

含能柔性管材稳定性分析及涂胶策略工艺技术研究

王兴全, 陈子豪, 李荣*, 钱力, 侯波, 万利梅, 余泉, 周美玲

四川航天川南火工技术有限公司, 四川 泸州

收稿日期: 2025年7月5日; 录用日期: 2025年8月18日; 发布日期: 2025年8月19日

摘要

针对传爆接头非刚性轴孔配合间隙小、装配过程量化不足, 涂胶一致性控制难等问题, 开展含能柔性金属管材轴线特征稳定性分析与识别研究。对基于细深孔套管内壁高稳定性涂胶策略、无约束柔软金属丝轴线特征控制进行研究。探究了传爆接头内金属管材轴线角度偏移和细深孔内壁涂胶一致性问题, 为实现传爆接头全自动化装配、智能化奠定技术基础。

关键词

传爆接头, 柔性管材, 胶液涂覆

Study on Stability Analysis and Gluing Strategy Process Technology of Energetic Flexible Pipes

Xingquan Wang, Zihao Chen, Rong Li*, Li Qian, Bo Hou, Limei Wan, Quan Yu, Meiling Zhou

Sichuan Aerospace Chuannan Initiating Explosive Technology Limited, Luzhou Sichuan

Received: Jul. 15th, 2025; accepted: Aug. 18th, 2025; published: Aug. 19th, 2025

Abstract

To address issues such as small clearance in non-rigid shaft-hole fitting of detonation transfer joints, insufficient process quantification during assembly, and difficulties in adhesive coating consistency control, this study conducts research on the stability analysis and identification of axis characteristics of energetic flexible metal tubes. Investigations focus on high-stability adhesive coating strate-

*通讯作者。

文章引用: 王兴全, 陈子豪, 李荣, 钱力, 侯波, 万利梅, 余泉, 周美玲. 含能柔性管材稳定性分析及涂胶策略工艺技术研究[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(4): 434-446. DOI: 10.12677/met.2025.144043

gies for deep and narrow bore inner walls and the control of axis characteristics of unconstrained flexible metal wires. The research examines axial angle deviation of metal tubes within detonation transfer joints and coating uniformity in deep bore inner walls, thereby establishing a technical foundation for achieving fully automated and intelligent assembly of detonation transfer joints.

Keywords

Detonation Transfer Joints, Flexible Metallic Conduit, Glue Coating

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

传爆组件是通过爆轰形式传递信号,对初始激发能量放大,并引爆下级终端功能元件的传爆元件[1]。传爆组件中的限制性索体两端需要分别与输入接头和输出接头连接,因此需要在端头处装配金属套管,如图1所示,一方面能够提高端头密封性和连接强度,保证传爆效果及无爆炸产物泄露[2];另一方面能将不同规格索体转化为标准规格接头,有助于产品的标准化。



Figure 1. Assembly schematic of flexible rope sleeve module

图1. 柔性索套管组件装配示意图

限制性传爆索[3]内部的含能金属管材是产品发挥功能的核心零件,结构如图2所示,管材内装猛炸药,管材外径仅1 mm,其中金属管材壁厚约0.2 mm。为保证传爆可靠、爆轰稳定,要求金属管材外表面不允许有裂缝、裂纹、擦伤、划伤、油污等瑕疵,产品不允许严重弯曲、扭曲[4]。

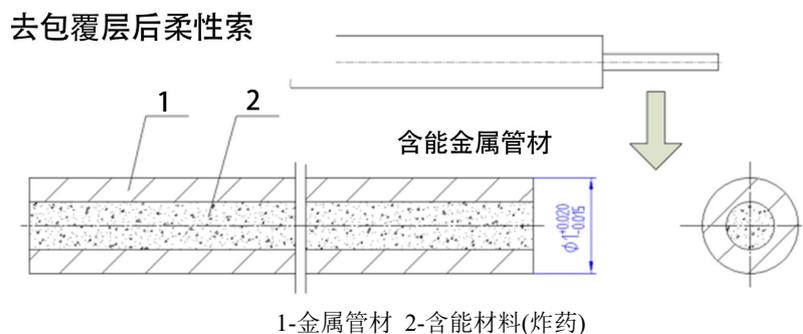


Figure 2. Explosive-filled metal pipe

图2. 含能金属管材

如图3所示,在套管装配时,需要进行对套管内壁进行涂胶,然后将含能管材穿入套管小孔中,过

程含能管材不能发生弯曲。

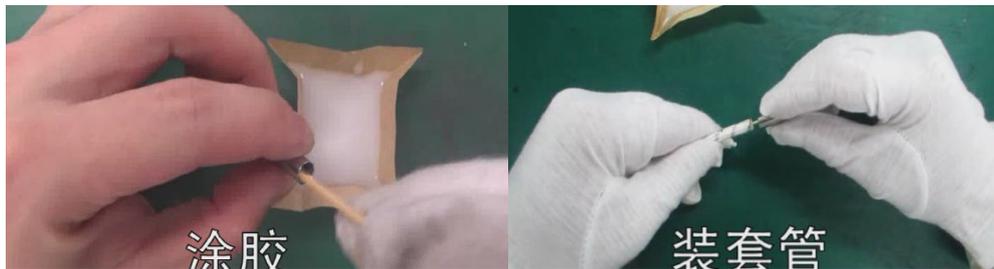


Figure 3. Manual assembly process
图 3. 手工装配过程

梳理手工装配过程中主要存在的问题有：

非刚性轴孔配合间隙小，对接装配难度大。金属管材与套管间隙约 0.12 mm，含能金属管材与套管的间隙约 0.1 mm。在当金属管材和套管对中性不好时，金属管材容易在套管的约束下出现弯曲变形，过度弯曲变形会影响可靠传爆[5]。

