

引文格式: 屈力刚, 赵子惠, 李铭. 航空导管自增强工艺参数优化及疲劳性能测试[J]. 航空制造技术, 2025, 68(14): 99–106.

QU Ligang, ZHAO Zihui, LI Ming. Process parameter optimization and fatigue performance test of autofrettaged aviation pipeline[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(14): 99–106.

航空导管自增强工艺参数优化及疲劳性能测试*

屈力刚^{1,2}, 赵子惠¹, 李 铭¹

(1. 沈阳航空航天大学, 沈阳 110136;

2. 营口理工学院, 营口 115100)

[摘要] 作为航空发动机能量传输的重要通道, 航空高压导管的疲劳强度与可靠性直接影响着飞机的飞行性能和服役寿命。基于三剪统一强度准则, 采用能够考虑材料应变硬化和包辛格效应的双线性随动强化模型, 建立了典型航空高压导管自增强处理的有限元仿真模型。分析不同材料导管自增强处理后残余应力的分布规律, 对不锈钢导管的疲劳寿命进行仿真分析和试验验证, 计算航空高压导管的内外径比和弯曲角度对自增强处理的力学响应结果。结果表明, 与其他材料相比, 经自增强处理后的钛合金导管获得了较好的残余压应力状态; 得到了残余压应力随径比与弯曲角度的变化规律, 确定了导管获得最佳自增强处理效果时的径比与弯曲角度的范围, 以及导管上存在多个弯曲角度时自增强压力的确定方法, 为自增强工艺在航空高压导管中的应用提供了理论基础。

关键词: 航空导管; 自增强; 残余应力; 疲劳测试; 弯管

中图分类号: V216.3

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.14.099

Process Parameter Optimization and Fatigue Performance Test of Autofrettaged Aviation Pipeline

QU Ligang^{1,2}, ZHAO Zihui¹, LI Ming¹

(1. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Yingkou Institute of Technology, Yingkou 115100, China)

[ABSTRACT] As an important channel for energy transmission in aero-engines, the fatigue strength and reliability of aviation high-pressure pipeline system have a direct impact on the flight performance and service life of aircraft. Based on the three shear unified strength criterion, a bilinear dynamic strengthening model considering material strain hardening and Bauschinger effect was adopted to establish a finite element analysis model for the autofrettaging treatment of typical aviation high-pressure pipelines. Analyze the distribution pattern of residual compressive stress after autofrettaging treatment of stainless steel, aluminum alloy, and titanium alloy pipelines; Conduct simulation analysis and experimental verification on the fatigue life of stainless steel pipelines; Calculate the mechanical response results of the internal to external diameter ratio and bending angle of aviation high-pressure pipelines to autofrettaging treatment. The results show that compared with other materials, titanium alloy pipelines with autofrettaging treatment will achieve a better residual compressive stress state; At the same time, analyzed the residual compressive stress state after bending treatment and under working load, and based on the variation law of residual compressive stress with diameter ratio and bending angle, the range of diameter ratio and bending angle for obtaining the best self strengthening treatment effect of the pipeline was determined. The stress state of the bend under working state was analyzed, and the method of selecting autofrettaging pressure when there are multiple bending angles on the pipeline was analyzed, providing a theoretical basis for the application of autofrettage in aviation high-pressure pipelines.

Keywords: Aviation pipeline; Autofrettage; Residual stress; Fatigue testing; Bend pipe

* 基金项目: 辽宁省兴辽人才计划(XLYC2002086); 应用基础研究计划(2022JH2/101300211)。

航空高压导管主要为发动机和飞机输送燃油、滑油、液压油、空气和氧气等工作介质,是支撑发动机运行所必需的“血管和神经”。导管破裂会造成不同程度的质量事故,轻则影响交付,重则机毁人亡。因此,导管构件的可靠性是航空发动机及整个飞机结构完整性与服役可靠性的重要组成部分。由于导管安装位置苛刻、温度压力不断变化^[1],内部受到循环高压、压力冲击与流体腐蚀等载荷形式的长期影响,极端的服役环境使导管结构的疲劳问题尤为突出。以航空导管为代表的基础零部件的制造技术是航空发动机的核心制造技术,也是制约航空制造技术发展的瓶颈之一。大力发展航空导管等基础零部件的生产技术水平,对提高航空基础件的自主创新能力和航空装备制造业的核心竞争力有十分重要的意义。为了满足航空发动机高功重比、高推重比的发展需求,世界各国的新型战机与大型民机都在朝着高压化方向迅速发展,这对航空高压导管的力学环境适应性提出了更高的要求,因此在重量与经济性约束条件下,有效提高高压导管在极端服役环境下的承载能力与疲劳寿命已成为发展新型战机和大飞机技术必须面对的核心问题之一^[2]。

随着自增强理论与技术研究的逐步深入,自增强产品的强化效果也越来越显著。如今,自增强技术作为各种高压金属导管的强化工艺逐渐得到推广,它能够在导管内壁形成有益的残余压应力状态,从而提高导管结构的弹性承载能力与疲劳寿命等,降低由于导管破裂造成严重事故的风险。国内外众多学者针对自增强技术及应用进行了深入的研究,如 Molaie 等^[3]研究了具有非线性应变硬化特性的高压导管的自增强行为,通过解析法获得了导管在加载和卸载阶段的弹塑性应力分布,并

