

预制螺旋槽薄壁管的吸能研究

李玉如¹, 柳忠彬^{1,2}, 肖守讷², 王欢¹

(1. 四川理工学院机械工程学院, 四川 自贡 643000; 2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031)

摘要:为了使机车在碰撞过程中吸收更多的能量,达到提高机车被动安全性的目的,设计了一种预制螺旋槽薄壁管结构。通过非线性有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对 3 种不同薄壁管结构进行了数值分析,并研究了螺距、螺旋角和半圆形螺旋槽直径对预制螺旋槽薄壁管的吸能性能的影响。研究表明:(1)半圆形螺旋槽薄壁管相比圆形管和矩形管具有更好的吸能性能,可作为一种新型薄壁管吸能元件;(2)螺距对螺旋形薄壁管的吸能效果具有很大的影响,在 0.17 m 时吸能效果最好;(3)当半圆形螺旋槽的直径大于 5 mm 时,吸能性能会出现急剧下降;(4)螺旋角几乎不影响吸能效果。

关键词:非线性;数值分析;螺旋形薄壁管;耐碰撞

中图分类号:U260.2

文献标志码:A

引言

随着我国铁路运输的大提速,列车的运行速度越来越高,一旦发生碰撞就会造成大量的人员伤亡和严重的财产损失。为了更好地保护乘客及乘务人员的生命财产安全,提高机车的耐碰撞性显得尤为重要。吸能装置是机车车辆耐碰撞设计的关键环节,吸能元件又是吸能装置的重要组成部分,薄壁构件由于重量轻、成本低及其在碰撞过程中的稳定性,已作为一种良好的吸能元件,在汽车、轮船、火车、飞机等各类交通工具中得到了广泛的应用。目前国内在薄壁构件的耐碰撞性方面的研究越来越多,贾宇等^[1]对正方形、矩形、圆形、圆形和六边形截面的薄壁构件进行了有限元模拟;刘中华等^[2]对碰撞的主要薄壁吸能构件的变形方式和特点进行了研究;荆友录等^[3]对不同截面结构薄壁管直梁的轴向耐碰撞性进行了研究。

本文提出了一种新型薄壁管结构——预制螺旋槽薄壁管,并与矩形管和圆形管一起通过轴向仿真分析,

得到不同结构薄壁管的轴向撞击吸能特性。通过非线性有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 分析了螺旋角、螺距以及半圆形螺旋槽直径对螺旋形薄壁管轴向撞击特性的影响,为薄壁管轴向吸能结构设计提供参考。

1 问题描述

1.1 几何模型描述

所研究的对象是一种预制螺旋槽薄壁管结构,并将其与圆形薄壁管和方形薄壁管进行对比分析。3 种薄壁管的长度、厚度和截面周长均相同,分别为 0.29 m、2 mm、188.4 mm。图 1 中(a)、(b)、(c)分别表示截面积为圆形、矩形薄壁管和预制螺旋槽薄壁管。这些薄壁管的一端完全固定,另一端受到质量为 400 kg 的刚性墙的轴向冲击^[4],冲击速度为 $V = 10$ m/s。图 2 为预制螺旋槽薄壁管的结构参数, H 、 φ 、 D 分别为螺距、螺旋角和半圆槽直径。

1.2 薄壁构件轴向撞击吸能特性基本理论

薄壁构件作为主要的能量吸收元件,在受到轴向撞

收稿日期:2015-03-08

基金项目:中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(SWJTU09ZT23);牵引动力国家重点实验室自主课题(2014TPL-T04)

作者简介:李玉如(1987-),男,河南郸城人,硕士生,主要从事机车被动安全技术方面的研究,(E-mail) 1284693231@qq.com;

柳忠彬(1972-),男,四川彭州人,教授,博士生,主要从事高速列车被动安全技术方面的研究,(E-mail)172232288@qq.com

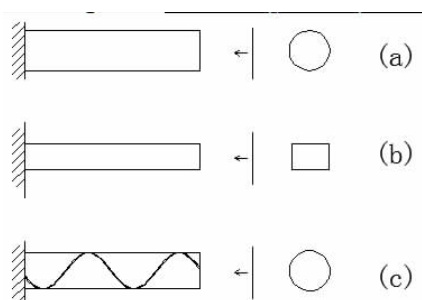


图1 不同截面薄壁管结构

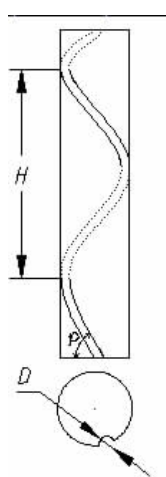


图2 预制螺旋槽薄壁管结构参数

击时,是通过塑性变形来吸收撞击动能以及缓冲撞击力来减少伤害的^[5]。因此要求吸能构件具有较高的比吸能,并且变形过程要平稳。一般地,评估吸能元件性能的主要指标有:

(1) 总吸能 E 和比吸能 η

整个塑性变形过程中吸收的能量 E 可通过载荷—位移历程曲线得到:

$$E = \int_{s_a}^{s_b} F ds = F_r (S_b - S_a) = F_r \Delta L \quad (1)$$

式(1)中, s_a 为起始变形点; s_b 为最终变形点; F 为瞬时撞击载荷; F_r 为平均撞击载荷; ΔL 为有效压溃距离。

比吸能是指单位质量的薄壁结构所吸收的能量^[6],是衡量材料和结构吸能能力的一个重要参数。比吸能可以表示为:

$$\eta = \frac{E}{m} = \frac{F_r \Delta L}{m} \quad (2)$$

式(2)中, m 为构件质量。

(2) 平均撞击力 F_r 和撞击力载荷 F_m

平均撞击力反映整个结构所载荷的水平,撞击力峰值反映初始过载或最大过载情况。

薄壁构件作为吸能元件在碰撞产生大变形过程中,

既要保证单位质量吸收尽可能多的撞击能量,又要保证其撞击力峰值尽可能的小,以减少碰撞产生的损失^[7-9]。

1.3 有限元仿真模型的建立

研究对象(图1中的3种薄壁管)的力学性能的参数如下:密度 $\rho = 7853 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E = 203 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.3$,屈服应力 $\sigma_s = 200 \text{ MPa}$,剪切应力 $\sigma_r = 76.9 \text{ MPa}$ 。

采用非线性有限元软件 ANSYS-LS/DYNA 建立有限元模型,单元类型选择 SHELL163,单元算法采用缺省值,沿薄壁壳的厚度方向采用5点积分,对材料的沙漏及体积粘性控制采用默认设置,由于薄壁管在碰撞过程中会发生表面折叠和自相接触现象,因此还需要定义接触控制,定义的接触类型为单面自动接触(ASSC),静摩擦系数与动摩擦系数均为0.2。碰撞冲击时间为50 ms。

2 仿真结果与分析

2.1 有限元模型的变形

不同截面薄壁管结构在30 ms时的塑性变形如图3所示。

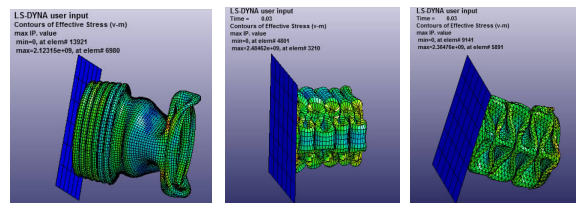


图3 有限元模型的塑性变形图

从图3中可以看出,3种薄壁管发生了明显的塑性变形。证明了吸能构件是通过有规律的塑性变形来吸收撞击动能的^[10-12]。

2.2 薄壁管横截面形状对碰撞吸能性能的对比分析

对3种不同的薄壁管进行碰撞分析,得出预制螺旋槽相比其他两种薄壁管结构具有更优异的吸能特性。撞击作用时间为30 ms,得到了3种薄壁管的压溃位移—时间曲线,如图4所示。图5为3种不同薄壁管的吸能—时间曲线,碰撞冲击的作用时间为50 ms。

从图4中可以看出,在相同的时间内圆形管的压溃位移最小,螺旋管(图中均以螺旋管代称预制螺旋槽薄壁管)的压溃位移与圆形管接近,稍大于圆形管的压溃位移,矩形管的压溃位移最大。

从图5中可以看出,三种不同的薄壁管在不同的时间段表现出不同的吸能效果。明显地,30 ms对于圆形管与螺旋管是一个的分界点,在30 ms以前的时间段内,圆形管吸收的能量最多,吸能效果最好,螺旋管