过程细化量化不足，涂胶一致性控制难。受不同操作者的手法差异、以及使用的工具不具备定量取用胶液的功能，导致实际生产中涂胶量存在一致性差异。

为此，开展含能柔性金属管材稳定性研究和套管涂胶量化分析，对高稳定性涂胶策略、无约束柔软金属丝轴线特征控制进行研究，解决当前手工操作模式下解决索与套管对接过程中金属管材弯曲问题和涂胶一致性控制难等问题对于实现导传爆接头自动装配自动化具有重要意义。

2. 含能柔性金属管材轴线特征稳定性分析及特征识别

2.1. 含能柔性金属管材稳定性分析

装配过程中需要确保含能柔性金属管材在套管内部竖直，进入套管锥形 $\phi 3$ mm 口中，然后沿锥形小孔轴线进行直线运动，轴线对位不准确硬装会损伤含能金属管材，造成弯曲或损伤，因此首先需要进行柔性金属管材稳定性分析。

在脱去包覆层后的固定长度的裸露管材装配过程等同于工程力学中的受压直杆模型，如下图 4 所示，在套管装配过程中受到轴向压力的细长金属管材，当压力超过一定数值时，受压直杆会由原来的直线平衡形式突然变弯，发生稳定失效，称为失稳或屈曲。

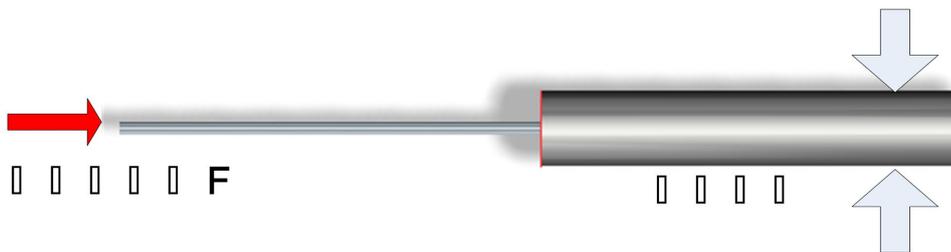


Figure 4. Force diagram of metal pipes in hard installation
图 4. 金属管材硬装时受力示意图

含能金属管材简化模型后进行受力分析，简化模型为下图 5 所示，一端固定，另一端自由，在自由端端面施加压力 F 。

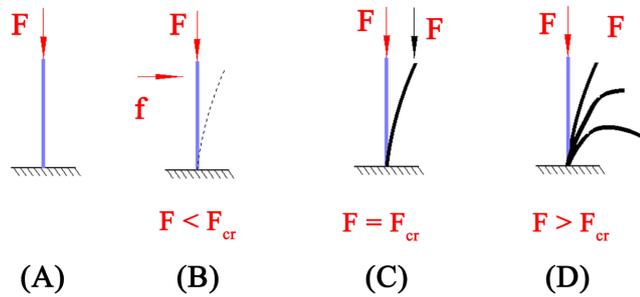


Figure 5. Load analysis of a metal pipe beam with fixed-free ends
图 5. 一端固定、一端自由的金属管材杆件受力分析

如上图 5(A)所示, 金属管材一端固定, 一端自由, 在受到压力 F 作用。当载荷小于某一个临界力 F_{cr} , 如图 5(B)所示, 金属管材受到某种微小干扰力 f 作用下, 使金属管材发生微小弯曲变形, 金属管材偏离直线平衡位置, 当取消干扰力 f 后, 金属管材又回到原来的直线平衡位置。

当一端压力 F 等于临界力 F_{cr} 时, 金属管材可以保持原来的直线平衡状态, 当受到微小干扰力后, 金属管材不再回到直线平衡状态, 而是保持微小弯曲变形的平衡状态, 如图 5(C)所示。

但是当压力 F 超过临界力 F_{cr} 时, 在干扰力作用下, 杆件不再回到直线平衡位置, 载荷 F 稍大于临界力, 就足以使金属管材产生很大的挠度。当 $F > F_{cr}$ 时, 原有的直线平衡形式是不稳定的, 使中心受压直杆由平衡形式转变为不稳定平衡时所受到的轴向压力, 称为临界载荷, 简称为临界力, 用 F_{cr} 表示。

为了保证金属管材在装配过程中不受损伤, 必须使金属管材处于直线平衡形式, 金属管材所承受的临界压力 F_{cr} 为金属管材的极限承载能力, 保证含能金属管材装配过程中不发生弯折保持稳定最核心的是确定含能金属管材的临界压力 F_{cr} 。

在理论分析中, 主要讨论理想中心受压直杆的稳定性, 材料满足均匀、连续、各向同性的假设, 杆件为等截面直杆, 压力与杆轴线重合, 没有偏心, 以上假设成立的前提下探究金属管材的临界压力值 F_{cr} 。