指出对材料力学行为的有效描述是准确预测自增强导管应力分布结果的关键; Singh 等^[4]通过对 Zr 2.5% Nb 的厚壁圆筒进行自增强处理,考虑各向同性和各向异性塑性行为,研究材料各向异性对自增强筒体残余应力的影响;周溢等^[5]提出了厚壁圆筒最佳自增强处理内压的简便计算公式,基于有限元软件,对比自增强处理前后圆筒的应力分布,分析得到相同工作压力下内压与最大应力值的关系,确定了最佳自增强处理的内压值;林太清等^[6]基于三剪统一强度准则对厚壁圆筒极限承压的分析,得出了一个新的统一解析解,并分析厚壁圆筒材料的拉压屈服比和强度准则的中间主应力效应参数对承载极限的影响;钱凌云等^[7]基于有限元软件对自增强厚壁圆筒涉及的3个加载过程进行模拟分析,得到了厚壁圆筒工作时的最大等效应力和最大周向应力与自增强压力的关系,并优化了最佳自增强压力的计算方法。以上研究均侧重于厚壁圆筒自增强处理的研究,不完全适用于管壁薄且弯曲多的航空导管,因此本文研究分析自增强理论在航空导管中的应用,探究自增强处理效果的评价指标,并讨论不同工艺参数对自增强效果的影响。

1 理论与模型概述

1.1 自增强机理

自增强工艺是一种被广泛应用的金属加工工艺^[8],利用材料自身弹塑性特点在导管内部产生残余压应力,可在一定程度上提高导管的疲劳强度。图1为自增强机理,自增强处理的加载阶段是在导管内壁施加均匀的高压载荷,使内壁材料屈服产生塑性区,压力卸载后,外壁弹性区试图收缩回其原始半径而对塑性区施加反向

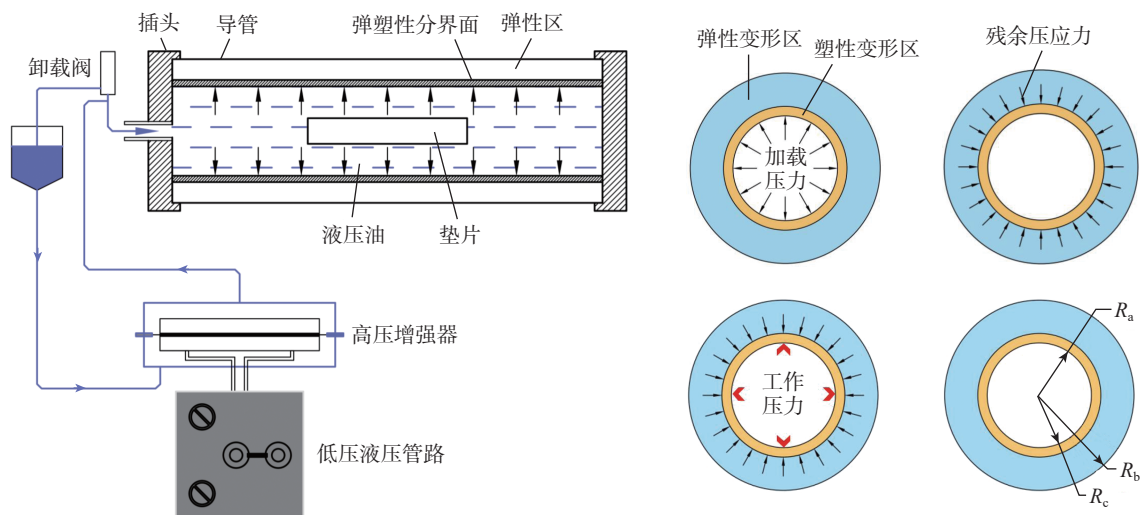


图1 自增强机理

Fig.1 Mechanism of autofrettage

作用力,与塑性区保持稳定变形的作用力形成了持久的残余应力状态,待导管投入使用后,残余压应力可抵消一部分工作压力,从而降低导管的应力水平。从断裂力学的角度看,残余压应力可以抑制裂纹萌生,减小循环应力下的裂纹开度,减缓裂纹扩展速率,从而提高导管的疲劳强度^[9]。图1中导管的内径为 R_a ,外径为 R_b ,径比 $K=R_b/R_a$,在自增强压力 P_a 作用下形成的弹塑性分界面半径为 R_c ,具体分析流程如图2所示。

1.2 双线性随动强化模型

自增强残余压应力的分析主要集中于力学模型的选择,是否考虑材料的包辛格效应与应变硬化是分析结果准确性的关键。包辛格效应是指材料在拉伸方向上发生塑性变形,随后在压缩方向上加载会表现出弹性行为,即材料屈服极限下降这一现象^[10]。该现象会使导管的承载能力下降,因此,采用ANSYS材料模型中的双线性随动强化模型(BKIN)进行分析,其本构关系如图3所示,其中 σ_{s0} 、 σ_{sc0} 分别为材料初始拉伸屈服极限、初始压缩屈服极限; E 、 E_t 分别为弹性模量、切线模量。

依据 Von Mises 屈服准则可将屈服极限 σ_s 写成

$$\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s = \sigma_\theta - \sigma_r \quad (1)$$

式中, σ_θ 、 σ_r 分别为周向应力和径向应力。

2 导管自增强的理论最佳压力

自增强过程的关键是要确定自增强理论最佳压力和相应的弹塑性分界面半径。理论最佳压力就是指在工作压力一定的情况下,使最大等效力与最大周向应力均处于较低水平的自增强压力^[11]。

理论最佳自增强压力 P_z 可表示为

$$P_z = \frac{\sigma_{s0}}{\sqrt{3}} \left[1 - \frac{R_c^2}{R_b^2} + 2(1-m) \ln \frac{R_c}{R_a} + m \left(\frac{R_c^2}{R_a^2} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

式中, σ_{s0} 为屈服强度; m 为拉伸强化模量系数,此处取0.1。弹塑性分界面半径可由式(3)求得。

$$R_c = R_a e^B \\ B = \frac{\sqrt{3}P}{2\sigma_{s0}(1-m)} \quad (3)$$

式中, B 为强化指数; P 为工作压力。

3 自增强导管有限元分析

不同材料对应不同的拉压曲线,处理后会获得不同的残余压应力,自增强效果可由残余压应力的大小来评价。因此,选择相同尺寸的不锈钢、铝合金和钛合金材料的导管,分别进行处理后导管的残余应力状态分析。以航空发动机高压燃油导管的常用尺寸为例,其内径为6.5 mm,外径为8 mm,3种材料的性能参数见表1。

