

文章编号: 1000-4750(2015)09-0216-06

复合材料螺旋弹簧刚度及其影响因素分析

熊志远, 宋瑞祥, 康钟绪, 刘 磊, 刘 强

(北京市劳动保护科学研究所, 国家环境保护城市噪声与振动控制工程技术中心, 北京 100054)

摘 要: 该研究制备了一种与中空圆截面簧丝轴线成 $\pm 45^\circ$ 铺层的新型复合材料圆柱螺旋压缩弹簧, 并对该弹簧进行准静态压缩试验。将纤维复合材料平板的剪切模量等效替代各向同性材料弹簧刚度表达式中的剪切模量, 从而理论导出该类复合材料弹簧的刚度表达式。针对该表达式分析影响弹簧刚度的各种因素及其影响程度。结果表明: 弹簧的刚度系数随着纤维弹性模量、纤维体积分数、簧丝外直径的增加而急剧增加, 随它们的下降而显著下降; 基体弹性模量与复合材料泊松比对弹簧刚度的影响十分微小; 簧丝内直径在一定范围内变化时对弹簧刚度的影响几乎可以不计, 但却能显著降低弹簧质量, 超出该范围后, 弹簧刚度随内直径增加而急剧下降; 刚度系数随弹簧有效圈数和弹簧圈平均直径的增加而剧烈下降, 随着它们的下降而急剧增加。

关键词: 复合材料; 圆柱螺旋弹簧; 刚度; 轻量化; 影响因素

中图分类号: TB33 **文献标志码:** A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.06.0576

ANALYSIS ON RIGIDITY OF COMPOSITE HELICAL SPRING AND ITS INFLUENCE FACTORS

XIONG Zhi-yuan, SONG Rui-xiang, KANG Zhong-xu, LIU Lei, LIU Qiang

(Beijing Municipal Institute of Labour Protection,

State Environmental Protection Engineering Center for City Noise and Vibration Control, Beijing 100054, China)

Abstract: A new type of composite cylinder helical spring is prepared in this study. The cross section of spring wire is annular. The spring wire is made from fiber composite plies and the fiber composite plies are alternately laid out along the directions of $\pm 45^\circ$ from the axis of spring wire. At the same time, a series of quasi-static compression tests are carried out on the composite spring specimens. The shear modulus in the stiffness expression of isotropic helical spring will be equivalently replaced by the shear modulus of the fiber composite plies with $\pm 45^\circ$ directions. Hence, the stiffness expression of the new type of composite spring can be obtained. Based on the stiffness expression, a variety of influence factors and their degree of influence on the rigidity of the new type of spring will be analyzed. The studied results show that the stiffness coefficient of composite spring obviously increases with the increase of the Young's modulus of fiber, the volume fraction of fiber, and the outer diameter of spring wire, and vice versa. The Young's modulus of matrix and the Poisson's ratio of composite material have a very small effect on the stiffness of composite spring. The inside diameter of spring wire almost has no effect on the stiffness of composite spring in a certain size range, but beyond the range, the stiffness coefficient significantly decreases with the increase of the inside diameter of spring wire. The stiffness coefficient of composite spring obviously decreases with the increase of the number of active coils and the average diameter

收稿日期: 2013-06-24; 修改日期: 2015-05-25

基金项目: 北京市科学技术研究院市级财政项目(PXM2014-178304-000005-00132840)

通讯作者: 熊志远(1973—), 男, 湖南人, 助理研究员, 博士, 主要从事振动力学、复合材料方面的研究(E-mail: txiongzhizhuan@126.com)。

作者简介: 宋瑞祥(1978—), 男, 河北任丘人, 助理研究员, 硕士, 主要从事振动与噪声控制方面的研究(E-mail: rxsonj@163.com);

康钟绪(1980—), 男, 河北深州人, 副研究员, 博士, 主要从事振动与噪声控制方面的研究(E-mail: kzx@bmlp.com);

刘 磊(1981—), 男, 河北石家庄人, 助理研究员, 硕士, 主要从事环境噪声与振动控制方面的研究(E-mail: soundliulei@163.com);

刘 强(1985—), 男, 河北唐山, 助理研究员, 硕士, 主要从事振动与噪声控制方面的研究(E-mail: liuqiang347@126.com)。

of the coil, and vice versa.

