

带蒙皮复合材料圆柱网格结构的轴压稳定性分析

Axial Compression Stability Analysis of Composite Circular Grid Structure with Outer Skin

廖英强¹, 刘勇琼²

(1 第二炮兵工程学院, 西安 710025;

2 西安航天复合材料研究所, 西安 710025)

LIAO Ying-qiang¹, LIU Yong-qiong²

(1 The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China;

2 Xi'an Aerospace Composites Research Institute, Xi'an 710025, China)

摘要: 为获得高承载效率的带蒙皮纤维缠绕复合材料圆柱网格结构, 利用有限元法对其轴压稳定性进行了分析。同时, 结合 ANSYS 的二次开发语言 APDL 编写了圆柱网格结构参数化设计程序, 并运用该程序研究了带蒙皮圆柱网格结构载荷质量比随纵筋缠绕角度、筋横截面积、筋高宽比、纵筋对数以及环筋条数的变化规律。对于一定尺寸的网格结构在 INSTRON 1346 材料疲劳强度试验机上进行了轴压实验。研究表明: 利用有限元法可以有效预测带蒙皮圆柱网格结构的轴压承载能力; 纵筋缠绕角度在 0~40° 范围内时, 圆柱网格结构具有较高的承载效率; 筋高宽比的较佳选择范围为 0.9~1.3。

关键词: APDL; 稳定性; 网格结构; 复合材料

中图分类号: TB33 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2011)07-0001-05

Abstract: In order to achieve high load-carrying efficiency for fiber winding composite circular grid structure with outer skin, axial compression stability is analyzed using FEM. Parameter design program is finished using the APDL language of ANSYS. Changing law of load-to-mass ratio for circular grid structure with outer skin which is attached to helical stiffener winding angle, stiffener cross area, stiffener aspect ratio, helical stiffener couples and hoop stiffener strips has been researched utilizing the parameter design program. Axial compression experiment of specific dimension grid structure is carried out on the INSTRON 1346 material fatigue strength test machine. It is shown that axial compression load-carrying capacity can be predicted using FEM; when helical stiffener winding angle is from a value between 0 degree and 40 degree, load-carrying efficiency of circular grid structure is more higher; better value for stiffener aspect ratio is in the range of 0.9-1.3.

Key words: APDL; stability; grid structure; composite

在航天、航空领域中对材料的结构和质量有其特殊要求, 在保证结构可靠性的同时, 需要其质量越轻越好^[1]。碳纤维/环氧复合材料网格结构是一种先进的结构形式, 与传统的金属蜂窝结构相比, 网格结构的质量大幅度降低, 制造费用减少 20%~30%^[2]。应用在探空火箭有效载荷整流罩上的网格结构与目前应用的铝质整流罩相比, 质量降低了 60%^[3]。该结构通常用于薄壁圆柱或圆锥壳体上, 一般由与壳体轴线成一定夹角 $\pm\phi$ 度的纵筋和环向筋组成^[4-6], 见图 1。

影响带蒙皮网格结构承载效率的设计参数主要包括网格筋缠绕角度、网格筋横截面积、筋高宽比、纵筋

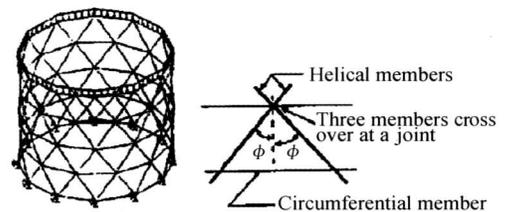


图 1 圆柱网格结构示意图

Fig. 1 Scheme of circular grid structure

对数以及环筋条数等。由于设计参数众多, 无法通过经验预测网格结构的轴压承载能力, 这就需要在设计

方法上寻找突破点。本工作采用有限元法对带蒙皮圆柱网格结构进行了稳定性分析并完成了轴压实验, 结果表明: (1) 采用有限元数值计算方法可以有效预测网格结构的轴压承载能力; (2) $0 \sim 40^\circ$ 范围内的纵筋缠绕角度可以使网格结构具有较高的承载效率; (3) 筋高宽比的范围在 $0.9 \sim 1.3$ 时可以保证网格结构具有较高的承载效率。