已知航空发动机高压燃油导管的工作压力为22 MPa,将表1数据代入式(2)和(3)计算,可得此工作压力下不锈钢、铝合金与钛合金导管的理论最佳压力 P_z ,分别为56.13 MPa、65.95 MPa和115.68 MPa。

对于塑性区($R_a < R < R_c$, R 为管壁不同位置对应的半径),周向残余应力 σ_θ' 可表示为

$$\frac{\sigma_\theta'}{\sigma_{s0}} = \frac{R_c^2}{\sqrt{3}R_b^2} \left(1 \pm \frac{R_b^2}{R^2} \right) - \frac{P_a R_a^2}{\sigma_{s0}(R_b^2 - R_a^2)} \left(1 \pm \frac{R_b^2}{R_a^2} \right) \quad (4)$$

式中, P_a 为对管路施加的自增强压力。

对于弹性区($R_c < R < R_b$),周向残余应力 σ_θ' 可表

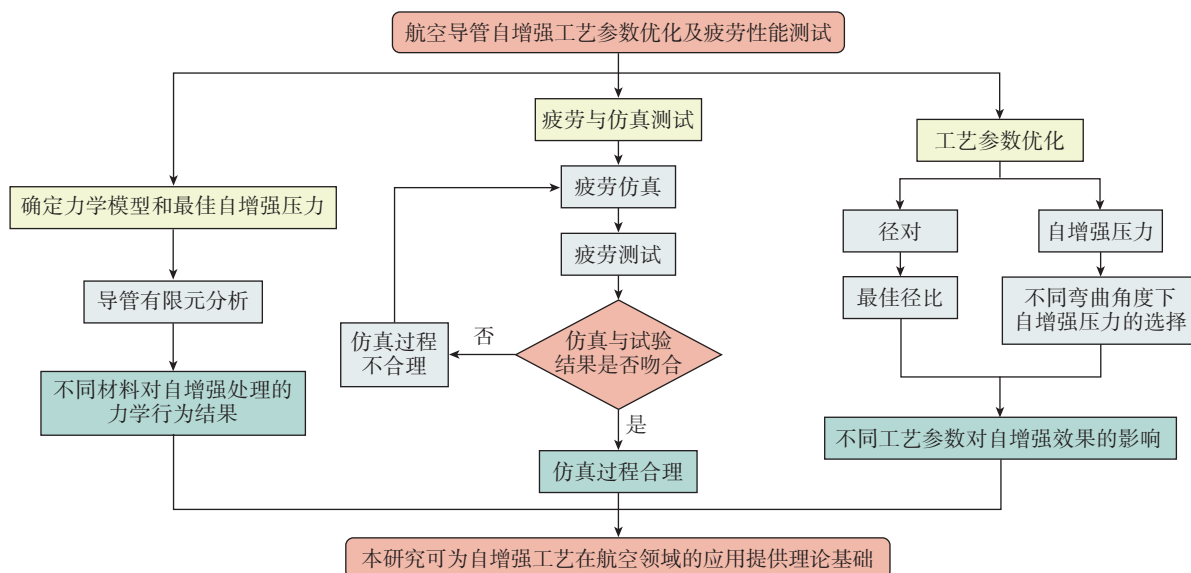


图2 分析流程图

Fig.2 Analysis flow chart

示为

$$\frac{\sigma_{\theta}'}{\sigma_{s0}} = \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{R}{R_c} \right) \pm \frac{1}{\sqrt{3}} \left(1 \pm \frac{R_c^2}{R_b^2} \right) \right] - \frac{P_a R_a^2}{\sigma_{s0} (R_b^2 - R_a^2)} \left(1 \pm \frac{R_b^2}{R^2} \right) \quad (5)$$

3.1 不同导管材料对自增强处理的力学行为结果

由于导管的对称性,在 ANSYS 中建立 1/4 导管分析模型,应用平面应变模型,网格类型为 Plane182,约束其对称面法线方向上的位移,选择双线性随动强化模型 (BKIN),基于 Von Mises 屈服准则进行分析,3 种材料的导管残余应力分析结果如图 4 所示。

由图 4 可知,处理后导管获得的残余应力沿径向呈现由大变小再由小变大的分布状态,在内壁处最大,且方向发生改变。图 4 (a)~(c) 表示 3 种材料导管的残余应力状态,不锈钢导管获得的残余压应力最小,钛合金导管获得的残余压应力最大,因此,钛合金导管的自增强处理效果最好。图 4 (d) 表示处理后的不锈钢导管在工作载荷下的应力分布,处理后导管获得的残余压应力和工作拉应力相互作用,使得导管的应力峰值出现在管壁内部,能有效提升导管的疲劳强度。

3.2 自增强导管的疲劳寿命仿真

引起航空高压燃油管失效的主要原因是疲劳失效,因此分析导管的疲劳寿命要讨论导管发生疲劳破坏时所经历的应力-应变循环次数。在 ANSYS 疲劳仿真

模块中,将交替循环变化的液压载荷作用于不锈钢导管内部,以正弦波形式加载,保持压力幅值 $\Delta P=42$ MPa,对自增强处理前后的导管进行疲劳寿命仿真,得出疲劳寿命预测云图,如图 5 所示。

循环次数低的位置易发生疲劳破坏,图 5 (a) 中疲劳寿命最低为 8.04×10^5 次,图 5 (b) 中疲劳寿命最低为 1.77×10^6 次,可知处理后导管的疲劳寿命得到显著提升;由仿真结果可知,自增强处理有效提升了导管的疲劳寿命和疲劳可靠性^[12]。

