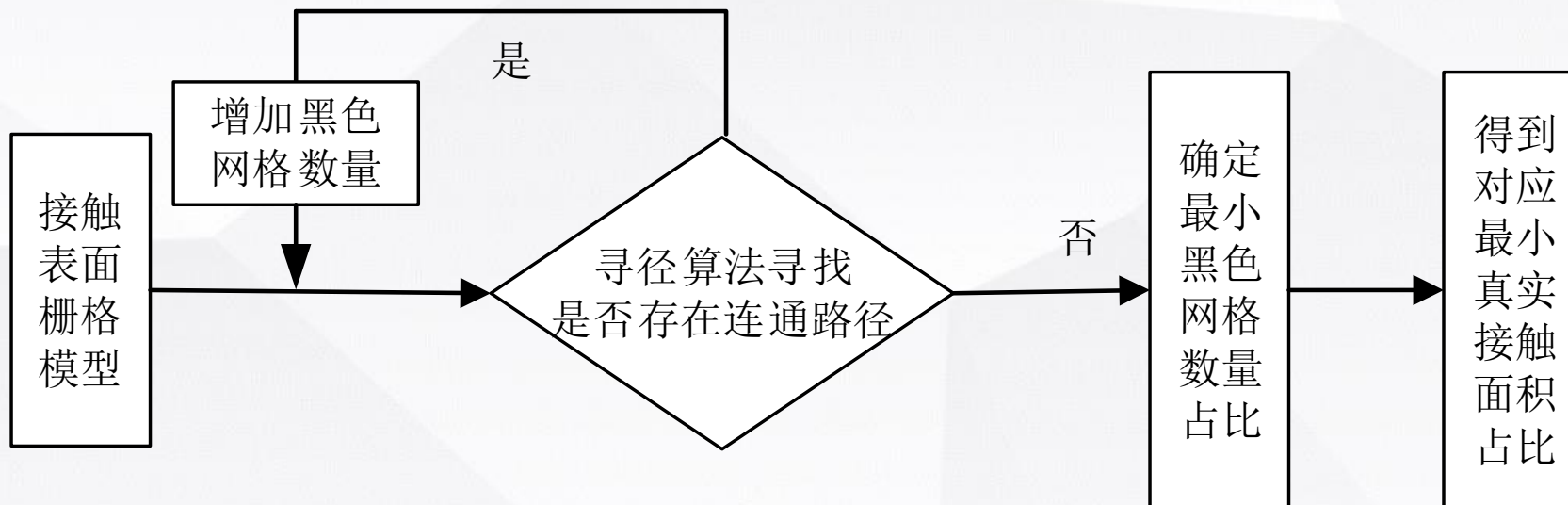
白色网格：未接触区域

黑色网格：接触区域

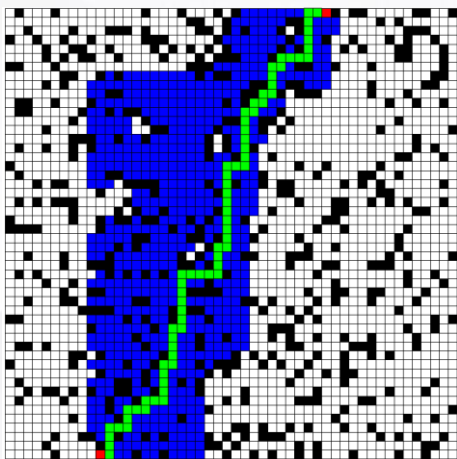
r :黑色网格与整个网格数量之比

黑色网格设置为**均匀分布**

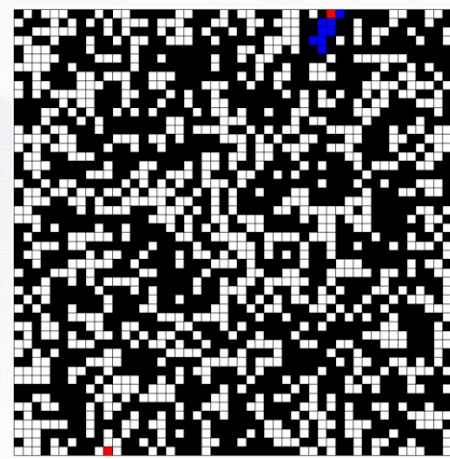
03 接触表面栅格化模型模拟



密封界面由泄漏转变为密封的状态流程图

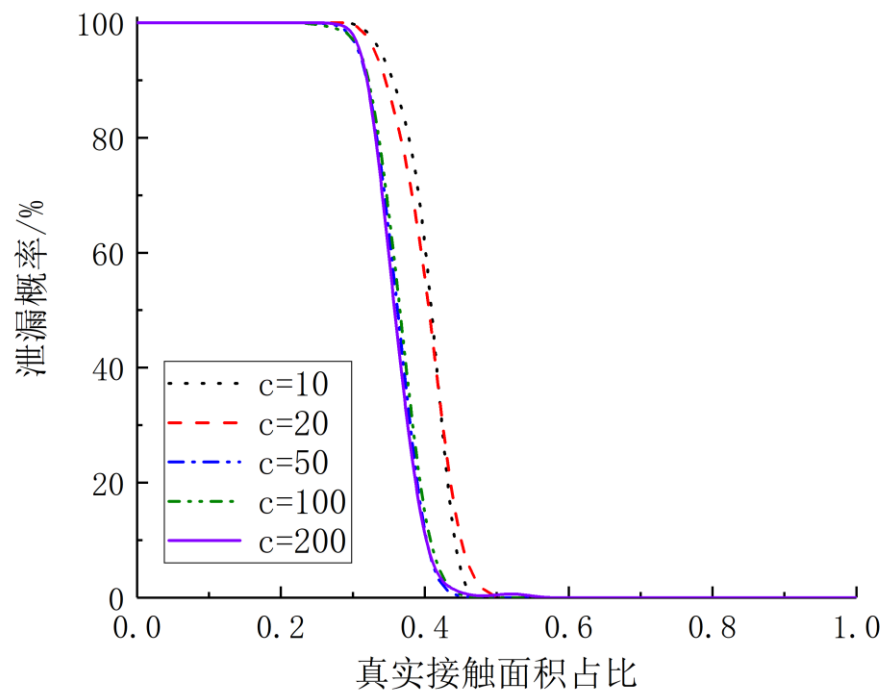


找到连通路径



未找到连通路径

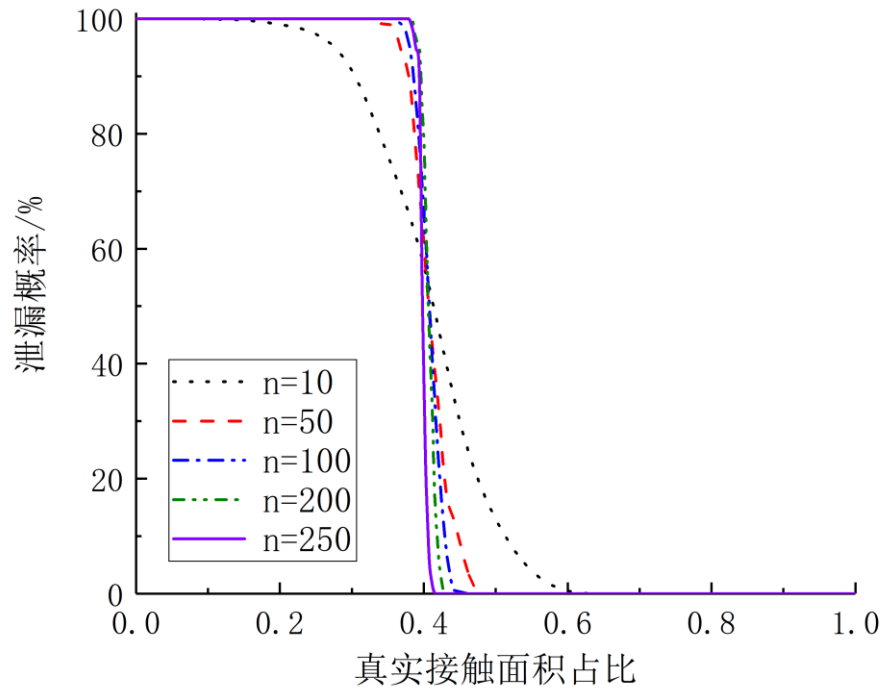
03 接触表面栅格化模型模拟



不同循环次数下寻径结果

当循环次数为50, 100, 200时计算结果曲线几乎重合, 循环次数越多其曲线结果更加精确, 但同时会导致算法运行时间更长, 为提高算法运行效率, 节省计算时间, 同时保证结果的精确性, 选取循环次数为100作为后续栅格泄漏模型每次计算循环次数。