1 带蒙皮网格结构的有限元分析

下面从带蒙皮复合材料圆柱网格结构的材料性质、几何模型以及有限元分析三个角度对其极限轴压的有限元分析过程进行介绍。

1.1 带蒙皮网格结构的材料性质

带蒙皮复合材料网格结构由外蒙皮和内部纵、环向筋组成。外蒙皮由炭布与环氧树脂固化成型, 筋由单向纤维与环氧树脂固化成型。本工作设计并制造的带蒙皮复合材料网格结构由 3K 炭布、T700-12K 碳纤维与环氧树脂中温固化而成。T300-3K 缎纹炭布/环氧树脂材料力学性能见表 1, T700-12K/环氧单向板材料力学性能见表 2。

表 1 T300-3K 缎纹炭布/环氧复合材料力学性能
Table 1 Mechanical properties of T300-3K satin carbon cloth/epoxy composite

Item	Property
Longitude tensile modulus E_1 /GPa	67
Transverse tensile modulus E_2 /GPa	52.3
In-plane shear modulus G_{12} /GPa	4.7
Poisson's ratio ν	0.118
Density ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1570

表 2 T700-12K/环氧单向板材料力学性能
Table 2 Material mechanical properties of T700-12K/epoxy unidirection plate

Item	Property
Longitude tensile modulus E_1 /GPa	118
Transverse tensile modulus E_2 /GPa	10.4
In-plane shear modulus G_{12} /GPa	4.14
Poisson's ratio ν	0.29
Density ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1570

1. 带蒙皮网格结构几何模型的建立

网格结构是通过纤维和炭布缠绕固化工序成型。纤维缠绕工艺用于生成纵环向筋, 炭布缠绕工艺用于生成外蒙皮。为进行网格结构的几何建模, 必须建立纵向筋的缠绕轨迹数学模型。纵向筋沿测地线排布于芯模表面, 由于测地线为表面上两点之间的最短程线,

故芯模表面展开为平面后, 其轨迹线在芯模表面上为一条直线, 与母线夹角为 α_0 。纤维在圆柱状芯模上缠绕一定高度 L_0 的芯模转角为:

$$\gamma = \frac{L_0 \times \tan \alpha_0}{\pi \times D} \times 360^\circ \quad (1)$$

式中, L_0 为缠绕高度, α_0 为网格结构的缠绕角, D 为芯模的直径, 缠绕轨迹平面展开图见图 2。

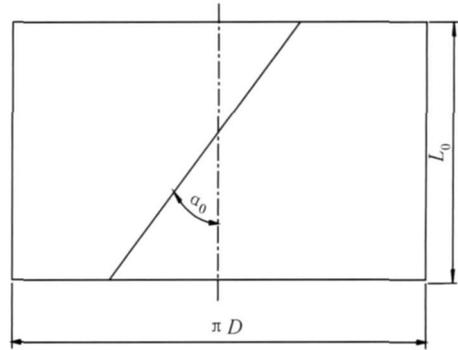


图 2 缠绕轨迹平面展开示意图

Fig.2 Planar development scheme of fiber winding path

在筒体段建模时采用转角为计算的参照量, 计算参照零点定义在芯模筒体部分的一端。采用右手笛卡尔坐标系, XOY 面为垂直轴线的平面, Z 向沿轴线方向。假设芯模不动, 纤维绕 Z 轴正向缠绕, 当落纱点为筒体的 (x, y, z) 点处时, 可得数学关系式:

$$x = \frac{D}{2} \cos \gamma, y = \frac{D}{2} \sin \gamma, z = L_0 \quad (2)$$

式中, γ 为一根据缠绕角 α_0 及缠绕过程中当前高度 L_0 计算获得的芯模转角, 单位($^\circ$)。

利用以上数学模型可以在有限元商用软件 ANSYS 中生成复合材料网格结构的几何模型。考虑到问题的对称性, 只需建立了一半的几何模型, 见图 3。几何建模过程可以分为以下三步: (1) 生成一圆柱体; (2) 生成代表网格筋的螺旋线和环向线; (3) 对圆柱体与螺旋线和环向线执行布尔运算, 得到代表网格纵环向筋的网格结构几何模型。

1.3 有限元分析

利用 ANSYS 中的 SHELL91 复合材料壳单元和 BEAM 189 梁单元分别对外蒙皮和内部纵环向筋进行了有限元划分, 对结构的一半进行了分析。分析过程中在圆柱网格结构的对称面上施加对称约束, 下端施加固定端约束, 上端所有节点除施加一沿端面法线方向单位位移外其余移动和转动位移皆为零。首先对结构进行预应力计算, 然后进行线性屈曲分析。由于网格结构的屈曲是低阶屈曲模态起主要作用, 而高阶模态对网格结构的屈曲影响较小, 因此只分析网格结构

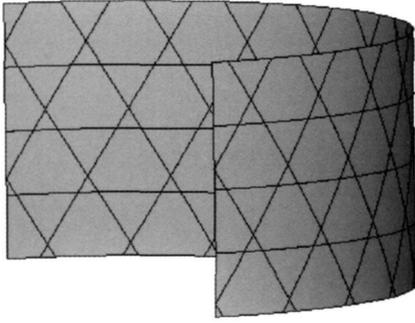


图3 网格结构几何模型

Fig. 3 Geometry model of lattice structure

的第一阶屈曲载荷。

圆柱网格结构的参数化设计

本工作利用 ANSYS 自带的二次开发语言编写了计算结构轴压承载能力的参数化设计程序。以下五节即为针对采用参数化设计程序计算得到的数据进行分析,得出的载荷质量比随各个设计参数的变化规律。圆柱网格结构的总体结构尺寸为:内径 $\phi 470\text{mm}$, 高度 210mm 。

1. 纵筋缠绕角度对载荷质量比的影响

取复合材料网格结构的环筋条数为 3 条,蒙皮厚度为 1mm ,筋横截面积为 28mm^2 ,纵筋对数分别取 11 和 7,筋高宽比分别取 $2:1$, $1.3:1$ 和 $1:1$ 。采用参数化设计程序对缠绕角 $0\sim 80^\circ$ 范围内复合材料圆柱网格结构的载荷质量比进行了分析,结果见图 4,图中 n_z 为纵筋条数, r_a 为筋横截面高宽比。

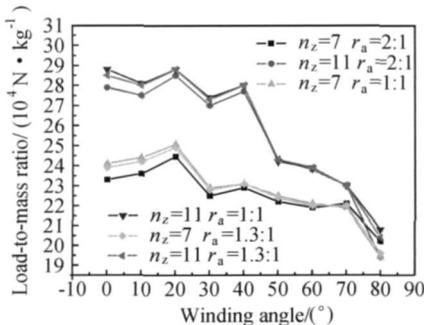


图4 载荷质量比随纵筋缠绕角度的变化规律

Fig. 4 Changing law of load-to-mass ratio with the changing of helical stiffener winding angle

从图 4 可以看出:在蒙皮厚度一定的条件下,当纵筋缠绕角度小于 40° 时,复合材料圆柱网格结构的载荷质量比有小幅波动;从 40° 开始,随着纵筋缠绕角度的逐渐增加,复合材料网格结构的载荷质量比迅速降