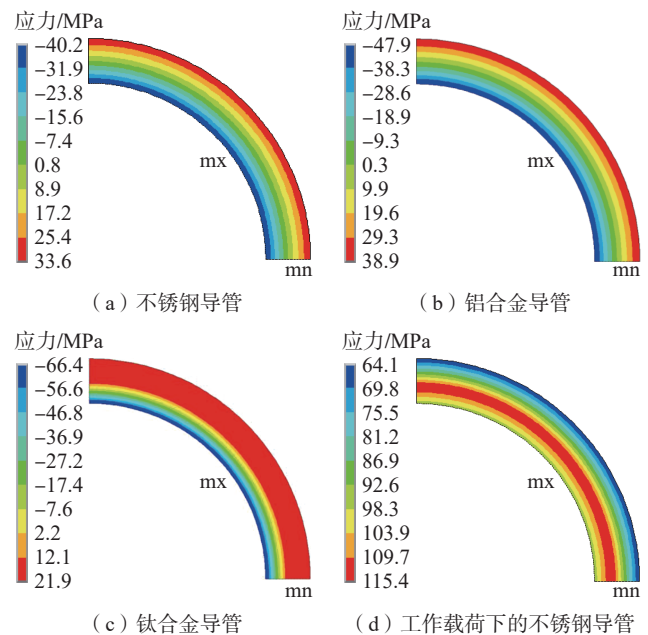


图 4 导管周向应力云图
Fig.4 Circumferential stress nephogram of pipeline

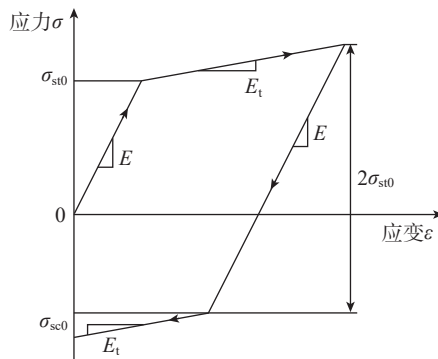


图 3 双线性随动强化模型
Fig.3 Bilinear hardening model

表 1 材料性能参数
Table 1 Material performance parameters

材料	密度 ρ / (g/cm ³)	杨氏模量 E / MPa	屈服强度 σ_{s0} / MPa	泊松比 ν
不锈钢	7.85	200000	242.31	0.3
铝合金	2.76	66788.2	297.98	0.33
钛合金	4.51	110000	956	0.34

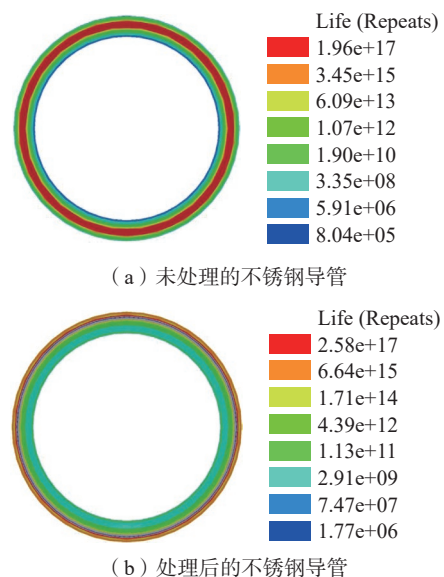
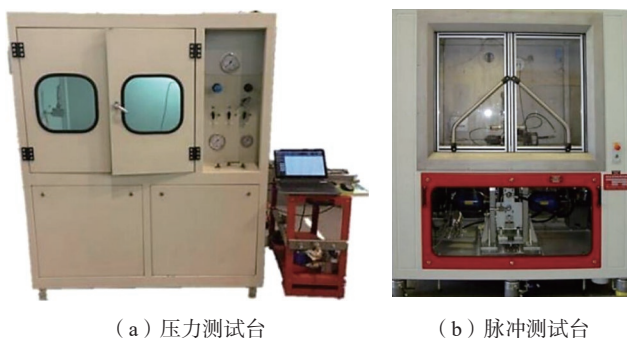


图 5 疲劳寿命预测云图
Fig.5 Cloud chart for fatigue life prediction

3.3 疲劳性能测试

试验所需的压力测试台与脉冲测试台如图6所示。将12根不锈钢导管试件分为两组,首先其中一组接入压力测试台做自增强处理,随后将两组试件同时接入脉冲测试台,在循环压力下进行脉冲测试。当试件出现破裂漏油现象时,对应的测试腔会立刻记录载荷循环次数,不影响其余测试腔正常运行。设置脉冲测试台的循环基数为 10^5 次,若存在次数小于 10^5 次的试件,说明试验过程不合理,需要检查原因后重新试验^[13]。

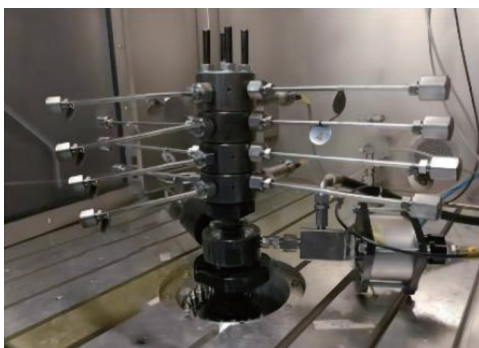
疲劳测试试验过程如图7所示,两组试件均未见异常样本,说明导管无明显缺陷,试验环节合理。处理后试件的循环次数明显高于未处理试件,验证了自增强处理可以提高导管的疲劳寿命,延长导管的服役时间,提