03 接触表面栅格化模型模拟

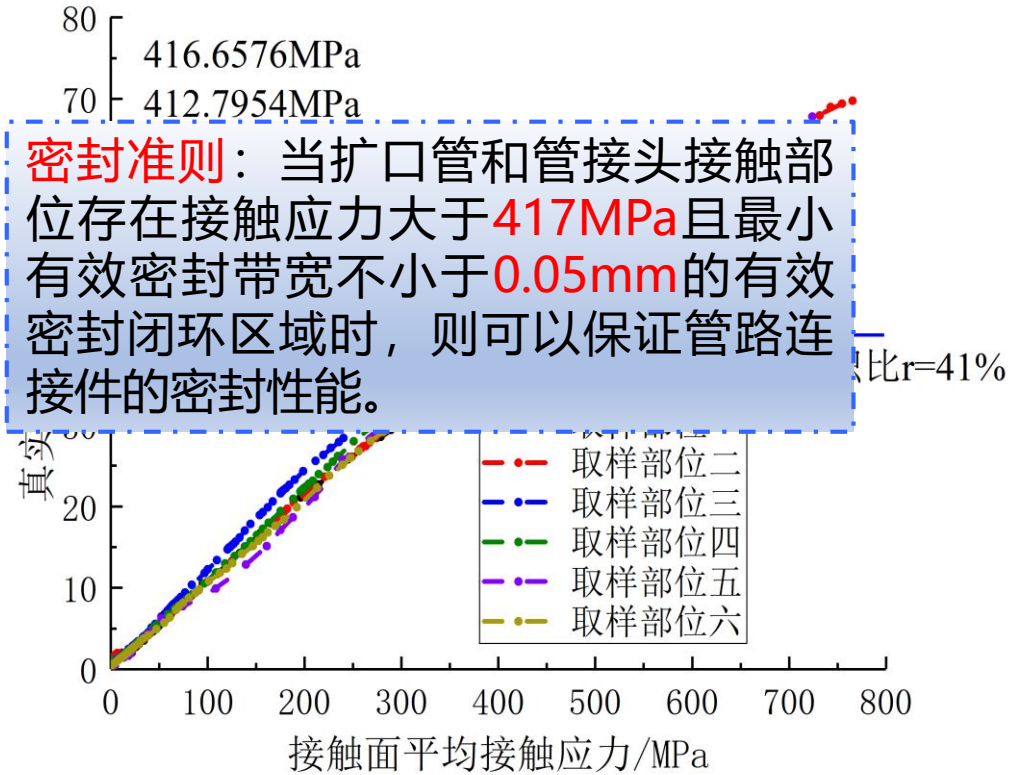


不同栅格模型网格数量下寻径结果

栅格模型网格数量	真实接触面积比
10×10	0.600
50×50	0.480
100×100	0.440
200×200	0.425
250×250	0.415

当网格数量继续增加时，计算时间耗费越大，计算效率低下，并且其过渡区域始终在附近；当网格数量区域无穷多时，并且根据逾渗理论可知，其最终结果会收敛于0.41，即逾渗阈值，则此时接触面积比就为**临界接触面积比**。

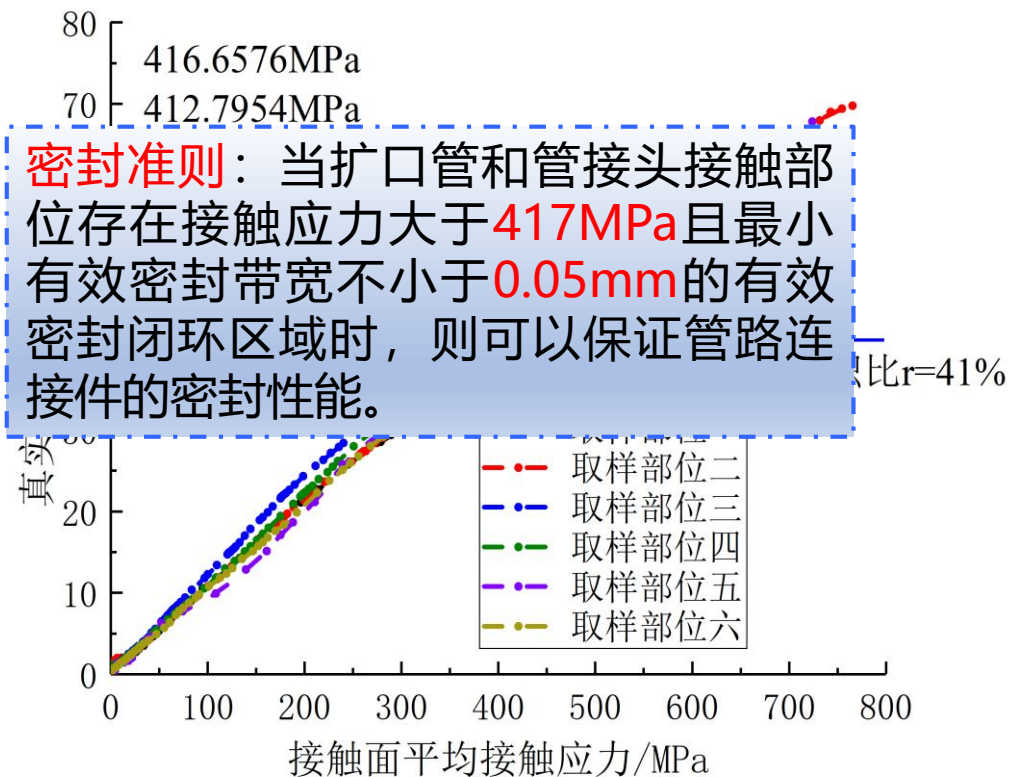
03 接触表面栅格化模型模拟



$r=0.41$ 时对应平均接触应力

扩口管与管接头 $0.05\text{mm} \times 0.05\text{mm}$ 接触区域形成密封界面时所需要的最小接触应力：**417MPa**

03 密封准则



$r=0.41$ 时对应平均接触应力

扩口管与管接头**0.05mm×0.05mm**接触区域形成密封界面时所需要的最小接触应力：**417MPa**

1 接触表面真实形貌数据获取

通过对真实扩口管和管接头接触部位进行取样扫描测量，对扫描出的点云数据进行逆向建模、网格划分得到三维接触表面有限元模型。

2 接触表面栅格化模型模拟

对扩口管接触界面建立了栅格模型，通过构建启发式寻径算法寻找界面之间的连通路径，接触界面真实接触面积占比至少要大于0.41时，才能使得接触区域之间不发生泄漏从而实现密封性能。

3 管路密封准则

当扩口管和管接头的 $0.05\text{mm} \times 0.05\text{mm}$ 接触区域形成密封界面时，其所需的最小接触应力为417MPa，为后续管路连接件的密封性能分析中提供重要密封评判指标。