Key words: composite; cylinder helical spring; rigidity; lightweight; influence factors

随着私家车日益普及,汽车排放的污染物和温室气体也在成倍增加。同时,人类的生存环境随之日益恶化,如雾霾,因而实施交通低碳化是大势所趋^[1]。权威研究表明^[2]:汽车整備质量每减少 100 kg,百公里油耗可降低 0.3 L~0.6 L,二氧化碳排放可减少约 5 g/km。因而汽车零部件设计迫切要求在满足强度和安全性能的前提下,尽可能降低其重量,减少燃料消耗,降低排气污染,而采用轻质材料是实现汽车零部件轻量化设计的主要措施之一。

碳纤维复合材料具有轻质、高强度、耐酸碱等优异性能。用碳纤维复合材料制造汽车零部件(如:发动机机体^[3]、飞轮^[4]、制动缸^[5]、刹车片^[6]、板弹簧^[7]等)的研究已有报道,其中或已应用,或处于刚刚起步阶段。同样,用纤维复合材料制作汽车悬架圆柱螺旋弹簧也有一些探索性研究。

Kim 等^[8]将纺织技术与树脂传递模塑技术相结合制备出复合材料圆柱螺旋弹簧,并导出了弹性常数解析式。Delft^[9]基于有限元方法分析了玻璃纤维复合材料螺旋弹簧簧丝内部应力分布情况。Yildirim 等^[10]对碳纤维复合材料圆柱螺旋弹簧的振动问题进行了研究。隋刚等^[11]对玻璃纤维增强环氧树脂圆柱螺旋弹簧的弯曲力学性能进行了实验研究。Chiu 等^[12]通过实验研究表明:在碳纤维复合材料圆柱螺旋弹簧的簧丝中加入橡胶芯轴或在簧丝的外部紧裹一层编织物薄膜均能提高弹簧的弹性常数与极限载荷等力学性能。李勇圻等^[13]探讨了不同种类纤维及含量对复合材料螺旋弹簧的压缩与疲劳性能的影响。邱俊凯等^[14]探讨了不同种类纤维及含量对复合材料螺旋弹簧的侧向冲击与阻尼性能的影响。蔡念勋等^[15]与林建甫等^[16]分别研究了碳纤维编织复合材料螺旋弹簧的结构对弹簧常数的影响、编织角对疲劳性质的影响。Faruk^[17]研究了任意形状复合螺旋弹簧的动态行为。Azzam^[18]与Oussama^[19]分别对复合材料螺旋弹簧的最小质量与最大刚度进行了优化设计。

圆柱螺旋弹簧是各类弹簧中应用最为广泛的一类弹簧。复合材料圆柱螺旋弹簧具有普通金属弹簧所不具有的优势,但由于复合材料的各向异性及其复杂性,人们对复合材料螺旋弹簧的了解仍十分有限。这也在一定程度上阻碍了它们的推广应用,

因而,工程实际中应用极少。本文将重点探讨一种新型复合材料圆柱螺旋弹簧的刚度及影响刚度的各种因素。以期为复合材料螺旋弹簧的设计提供一定的理论依据,促进汽车零部件轻量化设计。

1 复合材料螺旋弹簧的制备与实验

原材料为 0.2 mm 厚碳纤维/环氧单向预浸料,其中增强体型号 M40B-3000,直径 5.2 μm ;基体为环氧 648。将按预算尺寸裁剪好的单向预浸料 $\pm 45^\circ$ 叠合,叠合的预浸料围绕预先准备好的纸制芯棒卷成一个致密圆柱体,将该圆柱体嵌入柱形内模侧面的螺旋形凹槽中,合上外模后,用螺栓将外模拧紧到适当位置,在高温高压下固化成型,脱模后,将弹簧浸泡在清水中,软化纸棒,并将纸屑清除。同时,去除毛刺,形成中空的、与簧丝轴线成 $\pm 45^\circ$ 铺层的复合材料压缩圆柱螺旋弹簧试样,见图 1。由于单向纤维复合材料簧丝(即纤维方向与簧丝轴线成 0°)的扭转剪切弹性模量较低,接近单向层合板的面内剪切模量,为了提高簧丝抗扭能力,纤维铺层必须采用 $\pm 45^\circ$ 方向。