低。因此,在设计圆柱复合材料网格结构时,要根据结构具体尺寸情况合理选择缠绕角度。一般情况下,可以直接选择 $0\sim 40^\circ$ 范围内的纵筋缠绕角度来生成所需的网格结构。此时,即使不是结构的最佳缠绕角度,但至少能够保证结构效率的损失不是很高。

2. 筋横截面积对载荷质量比的影响

取复合材料网格结构的环筋条数为 3 条,纵筋对数为 11 对,缠绕角度为 30° ,蒙皮厚度分别取 $1, 4, 8\text{mm}$,筋的高宽比 $2:1$ 和 $1:1$ 。采用有限元参数化计算程序对筋横截面积 $14\sim 126\text{mm}^2$ 范围内的复合材料圆柱网格结构的载荷质量比进行了分析计算,结果见图 5,图中 t 为蒙皮厚度, r_a 为筋横截面高宽比。

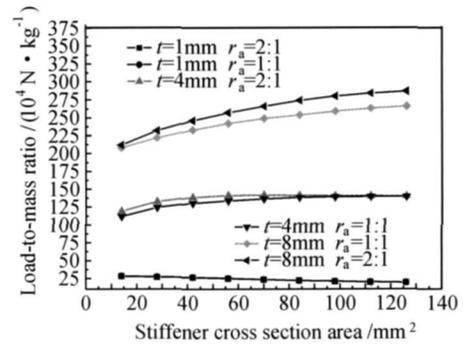


图5 载荷质量比随筋横截面积的变化规律

Fig. 5 Changing law of load-to-mass ratio with the changing of stiffener cross section area

从图 5 可以看出:在蒙皮厚度为 1mm 时,复合材料圆柱网格结构的载荷质量比随着筋横截面积的增加而逐渐减小;在蒙皮厚度为 4mm 时,开始阶段复合材料圆柱网格结构的载荷质量比逐渐增加,当横截面积达到 60mm^2 时,复合材料圆柱网格结构的载荷质量比达到一个较高的值,此后结构的载荷质量比趋于稳定;在蒙皮厚度为 8mm 时,复合材料网格结构的载荷质量比随着筋横截面积的增加而逐渐增加。因此,在确定圆柱网格结构的筋横截面积时,应根据蒙皮厚度的具体情况应用参数化设计程序来确定。

3. 筋高宽比对载荷质量比的影响

取复合材料网格结构的环筋条数为 3 条,缠绕角度为 30° ,筋横截面积为 28mm^2 ,结构高度分别取 210mm 和 600mm ,蒙皮厚度分别取 1mm 和 2mm 。采用有限元参数化计算程序对高宽比为 $0.5\sim 3.3$ 范围内的复合材料网格结构的载荷质量比进行了分析计算,结果见图 6, h 为网格结构高度, t 为蒙皮厚度。