目 录

01

研究背景及意义

02

扩口式管路连接件结构力学性能分析

03

粗糙表面接触特性分析及密封性能评判

04

装配状态对管路密封性能影响分析

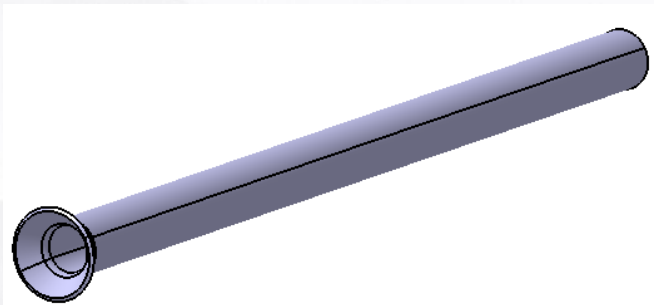
05

管路连接件密封性能综合试验研究

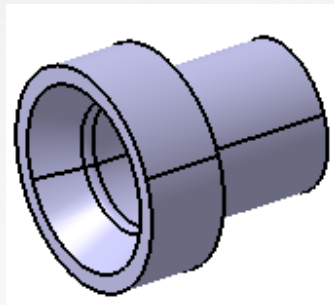
06

总结与展望

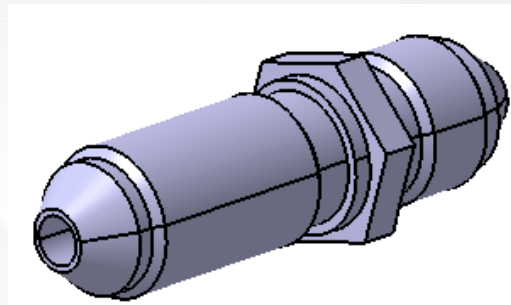
04 管路连接件有限元模型



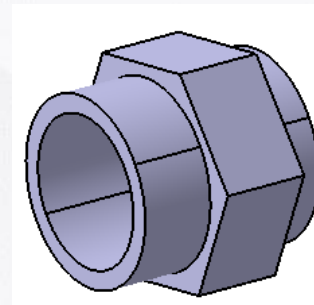
扩口导管



直通管接头

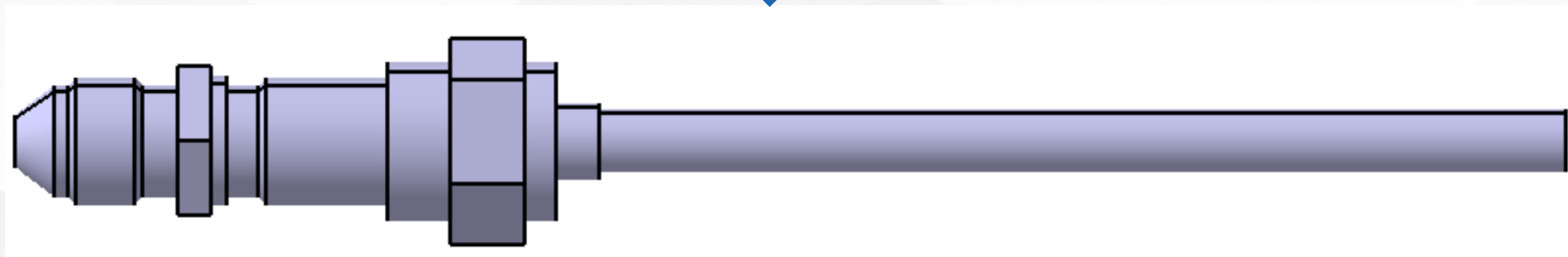


平管嘴



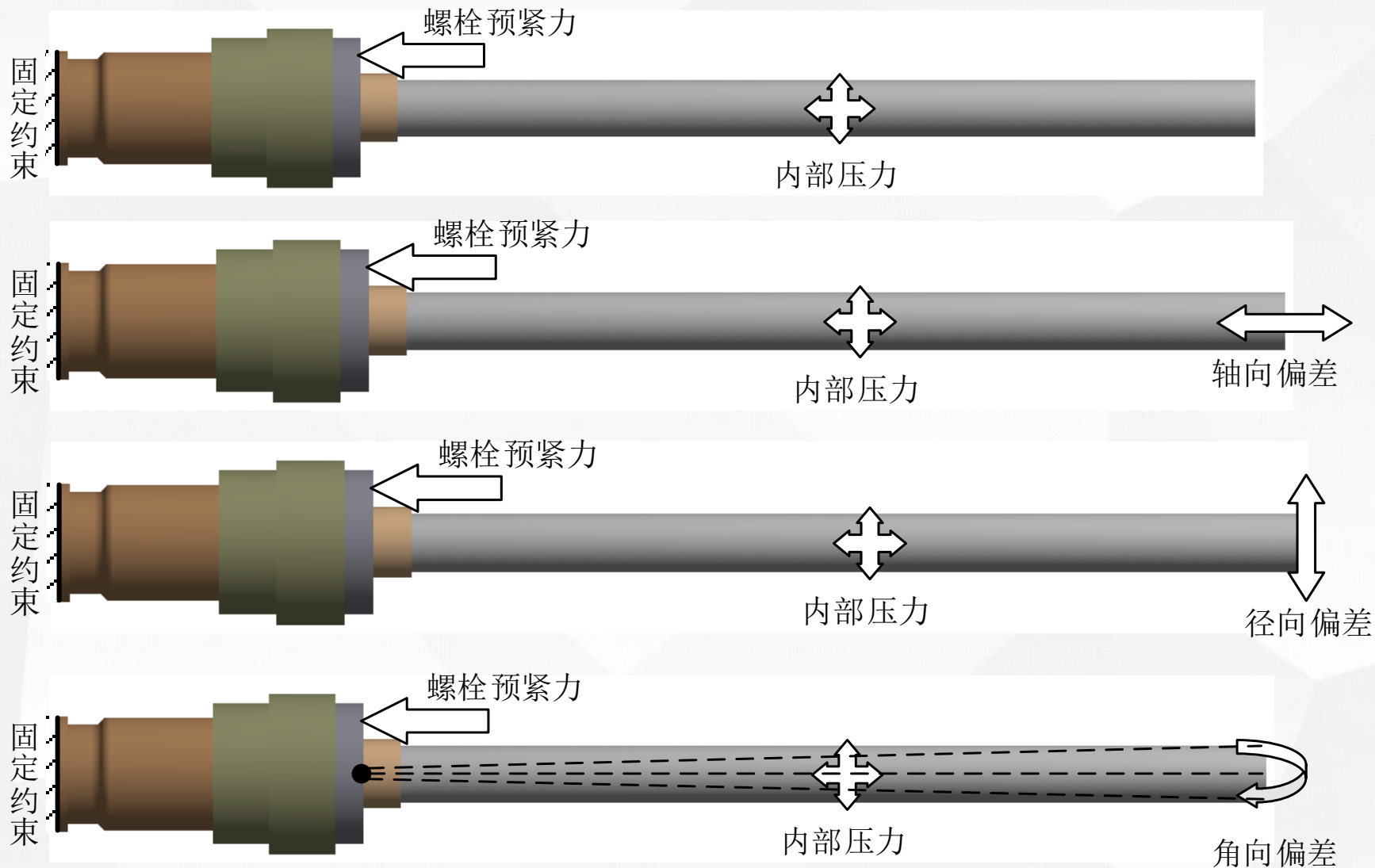
外套螺母

管路连接件各零件三维模型



管路连接件三维立体模型

04 管路连接件有限元模型



拧紧力矩对管路密封性能影响

轴向偏差对管路密封性能影响

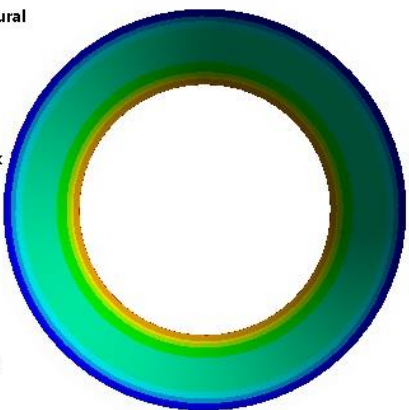
径向偏差对管路密封性能影响

角向偏差对管路密封性能影响

04 仿真结果分析

B: Static Structural
Pressure
Type: Pressure
Unit: MPa

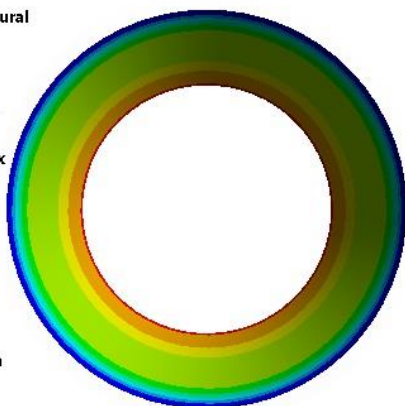
439.28 Max
417
205
183.02
161.03
139.05
117.07
95.084
73.101
51.117 Min



6KN

B: Static Structural
Pressure
Type: Pressure
Unit: MPa

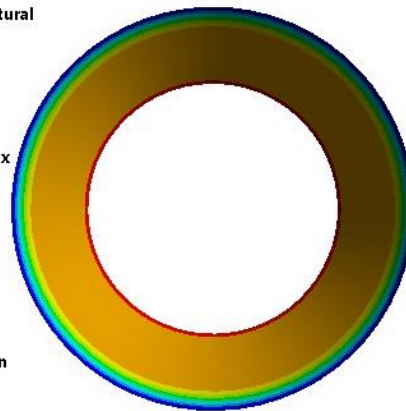
612.94 Max
417
205
184.74
164.48
144.22
123.96
103.7
83.437
63.177 Min



8KN

B: Static Structural
Pressure
Type: Pressure
Unit: MPa

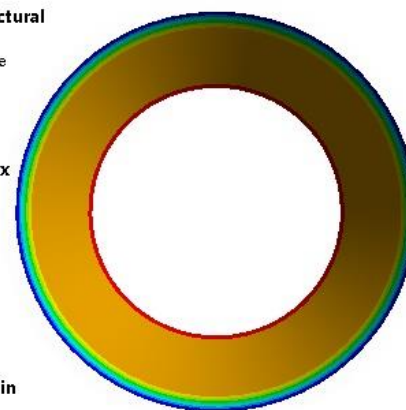
787.09 Max
417
205
185.32
165.63
145.95
126.27
106.59
86.905
67.222 Min



10KN

B: Static Structural
Pressure
Type: Pressure
Unit: MPa

978.2 Max
417
205
183.76
162.51
141.27
120.02
98.777
77.532
56.287 Min

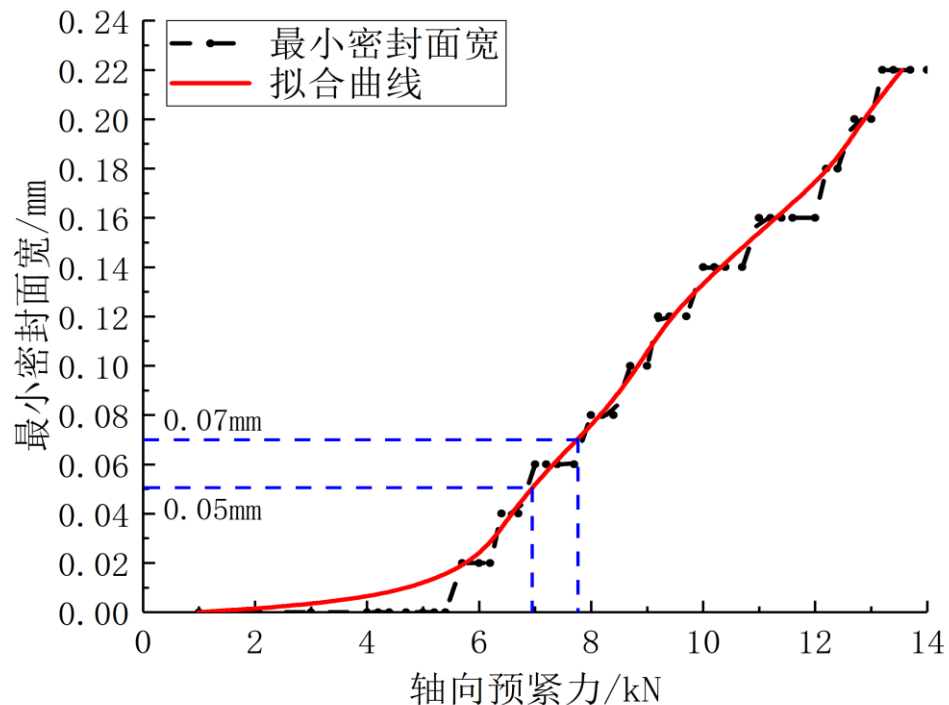


12KN

不同轴向预紧力下扩口管接触面的应力云图

表面接触应力从扩口管的扩口根部逐渐向扩口外缘扩张，并且随着轴向预紧力的不断增大，接触应力值的大小逐渐增大。

04 仿真结果分析



扩口管扩口表面网格精度为**0.02mm**，输出结果存在 **$\pm 0.02\text{mm}$** 的误差。根据密封准则，其有效密封带宽至少为**0.05mm**。