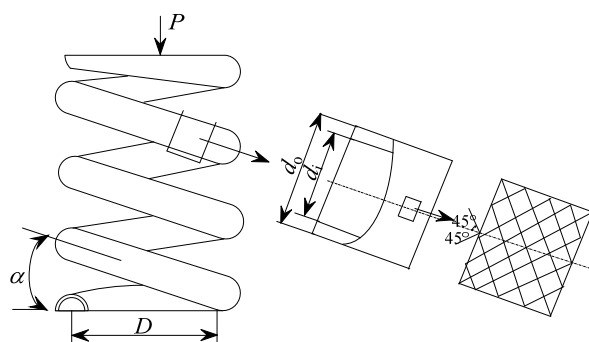


图 1 复合材料弹簧结构示意图

Fig.1 A sketch of the structure of composite spring

表 1 是弹簧试样的结构参数及主要力学性能参数。 $\alpha < 5^\circ$ 时,可近似认为簧丝横截面与弹簧轴线(亦即外载 P 方向)在同一平面内。另外,簧丝直径相比于弹簧圈平均直径小很多时($d_i/D=8\%$, $d_o/D=12\%$, 平均为 10% , 下标“i”与“o”分别是英文“inside”与“outside”的第一个字母),可略去簧丝曲率的影响。

室温下,通过 CSS-44020 电子万能实验机分别对三个相同的复合材料弹簧试样进行准静态压缩

试验,速率均为 3 mm/min。图 2 为其载荷-位移($P-\lambda$)曲线。

表 1 试样主要参数

Table 1 Main parameters of spring sample

名称	符号	数值
弹簧圈平均直径/mm	D	100
簧丝外径/mm	d_o	12
簧丝内直径/mm	d_i	8
有效圈数	N	4
螺旋角/(°)	α	4.0
纤维弹性模量/GPa	E_f	397
基体弹性模量/GPa	E_m	2.5
纤维体积分数	V_f	0.61
复合材料泊松比	$\mu_{12} (\mu_{21})$	0.2

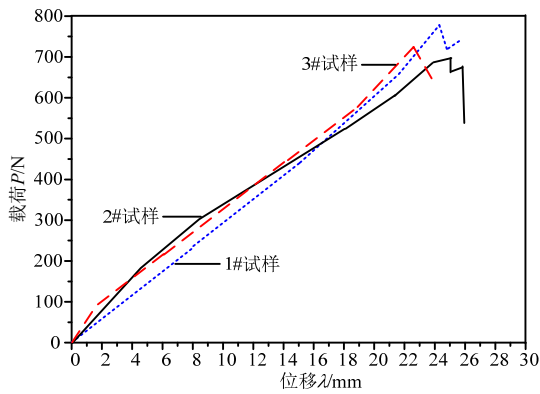


图 2 三试样的压缩载荷-位移实验曲线

Fig.2 Load-displacement curves of three spring specimens

2 复合材料螺旋弹簧的刚度

由于弹簧受压时,簧丝发生扭转变形,剪应力沿簧丝管壁均匀分布,因此,复合材料簧丝的扭转剪切模量与纤维复合材料平板剪切模量的理论分析是一样的,均与纤维含量、铺层方向有关^[20]。如果将各向同性螺旋弹簧刚度表达式中的剪切模量用纤维复合材料平板剪切模量等效替代,便可获得新型复合材料圆柱螺旋弹簧的刚度表达式。

单向板纵向弹性模量 E_L 为:

$$E_L = E_f V_f + E_m V_m \quad (1)$$

式中, V_m 为基体体积分数。

单向板横向弹性模量 E_T 为:

$$E_T = \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f V_m} \quad (2)$$

$\pm 45^\circ$ 正交板纤维方向弹性模量 E_1 (或 E_2) 为^[20]:

$$E_1 = E_2 = E_L V_L + E_T V_T = \frac{1}{2} \left(E_f V_f + E_m V_m + \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f V_m} \right) \quad (3)$$

式中, V_L 、 V_T 分别是沿两个纤维方向的铺层占总铺层的体积比, 这里 $V_L = V_T = 0.5$ 。

纤维与复合材料平板 x 轴成 θ 时, 纤维复合材料的剪切模量为:

$$G_{\theta} = \frac{G_{12}}{1 + \left[\frac{G_{12}(1 + \mu_{12})}{E_1} + \frac{G_{12}(1 + \mu_{21})}{E_2} - 1 \right] \sin^2 2\theta} \quad (4)$$