从图 6 可以看出:在结构高度仅为 210mm 时,随着筋横截面高宽比的逐渐增加,复合材料圆柱网格结构的载荷质量比先增加后逐渐减小,但变化幅度不大,

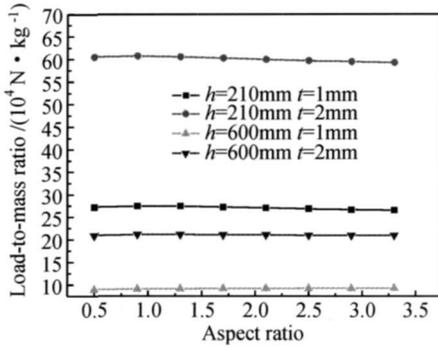


图 6 载荷质量比随横截面高宽比的变化规律

Fig. 6 Changing law of load-to-mass ratio with the changing of aspect ratio

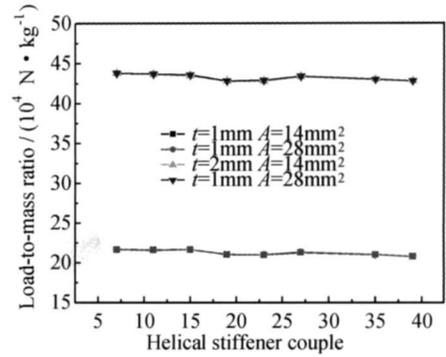


图 7 载荷质量比随纵筋对数的变化规律

Fig. 7 Changing law of load-to-mass ratio with the couples of helical stiffener

极值点出现在 0.9~1.3 范围内。在结构高度为 600mm 时,随着筋横截面高宽比的逐渐增加,复合材料网格结构载荷质量比随蒙皮厚度的不同分别为逐渐增加趋势和先增加后减小的趋势。当蒙皮厚度为 1mm 时,载荷质量比随筋横截面高宽比的增加而逐渐增加;当蒙皮厚度为 2mm 时,开始阶段载荷质量比随着筋横截面高宽比的增加而增加,当高宽比达到 0.9~1.3 范围内时达到一个极值,此后该值逐渐减小,但变化不大。从以上分析可以看出:载荷质量比随筋横截面高宽比的变化具有一定的规律性,即筋横截面高宽比在 0.9~1.3 范围内时,载荷质量比具有极值。但也具有例外情况,如厚度为 1mm 时,载荷质量比随筋横截面高宽比的增加而逐渐增加,但变化幅度不大。因此,当进行有蒙皮复合材料网格结构的设计时,设计人员一般可以直接在 0.9~1.3 范围内选择筋高宽比,这样可以保证复合材料网格结构本身具有较高的载荷质量比。在精细设计阶段,可以采用参数化设计程序计算出网格结构最佳的筋横截面高宽比。

4.4 纵筋对数对载荷质量比的影响

取复合材料网格结构的环筋条数为 3 条,缠绕角度 30°,高宽比 2:1,蒙皮厚度分别取 2mm 和 1mm,筋的横截面积分别取 28mm² 和 14mm²。采用有限元优化计算程序对纵筋对数 7~39 范围内的复合材料网格结构的载荷质量比进行了计算,结果见图 7,图中 t 为蒙皮厚度, A 为筋横截面积。

从图 7 可以看出:随着纵筋对数的增加,复合材料圆柱网格结构的载荷质量比变化不大,仅在一定范围内波动。当蒙皮厚度为 1mm 时,载荷质量比在纵筋对数为 15 对时具有极值;当蒙皮厚度为 2mm 时,载荷质量比在纵筋对数为 7 对时具有极值;也就是说较优纵筋对数与蒙皮厚度有很大关系。在复合材料圆柱网格结构的具体设计过程中,纵筋对数应根据设计所要

求的最大载荷并结合参数化设计程序具体确定。

5 环筋条数对载荷质量比的影响

取复合材料网格结构的纵筋对数为 11 对,缠绕角度 30°,高宽比取 2:1,蒙皮厚度分别取 1mm 和 2mm,筋的横截面积分别取 14mm² 和 28mm²。采用有限元优化计算程序对环筋条数 3~10 范围内的复合材料网格结构的载荷质量比进行了计算,结果见图 8,图中 t 为蒙皮厚度, A 为筋横截面积。

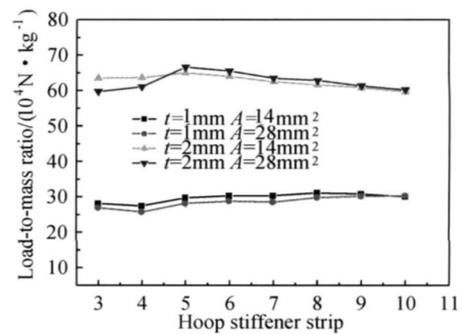


图 8 载荷质量比随环筋条数的变化规律

Fig. 8 Changing law of load-to-mass ratio with the number of hoop stiffener strips