密封面宽为**0.05mm**

轴向预紧力为**7.0kN**

密封面宽为**0.07mm**

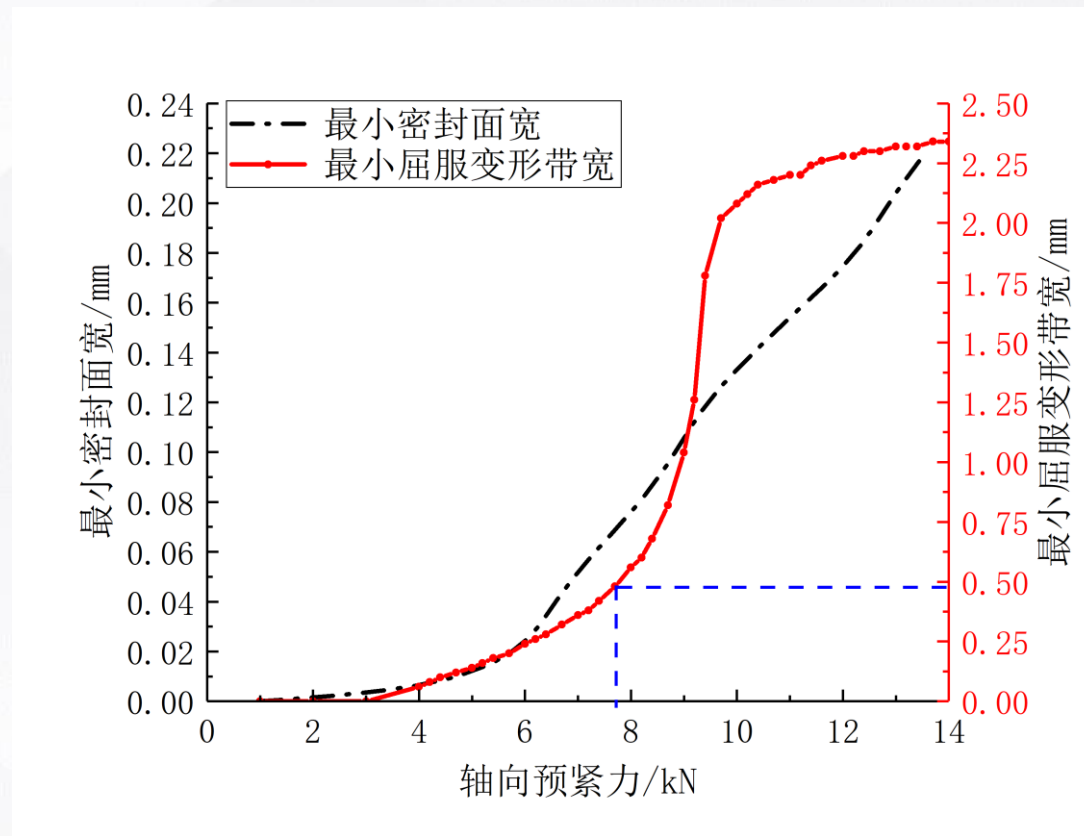
轴向预紧力为**7.7kN**

轴向预紧力为**7.7kN**

F=543.078T

拧紧力矩为**14.18N.m**

04 仿真结果分析



轴向预紧力为7.7KN

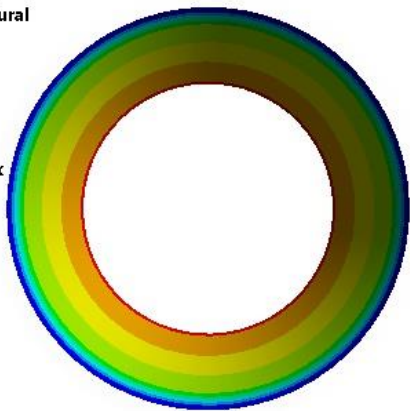


屈服变形带宽为0.48mm

04 仿真结果分析

B: Static Structural
Pressure
Type: Pressure
Unit: MPa

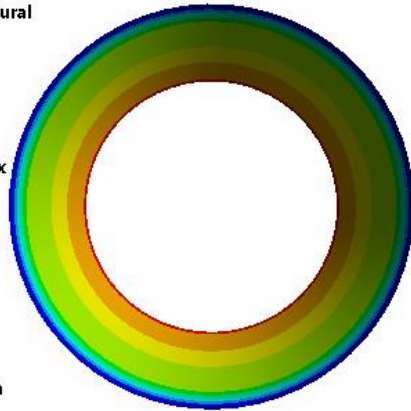
777.49 Max
417
205
184.4
163.8
143.2
122.61
102.01
81.409
60.81 Min



-0.6mm

B: Static Structural
Pressure
Type: Pressure
Unit: MPa

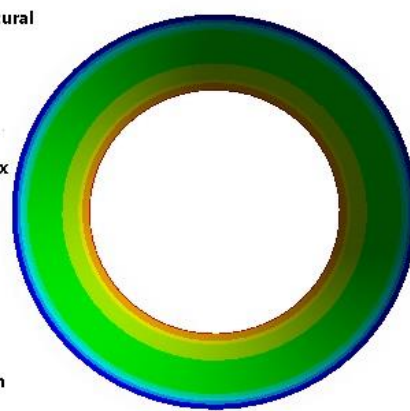
734.69 Max
417
205
184.89
164.78
144.68
124.57
104.46
84.352
64.244 Min



-0.2mm

B: Static Structural
Pressure
Type: Pressure
Unit: MPa

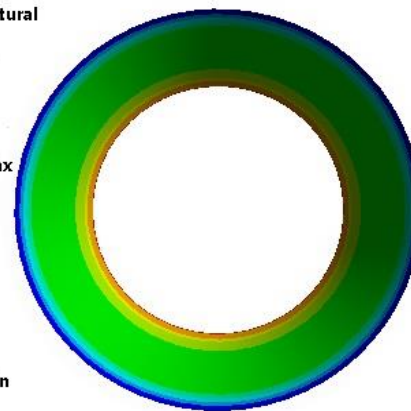
539.09 Max
417
205
182.72
160.43
138.15
115.87
93.587
71.305
49.022 Min



0.2mm

B: Static Structural
Pressure
Type: Pressure
Unit: MPa

495.44 Max
417
205
181.34
157.68
134.03
110.37
86.709
63.051
39.392 Min

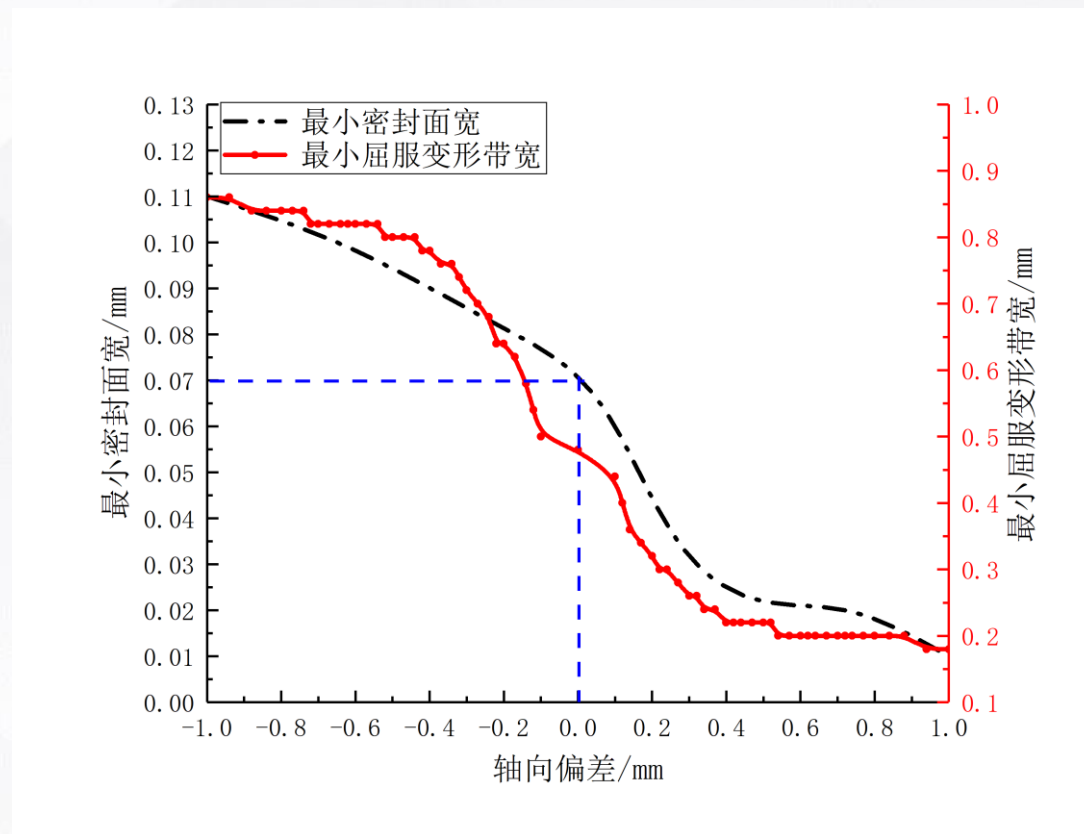


0.6mm

不同轴向偏差下扩口管接触面的应力云图

随着轴向偏差从负到正的增加（扩口管从靠近到远离）
表面接触应力逐渐减少。

04 仿真结果分析



拧紧力矩为14.18N.m

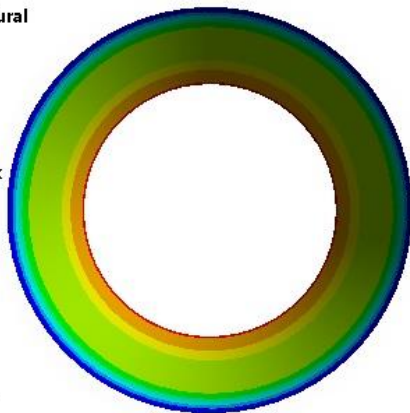
轴向偏差阈值为0

屈服变形带宽为0.45mm

04 仿真结果分析

B: Static Structural
Pressure
Type: Pressure
Unit: MPa

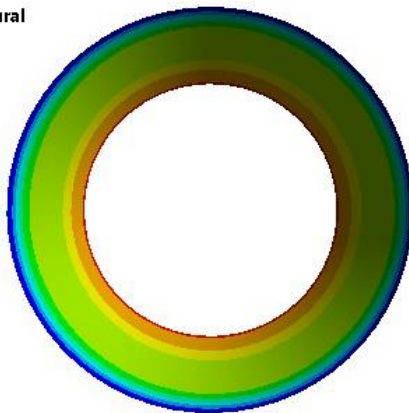
661.98 Max
417
205
183.87
162.73
141.6
120.46
99.326
78.191
57.056 Min



