

文章编号:1001-4888(2011)01-0026-06

孔网钢增强复合材料管的弹性模量研究

林谋金, 刘荣凤, 王晓春*

(四川大学 建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要: 以孔网钢聚乙烯复合管为例, 利用单轴压缩实验研究了孔网钢增强复合材料管的力学性能, 包括复合管的抗压强度和弹性性质, 提出了孔网钢等效弹性模量和开孔因子的概念(分别记为 E_s 和 η), 根据实验结果和复合材料理论, 得到孔网钢等效弹性模量 E_s 和开孔因子 η 的实验值。运用单孔模型, 推导得到了孔网钢等效弹性模量 E_s 和开孔因子 η 的解析计算公式, 由此可计算得到孔网钢增强类复合材料弹性模量的理论值。最后, 通过 ANSYS 有限元分析得到 E_s 和 η 的数值计算值。研究表明: E_s 和 η 的理论计算值与其实验结果、有限元数值计算结果比较, 三者吻合较好, 可推广用于工程实际。

关键词: 孔网钢带; 聚乙烯; 复合材料; 等效弹性模量; 开孔因子

中图分类号: O341 **文献标识码:** A

0 引言

管道输送是一种经济、安全的运输方式, 在石油、天然气、电力、煤炭、化工以及城市供水等各领域都得到广泛的应用。目前我国使用的传统管材主要有金属管和塑料管两大类, 其中普通金属管道壁粗糙、笨重、易生锈、腐蚀问题严重。塑料管虽具有重量轻、耐腐蚀、水流阻力小、安装简便、快捷等优点, 但非金属管的强度、刚性、抗冲击性等指标又达不到要求。为消除以上不足, 可采用复合化处理, 得到有理想强度与优良耐蚀性能的复合材料管。塑料基金属复合管具备了金属管和塑料管的优点, 在机械强度、刚直不易变形、耐压、耐腐蚀、耐热、保温性、抗静电、不生锈、不易渍垢、管壁光滑、质轻等方面具有良好的性能。国内塑料基金属复合管的应用起步较晚, 于 20 世纪 90 年代初才开始, 对其研究大多停留在制造、安装及应用等方面, 对其力学响应特性及优化设计的研究尚处于起步阶段^[1]。

在孔网钢带聚乙烯复合管方面, 主要是对孔网钢进行研究, N. E. Shanmugam 等^[2]运用有限元方法求解冲孔板在轴向压缩下的极限载荷, 并用回归分析方法给出公式预测其极限载荷。Jeom Kee Paik^[3]运用有限元方法求解冲孔板边缘在剪切载荷作用下的极限载荷, 并用回归分析方法给出公式预测其极限载荷。R. Kopp 等^[4]分别运用二维有限元和三维有限元计算冲孔板在轴向拉伸下的应力应变值, 并与实验进行比较, 发现二维有限元计算更符合实验结果。董大伟等^[5]采用 ANSYS 模拟分析了孔网钢的应力和应变, 当孔隙率不变而使孔的排布与筒体轴线成 45° 时, 发现应力应变大小变化不大, 但分布却更加均匀。

关于孔网钢增强复合材料管(图 1)的力学性能的研究, 目前还没有相关报道。本文以孔网钢聚乙烯复合管为例, 利用单轴压缩实验得到了孔网钢增强复合材料管的抗压强度, 并通过载荷一位移曲线研究了复合管的弹性性质。为了得到计算孔网钢增强复合材料弹性模量的理论公式, 提出了孔网钢等效弹性模量和开孔因子的概念(分别记为 E_s 和 η)。根据实验结果和复合材料理论, 通过反算得到了孔网

* 收稿日期: 2010-04-26; 修回日期: 2010-06-20

通讯作者: 王晓春(1960—), 男, 博士, 教授。从事复合材料力学、断裂损伤力学研究。E-mail: wxcscu@sina.com

钢等效弹性模量 E_s 和开孔因子 η 的实验值。运用单孔模型,推导得到了孔网钢等效弹性模量 E_s 和开孔因子 η 的解析计算公式,由此可计算得到孔网钢增强复合材料弹性模量的理论值。最后,利用 ANSYS 有限元分析软件得到了 E_s 和 η 的数值计算结果。研究表明:孔网钢等效弹性模量和开孔因子的理论计算值与其实验反算值、有限元计算值比较,三者吻合较好,可推广用于工程实际。