式中: G_{12} 是 0° 铺层平板相对 xy 轴的剪切模量; μ_{12} 与 μ_{21} 是复合材料的相应泊松比。

当 θ 是 $\pm 45^\circ$ 的正交纤维复合材料平板时, 则有 $E_1 = E_2$ 、 $\mu_{12} = \mu_{21}$, 式(4)可简化为^[20]:

$$G_c = \frac{E_1}{2(1 + \mu_{12})} \quad (5)$$

将式(3)代入式(5), 可得:

$$G_c = \frac{E_f V_f + E_m V_m + \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f V_m}}{4(1 + \mu_{12})} \quad (6)$$

对于由各向同性材料制成的簧丝为中空圆截面的圆柱螺旋弹簧, 其刚度表达式为:

$$\kappa = \frac{P}{\lambda} = \frac{G(d_o^4 - d_i^4)}{8nD^3} \quad (7)$$

将式(6)中的复合材料剪切模量 G_c 等效替代式(7)中的剪切模量 G , 获得新型复合材料圆柱螺旋弹簧刚度表达式如下:

$$\kappa = \frac{(d_o^4 - d_i^4) \left(E_f V_f + E_m V_m + \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f V_m} \right)}{32n(1 + \mu_{12})D^3} \quad (8)$$

在图 3 中, 实线是图 2 中三试样实验曲线的平均值, 近似为一条直线, 依其斜率, 测量并计算弹簧的弹性常数实验值约为 3.03×10^4 N/m。将表 1 的参数代入式(8), 计算结果为: $\kappa = 2.70 \times 10^4$ N/m, 图中虚线是依据理论结果而作出。从图 3 可以直观看出, 实线与虚线尽管有一定差距, 但整体上仍较为靠近。理论结果 2.70×10^4 N/m 比平均实验结果 3.03×10^4 N/m 略小, 二者的差值为 0.33×10^4 N/m, 差值与试验值相比, 结果为 10.8%, 可见理论值与实验值较为接近, 具有可比性。一般情况下, 计算值要稍大于实验值, 因为理论计算时通常将材料视为完美无缺的, 但实际情况是材料中总是由于各种原因而存在缺陷, 有缺陷的材料在外力作用下更容易发生变形。但是, 图 3 的实验值大于理论值, 其最有可能的原因是略去了中空簧丝(或 $\pm 45^\circ$ 正交层合板)的耦合效应, 从而导致理论值反而比实验值要

小, 保持约 10 %左右的系统误差。

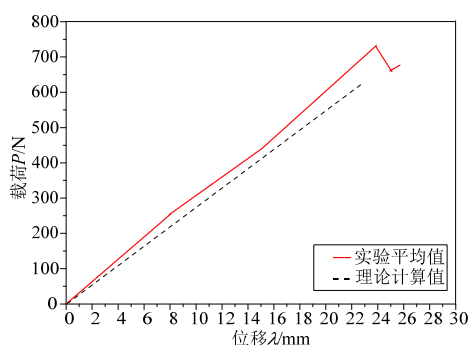


图3 实验平均值与理论值的比较

Fig.3 Comparison of experimental average value and theoretical value

纤维、基体的密度分别为 1.84 g/cm^3 、 1.25 g/cm^3 , 65 Mn 弹簧钢的密度与剪切模量分别为 7.81 g/cm^3 、 7.86 GPa 。若复合材料弹簧与普通 65Mn 钢弹簧具有相同质量, 且保持两弹簧内径不变, 钢弹簧外径经计算为 8.972 mm , 由式(7)可得钢弹簧刚度为 5855 N/m 。可见, 在同质量条件下, 复合材料弹簧刚度(27000 N/m)是普通钢弹簧刚度的 4.6 倍。当两弹簧的刚度均为 27000 N/m 时, 保持两弹簧内径不变, 由式(7)可得钢弹簧外径为 11.08 mm , 经计算, 可得复合材料弹簧与普通钢弹簧质量比为 7 : 25。