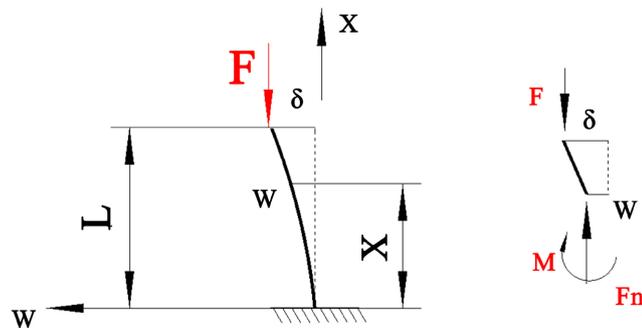


Figure 6. Stress analysis of metal pipe with one end fixed and one end free
图 6. 金属管材一端固定、一端自由的受力分析

设金属管材压杆受到的压力为临界压力, 杆件处于微弯平衡状态, 取压力的 F 的绝对值, 设杆端的挠度为 σ , 如图 6 坐标系中, 弯矩与挠度的方向符号一致, 挠曲线二阶倒数与弯矩符号一致, 则 X 截面的弯矩为:

$$M = F(\sigma - W) \quad (1)$$

其中: $(\sigma - W)$ 为纵向截面的轴心偏移量。

将截面弯矩公式(1)代入, 则挠曲线微分方程为:

$$w'' = \frac{M}{EI} = \frac{F}{EI}(\sigma - W) \quad (2)$$

其中: E 为金属管材的弹性模量, I 为截面惯性矩, EI 为抗弯刚度。
记:

$$k^2 = \frac{F}{EI} \quad (3)$$

将公式(3)代入(2), 则挠曲线近似微分方程则为:

$$w'' + k^2 w = k^2 \sigma \quad (4)$$

微分方程的通解为:

$$w = A \cos kx + B \sin kx + \sigma \quad (5)$$

上式求导:

$$w' = -kA \sin kx + kB \cos kx \quad (6)$$

B 为积分常数, 代入边界条件:

$$w|_{x=0} : A + \sigma = 0 \quad (7)$$

$$w'|_{x=0} : B = 0 \quad (8)$$

可以解得:

$$A = -\sigma, B = 0 \quad (9)$$

将(9)解代入边界条件可得:

$$-\sigma \cos kl + \sigma = \sigma, \text{ 即 } \cos kl = 0 \quad (10)$$

则:

$$kl = \frac{(2n+1)\pi}{2} (n=0,1,2,\dots) \quad (11)$$

可计算求得:

$$k = \frac{(2n+1)\pi}{2l} \quad (12)$$

将式(12)代入(3)计算可得:

$$F = \frac{(2n+1)^2 \pi^2 EI}{(2l)^2} (n=0,1,2,\dots) \quad (13)$$

当 $n=0$, 就可得到杆件的临界压力 F_{cr} :

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(2l)^2} \quad (14)$$

其中: l 为含能金属管材的长度。

依据上述计算过程, 假设含能金属管材轴线是理想直线, 压力与轴线是重合的, 材料是均匀, 不存在初弯曲和偏心等情况, 在含能金属管材压杆模型条件下得到含能金属管材的临界压力 F_{cr} 。

2.2. 含能柔性金属管材轴线特征控制与识别

柔性索套管对接装配过程中确保含能管材几何形状、尺寸精度，尤其针对管材的相对居中度、直线度一致性的关键环节。含能金属管材中心轴线的最大偏移量或全长总弯曲量直接决定了装配的可行性。

现阶段柔性索套管装配生产模式是基于专家经验的手工装配过程。如图 7 所示，柔性含能金属管材理想模型是相对索体无歪曲，与索体端面垂直，而实际模型中含能金属管材是与索体有相对偏移，存在一定挠度。如图 7 A 向视图内容所示，含能金属管材在手工捋直干预下，管材的轴线可以控制在索外径轮廓内。在手工装配过程中，技能人员凭借触感进行装配，过程中不会损伤金属管材，直接证明金属管材的二次控制矫形是合理可行的。