0.5mm

B: Static Structural
Pressure
Type: Pressure
Unit: MPa

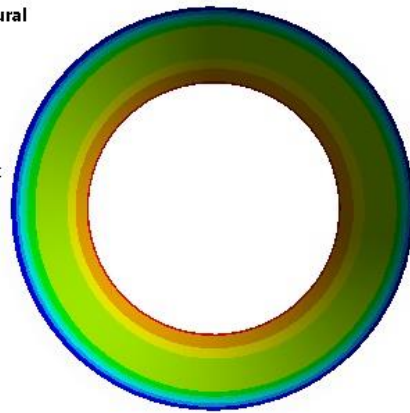
665.69 Max
417
205
183.23
161.47
139.7
117.94
96.17
74.404
52.638 Min



1.0mm

B: Static Structural
Pressure
Type: Pressure
Unit: MPa

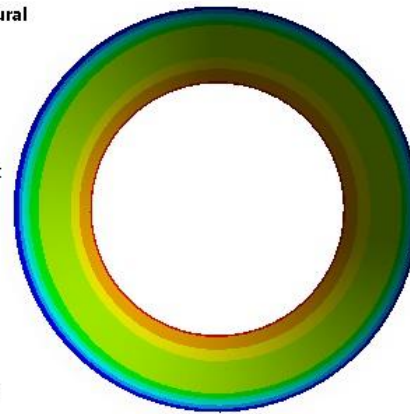
668.94 Max
417
205
182.68
160.35
138.03
115.71
93.384
71.061
48.738 Min



1.5mm

B: Static Structural
Pressure
Type: Pressure
Unit: MPa

671.81 Max
417
205
182.19
159.37
136.56
113.75
90.934
68.121
45.308 Min

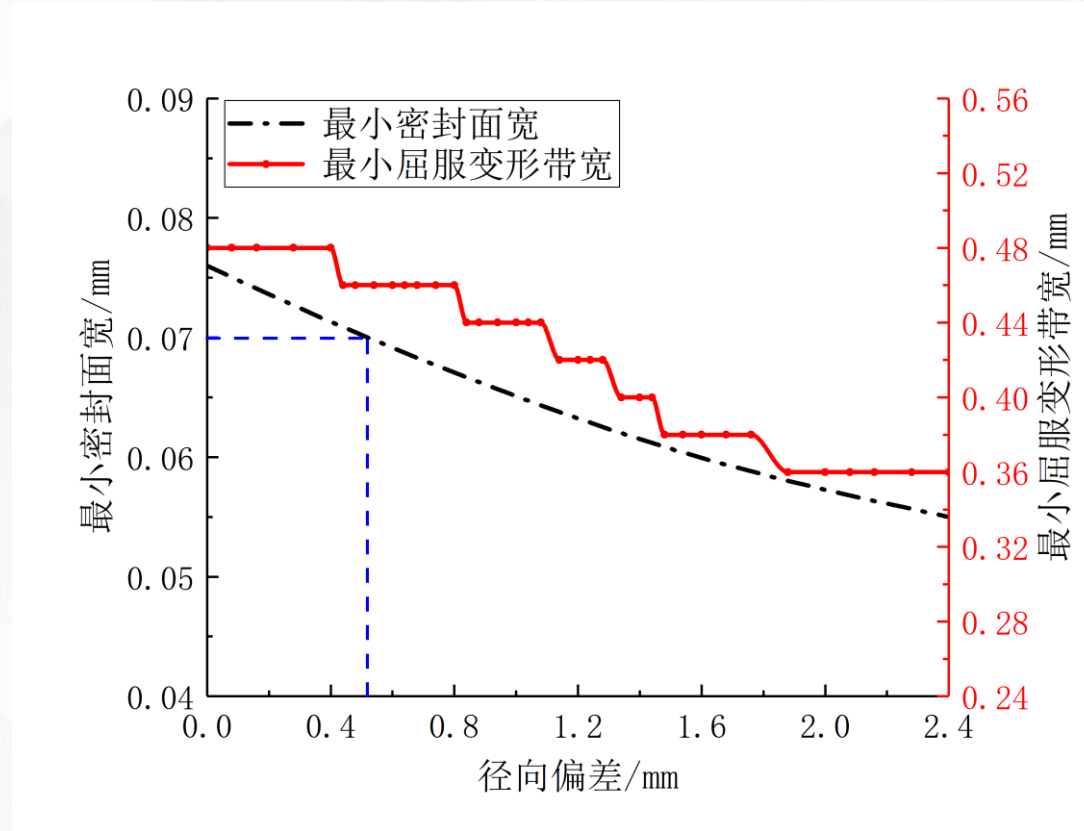


2.0mm

不同径向偏差下扩口管接触面的应力云图

随着径向偏差的增加，表面接触应力逐渐减少。

04 仿真结果分析

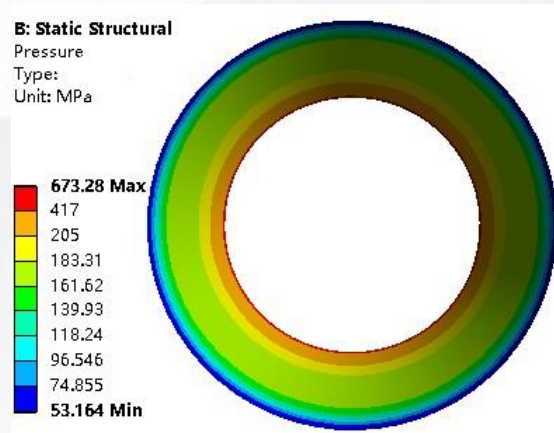


拧紧力矩为14.18N.m

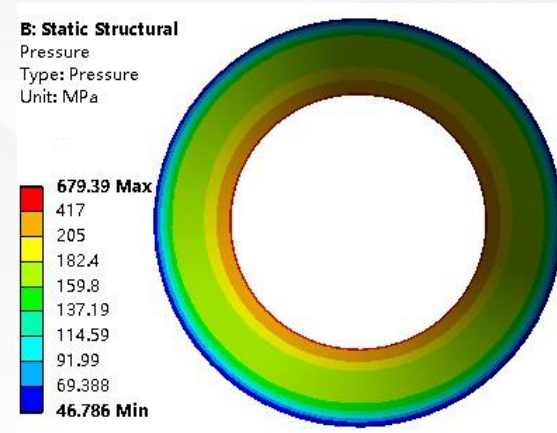
径向偏差阈值为
0.52mm

屈服变形带宽为0.46mm

04 仿真结果分析



2°

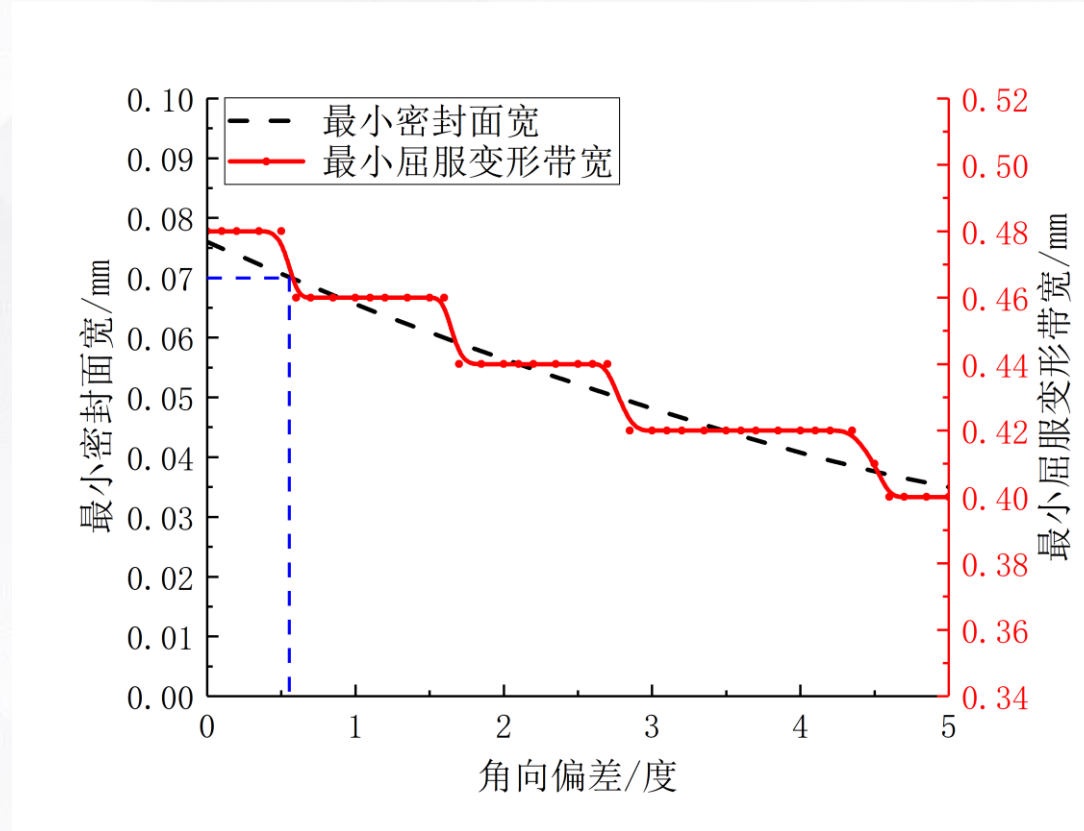


4°

不同角向偏差下扩口管接触面的应力云图

随着角向偏差的增加，表面接触应力同样**逐渐减少**。

04 仿真结果分析



拧紧力矩为14.18N.m

角向偏差阈值为
0.55°

屈服变形带宽为0.47mm

04 仿真结果分析

管路连接件最小拧紧力矩和屈服变形带宽仿真值

管路连接件尺寸 d_0 /mm	最小拧紧力矩仿真值 T_s /N·m	屈服变形带宽仿真值 L_s /mm	
4	14.18	0.48	
6	轴向偏差装配阈值	径向偏差装配阈值	
8			角向偏差装配阈值
最小拧紧力矩及对应的			
管路连接件尺寸 d_0 /mm	径向偏差装配阈值	屈服变形带宽仿真值 L_s /mm	
4	0.52	0.46	
6	0.55	0.46	
8	0.40	0.51	