3 复合材料螺旋弹簧刚度影响因素

从式(8)还可以看出, 弹簧刚度与两类参数有关, 一是与复合材料有关的参数(E_f 、 E_m 、 V_f 或 V_m 、 μ_{12}), 一是与弹簧自身结构有关的参数(d_o 、 d_i 、 n 、 D), 它们共同影响着弹簧的刚度。但是光从该表达式只能初步定性知道刚度系数 κ 与 $(d_o^4 - d_i^4)$ 、 $\left(E_f V_f + E_m V_m + \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f V_m}\right)$ 成正比, 与 n 、 $(1 + \mu_{12})$ 、 D^3 成反比, 甚至从该式的因子 $\left(E_f V_f + E_m V_m + \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f V_m}\right)$ 中, 无法直接判断 κ 与 V_f (或 V_m)、 E_f 、 E_m 等的变化关系。

下面针对式(8)以及表 1 中的参数, 分别讨论只允许其中一个或两个参数变化, 其余参数均不变的情况下, 通过图形定量分析新型复合材料螺旋弹簧的刚度系数 κ 随各参数的变化而变化的情况。

3.1 κ 与 E_f 的关系

在图 4 中, 横坐标表示增强纤维的弹性模量, 单位 GPa; 纵坐标表示复合材料螺旋弹簧的刚度系

数 κ , 单位 10^4 N/m 。从式 (8) 的因子 $\left(E_f V_f + E_m V_m + \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f V_m}\right)$ 中, 我们能够看到 E_f 出现在三个位置, 加式、分子、分母中, 因此, 无法判断 κ 与 E_f 的变化趋势。可是, 从图 4 中, 我们能够了解到刚度系数 κ 随着纤维的弹性模量 E_f 的增加而近乎线性增加, 而且当 E_f 每增加 1 GPa 时, κ 增加约 68 N/m 。图 4 虚线所示, 当 E_f 取 397 GPa 时, 所对应的 κ 值约为 $2.7 \times 10^4 \text{ N/m}$, 图示值与上面的理论计算值相符, 表明图形绘制正确。

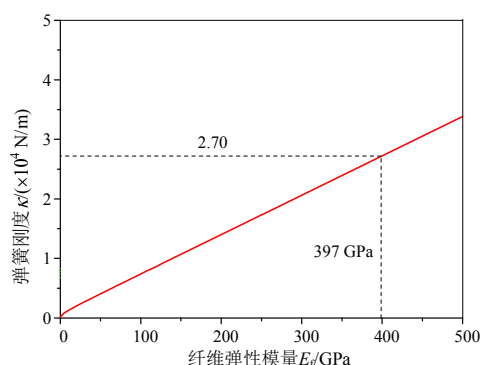


图4 κ 与 E_f 的变化关系

Fig.4 The relations of κ and E_f

3.2 κ 与 V_f 的关系

在图 5 中, 下横坐标是纤维体积分数 V_f , 坐标值从左到右由 0 均匀增加到 1, 上横坐标是基体的体积分数 V_m , 因为 $V_f + V_m = 1$, 所以基体的坐标值是从左到右由 1 均匀减少到 0。竖坐标是弹簧的刚度系数 κ 。图中的曲线基本上是一条直线, 表明随着纤维体积分数的增加(或基体体积分数的减少), 刚度系数 κ 几乎线性增加, 测得纤维体积分数每增加 0.1, κ 值就增加约 $0.44 \times 10^4 \text{ N/m}$ 。如图中虚线所示, 如果 $V_f = 0.61$, 所对应的 κ 值也就约为 $2.7 \times 10^4 \text{ N/m}$ 。