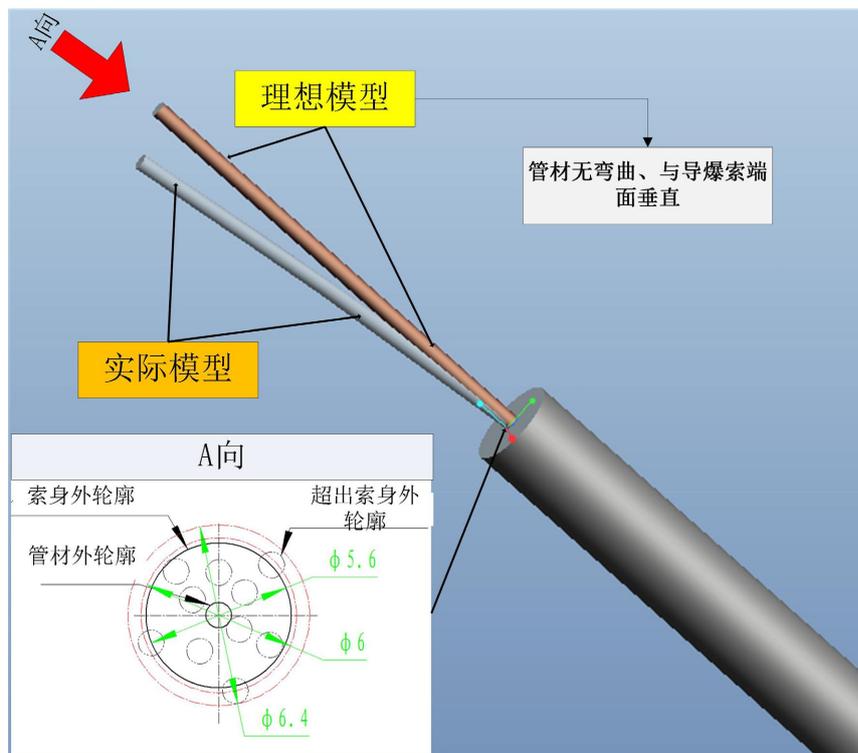


Figure 7. Manually-controlled metal tubular components schematic

图 7. 基于手工控制的金属管材示意图

柔性金属管材在柔性索包覆层去除后，金属管材根部只要存在的微小的挠度(偏转角度)，金属管材的端头位置的偏移量会随着金属管材的长度而增大，致使在金属管材的端头会产生较大的中心偏移量，导致其三维空间定位产生较大的偏差，进而影响金属管材端头与套管的配合装配。

设计含能柔性金属管材轴线控制模型如图 8，通过大锥形口导向，金属管材进入 $\phi 1.1$ mm 的深孔，沿轴线运动直到柔性索端面接触到矫形验证工装的锥面停止移动，促使含能柔性金属管材在长度约 30 mm、 $\phi 1.1$ mm 的通孔内被强制约束矫形，保持一段时间后，沿轴线运动向反方向退出金属管材，完成矫形。

金属管材在穿入套管前需进行轴线特征识别，通过轴线特征识别技术对金属管材居中度、偏离量进行量化识别，通过设置阈值进行判断是否符合装配条件。可以通过视觉技术对金属管材轴线特征及端面位置、偏移量进行识别判断。搭建金属管材轴线特征视觉试验平台，如图 9 所示，使用 0.5 倍远心镜头，规定视野大小为 40 mm × 30 mm，光源采用 CR-9030-W 进行柔性索端面和金属管材端面识别，识别结果如图 10 所示。

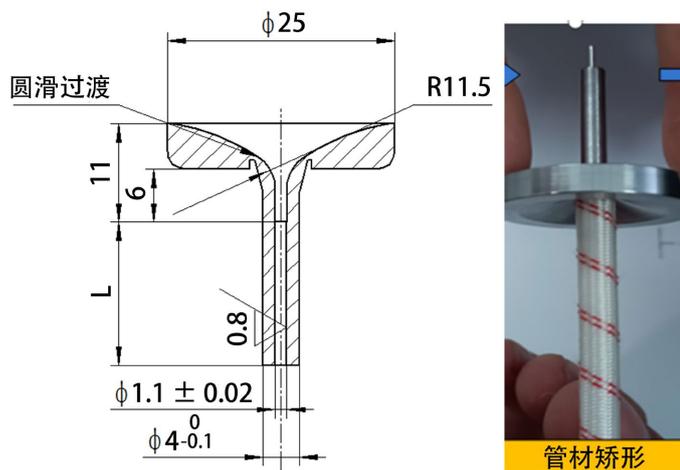


Figure 8. Warhead tube straightening simulation
图 8. 含能金属管材矫形模型



Figure 9. Vision test platform
图 9. 视觉试验平台

相机型号	2000万黑白	镜头焦距	0.5倍远心	光圈数	/
分辨率	5496*3672	光源型号	CR-9030-W	配套控制器	SA2-24W64-4T
曝光时间	25000	增益	/	延长线	1m
视野大小	40x30mm	伽玛值	/	背景颜色	白色
镜头工作距离	110mm	接圈长度	/	来料方式	/
光源工作距离	100mm	漫射板	/	备注	/

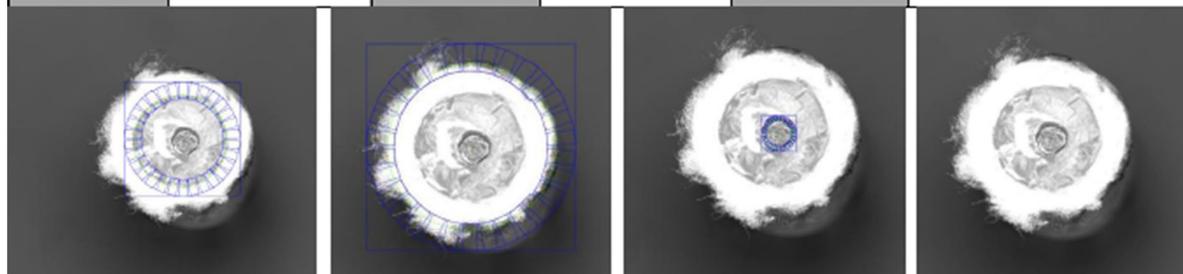


Figure 10. Recognition results
图 10. 识别效果

通过视觉技术能够判断金属管材轴线空间特征,对不满足装配条件(偏移量 $> 2\text{ mm}$)时进行程序屏蔽,不进行后续装配;对满足装配条件时(偏移量 $< 2\text{ mm}$),进行下序装配工步。

3. 基于细深孔套管内壁稳定涂胶策略

3.1. 细深孔套管内壁稳定涂胶策略

针对细深孔(如高长径比孔、微孔等)内壁涂胶的研究,其核心挑战在于胶液的均匀覆盖及固化稳定性,孔深大、孔径小导致胶液流动阻力大,易出现未覆盖或气泡残留。内壁的光洁度、孔轴偏斜等因素都会影响胶液厚度的一致性。