最小拧紧力矩下轴向偏差装配阈值及对应的最小屈服变形带宽

管路连接件尺寸 d_0 /mm	轴向偏差装配阈值 x_k /mm	最小屈服变形带宽仿真值 L_s /mm	
4	0	0.48	
6	轴向偏差装配阈值	径向偏差装配阈值	
8			角向偏差装配阈值
最小拧紧力矩及对应的			
管路连接件尺寸 d_0 /mm	轴向偏差装配阈值	屈服变形带宽仿真值 L_s /mm	
4	0.55	0.47	
6	0.52	0.51	
8	0.48	0.53	

1 管路连接件有限元建模

建立第1尺寸系列 $d_0=4\text{mm}$ 、 $d_0=6\text{mm}$ 、 $d_0=8\text{mm}$ 扩口式管路连接件有限元模型，并且设置了模拟实际装配偏差的边界条件。

2 拧紧力矩和装配偏差对密封性能的影响

随着管径的增大，密封时所需要的最小拧紧力矩也逐渐增大，并且对应产生的接触部位屈服变形带宽大小均在 0.5mm 附近；轴向偏差对管路密封性能影响最大，角向偏差次之，径向偏差的影响最小。

1 管路连接件有限元建模

建立第1尺寸系列 $d_0=4\text{mm}$ 、 $d_0=6\text{mm}$ 、 $d_0=8\text{mm}$ 扩口式管路连接件有限元模型，并且设置了模拟实际装配偏差的边界条件。

2 拧紧力矩和装配偏差对密封性能的影响

随着管径的增大，密封时所需要的最小拧紧力矩也逐渐增大，并且对应产生的接触部位屈服变形带宽大小均在 0.5mm 附近；轴向偏差对管路密封性能影响最大，角向偏差次之，径向偏差的影响最小。

目 录

01

研究背景及意义

02

扩口式管路连接件结构力学性能分析

03

粗糙表面接触特性分析及密封性能评判

04

装配状态对管路密封性能影响分析

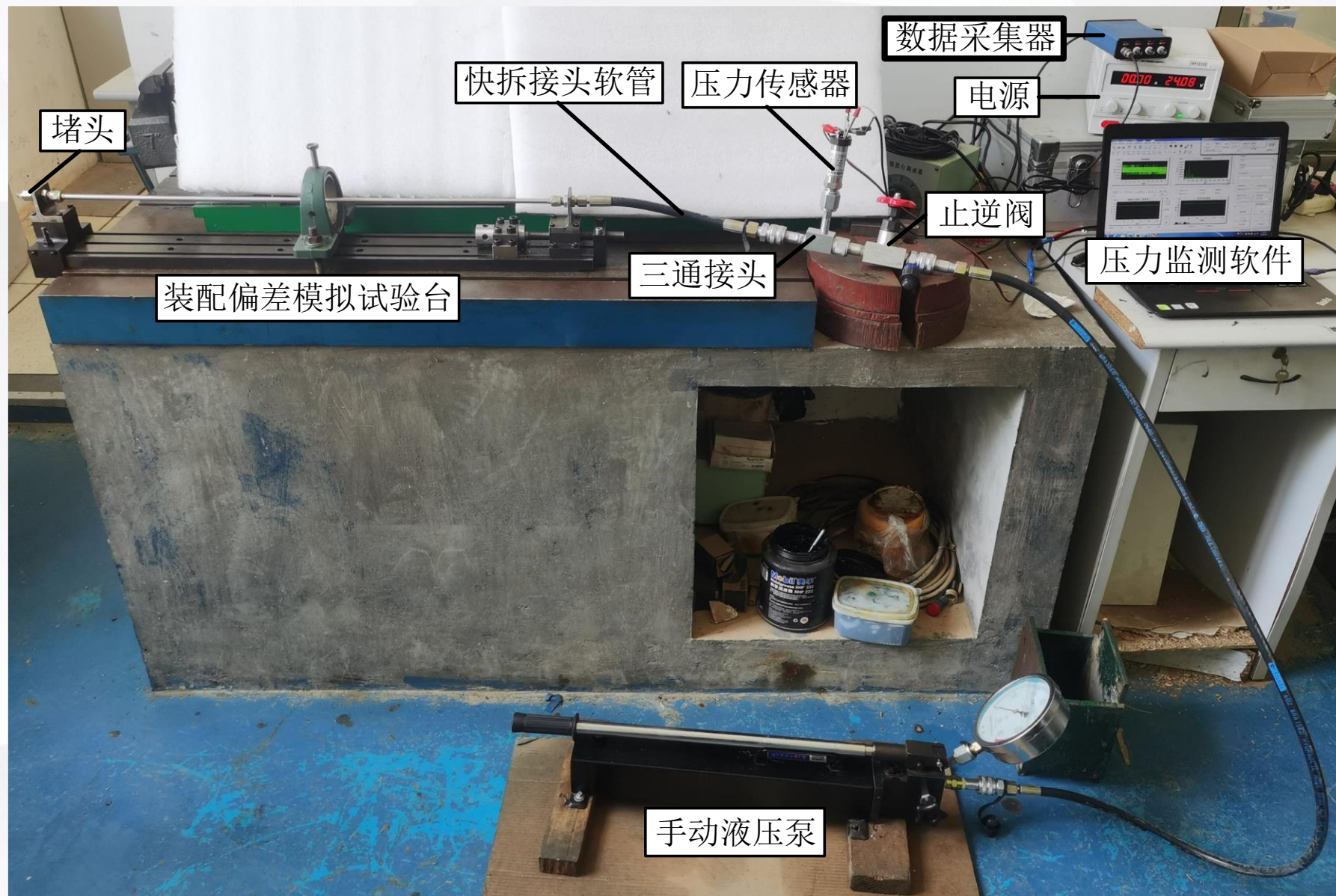
05

管路连接件密封性能综合试验研究

06

总结与展望

05 管路连接件密封性能试验



05 管路连接件密封性能试验

44

管路连接件尺寸 d_0 /mm	试验值 T_e /N·m	航标规定值 T_a /N·m	仿真值 T_s /N·m
4	14.50	14.70	14.18
6	20.70	20.60	22.28
8	25.20	26.50	25.07

通过对不同尺寸的管路连接件进行测定，并与航标值和仿真值结果进行对比，航标规定值和仿真值与试验得到的结果相差较小，仿真值与试验值的相对误差分别为2.2%、7.6%、0.5%，与航标规定值相对误差分别为3.5%、8.2%、5.4%，验证了仿真结果的准确性和有效性。

05 管路连接件密封性能试验

管路连接件尺寸 d_0 /mm	角向偏差拧紧力矩变化 $T/N\cdot m$	
	从0增加到 2°	每增加 1°
4	1.60	0.80
6	1.60	0.80
8	1.40	0.70

在轴向上偏差不在公差范围内时，正轴向偏差对密封性能的影响效果更加显著，并且正轴向偏差相较于负轴向偏差的影响效果更加显著，同时也验证了仿真分析中轴向偏差对密封性能影响最大的结论，在实际装配过程中应首先尽可能避免正轴向偏差的出现。