从图 8 可以看出:当蒙皮厚度为 1mm 时,初始阶段复合材料圆柱网格结构的载荷质量比随环筋条数的增加而降低;当环筋条数等于 4 条时,载荷质量比达到一个较小值;当环筋条数大于 5 时,复合材料圆柱网格结构的载荷质量比随环筋条数的增加而变化幅度不大。当蒙皮厚度为 2mm 时,初始阶段复合材料圆柱网格结构的载荷质量比随环筋条数的增加而逐渐增加;当环筋条数达到 5 条时,载荷质量比达到一个极值;此后载荷质量比随着环筋条数的增加而逐渐降低。因此,在设计网格结构时,环筋条数可以直接选择为 5 条,此时能够保证其具有较高的载荷质量比。在精细

设计阶段,环筋条数可以采用有限元参数化设计程序具体确定。

3 实验分析

前面通过有限元分析计算讨论了复合材料网格结构轴压承载能力随各个设计参数的变化规律。为了检验有限元分析计算的有效性,必须通过实验来验证。先后进行了3次试验,试验用网格结构设计参数为:内径 $\phi 470\text{mm}$,高 210mm ,蒙皮 1.0mm ,纵向筋对数23,环筋3条,横截面 $7\text{mm} \times 4\text{mm}$,纵筋缠绕角度 30° 。

对制造的复合材料网格结构进行轴压试验,轴压实验机为INSTRON1346材料疲劳强度试验机。试验过程中:首先将复合材料圆柱网格结构水平放置在专门为进行轴压实验加工的标准试验台上,其次将轴压试验机上端面与复合材料网格结构上端面紧密贴合,然后缓慢加载,直至复合材料圆柱网格结构发生破坏,载荷不能继续施加时记录试验结果。复合材料圆柱网格结构轴压实验件见图9~10,复合材料圆柱网格结构有限元计算失稳模式见图11。



图9 网格结构试验件

Fig.9 Grid structure experiment component

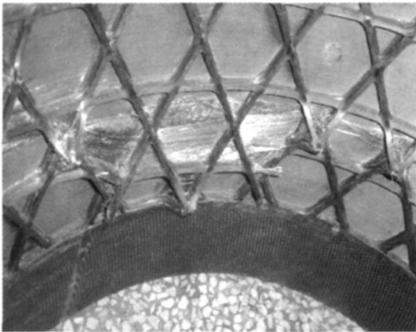


图10 网格结构轴压实验破坏位置

Fig.10 Breakage position of grid structure axial compression experiment

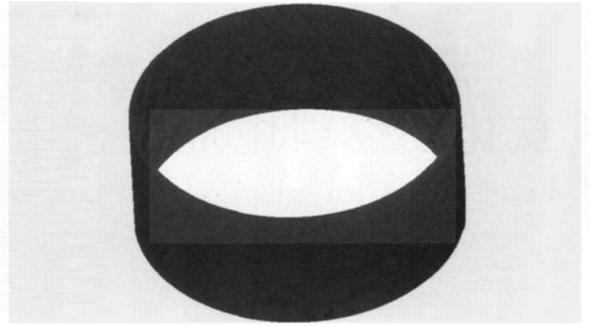


图11 网格结构失稳模式

Fig.11 Grid structure buckling mode

从图11可以看出:该网格结构在轴压载荷作用下,发生的是局部蒙皮屈曲破坏,其破坏位置出现在靠近端框位置。从网格结构轴压试验破坏图10来看,实际破坏位置也处于靠近端框位置,且出现蒙皮的分层破坏现象。

将轴压试验及有限元分析结果汇总于表3。

表3 轴压实验及有限元分析结果

Table 3 Axial compression experiment and FEM analysis result

No	Experiment result	FEM result	Absolute value of relative error
	$/ (10^4 \text{N})$	$/ (10^4 \text{N})$	
1# grid structure	53.0		3.81%
2# grid structure	56.8	55.1	3.08%
3# grid structure	51.8		5.99%