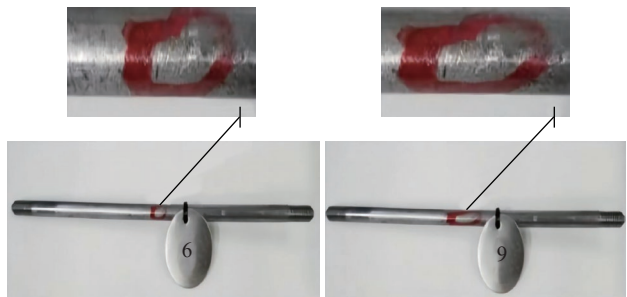
(a) 压力测试台 (b) 脉冲测试台

图6 试验设备

Fig.6 Experimental equipment



(a) 测试过程



(b) 失效样品及区域

图7 疲劳测试过程

Fig.7 Fatigue testing process

升导管的疲劳可靠性。

由图8的数据可知,未处理导管的平均寿命为 7.58×10^5 次,处理后导管的平均寿命为 1.69×10^6 次,与图5仿真结果的比值分别为0.94和0.95,试验结果与仿真结果吻合度较好,验证了仿真过程的可靠性。疲劳分析中,弯管的应力状况与直管的应力状况等效,因此该仿真模型也可用于预测弯管的疲劳寿命。

4 航空导管最佳自增强参数的确定

4.1 径比K对自增强效果的影响

自增强处理的效果取决于处理后导管的残余压应力状态。由式(2)可知,不同径比对应不同的理论最佳压力,为保证结果的准确性,需保持理论压力与径比的对应关系,基于ANSYS中不锈钢导管的仿真模型,分析得到不同径比导管处理后的残余压应力 σ_{bc} 与残余拉应力 σ_{bt} 的变化曲线,如图9所示。

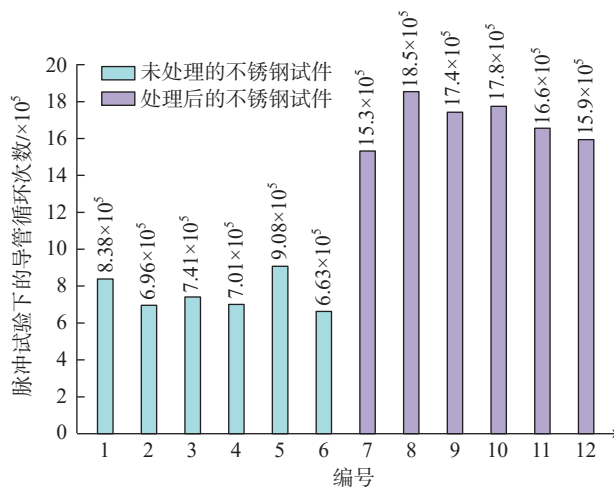


图8 试验样本寿命数据统计

Fig.8 Statistical of lifespan data of experimental samples

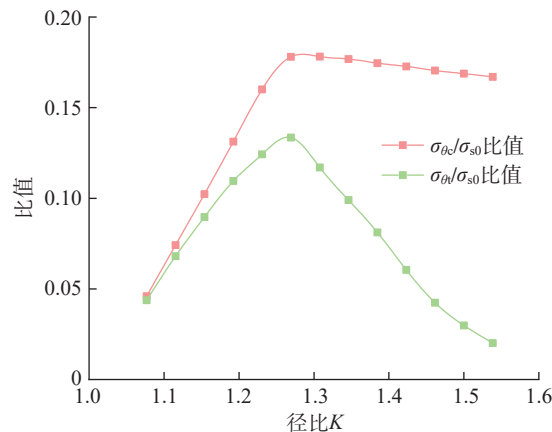


图9 残余压应力与径比的关系曲线

Fig.9 Relationship curve between residual stress and radius ratio

由图9可知, $K < 1.25$ 时, $\sigma_{\theta t}$ 与 $\sigma_{\theta c}$ 均随径比的增大而增大; $K = 1.25$ 时, $\sigma_{\theta t}$ 与 $\sigma_{\theta c}$ 同时取得最大值; $K > 1.25$ 时, $\sigma_{\theta c}$ 基本保持不变, $\sigma_{\theta t}$ 迅速下降。由于 $K < 1.25$ 的导管管壁较薄, 自增强产生的塑性区较小, 因此, 获得的残余压应力小于 $K > 1.25$ 的导管获得的残余压应力。在实际生产中, 应选择 $K > 1.25$ 的导管进行自增强处理, 从而获得更好的处理效果。

4.2 导管弯曲角度对自增强效果的影响

弯管的几何模型如图10所示。其中, θ 为弯曲角度, R_z 为转弯半径, 以截面1-1为后处理的研究对象, 将弯曲内侧记为A, 外侧记为B, 导管内壁记为i, 导管外壁记为o, 则Ai表示导管弯曲内侧内壁, σ_{Ai} 表示弯曲内侧内壁处的应力值。在ANSYS Workbench中建立不锈钢弯管的三维模型, 内径为6.5 mm, 外径为8 mm, R_z 为20 mm。通常, 导管先进行弯曲成形再做自增强处理。

由式(4)和(5)可得导管等效应力 σ_M 的计算式, 塑性区 ($R_a < R < R_c$) [14] 的计算式为

$$\frac{\sigma_M}{\sigma_{s0}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_{s0}} - \frac{\sigma_r}{\sigma_{s0}} \right) = 1 - \frac{\frac{R_b^2}{R_a^2} - \frac{R_c^2}{R_a^2} + \frac{R_b^2}{R_a^2} \ln \frac{R_c^2}{R_a^2}}{\left(\frac{R_b^2}{R_a^2} - 1 \right) \frac{R^2}{R_a^2}} \quad (6)$$

弹性区 ($R_c < R < R_b$) 的计算式为

$$\frac{\sigma_M}{\sigma_{s0}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_{s0}} - \frac{\sigma_r}{\sigma_{s0}} \right) = \frac{\frac{R_b^2}{R_a^2} \left(\frac{R_c^2}{R_a^2} - 1 - \ln \frac{R_c^2}{R_a^2} \right)}{\left(\frac{R_b^2}{R_a^2} - 1 \right) \frac{R^2}{R_a^2}} \quad (7)$$