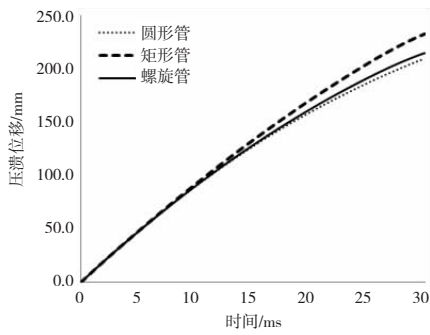


图 4 不同薄壁管压溃位移随时间的变化

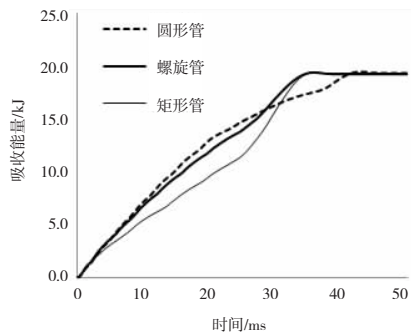


图 5 不同薄壁管的吸能随时间的变化曲线

其次,但与圆形管相差很小,吸能最少的是矩形管;在 30 ms 之后的时间段内,半圆形螺旋槽薄壁管出现吸能大于圆形管的情况,在 35 ms 时半圆形螺旋槽薄壁管与矩形管同时达到 20 kJ,而圆形管在 40 ms 时吸能才达到相同值。

结合图 3 与图 4 可以看出,在 30 ms 以前,圆形管和预制螺旋槽薄壁管的压溃位移比矩形管短,但吸收的能量比矩形管多,也就是矩形管的压溃位移最大,吸收的能量却最少。因此在较短的距离内,从吸收能量上来看,圆形管具有最好的效果,矩形管的吸能效果最差,预制螺旋槽薄壁管的吸能效果与圆形管接近。

由以上分析可知,三种薄壁管在不同的时间段具有不同的吸能效果,在 30 ms 以前圆形管与预制螺旋槽薄壁管的吸能效果更好,在 30 ms 以后预制螺旋槽薄壁管与矩形管吸能先达到最大值。通过三者的对比发现,预制螺旋槽薄壁管可以在更短的时间、距离内达到吸能最大值,在整体吸能方面较其他两种薄壁管具有明显的优势,因此预制螺旋槽薄壁管可以作为一种新型的薄壁管吸能元件。

3 预制螺旋槽薄壁管的结构参数对吸能性能的影响分析

影响预制螺旋槽薄壁管吸能性能的参数有以下 3 个:预制螺旋槽薄壁管的螺距、预制螺旋槽的直径以及

预制螺旋槽的螺旋角。分别对这 3 个参数对薄壁管的吸能性能的影响进行仿真研究。

3.1 预制螺旋槽薄壁管的螺距对碰撞吸能性能的影响

研究预制螺旋槽薄壁管的螺距对吸能效果的影响,取其螺距为 0.1~0.2 m,并进行刚性墙冲击,经分析,得出螺旋管的吸能—螺距曲线图,如图 6 所示。

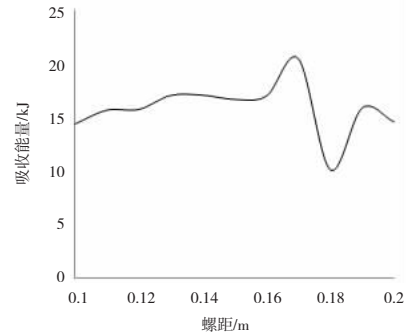


图 6 不同螺距的预制螺旋槽薄壁管吸能随时间的变化

由图 6 可看出,薄壁管在螺距为 0.17 m 时吸能达到最大值 20.5 kJ,螺距为 0.18 m 时吸能急速下降达到最小值 10.1 kJ。由此可知,预制螺旋槽薄壁管随着螺距的增加呈现出先增加后减少的变化规律。从仿真结果中可知,螺距为 0.17 m 时半薄壁管吸收的能量最多,吸能效果最好。