1 单轴压缩实验结果

实验通过在 WDW-50 微机控制电流伺服万能试验机上对孔网钢带聚乙烯复合管试件(采用圆管试件,尺寸参见表 1)以 2.0mm/min 位移速率沿圆管试件轴向进行单轴压缩加载,通过载荷一位移曲线图计算复合管的弹性模量和抗压强度,得到的实验数据,列于表 1。

表 1 复合管单轴压缩实验数据

Tab. 1 Experimental data of PSS-PL pipe

试样 编号	孔网钢 截面积 $A_s(10^{-3} m^2)$	聚乙烯 截面积 $A_p(10^{-3} m^2)$	最大 压缩力 (kN)	复合管 截面积 $A(10^{-3} m^2)$	抗压 强度 (MPa)	试样 长度 (mm)	载荷 增量 $\Delta P(kN)$	压缩 位移 $\Delta L(mm)$	复合管的 弹性模量 (GPa)
1	0.71	4.002	168.80	4.712	36	160	110	0.06	19.45
2	0.71	4.002	163.00	4.712	35	160	109	0.06	19.28
3	0.71	4.002	169.50	4.712	36	160	135	0.08	17.91
4	0.71	4.002	196.90	4.712	42	160	128	0.04	33.96
5	0.71	4.002	109.44	4.712	22	160	68	1.20	19.35

备注:试样 5 的标距为 160mm,即为试样的长度,其余标距为 50mm。试样 4 的结果跟平均值偏差较大。

为了得到计算孔网钢增强复合材料弹性模量的理论公式,将孔网钢和孔中的聚乙烯组成的复合材料作为一种等效材料,引入孔网钢等效弹性模量的概念:由于钢的弹性模量(本文取值为 210GPa)比聚乙烯的弹性模量(本文取为 0.79GPa)大得多,孔网钢的等效弹性模量(记为 E_s)近似等于这种等效材料的弹性模量,那么复合管的弹性模量可以利用下面公式^[6]计算得出。

$$E = \frac{E_s A_s + E_p A_p}{A_s + A_p} \quad (1)$$

式中, E 为复合管的弹性模量; E_s 为孔网钢的等效弹性模量; E_p 为聚乙烯的弹性模量; A_s 为复合管中孔网钢横截面面积; A_p 为复合管中聚乙烯的横截面面积。从式(1)中可得到孔网钢的等效弹性模量 E_s 如下:

$$E_s = \frac{E(A_s + A_p) - E_p A_p}{A_s} \quad (2)$$

将实验得到的 Φ160 规格复合管的弹性模量 E ,以及各个参数代入式(2)得到下表 2。

表 2 Φ160 规格孔网钢等效弹性模量数据表

Tab. 2 Experimental results of modulus of elasticity of PSS

试样编号	1	2	3	5	平均值
孔网钢等效弹模 $E_s(GPa)$	124.63	123.50	114.40	124.00	121.63

2 孔网钢的等效弹性模量解析表达式

上面通过单轴实验和复合材料理论反算得到 Φ160 规格孔网钢的等效弹性模量,如果能够推导出

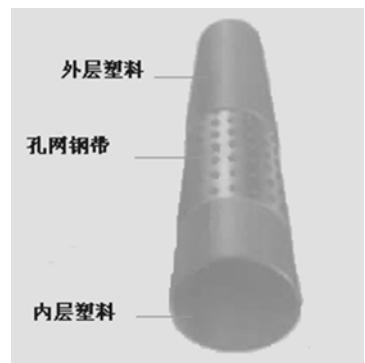


图 1 孔网钢增强复合材料管

Fig. 1 Perforated sheet steel plastics composite pipe

孔网钢等效弹性模量的解析表达式,那么通过简单计算,就能获得任意规格孔网钢复合材料管的弹性模量。下面应用单元分析方法,推导出孔网钢等效弹性模量的解析表达式。

将线弹性、小变形条件下的单孔模型作为计算模型,如图2所示。作为近似处理方法,用方孔代替单孔模型板中的圆孔,并忽略可能出现的局部弯曲变形和应力集中的影响。

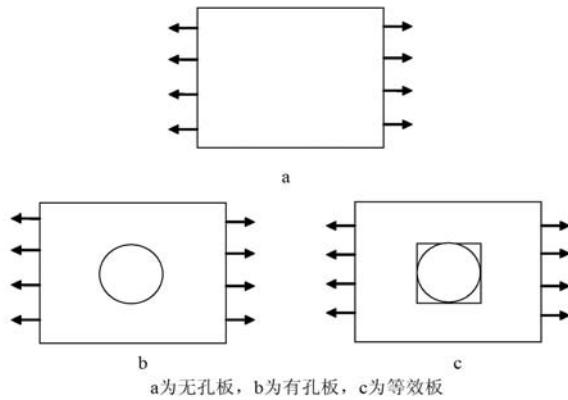


图2 孔网钢带单孔模型

Fig. 2 Single hole model of PSS

根据弹性理论,对于无孔板,其弹性模量可通过应力应变关系按下式计算:

$$E_1 = \frac{FL}{A_1 \Delta L} = \frac{FL}{Kt \Delta L} \quad (3)$$

式中, F 为板端的载荷; ΔL 为无孔板变形量; L 为板的长度; K 为板的宽度; t 为板的厚度; $A_1 = Kt$ 为板的横截面积。对于单孔板,可由弹性理论得到其伸长量的近似计算公式为:

$$\Delta L' = \frac{F(L-d)}{KtE_1} + \frac{Fd}{(K-d)tE_1} = \frac{F(KL - dL + d^2)}{(K-d)KtE_1} \quad (4)$$

如果将单孔板视为一种等效的无孔板(图2a),那么,其等效弹性模量根据其变形量计算如下:

$$E_s = \frac{FL}{Kt\Delta L'} = \frac{(K-d)L}{(K-d)L + d^2} E_1 \quad (5)$$

式中, $E_1 = 210\text{GPa}$ 为无孔钢板材的弹性模量; $\Delta L'$ 为单孔板变形量; L 为单孔板的长度,它等于孔网钢孔的轴向间距; K 为单孔板的宽度,它等于孔网钢孔的周向间距; d 为圆孔的直径。

为了进一步检验公式(5)的理论预测性,运用ANSYS有限元软件对孔网钢等效弹性模量进行数值计算,在三个开孔参数 L 、 K 、 d (对于Φ160规格孔网钢, $L=15\text{mm}$, $K=14.15\text{mm}$, $d=8\text{mm}$)中任意改变一个参数值,而保持其它两个参数值不变,得到不同开孔参数孔网钢等效弹性模量 E_s 的数值计算结果。同时根据式(5)的计算值进行绘图比较,结果见图3、图4和图5。

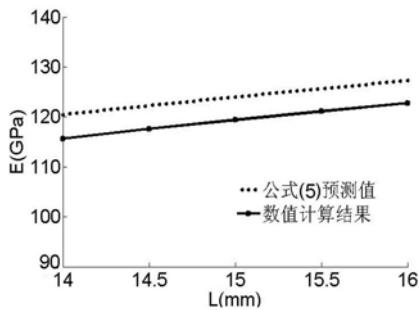


图3 L-E_s关系图($K=14.15\text{mm}$, $d=8\text{mm}$)

Fig. 3 Curve of L-E_s($K=14.15\text{mm}$, $d=8\text{mm}$)

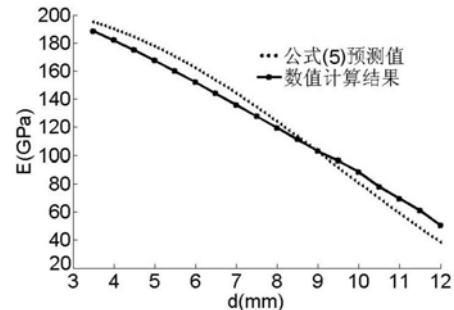
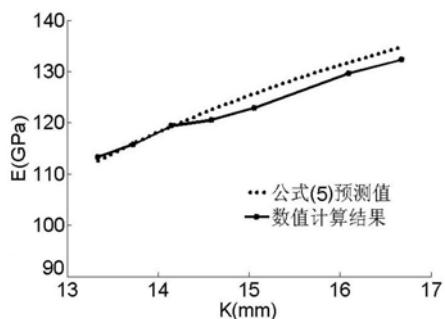


图4 d-E_s关系图($L=15\text{mm}$, $K=14.15\text{mm}$)