从表3数据可以看出:有限元分析计算结果相对误差绝对值的最大值为5.99%。

4 结论

(1)采用有限元数值计算方法可以有效预测圆柱网格结构的轴压承载能力。

(2)一般情况下,可以直接选择 $0 \sim 40^\circ$ 范围内的纵筋缠绕角度来生成所需的网格结构。此时,即使不是结构的最佳缠绕角度,但至少能够保证结构效率的损失不是很高。

(3)当进行有蒙皮复合材料网格结构的设计时,设计人员可以直接在 $0.9 \sim 1.3$ 范围内选择筋高宽比,这样可以保证复合材料网格结构本身具有较高的载荷质量比。

参考文献

- [1] 廖英强,刘勇琼,刘建超,等.纤维缠绕复合材料圆柱网格结构的稳定性分析及优化设计[J].宇航学报,2009,30(4):1693-1697.

- 工经济分析, 2007, (12): 58- 65.
- [3] 阎光灿. 世界长输天然气管道综述[J]. 天然气与石油, 2000, 18(3): 9- 20.
- [4] 吴长春, 张孔明. 天然气的运输方式及其特点[J]. 油气储运, 2003, 22(9): 39- 43.
- [5] 王功礼, 王莉. 油气管道技术现状与发展趋势[J]. 石油规划设计, 2004, 15(4): 1- 7.
- [6] 阎光灿, 冯亚利, 吴邦辉. 世界天然气输送管网系统(续完)[J]. 天然气与石油, 1999, 17(1): 58- 64.
- [7] 阎光灿, 冯亚利, 吴邦辉. 世界天然气输送管网系统(待续)[J]. 天然气与石油, 1998, 16(4): 50- 55.
- [8] 吴玉国, 陈保东. 输气管线摩阻系数的影响因素以及减阻的主要方法[J]. 管道技术与设备, 2003, (5): 1- 3.
- [9] SLETFJERDING E, GUDMUNDSSON J S. Friction factor in gas pipelines in the North Sea [A]. Richardson. SPE Proceedings Gas Technology Symposium [C]. Texas USA: SPE, 2000. 459- 467.
- [10] 林竹, 刘本华, 刘国书. 输气管道减阻涂料现状及发展趋势[J]. 上海涂料, 2004, 42(1): 16- 18.
- [11] 吴玉国, 陈保东. 输气管线摩阻公式评价[J]. 油气储运, 2003, 22(1): 23- 28.
- [12] 沈善策. 输气管道采用内衬覆层时的工艺设计问题[J]. 油气储运, 2000, 19(7): 19- 24.
- [13] KUT S. High performance coatings for the oil and gas industry internal and external liquid coatings for pipelines, corrosion in the oil and gas industry [D]. Kosice, Czechoslovakia: Technical University, 1989.
- [14] 钱成文, 刘广文, 王武, 等. 天然气管道的内涂层减阻技术[J]. 油气储运, 2001, 20(3): 1- 6.
- [15] 胡士信, 陈向新. 天然气管道减阻内涂技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [16] 林竹, 张丽萍, 袁中立, 等. 减阻型涂料在天然气管道中的应用[J]. 焊管, 2002, 25(6): 1- 4.
- [17] 刘雯, 钱成文. 输气管道内涂层用料[J]. 油气储运, 2001, 20(2): 13- 15.
- [18] FRANK E L. Drag Reduction Method for Gas Pipelines [P]. US Patent: 4958653, 1990-07-26.
- [19] LI Ying-Hsiao. Drag Reduction Method For Gas Pipelines [P]. U S Patent: 5020561, 1991-06-04.
- [20] LI Y H, CHESNUT G R, RICHMOND R D, et al. Laboratory tests and field implementation of gas-drag-reduction chemicals [J]. SPE Production & Facilities, 1998, 13(1): 53- 58.
- [21] CHEN H J, KOUBA G E, MICHAEL S. DRA for gas pipelining successful in gulf of mexico trial [J]. Oil & Gas Journal, 2000, 98(23): 54- 58.
- [22] RAMACHANDRAN S, JOVANCICEVIC V. Molecular modeling of the inhibition of mild steel carbon dioxide corrosion by imidazolines [J]. Corrosion, 1999, 55(3): 259- 267.
- [23] CRUZ J, MARTINEZ R, GENESCA J. Experimental and theoretical study of 1-(2-ethylamino)-2-methylimidazole as an inhibitor of carbon steel corrosion in acid media [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2004, 566(1): 111- 121.
- [24] ZHENG J S, ZHAO J G. Control of corrosion by inhibitors in drilling muds containing high concentration of H₂S [J]. Corrosion, 1993, 49(2): 170- 174.
- [25] MARTIN J A. The existence of imidazoline corrosion inhibitors [J]. Corrosion, 1985, 41(5): 281- 287.
- [26] 吕彤, 李凡, 郭晓红. 咪唑啉柔软剂中间体的合成研究[J]. 天津纺织工学院学报, 1999, 18(1): 31- 32.
- [27] 王慧龙, 韩秀丽, 郑家葵. 高级脂肪酰胺基烷基咪唑啉的合成及缓蚀研究[J]. 郑州工业大学学报, 2001, 22(3): 62- 64.
- [28] 刘瑞斌, 王慧龙, 辛剑, 等. 高级脂肪酰胺基烷基咪唑啉合成工艺条件的研究[J]. 广东化工, 2004, (2): 7- 8.
- [29] JOVANCICEV V. Inhibition of CO₂ corrosion of mild steel by imidazolines and their precursors [J]. NACE Corrosion, 1999, 55(5): 449- 455.
- [30] 王大喜, 俞英. 新型咪唑啉化合物的合成及缓蚀性能测试 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2000, 24(6): 52- 54.
- [31] ZHAO L. Corrosion inhibition approach of oil production systems in offshore oilfields [J]. Materials and Corrosion Werkstoffe und Corrosion, 2004, 55(9): 684- 688.
- [32] WANG Da-xi, LI Shu-yuan, YU Ying. Theoretical and experimental studies of structure and inhibition efficiency of imidazoline derivatives [J]. Corrosion Science, 1999, 41(10): 1911- 1919.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2008CB617508)。