结合现场工艺技术方法和现阶段涂胶技术,有两种策略,其一使用竹签或其他圆柱形物体蘸取胶液后在内壁旋转涂覆;其二使用针头在深孔底部以螺旋线轨迹进行涂覆。

两组试样的均使用大约相同重量的胶量约 $(40 \pm 5)\text{ mg}$,涂胶后套管胶液内壁分布情况如下图 11 所示,竹签涂覆方式,因为使用竹签的圆周面与套管内壁绕周向运动,因此胶液相比于针头涂胶方式,胶液较为均匀地分布在套管内壁上,只有局部有胶液厚度不均的情况;而针头涂胶运动轨迹为螺旋线形状,因此胶液分布呈现波浪状,相对于整个套管内壁,胶液分布更加均匀。

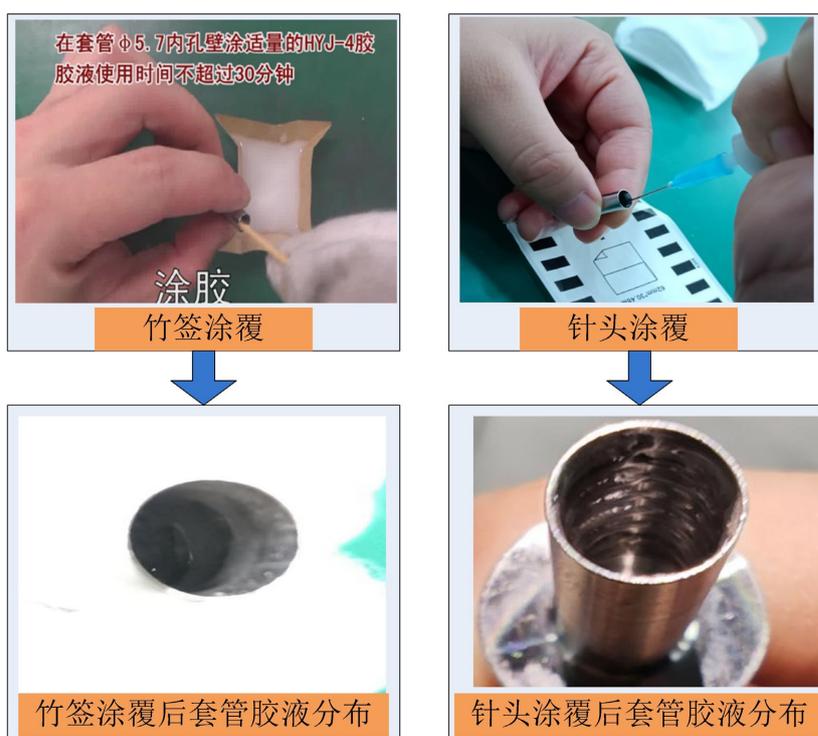


Figure 11. Adhesive distribution on casing inner walls using different application tools
图 11. 含使用不同涂胶工具后套管内壁胶液分布情况

将两种涂胶方式分别进行套管装配,两种不同涂胶策略下,套管装配后金属管材装配处均有胶液挤出,满足工艺要求,如图 12 所示。

将竹签涂胶与针头涂胶后套管进行紧口后固化,之后做拉脱力试验,拉脱力试验数据如表 1 所示,两组数据平均值分别为 1150.8 N 和 1136.7 N ,平均值相差不大,从数据分布分析,竹签涂胶后的柔性索拉脱力数据离散较大,而针头涂胶相对较好。



Figure 12. Adhesive extrusion phenomena on coated casing inner walls

图 12. 套管内壁涂胶后胶液挤出情况

Table 1. Comparative analysis of dual-group pull-off force tests

表 1. 两组拉脱力试验比对

序号	策略一(拉脱力 N)	策略二(拉脱力 N)	备注
1	1220	1132	
2	1091	1160	
3	1168	1170	
4	1222	1140	
5	1189	1095	
6	1150	1189	
7	1202	1154	
8	1076	1209	
9	1090	1058	
10	1100	1060	
平均值	1150.8	1136.7	
中位数	1159	1147	
标准差	257.4297639	251.3832009	
方差	3498.177778	2840.233333	

基于试验结果分析，针头套管内壁涂胶能更好地保证出胶量和涂胶位置一致性，涂胶均匀性和一致性相对于手工竹签涂胶优势较大，因此可以用设备针头涂胶来替代手工竹签涂胶。

3.2. 套管内壁涂胶量化分析

为保证套管内壁涂胶质量，需要对针头涂胶量进行量化分析。分别对套管内壁涂胶长度、胶量、以及涂胶轨迹进行研究分析，涂胶过程如图 13。

通过胶液用量试验，人工对 n 个套管内壁进行涂胶，涂胶后进行装配，胶液从小口段挤出，判断为涂胶合格，满足工艺要求。此时可以根据胶公式(15)液使用前后的重量差值，间接计算出单个套管胶液用