分析弯曲角度 $10^\circ \sim 90^\circ$ 的弯管处理后在工作载荷下的应力分布。由图11可知, 在 $\theta = 10^\circ$ 时, 最大等效应力 σ_{Mmax} 最小, 外壁应力变化的区域最小; 在 $\theta = 30^\circ$ 时, σ_{Mmax} 与外壁应力变化的区域均逐渐变大; 在 $\theta = 60^\circ$ 时, σ_M 在截面C-C上的分布状态如图11(c)所示, A区域接触面积小于B区域, 所以A区域的应力值较大; 在 $\theta = 90^\circ$ 时, 此时 σ_{Mmax} 为127.86 MPa, 是9个弯曲角度中的最大值, 出现在导管的Ai处。

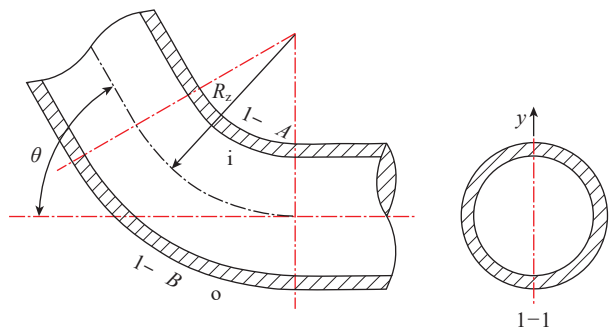


图10 弯管的几何模型

Fig.10 Geometric model of bend pipe

分析弯曲角度为 $10^\circ \sim 90^\circ$ 的弯管处理后残余压应力 σ_{θ} 的分布。由图12可知, $\sigma_{\theta A}$ 沿径向呈现由大变小再由小变大的分布规律, 力的方向发生改变, $\sigma_{\theta A o}$ 为拉应力, $\sigma_{\theta A i}$ 为压应力 [15]。在 $\theta = 10^\circ$ 时, 最大残余压应力 $\sigma_{\theta max}$ 是最小的, 弯管内侧 $\sigma_{\theta A o}$ 范围也最小; 在 $\theta = 30^\circ$ 时, $\sigma_{\theta A i}$ 和 $\sigma_{\theta A o}$ 逐渐增大; 在 $\theta = 60^\circ$ 时, 弯曲截面C-C上 σ_{θ} 的分布状况如图12(c)所示, $\sigma_{\theta max}$ 出现在Ai处; $\theta = 90^\circ$ 时, 其 $\sigma_{\theta A i}$ 和 $\sigma_{\theta A o}$ 均为9种角度下的最大值, 弯管内侧 $\sigma_{\theta A o}$ 范围