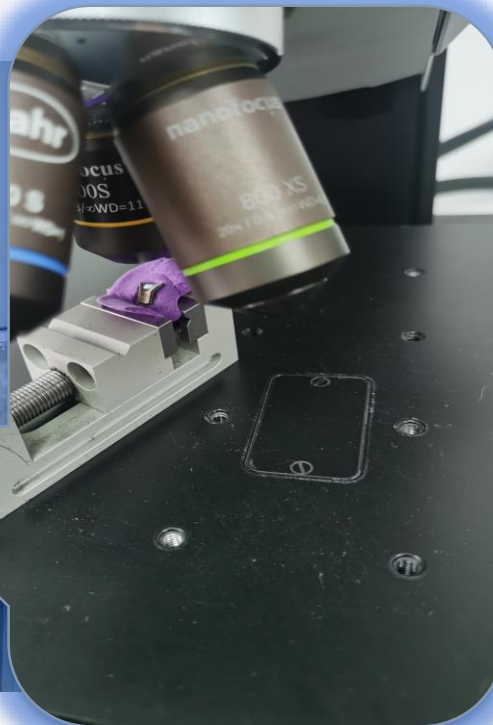
05 压痕带宽测定试验



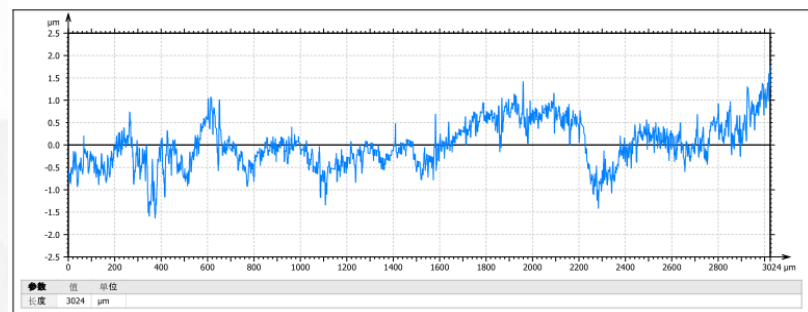
切割



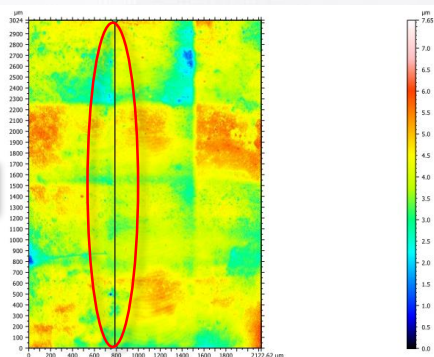
测量



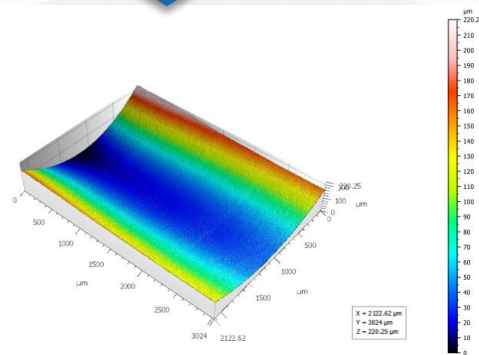
结果



绘制



选择区域



05 压痕带宽测定试验

为了验证上述测定方法的有效性，先增加了一个**预实验**过程：

采用了硬度计对表面打出一个**微小点状凹坑**，通过采用共聚焦显微镜对凹坑部位进行扫描，观察根据能否扫描出的结果来判断产生形变区域的宽度。

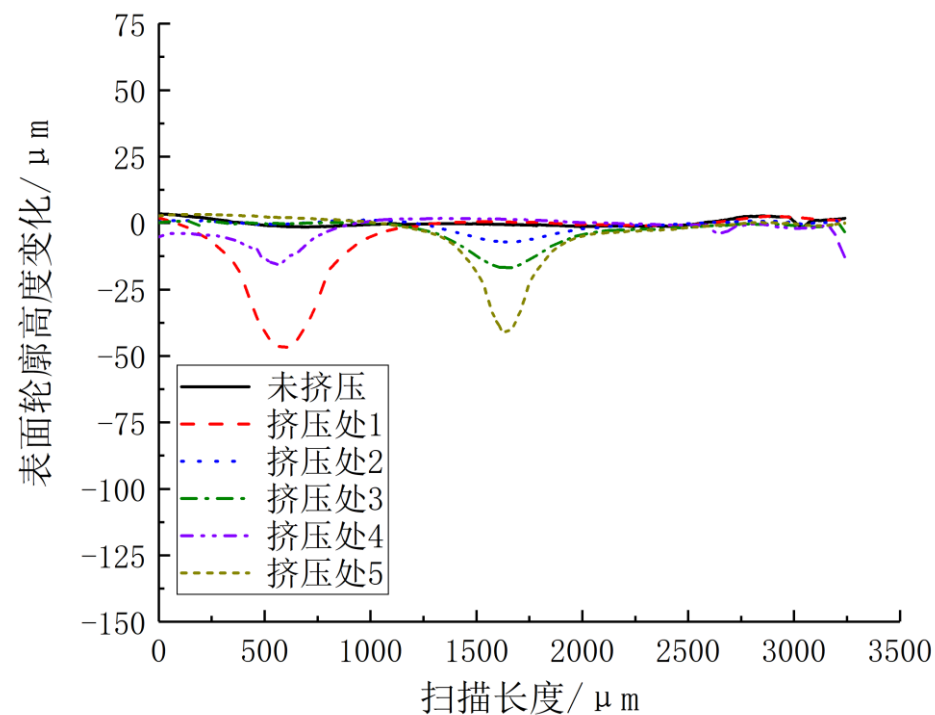
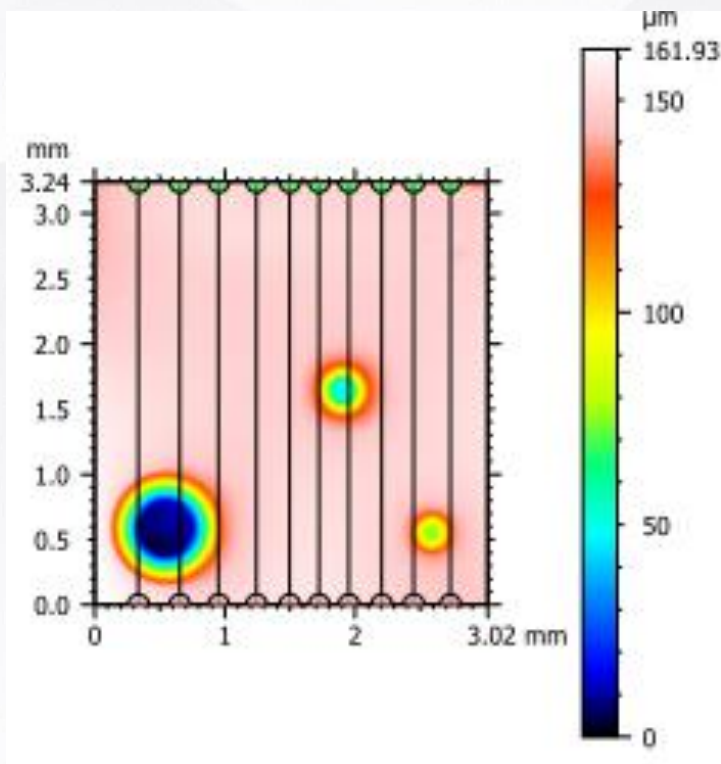


硬度计



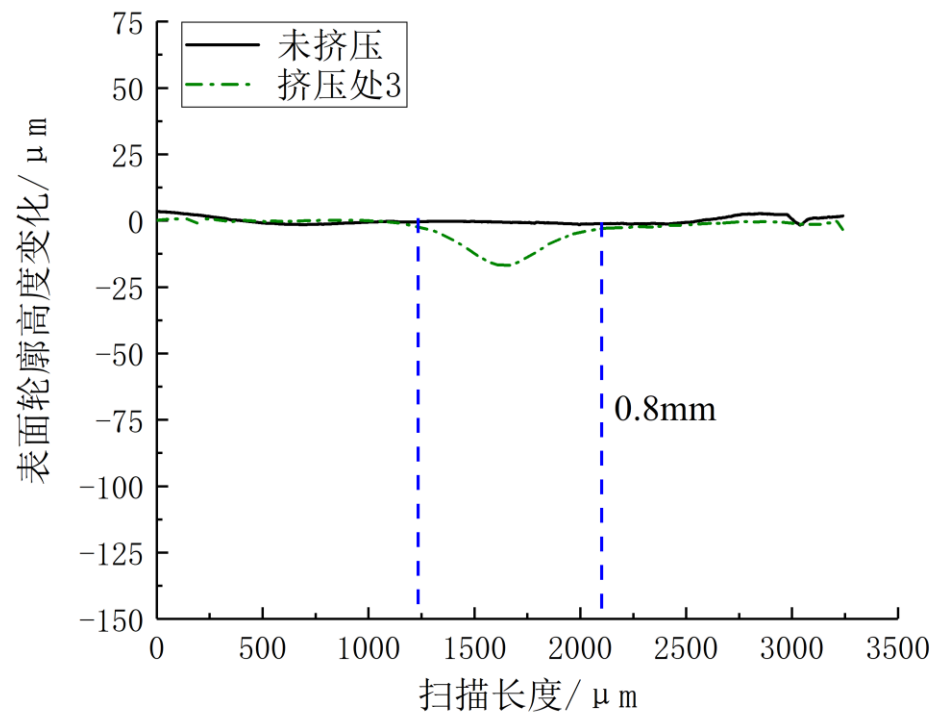
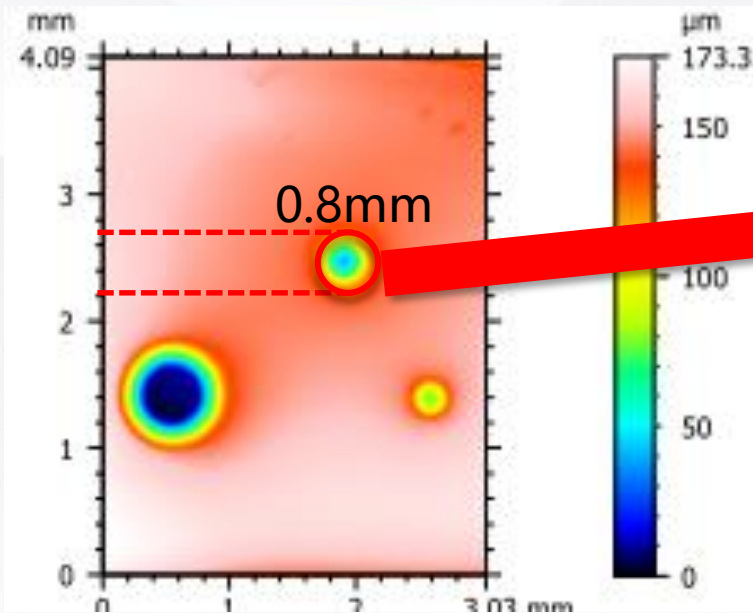
采用硬度计对试件表面进行
挤压后形成的点状凹坑