Fig. 4 Curve of d-E_s($L=15\text{mm}$, $K=14.15\text{mm}$)

从曲线图可以看出根据公式(5)所得结果与有限元数值计算结果基本吻合,变化趋势也相同,说明

图 5 K—E_s 关系图 ($L=15\text{mm}$, $d=8\text{mm}$)Fig. 5 Curve of K—E_s ($L=15\text{mm}$, $d=8\text{mm}$)

公式(5)具有较好的理论预测精度。

3 开孔因子

为了得到任意规格孔网钢增强复合管弹性模量的通用计算方法,引入一个无量纲参数 η 是方便的,它定义为孔网钢的等效弹性模量 E_s 与钢材的弹性模量 E_1 之比,称之为开孔因子,即:

$$\eta = \frac{E_s}{E_1} \quad (6)$$

将式(5)代入,即可得到开孔因子 η 的表达式:

$$\eta = 1 - \frac{d^2}{(K-d)L + d^2} \quad (7)$$

它反映各开孔参数(孔径 d 、孔距 L 、 K)对孔网钢等效弹性模量的综合影响。这里,式(6)为开孔因子的定义式,式(7)为开孔因子的解析计算式。从式(7)可以看出,开孔因子只取决于参数 d 、 L 、 K ,与钢板厚度 t 无关。当 $d=0$ 时, $\eta=1$,与无孔板对应;当孔径接近等于板的宽度即 $d \rightarrow K$ 时, $\eta \rightarrow 0$,此时钢板失去承载能力。将前面已得到的孔网钢等效弹性模量实验值代入式(6),同时将开孔参数 $L=15\text{mm}$, $K=14.15\text{mm}$, $d=8\text{mm}$ 代入式(7),得到开孔因子 η 的理论计算值,参见表 3。

表 3 开孔因子实验值与理论值比较

Tab. 3 Comparison of experimental results with theoretical results of factor of perforations

试样编号	1	2	3	5	实验平均值	式(7)计算值	误差
开孔因子	0.5935	0.5881	0.5448	0.5905	0.5793	0.5904	1.88%

表 3 所给结果表明:由式(7)计算所得开孔因子 η 的理论值与实验值相比,两者误差百分比仅为 1.88%,预测精度良好。下面利用复合材料理论、孔网钢等效弹性模量和开孔因子的已有公式,给出解析计算孔网钢增强复合材料弹性模量的理论公式。

4 孔网钢增强复合材料弹性模量的解析计算公式

将式(6)代入式(1)可得到孔网钢增强复合材料弹性模量解析计算公式为:

$$E = \frac{\eta E_s A_s + E_p A_p}{A_s + A_p}, \quad \eta = 1 - \frac{d^2}{(K-d)L + d^2} \quad (8)$$

式中 η 为开孔因子。在工程实际应用中,可以根据给定的开孔参数 d 、 L 、 K ,计算确定孔网钢开孔因子 η ,然后根据孔网钢增强复合管两种材料的弹性模量进一步由公式(8)计算得到复合管的轴向弹性模量(如果对换参数 L 、 K 的位置,则得到复合管的周向弹性模量),同时也可根据工程实际对复合管弹性模量的具体要求进行参数的优化设计,即可以根据公式(7)改变孔网钢的设计参数 d 、 L 、 K ,以获得不同取值的开孔因子。

下面表 4 给出了根据另外两种不同规格($\Phi 200$ 和 $\Phi 250$)复合管的压缩实验得到的弹性模量实验值,作为比较,同时给出了有限元计算值、公式(8)得到的理论计算值。

表4 三种不同规格复合管的弹性模量比较

Tab. 4 Comparison of modulus of elasticity of the PSS-PL

规格	轴向孔间 L(mm)	孔的直径 d(mm)	周向孔距 K(mm)	弹性模量 实验值 E(GPa)	有限元 计算值 E(GPa)	公式(8) 计算值 E(GPa)
160	15	8	14.15	18.99	19.13	19.35
200	15	8	14.08	16.72	17.39	17.50
250	15	8	14.10	23.70	26.30	26.38