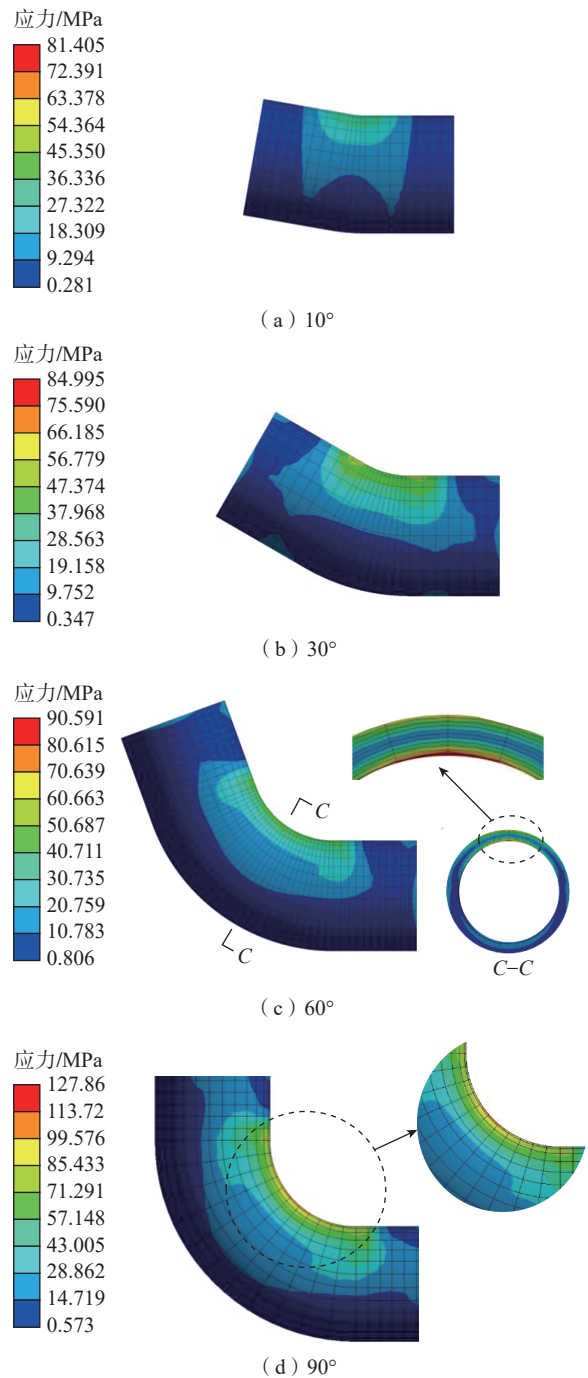


图11 工作状态下弯管的应力云图

Fig.11 Stress nephogram of bend pipe under working condition

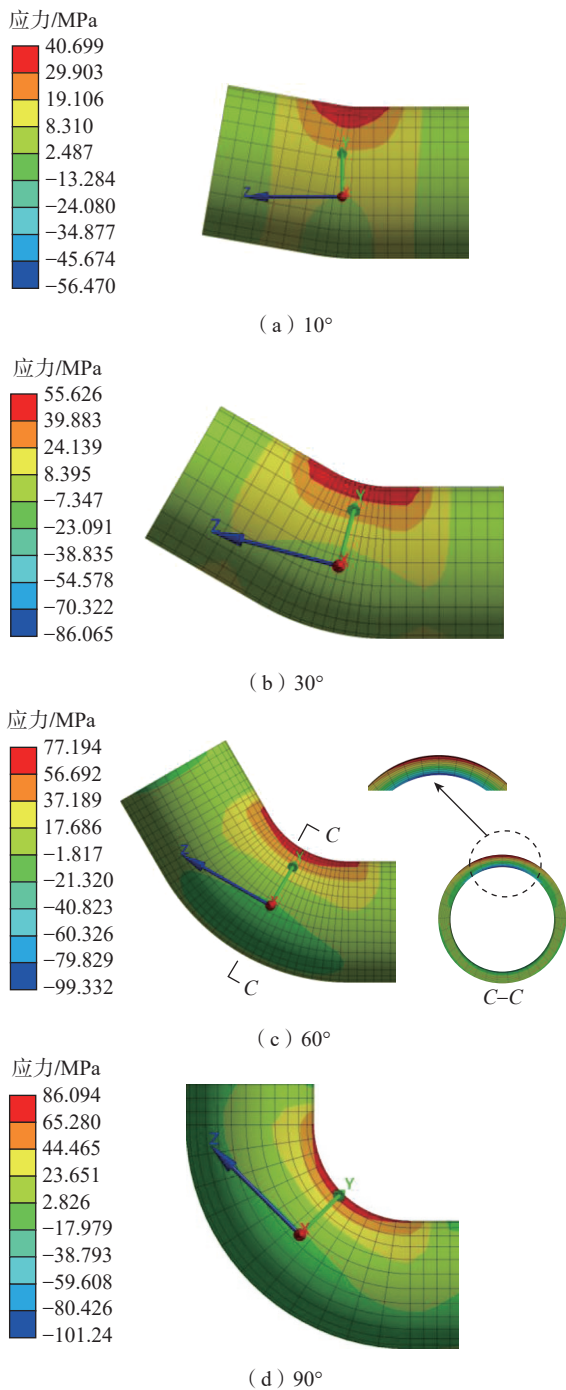


图 12 自增强后弯管残余应力云图

Fig.12 Residual stress nephogram of the bend pipe after autofrettage

也最大。 σ_θ 随弯曲角度的变化曲线如图 13 所示。

在设计弯管时,一般控制弯曲角度不超过 90° ^[16],因此在 $10^\circ \sim 90^\circ$ 内取 9 个角度分析不同弯曲角度的导管自增强处理后 σ_θ 的变化规律^[17]。由图 13 可以看出,随着弯曲角度的增大, $\sigma_{\theta_{Ai}}$ 与 $\sigma_{\theta_{Ao}}$ 均表现出先逐渐增大再缓慢降低的变化趋势,在弯曲角度为 50° 时, $\sigma_{\theta_{Ai}}$ 取得最大值 111.2 MPa。

图 14 为 9 种弯曲角度的导管残余压应力 σ_{θ_c} 随自增

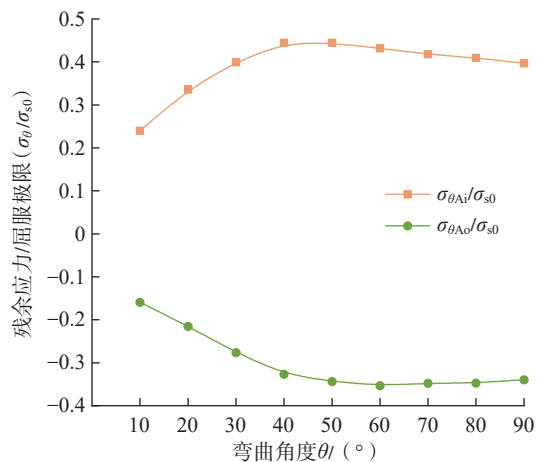


图 13 残余应力与弯曲角度关系曲线

Fig.13 Relationship curve between residual stress and bending angle

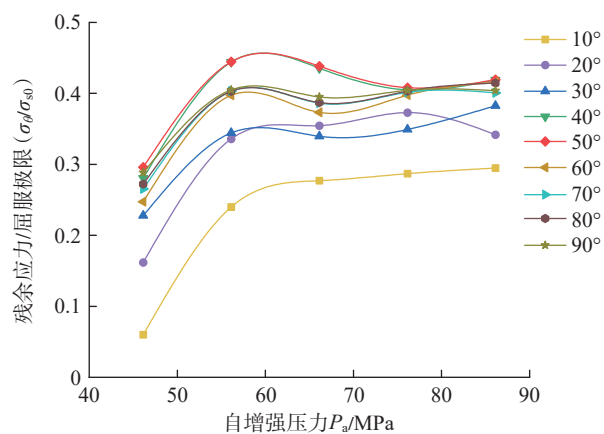


图 14 不同自增强压力作用下不同角度导管的残余压应力变化

Fig.14 Variation of residual compressive stress in different angle pipeline under different autofrettage pressure

强压力 P_a 的变化规律,由图 14 可知, σ_{θ_c} 随 P_a 的增大而逐渐增大,当 $46 \text{ MPa} < P_a < 56 \text{ MPa}$ 时 σ_{θ_c} 的增加速率明显大于 $56 \text{ MPa} < P_a < 86 \text{ MPa}$ 时。若同一导管上的多个弯曲角度 $\theta_{i=1,2,3,\dots,k} < 50^\circ$,在选择自增强压力时,应以最大的角度为标准,选择使残余压应力尽量大的自增强压力。当 $\theta_{i=1,2,\dots,a} < 50^\circ$, $\theta_{i=a+1,\dots,k} \geq 50^\circ$ 时,则应以大于 50° 的角度中最接近 50° 的角度为标准来选择。