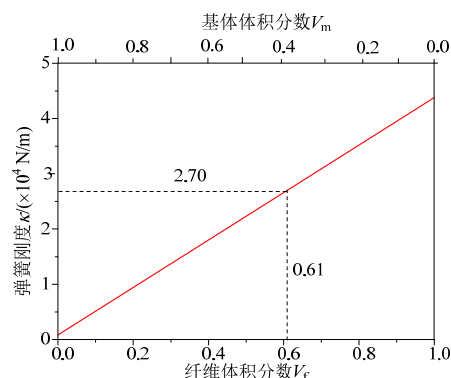


图5 κ 与 V_f 的变化关系

Fig.5 The relations of κ and V_f

3.3 κ 与 E_m 的关系

在本研究中,碳纤维的弹性模量为 397 GPa,而环氧树脂的弹性模量为 2.5 GPa,纤维弹性模量是树脂的 159 倍,考虑到基体模量值的实际变化范围,所以在图 6 中,其坐标值取 0~5 GPa。图中的曲线近似为一条直线,尽管较为平坦,但还能清晰地显示:随着基体弹性模量 E_m 的增加,弹簧的刚度系数 κ 也增加。但是,当我们测量 κ 值的增加率时,却发现 E_m 每增加 1 GPa 时, κ 值增加约 280 N/m,相比于 E_f 每增加 1 GPa 时 κ 增加约 68 N/m,要大 3.1 倍。尽管相应于基体, κ 的增加率较大,但是,基体弹性模量的实际取值范围是非常有限的,从而限制了弹簧刚度值的增高。所以,基体相比于纤维的弹性模量、纤维的体积分数对弹簧刚度的升高或降低的影响是非常有限的。

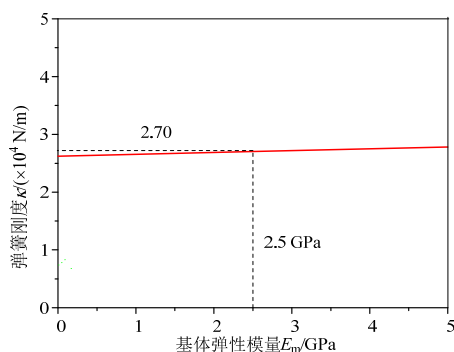


图 6 κ 与 E_m 的变化关系

Fig.6 The relations of κ and E_m

3.4 κ 与 μ_{12} 的关系

在图 7 中,横坐标表示复合材料平板的泊松比,它是两应变之比,为无量纲量;纵坐标表示弹簧刚度。从图中曲线可以看出,随着泊松比 μ_{12} (或 μ_{21}) 的增加, κ 略下降,曲线略微下凹,二者非线性关系不甚明显。当 μ_{12} 分别为 0、0.2、0.5 时, κ 值相对应地分别为 3.25×10^4 N/m、 2.70×10^4 N/m、 2.20×10^4 N/m。适当地选用不同泊松比的材料对弹

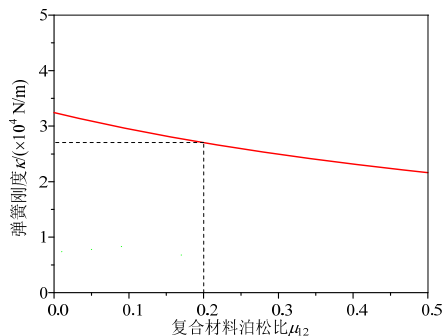


图 7 κ 与 μ_{12} 的关系

Fig.7 The relations of κ and μ_{12}

簧刚度具有一定的调节作用。

3.5 κ 与 d_o 、 d_i 的关系

在图 8 中,底面上两个相互垂直的坐标轴分别代表复合材料弹簧簧丝的内直径 d_i 和外直径 d_o ,单位均为 mm,纵坐标表示弹簧刚度系数 κ ,单位是 10^4 N/m。在正方形底面上,有一条对角线 $d_o = d_i$,对角线上所有的点代表簧丝的内、外径相等,实际上,该处表示弹簧不存在,刚度自然也就为零;只有在 $d_o > d_i$ 的等腰直角三角形区域内才呈现出曲面图形。从图 8 我们能够看到,假定簧丝的内直径 d_i 取定某一个具体的值时,弹簧的刚度系数 κ 将随簧丝的外直径 d_o 的增加而加速增加。如果用 $d_i = 8$ mm 的平面与曲面相交,那么,交线就是本研究中试样的 κ 与 d_o 的关系曲线。假定簧丝的外直径 d_o 取定某一个具体的值时,刚度系数 κ 随内直径 d_i 的增加,首先经历一个平缓下降区域,大约达到曲面上的粗实曲线之后才急剧下降。当 $d_o = 12$ mm 的平面与曲面相交,交线就是本研究中试样的 κ 与 d_i 的关系曲线。分析该曲面,我们既能够通过增大外直径提高弹簧的刚度,又能够通过适当选取内直径达到减轻产品重量的目的,适合为汽车零部件作轻量化设计时参考。