3.2 预制螺旋槽薄壁管的半圆形螺旋槽直径对碰撞吸能性能的影响

图 7 为吸能随半圆形螺旋槽直径的变化曲线图,冲击时间为 30 ms。

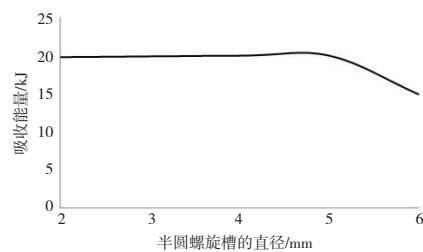


图 7 螺旋管的吸能随半圆形螺旋槽直径的变化

由图 7 可以看出,半圆形螺旋槽直径为 2~5 mm 时吸能几乎保持不变,但在 5~6 mm 时吸能发生急剧下降,对吸能效果影响极大,不利于螺旋管吸能效果的提升。

3.3 预制螺旋槽薄壁管的螺旋角对碰撞吸能性能的影响

通过预制螺旋槽薄壁管研究螺旋角对碰撞吸能性能的影响,分别取螺旋角为 0°、22.5°、45°进行碰撞吸

能分析。不同螺旋角的预制螺旋槽薄壁管吸收的能量随时间的变化如图8所示。

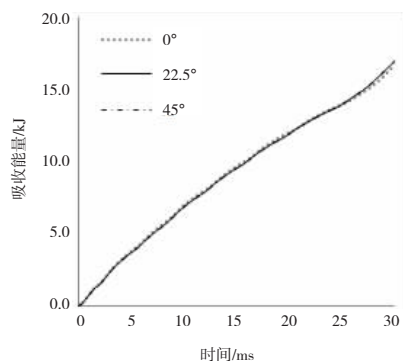


图8 不同螺旋角的预制螺旋槽薄壁管吸收能量随时间的变化

由图8可以看出,三种螺旋角所对应的吸收能量曲线几乎完全重合,由此可知预制螺旋槽薄壁管的螺旋角对吸能效果影响极小。

综合图6与图7可知,螺距是影响螺旋管吸能的一个重要因素,吸能随螺距呈现出先增加后减小的趋势,在螺距为0.17 m时吸能达到最大值;半圆形螺旋槽直径大于5 mm时会出现吸能效果锐减的情况,无法提升吸能效果。

4 结论

在保证横截面周长、长度与厚度均相等的前提下,对三种薄壁管轴向撞击性能进行分析,并探索预制螺旋槽薄壁管的螺距、螺旋角及半圆形螺旋槽直径对薄壁管的吸能性能的影响,得出如下结论:

(1)与矩形管和圆形管相比,预制螺旋槽薄壁管在轴向冲击的作用下,在更短的时间和压溃位移内的总吸能更多,吸能效果优势明显,可以作为一种新型的薄壁管吸能元件。

(2)三种不同的薄壁管在30 ms是一个临界点,在30 ms以前的时间段内,圆形管具有最好的吸能效果;在30 ms之后的时间段内,预制螺旋槽薄壁管具有最好的吸能效果。可由此设想提出一种薄壁管组合方案——圆形管与预制螺旋槽薄壁管不同长度的组合,使之发挥各自不同时间段的吸能优势。

(3)预制螺旋槽薄壁管的螺距、半圆形螺旋槽槽的直径和螺旋角对吸能的影响为:吸能随螺距呈现出先增加后减小的变化规律,在螺距为0.17 m时吸能达到最大值,吸能效果最优;半圆形螺旋槽的直径大于5 mm时

会出现吸能效果锐减的情况。无法提升吸能效果;预制螺旋槽薄壁管的螺旋角对吸能几乎没有产生影响。

综上所述,预制螺旋槽薄壁管比圆形管与矩形管具有更好的吸能效果,可作为一种新型的吸能元件。此外,本文还探讨了预制螺旋槽薄壁管的结构参数对吸能性能的影响,研究所得结果可为薄壁结构吸能元件的设计提供一定参考。

参考文献:

- [1] 贾宇,肖守纳.耐碰撞车体吸能装置的薄壁结构研究[J].铁道车辆,2005,43(5):6-11.
- [2] 刘中华,程秀生,杨海庆,等.薄壁直梁撞击时的变形及吸能特性[J].吉林大学学报:工学版,2006,36(1):25-30.
- [3] 荆友录.基于有限元法的矩形薄壁梁轴向耐撞性能优化[J].机械设计与制造,2009(12):36-38.
- [4] 崔杰,张卫刚,常伟波,等.基于双响应面模型的碰撞安全性稳健性优化设计[J].机械工程学报,2011,47(24):97-103.
- [5] 孟卓,孙秦.不同轴截面薄壁筒在轴向冲击下吸能特性研究[J].计算机仿真,2010,27(8):325-329.
- [6] Kim H S. New extrude multi-cell aluminum profile for maximum crash energy absorption and weight efficiency [J]. Thin-Walled Structure, 2002, 40: 311-327.
- [7] Lu Guoxing, Yu Tongxi. Energy absorption of structures and materials[M]. New York: Woodhead Publishing, 2003.
- [8] 许述财,邹猛,魏灿刚,等.仿竹结构薄壁管的轴向耐撞性分析及优化[J].清华大学学报:自然科学版,2014,54(3):299-304.
- [9] 谭丽辉,谭洪武,毛志强,等.具有不同诱导槽结构的薄壁圆管抗撞性优化[J].振动与冲击,2014,33(8):16-22.
- [10] 杨彬彬,赵修平.多胞金属管受径向冲击时的吸能特性[J].海军航空工程学院学报,2014,29(6):552-556.
- [11] 谭丽辉,徐涛,催晓梅,等.带有圆弧形凹槽金属薄壁圆管抗撞性优化设计[J].爆炸与冲击,2014,34(5):547-553.
- [12] 周伶俐,赵希禄.反转螺旋型薄壁结构碰撞吸能特性的优化设计[J].机械工程学报,2013,49(11):193-198.

Study on the Energy Absorption of Thin-walled Tube with Prefabrication Spiral Groove

LI Yuru¹, LIU Zhongbin^{1,2}, XIAO Shoune², WANG Huan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China;

2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to make the engine absorb more energy in the process of collision, and achieve the purpose of increasing the safety of the locomotive passive, the thin-walled tube with prefabrication spiral groove is designed. By means of nonlinear finite element software ANSYS / LS-DYNA, the numerical analysis of three different kinds of thin-walled structure is done, and the energy absorption properties of pitch, spiral angle and semicircle spiral groove diameter against thin-walled tube with prefabrication spiral groove are researched. The research shows that: (1) compared with the circular pipe and rectangular pipe, the semicircle helical thin wall pipe has better energy absorption performance, and can be used as a new type of thin wall pipe energy absorption component; (2) the pitch of the helical tube has a great effect on energy absorption, when it is 0.17 m, the energy absorption effect is the best; (3) when the diameter of the semicircle spiral groove is greater than 5 mm, the energy absorption performance will decline sharply; (4) spiral angle almost does not affect the energy absorption effect.

Key words: nonlinear; numerical analysis; spiral thin-walled tube; impact-resistant

(上接第 20 页)

- [5] 汪宏伟,欧阳光耀,赵建华,等.某型单缸机连杆结构强度仿真与试验研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2014(12):1343-1346.
- [6] 卢绪迪.某型柴油机连杆结构强度分析研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
- [7] 吴波,魏志明,刘长振,等.基于有限元的柴油机连杆双轴疲劳失效分析[J].内燃机工程,2014(4):1-5.

- [8] 叶修梓,陈超祥.SolidWorks Simulation 高级教程[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [9] 许广举,陈庆樟,李学智,等.柴油机连杆组合件的失效分析与优化设计[J].机械设计与制造,2014(8):28-30.
- [10] 杨志波,罗鹏飞,刘凯飞.基于有限元的发动机连杆优化设计[J].河南理工大学学报:自然科学版,2013(2):66-68.

The Finite Element Analysis and Structure Optimization Study of the Reciprocating Piston Air Compressor's Connecting Rod

LIU Xiaoxu, XIAO Di, PU Hu

(School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: Based on the SolidWorks software and design drawings of product, the crank connecting rod mechanism of the air compressor with two stages compressing, two cylinders and double actions is assembled and sculpted with 3D. Based on this, the dynamics simulation of the model is completed, and the load of connecting rod is got. Then the finite element analysis of connecting rod under pull and press is completed. According to the calculation results and based on the principle that the stress being small than the material allowable stress, the optimization design of connecting rod's geometry size is carried on. The weight of connecting rod is reduced by 12.5% after optimization, and the analysis results can be used as the reference to improve the design of the air compressor.

Key words: air compressor; connecting rod; finite element analysis; structure optimization