从表4可以看出:三种不同规格复合管的弹性模量有限元计算值与由公式(8)得到的预测值吻合较好,其中规格Φ160和Φ200复合管的实验值与公式(8)的理论预测值吻合较好,误差分别为1.86%、4.68%,但规格Φ250复合管的实验值与公式(8)的理论预测值有较大误差,误差为10.1%。经初步分析,两者存在较大误差可能与试件材料内部缺陷、加工精度(试样切断部分)或实验本身引起的误差有关。综上所述,由公式(8)给出的孔网钢增强复合管弹性模量理论预测值与实验值、有限元计算值吻合良好,满足工程要求,可以直接用来分析计算孔网钢增强类复合管的弹性模量。

5 结论

- (1) 提出了孔网钢等效弹性模量和开孔因子的概念。
- (2) 根据实验结果和复合材料理论,得到孔网钢等效弹性模量 E_e 和开孔因子 η 的实验值。
- (3) 运用单孔模型,推导得到了孔网钢等效弹性模量 E_e 和开孔因子 η 的解析计算公式,由此计算得到的理论值,与实验值、有限元计算值比较,三者吻合良好。
- (4) 开孔因子只取决于孔网钢开孔参数 d 、 L 、 K ,与钢板厚度 t 无关。当 $d=0$ 时, $\eta=1$,与无孔板对应;当孔径接近等于板的宽度即 $d \rightarrow K$ 时, $\eta \rightarrow 0$,此时钢板接近失去承载能力。开孔因子反映了各开孔参数对孔网钢等效弹性模量的综合影响。
- (5) 利用复合材料理论、孔网钢等效弹性模量公式,给出解析计算孔网钢增强类复合材料弹性模量的近似理论公式,在实验研究和有限元分析之外,为计算复合管的弹性模量提供了一种简易的方法,并具有较好的预测精度,可以用来分析计算任意规格孔网钢增强类复合管的弹性模量。

致谢:感谢四川东泰新材料科技有限公司在实验材料和项目经费上的支持。

参考文献:

- [1] 卢玉斌,马歆,方晓斌,等. 塑料基金属复合管研究进展[J]. 化工机械,2005,23(2):125—129 (LU Yu-bin, MA Xin, FANG Xiaobin, et al. Research Progress of Plastic Base Metal Composite Pipes[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2005, 23(2): 125—129 (in Chinese))
- [2] Shanmugam N E, Thevendran V, Tan Y H. Design formula for axially compressed perforated plates [J]. Thin-Walled Structures, 1999, 34: 1—20.
- [3] Jeom Kee Paik. Ultimate strength of perforated steel plates under edge shear loading[J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45: 301—306.
- [4] Kopp R, Wiedner C, El-Magd E, Gebhard J. Comparison between viscoplasticity measurements and finite element computations for tensile tests on cold rolled perforated ferritic chromium steel[J]. Computational Materials Science, 2004, 31: 439—447.
- [5] 董大伟,闫牧夫. 复合管金属增强体结构优化设计[J]. 机械工程师,2003,9:56—59 (DONG Dawei, YAN Mufu. The Optimum Structural Design of the Metal Reinforcement of Composite Pipes[J]. Mechanical Engineer, 2003, 9: 56—59 (in Chinese))
- [6] 琼斯 R M 著,朱颐龄等译. 复合材料力学[M]. 上海:上海科学技术出版社,1981 (Jones R M. Mechanics of Composite Materials[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1981 (in Chinese))

Study of Elastic Modulus of Composite Pipe Reinforced by Perforated Sheet Steel

LIN Mou-jin, LIU Rong-feng, WANG Xiao-chun

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The mechanical properties, including compressive strength and modulus of elasticity, of perforated sheet steel plastics (for instance, polyethylene) pipe (in short words PSS-PL pipe) were studied by uniaxial compression experiment. Concepts of equivalent elastic modulus of perforated sheet steel (or PSS) and factor of perforations, represented with E_s and η respectively, were introduced. Experimental values of equivalent elastic modulus E_s of PSS and factor of perforations η were obtained based on the theory of mechanics of composite materials and data of uniaxial compression test. Analytical expressions of E_s and η which could be extended to calculate the Yong's module of PSS-PL pipe, were derived out by means of single hole model. Finally, numerical results of E_s and η were also obtained by finite element software ANSYS. Comparison among theoretical, experimental and finite element numerical results of E_s and η shows that they coincide well and the formulae of E_s and η could be used in engineering.

Keywords: perforated sheet steel; polyethylene; composite; equivalent elastic modulus; factor of perforations