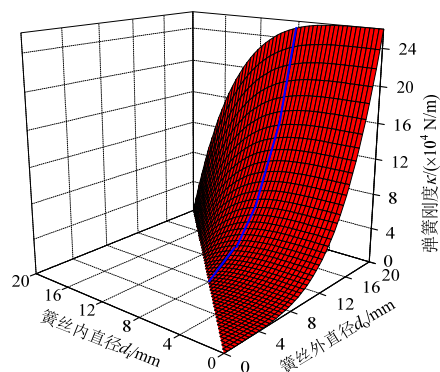


图 8 κ 与 d_o 、 d_i 的关系

Fig.8 The relations of κ and d_o , d_i

3.6 κ 与 n 、 D 的关系

在图 9 中,底面两个坐标轴分别是复合材料圆柱螺旋弹簧的有效圈数 n 和弹簧圈的平均直径 D /mm,纵坐标仍旧表示弹簧的刚度。从图中可以看到,当 n 一定时, κ 随 D 的增加而急剧降低。过 $n = 4$ 的平面与曲面的交线就是本研究中试样的 κ 与 D 的变化关系曲线。当 D 一定时, κ 随 n 的增加也降低,但比 D 对 κ 的影响要平和。过 $D = 100$ mm 的平面与曲面的交线就是本研究中试样的 κ 与 n 的变化关系曲线。增加圈数 n 和加大簧圈的平均直径

D , 都能显著降低弹簧的刚度, 当给弹簧施加的外部压力一定时, 都可以取得增加压缩位移的效果。另外, 从图 9 还可以看到, 当 D 与 n 都趋向于取得较小时, κ 将会非常高, 图中的显示只是理论计算结果, 实际上弹簧是不会达到如此高的刚度的, 在达到如此高的刚度之前弹簧早已发生了永久性变形。

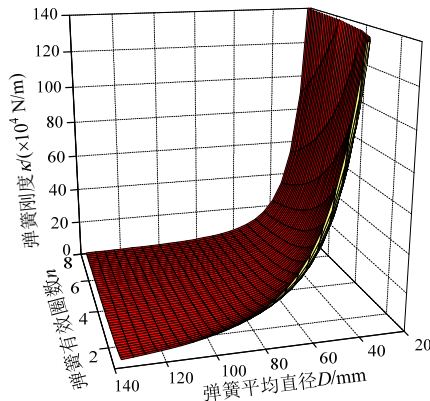


图 9 κ 与 n, D 的关系

Fig.9 The relations of κ and n, D

4 结论

本研究导出了一种新型复合材料圆柱螺旋弹簧的刚度表达式, 并基于该表达式, 进一步分析了刚度影响因素及其影响程度, 主要结论概括如下:

(1) 纤维弹性模量、纤维体积分数、簧丝外直径、有效圈数以及弹簧圈平均直径对新型复合材料弹簧的刚度有显著影响。刚度系数随着纤维杨氏模量、纤维体积分数、簧丝外直径的增加而明显地增加, 随着它们的下降而急剧下降; 而有效圈数、弹簧圈平均直径对刚度系数的影响正好与之相反。在实际许可条件下, 除了碳纤维弹性模量一般不变之外, 改变其中任意一个量, 都能显著改变刚度, 使产品能够轻易接近设计标准。

(2) 基体弹性模量、复合材料泊松比对刚度影响很小, 设计时可以忽略, 以减少设计变量数目。

(3) 簧丝内直径在一定范围内变化时, 几乎不影响弹簧刚度, 却能显著降低弹簧重量, 但超出这个范围之后, 随着内直径的增加, 弹簧刚度急剧下降。簧丝内直径是关键参数, 设计中需要找到一个平衡点, 内直径尽量大, 但刚度下降却要保持在一个很小的许可范围之内。

参考文献:

[1] 田伟. 低碳引领经济发展潮流[J]. 海峡科技与产业,

2010, 23(8): 39—41.

Tian Wei. Development of low-carbon economy will be a trend [J]. Technology and Industry Across the Straits, 2010, 23(8): 39—41. (in Chinese)

[2] Han H N, Clark J P. Lifetime costing of the body-in-white: steel vs. aluminum [J]. Journal of Management, 1995, 47(5): 22—28.