05 压痕带宽测定试验



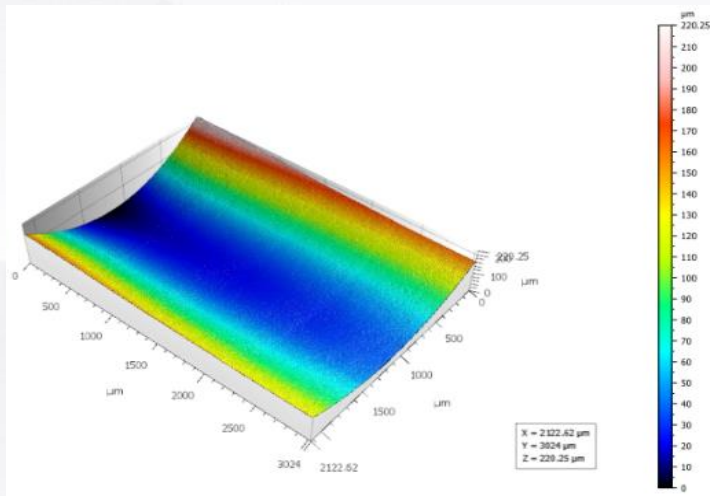
针对不同挤压深度的位置，表面轮廓高度变化程度也不一。但通过提取出二维轮廓形貌可以直观地反映出产生形变区域与未挤压区域有明显区别。

05 压痕带宽测定试验

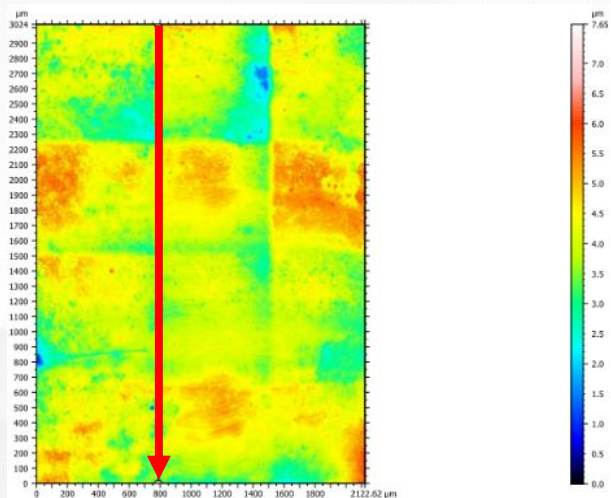
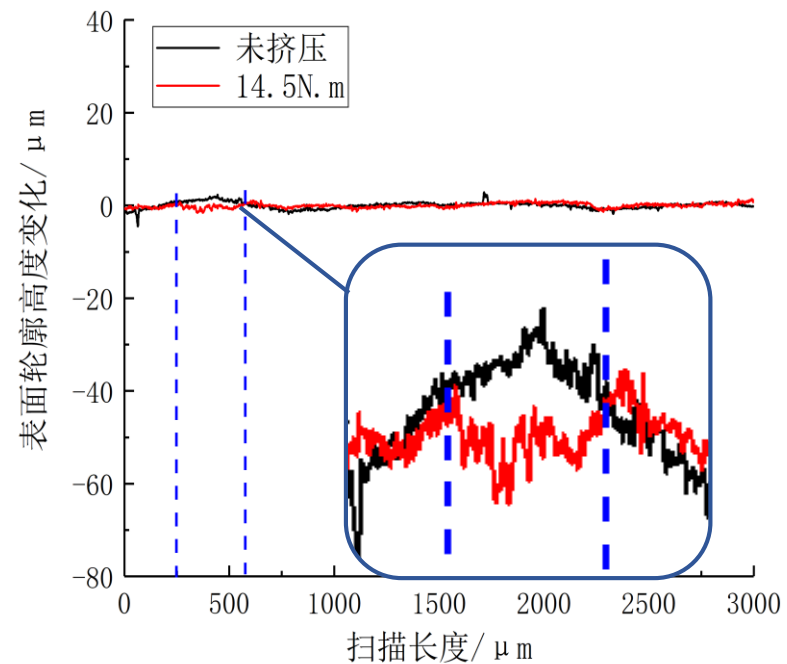


单独取其中一处凹坑进行对比，可以发现通过扫描得到的产生形变宽度与实际产生形变区域宽度相同。于是可以验证通过采用此种方法对扩口表面产生形变区域，即密封面宽度进行测量。

05 压痕带宽测定试验



表面三维形貌

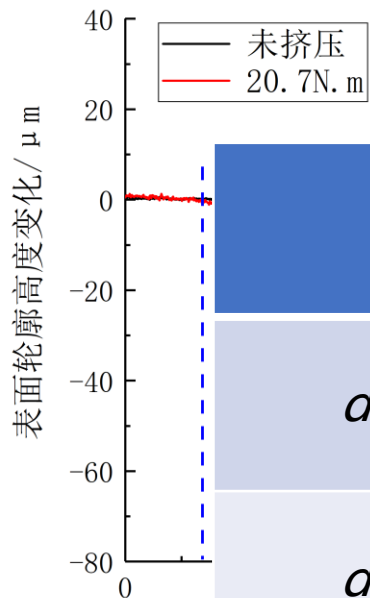


表面二维形貌

测量组别	压痕带宽试验值 L_e /mm
1	0.33mm
2	0.56mm
3	0.40mm
4	0.45mm

05 压痕带宽测定试验

$d_0=6\text{mm}$



$d_0=8\text{mm}$



	仿真值	试验最小值	误差
$d_0=4\text{mm}$	0.48mm	0.33mm	0.15mm
$d_0=6\text{mm}$	0.51mm	0.65mm	0.14mm
$d_0=8\text{mm}$	0.53mm	0.44mm	0.09mm

测量组
1
2
3
4

0.65mm
0.76mm
0.69mm
0.81mm

1
2
3
4

试验值 L_e /mm
0.62mm
0.57mm
0.83mm
0.44mm

1 管路密封性能最小拧紧力矩测定试验

第1尺寸系列 $d_0=4\text{mm}$ 、 $d_0=6\text{mm}$ 、 $d_0=8\text{mm}$ 扩口式飞机管路连接件所需要的最小拧紧力矩分别为 $14.5\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $20.7\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $25.2\text{N}\cdot\text{m}$ ，仿真值与试验值相对误差最大值为7.6%，与航标规定相对误差最大值为8.2%。

2 管路连接件装配偏差下密封性能试验

三种装配偏差中轴向偏差对管路的密封性能影响最大，并且正轴向偏差相较于负轴向偏差的影响效果更加显著，角向偏差次之，径向偏差影响最小。在实际装配过程中应尽量首先避免正轴向偏差的出现。

3 压痕带宽测定试验

对管路连接件在最小拧紧力矩下的扩口管扩口处产生的屈服变形带宽进行了测量，三种管径的压痕带宽测定试验的最小值分别为 0.33mm 、 0.65mm 、 0.44mm ，与仿真结果较为接近，验证了屈服变形带宽仿真方法的可行性。

目 录

01

研究背景及意义

02

扩口式管路连接件结构力学性能分析

03

粗糙表面接触特性分析及密封性能评判

04

装配状态对管路密封性能影响分析

05

管路连接件密封性能综合试验研究

06

总结与展望

1

螺栓扭拉关系确定

建立了螺栓有限元模型并进行仿真计算以及设计扭拉关系试验，并在此基础上对管路连接件中的扭拉关系公式进行推导。首先根据螺纹几何形状特点，建立了带三维斜螺纹六面体网格有限元仿真模型，通过仿真能够准确模拟螺栓与螺母之间的拧紧过程。

2

真实粗糙接触表面接触特性研究

采用真实管路连接件表面形貌数据对粗糙表面进行有限元建模及接触过程的仿真分析，并对接触界面采用栅格化模型进行模拟，得到评判扩口管和管接头接触表面达到密封性能的评价指标。

3

管路连接件有限元仿真

通过仿真分析不同管径管路连接件所需要的最小拧紧力矩、产生屈服变形区域的带宽、以及不同装配偏差下对管路连接件密封性能的影响。

4

管路连接件密封性能综合试验研究

对三种管径的管路连接件进行了无偏差下的最小拧紧力矩测定试验和最小拧紧力矩下装配偏差对密封性能的影响试验，以及对密封区域的压痕带宽的测定试验。

1

管接头螺栓扭拉关系修正

由于管接头接触部位存在锥角，只有锥面的法向方向才能转化为真正的产生挤压密封的有效接触应力，较难通过试验测出锥面所受力的的大小，没有针对管接头螺纹部位进行扭拉关系试验分析，以便更好地对理论计算公式进行修正，得到更准确地扭拉关系转化公式。

2

栅格模型模拟密封界面泄漏研究

利用栅格模型模拟接触表面的泄漏通道存在概率与工程实际存在一定差别，未来可以同样采用有限元方法建立三维微通道泄漏模型，采用流体力学思想对密封界面的液体流动进行分析。

3

密封区域压痕带宽测定

对表面形变部位在挤压前后可以采用图像识别方法进行匹配，通过扩口管接触表面产生形变后的形变量计算出表面接触应力大小，从而得出产生形变区域即压痕带宽大小，结果更精确。

4

综合装配偏差影响研究

实际飞机管路装配过程中往往是多种装配偏差共同存在的。下一步工作可以研究多种装配偏差同时存在的情况下管路密封性能变化规律，以及在外部存在振动情况下管路密封性能变化规律。



南京航空航天大学



谢谢!

请各位老师批评指正!