量。

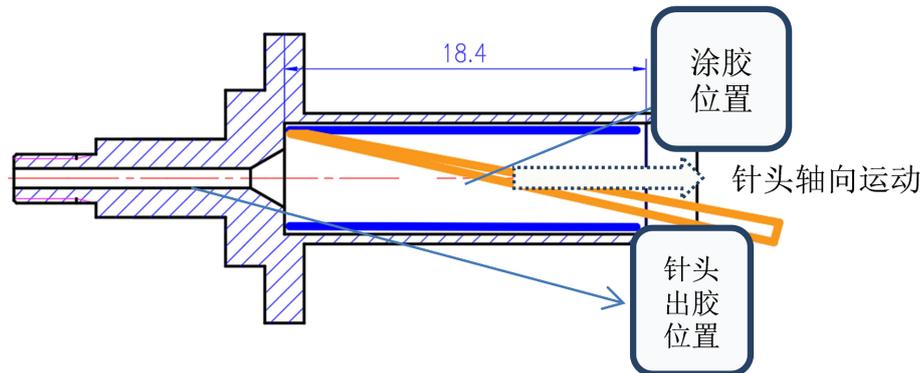


Figure 13. Schematic illustration of casing adhesive deposition
图 13. 套管涂胶示意图

$$m = (W_1 - W_2) / n \quad (15)$$

m = 单根套管用胶量

W_1 = 胶液初始重量

W_2 = 胶液使用后重量

n = 套管总数

根据前期试验，初步获得单根柔性索套管装配所需重量为 (40 ± 5) mg。

通过选用确定针头出胶口部直径 ϕd ，确定胶管容腔压力 P ，胶液密度为 ρ ，计算可得单个套管内胶液体积：

$$v = m / \rho \quad (16)$$

根据流量体积公式可以计算出单个套管胶液从针头出胶的时间，根据出胶时间 T ，对套管转速 v_1 和针头移动速度 v_2 进行优化验证试验，在时间 T 内，完成18 mm段的涂胶作业，确定最佳涂胶轨迹，使得胶液均匀分布在此长度段内。后续根据样机对出胶时间、套管转速以及针头移动时间进行试验验证，确定最佳参数。

4. 试验分析

实际生产过程中柔性索中的金属管材由于转运、盘圈等周转过程，存在初弯曲、材料不均匀、内装药剂约束、微偏心、压力偏心等情况，理论计算出金属管材模型的临界压力是有偏差的。设计金属管材稳定性试验，探究金属管材实际临界压力。

试验条件如下：

1) 设备：使用微机控制万能试验机 TSEFS03A (量程 0~5 KN)；

2) 材料：10 根取包覆层 30 mm 的金属管材柔性索；

3) 条件：柔性索一端固定，金属管材另一端缓慢施加力，直至金属管材发生失稳弯曲，记录过程压力曲线，如下图 14 所示。首先将柔性索一端固定在万能试验机固定夹具上，保证竖直，无歪斜，同时不能进行轴向或周向的移动，其次保证金属管材位置相对于柔性索居中，无歪斜，居中误差不超过 $\phi 1.5$ mm 内。万能试验机另一端施加力，并记录施加力大小，试验机压力输出端向金属管材轴向方向进行位移，直到金属管材发生失稳弯曲，停止载荷输入，记录金属管材受力过程曲线，如下图 15。