收稿日期: 2010-05-16; 修订日期: 2011-02-20

作者简介: 邢文国(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事表面工程及油气储运研究方向, 联系地址: 山东省济南市文化东路 80 号, 山东省化工研究院山东省生物化学工程重点实验室(250014), E-mail: xingwenguosdu@163.com

(上接第 5 页)

- [2] 廖英强, 刘勇琼. 纤维缠绕复合材料圆柱网格结构极限轴压载荷的理论分析[J]. 中国机械工程, 2009, 20(19): 2293- 2297.
- [3] WODESENBET E, KIDANE S, PANG S S. Optimization for buckling loads of grid stiffened composite panels [J]. Composite Structures, 2003, 60(2): 159- 169.
- [4] 李超, 刘建超, 丘哲明. 一种新型的材料结构—复合材料网格结构[J]. 航空材料学报, 2003, 23(增刊): 276.
- [5] VASILIEV V V, BARYNIN V A, RASIN A F. Anisogrid lattice structures—survey of development and application[J]. Journal

of Composite Structures, 2001, 54: 361- 370.

- [6] CHEN H J. Analysis and optimum design of composite grid structures [D]. Ph D Thesis, Stanford (CA): Stanford University, 1995.

收稿日期: 2010-04-06; 修订日期: 2011-04-25

作者简介: 廖英强(1978—), 男, 工程师, 博士研究生, 研究方向: 固体火箭发动机设计与结构强度研究, 联系地址: 陕西省西安市 101 信箱研发中心(710025), E-mail: liaoyingqiang@126.com