5 结论

(1) 自增强技术利用残余压应力与工作应力相互抵消来降低应力峰值,抑制裂纹萌生,有效地提高了导管的疲劳强度,计算得到理论最佳压力和弹塑性分界面半径,并根据自增强机理提出了将处理后导管的残余压应力大小作为自增强处理效果的评价指标。

(2) 基于 ANSYS 的 APDL 语言建立导管的有限元

分析模型,研究了不同材料残余压应力的分布,结果表明,3种材料中钛合金导管处理后获得较好的残余压应力状态,为自增强处理在不同材料航空导管中的应用提供了参考。

(3) 脉冲试验与仿真结果吻合度较好,仿真过程合理,验证了脉冲试验验证仿真过程的合理性,为弯管的疲劳寿命预测提供了仿真模型。

(4) 导管获得较好的残余压应力状态时,应选择导管的径比 $K \geq 1.25$ 。当导管上存在多个弯曲角度时,应以最接近 50° 的角度为标准来选择合适的自增强压力,为自增强理论在航空导管中的应用提供了理论基础。

参考文献

[1] 张香华,王立志,党伟.航空发动机管路设计研究[J].中国新技术新产品,2018(12):80-81.

ZHANG Xianghua, WANG Lizhi, DANG Wei. Research on pipeline design of aero-engine[J]. New Technology & New Products of China, 2018(12): 80-81.

[2] 杨华勇,丁斐,欧阳小平,等.大型客机液压能源系统[J].中国机械工程,2009,20(18):2152-2159.

YANG Huayong, DING Fei, OUYANG Xiaoping, et al. Hydraulic power systems for trunk line aircrafts[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(18): 2152-2159.

[3] MOLAIE M, DARIJANI H, BAHREMAN M, et al. Autofrettage of nonlinear strain-hardening cylinders using the proposed analytical solution for stresses[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 141: 450-460.

[4] SINGH R J, KUMAR R, MISHRA J, et al. Study the effect of anisotropy of elastic-plastic properties on residual stress development in autofrettage of thick cylinder[J]. Procedia Structural Integrity, 2019, 14: 549-555.

[5] 周谧,林铁军,周健.厚壁圆筒自增强理论与数值模拟对比分析[J].压力容器,2017,34(6):14-18.

ZHOU Mi, LIN Tiejun, ZHOU Jian. Comparison of theory and numerical simulation for thick-walled cylinder autofrettage[J]. Pressure Vessel Technology, 2017, 34(6): 14-18.

[6] 林太清,胡小荣.基于三剪统一强度准则的厚壁圆筒极限承压分析[J].福州大学学报(自然科学版),2006,34(5):727-731.

LIN Taiqing, HU Xiaorong. Limit pressures for thick wall cylinders based on the triple shear unified failure criterion[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2006, 34(5): 727-731.

[7] 钱凌云,刘全坤,王成勇,等.厚壁圆筒自增强压力的优化分析[J].中国机械工程,2012,23(4):474-479.

QIAN Lingyun, LIU Quankun, WANG Chengyong, et al. Optimization analysis of autofrettage pressure for thick walled cylinders[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(4): 474-479.

[8] XU S G, WEI R C, ZHAO Y L, et al. Using autofrettage technology to decrease stresses in a girth welded joint of a high pressure hydrogen tank[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(25): 8110-8121.

[9] MADERBACHER H, PÖLZL M. The influence of bauschinger effect on the stability of residual stresses in autofrettaged high pressure tubes Volume 5: High-Pressure Technology; ASME Nondestructive Evaluation, Diagnosis and Prognosis Division (NDPD) [C]/Rudy Scavuzzo Student Paper Symposium and 26th Annual Student Paper Competition. Prague: American Society of Mechanical Engineers, 2018: V005T05A005.

[10] 袁格侠,刘宏昭,范彩霞,等.自增强超高压容器残余应力分析[J].中国机械工程,2011,22(5):536-540.

YUAN Gexia, LIU Hongzhao, FAN Caixia, et al. Analysis of residual stress for autofrettaged ultrahigh pressure vessels[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(5): 536-540.

[11] 曹雪叶,赵均海,张常光.基于三剪统一强度准则的厚壁圆筒自增强分析[J].中国机械工程,2017,28(1):75-81.

CAO Xueye, ZHAO Junhai, ZHANG Changguang. Autofrettage analysis of thick-walled cylinder based on triple-shear unified strength criterion[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(1): 75-81.

[12] PERL M, SALEY T. The detrimental effect of autofrettage on externally cracked modern tank Gun barrels[J]. Defence Technology, 2019, 15(2): 146-153.

[13] 屈力刚,荆麒麟,李铭,等.面向航空发动机减重的铝合金管强化机理研究[J].航空制造技术,2021,64(5):14-23.

QU Ligang, JING Qiyu, LI Ming, et al. Research on strengthening mechanism of aluminum alloy pipe for aero-engine weight-reduction[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(5): 14-23.

[14] REES D W A. Autofrettage of thick-walled pipe bends[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46(11): 1675-1696.

[15] 邓夕胜.自增强超高压弯管的有限元分析[D].成都:西南石油大学,2006.

DENG Xisheng. Finite element analysis of autofrettage superhigh pressure curved pipe[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2006.

[16] 刘鹏飞,黄鑫,韩涛.航空发动机导管振动影响因素[J].科学技术与工程,2022,22(7):2930-2936.

LIU Pengfei, HUANG Xin, HAN Tao. Influence factor of vibration to aero-engine duct[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(7): 2930-2936.

[17] 闫晶,张荣霞,吴为,等.航空液压钛合金导管组件制造关键技术应用[J].航空制造技术,2022,65(10):44-51,60.

YAN Jing, ZHANG Rongxia, WU Wei, et al. Application of key technologies on manufacturing process of titanium alloy tube assembly for aeronautic hydraulic pressure system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(10): 44-51, 60.

通信作者:李铭,副教授,博士,研究方向为高端装备疲劳可靠性。

(责编 阳光)