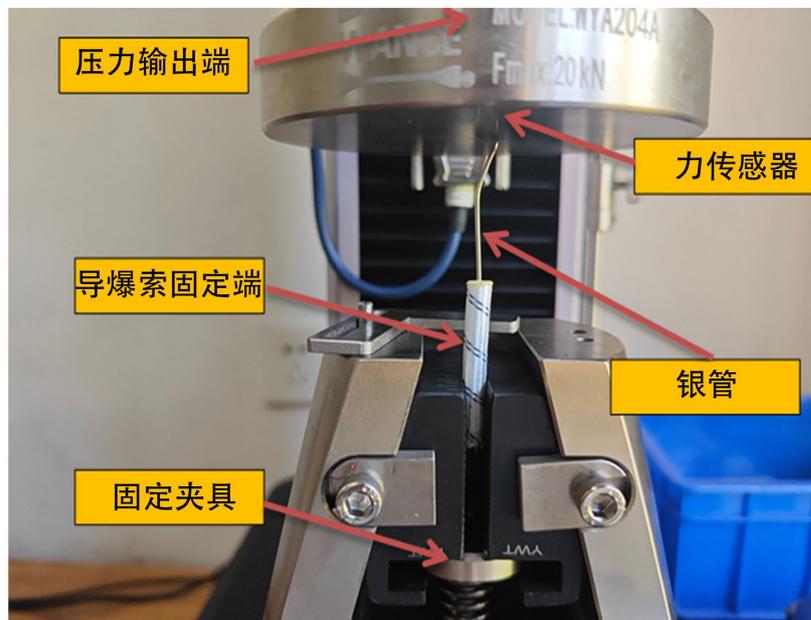


Figure 14. Stability test platform
图 14. 稳定性测试平台

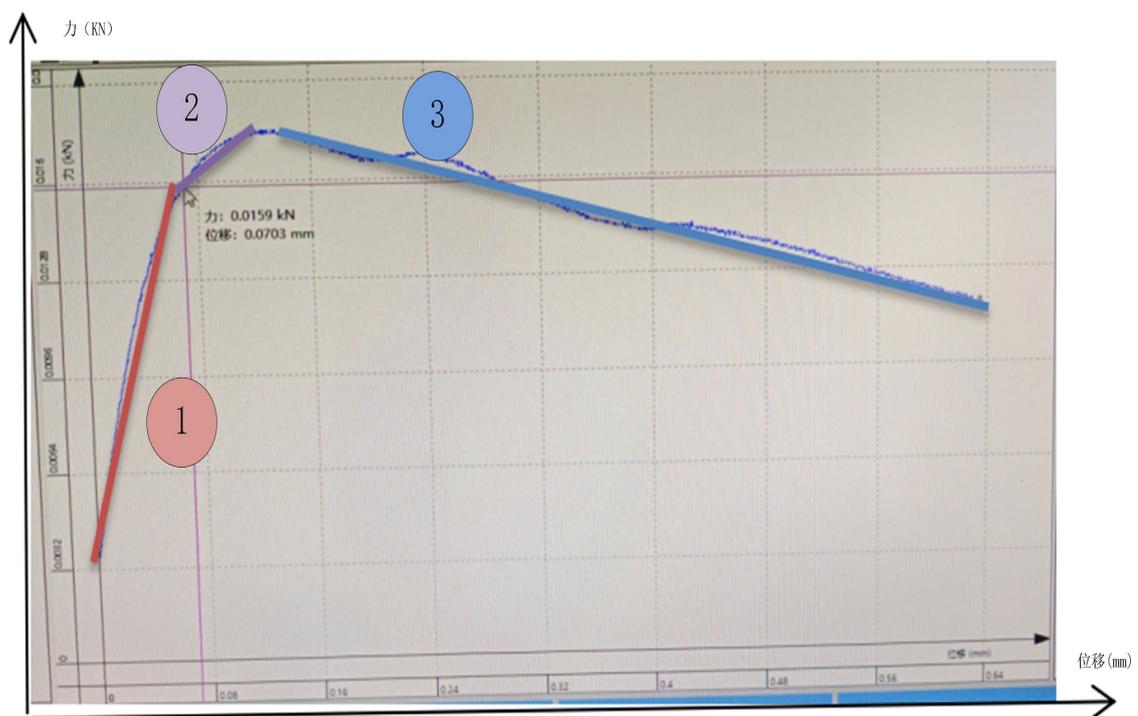


Figure 15. Stability test curve of a single pipe
图 15. 单根管材稳定性测试曲线

将金属管材位移 - 力曲线进行分析, 结合金属管材实际弯曲过程, 可以根据曲线中斜率变化趋势大致分为三段, 如图 15 所示:

第①段: 金属管材受力相对均匀, 随着位移量的不断增大, 载荷 F 随着增大, 曲线斜率基本无变化,

此时,金属管材产生为弹性变形,并且随着载荷增大而增大,在此曲线段内若取消载荷 F ,金属管材能恢复至直线状态,可知在此过程中金属管材所受载荷均 F 均小于其临界压力 F_{cr} ,即($F < F_{cr}$);

第②段:金属管材受力载荷逐渐增大后,达到某临界点时,达到金属管材的屈服强度极限,金属管材发生塑性变形,金属管材产生弯曲现象,此时曲线斜率发生改变,斜率减小,在此过程中载荷消失后金属管材已不能恢复至直线状态,发生失稳弯曲,即($F \geq F_{cr}$);

第③段:金属管材受力持续增大后,金属管材所承受载荷达到极限,发生弯折现象,此时,曲线斜率呈负相关,金属管材已经达到材料本身的最大抗拉强度,此时,材料可能已经发生微小的断裂,即($F > F_{cr}$)。

多根所做优化处理后如图16所示,曲线变化趋势相同,受材料均匀、内装药剂均匀性、偏心等因素影响,最大抗变形力略有差异,但弯折位置基本相同,在金属管材端约7 mm处。

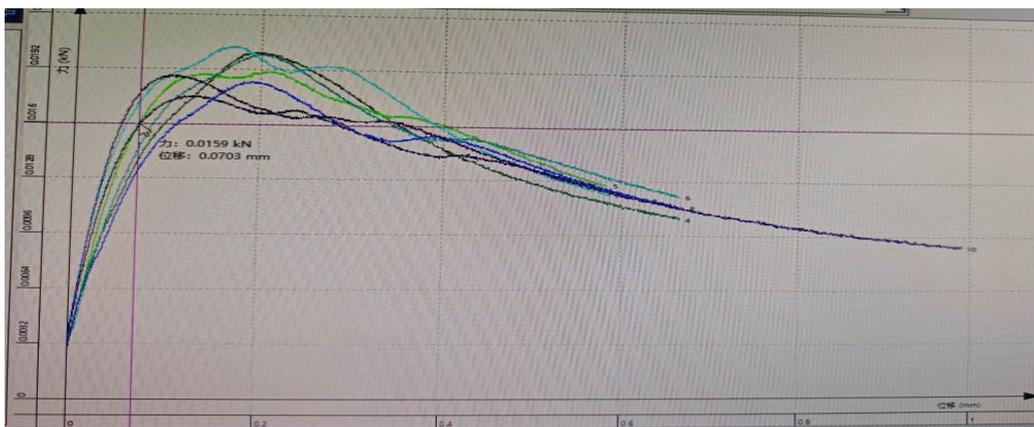


Figure 16. Stability test curve of multiple pipes after optimization

图 16. 多根管材优化后稳定性测试曲线

根据金属管材稳定性测试曲线,可以获得金属管材的临界压力 F_{cr} ,金属管材发生弯折力 F_{max} 为曲线的最大值,数据折线图17如下:

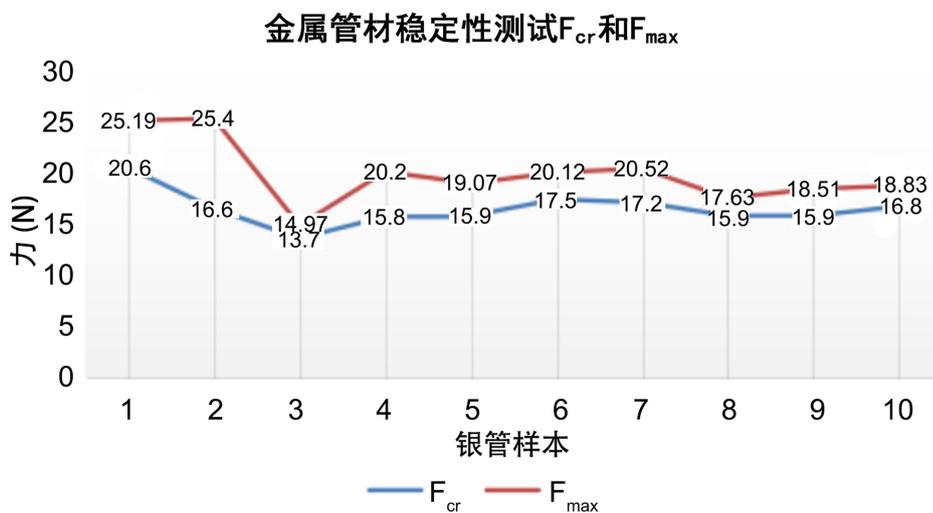


Figure 17. Line graph of critical force and bending force of metal pipes

图 17. 金属管材临界力和弯折力折线图

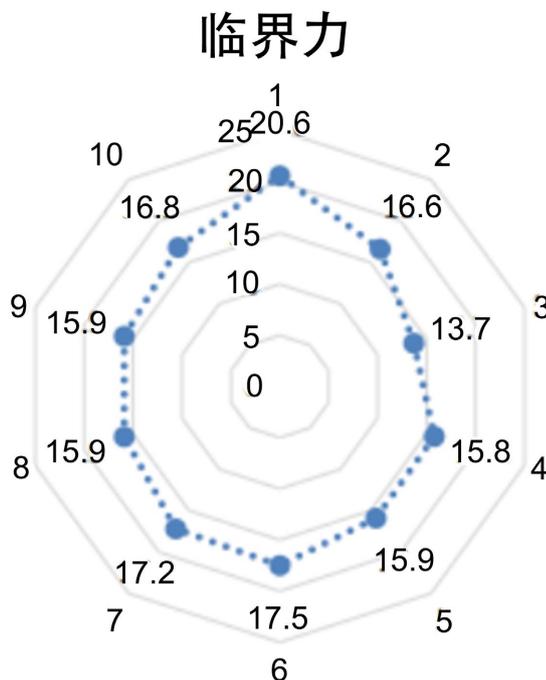


Figure 18. Radar chart of critical force of metal pipes
图 18. 金属管材临界力雷达图

从 F_{cr} 和 F_{max} 数据分布来看, 金属管材 F_{cr} 范围在(13.7 N~20.6 N)之间, F_{max} 范围在(14.97 N~25.19 N), 两者数据有交叉部分, 显然是不合理的, 因为必然是 $F_{cr} < F_{max}$, 显然实验中有样本是属于异常样本, 与之前金属管材稳定性曲线分析相同。做金属管材的 F_{cr} 的雷达图 18, 剔除表现异常的样本, 获得 F_{cr} 样本的平均值 16.45 N 和范围值(15.8~17.5 N)。

因此在柔性索套管自动装配设备开发过程中, 通过使用高精度压力传感器监测金属管材受力(精度 ≤ 0.5 N), 程序设置金属管材装配过程中压力传感器所承受载荷若超过规定阈值 13 N(考虑试验误差、材料误差等, 内控 2.8 N, 低于金属管材临界力的下限值 15.8 N), 则暂停装配, 则此根柔性索流转至人工位进行装配, 不会导致设备硬装, 产生质量不合格产品。

5. 结论

本文针对传爆接头非刚性轴孔配合间隙小、过程细化量化不足, 涂胶一致性控制难等问题, 开展含能柔性金属管材轴线特征稳定性分析与识别研究, 对基于细深孔套管内壁高稳定性涂胶策略、无约束柔软金属丝轴线特征控制进行研究, 探究了柔性索内金属管材轴线角度偏移和细深孔内壁涂胶一致性问题, 为实现柔性接头全自动化、智能化装配奠定技术基础。

参考文献

- [1] 孙秀亮. QJ 1951A 《CDF 通用规范》修订综述[J]. 航天标准化, 1999(3): 12-16.
- [2] 张磊, 孙泉, 尹鑫, 等. 标准化柔性导爆索验收指标体系构建研究[J]. 航天工业管理, 2025(3): 56-58.
- [3] 张枫, 杨树彬, 杨安民, 等. 非电传爆系统无起爆药传爆接头的性能研究[J]. 火工品, 2006(6): 1-4.
- [4] 中国航天科技集团公司一部. 非电传爆系统通用规范. QJ3122-2000 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [5] 龚翔. 小药量柔性导爆索的传爆可靠性[J]. 火工品, 1998(1): 1-5.