[3] 张力, 张恒. 聚合物复合材料发动机的研究进展[J]. 新技术新工业, 1999, 10(4): 434—436.

Zhang Li, Zhang Heng. Research development of polymer composite engine cylinder block [J]. New Technology & New Process, 1999, 10(4): 434—436. (in Chinese)

[4] Andrew C A, Charles E B. Optimal design of press-fitted filament wound composite flywheel rotors [J]. Composite Structures, 2006, 72(6): 47—57.

[5] 张力, 张恒. 复合材料汽车零部件设计制造及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 32—41.

Zhang Li, Zhang Heng. Design, manufacture and application of composite automotive components [M]. Beijing: Science Publishers, 2010: 32—41. (in Chinese)

[6] 刘枫, 王红侠, 费黄霞. 汽车制动器聚合物基摩擦材料的研究现状[J]. 材料开发与应用, 2008, 23(5): 89—93.

Liu Feng, Wang Hongxia, Fei Huangxia. State of arts on polymer matrix friction materials of automotive brake [J]. Development and Application of Materials, 2008, 23(5): 89—93. (in Chinese)

[7] Daugherty R L. Composite leaf spring in heavy truck applications [C]. Tokyo: Composite Materials, Proceeding of Japan-US Conference, 1986: 529—538.

[8] Kim B S, Byun J H, Kim B H. Structure-property relationships of composite coil springs processed by RTM [C]. Hotel Concord La Favette, ICCM-12, 1999: 335—341.

[9] Delft H S. The design and manufacture of a spring using composite materials [J]. Centre of Lightweight Structures, 2000, 25(7): 157—162.

[10] Yildirim V, Sancaktar E. Linear free vibration analysis of cross-ply laminated cylindrical helical springs [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000, 42(7): 1153—1169.

[11] 隋刚, 范勇峥, 仲伟虹, 等. 复合材料圆柱螺旋弹簧的制造与实验研究[J]. 复合材料学报, 2001, 18(1): 46—49.

Sui Gang, Fan Yongzheng, Zhong Weihong, et al. Manufacture and experiment study of composite cylinder rod spiral spring [J]. Acta Materiae Composite Sinica. 2001, 18(1): 46—49. (in Chinese)

[12] Chang Hsuan Chiu, Chung Li Hwan, Han Shuin Tsai, et al. An experimental investigation into the mechanical behaviors of helical composite springs [J]. Composite Structures, 2005, 77(8): 331—340.

(参考文献[13]—[20]转第 228 页)

- 145.
- [17] Green M A, Rowley C W, Haller G. Detection of Lagrangian coherent structures in three-dimensional turbulence [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 572(2): 111—120.
- [18] Tang J N, Tseng C C, Wang N F. Lagrangian-based investigation of multiphase flows by finite-time Lyapunov exponents [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2012, 28(3): 612—624.
- [19] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations [J]. *Month Weath*, 1963, 93(3): 99—165.
- [20] Kubota A, Kato H, Yamaguchi H. A new modeling of cavitating flows: A numerical study of unsteady cavitation on a hydrofoil section [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1992, 240(1): 59—96.
- [21] Zwart P J, Gerber A G, Belamri T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics [C]// Yokohama, Japan, Proceedings of International Conference on Multiphase Flow, 2004: Paper No.152.
- [22] 赵宇, 王国玉, 黄彪, 等. 非定常空化流动涡旋运动及其流体动力特性[J]. *力学学报*, 2014, 46(2): 191—200. Zhao Yu, Wang Guoyu, Huang Biao, et al. Study of turbulent vortex and hydraulic dynamics in transient sheet/cloud cavitating flows [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2014, 46(2): 191—200. (in Chinese)

(上接第 221 页)

- [13] 李勇圻, 邱长坝. 纤维种类对编织复合材料螺旋弹簧压缩与疲劳性能之影响[D]. 中国台湾: 逢甲大学, 2006. Li Yongqi, Qiu Changxun. The compression and fatigue effect of different fibers of braided composite spiral spring [D]. Taiwan, China: Fengjia University, 2006. (in Chinese)
- [14] 邱俊凯, 邱长坝. 纤维种类对编织复合材料螺旋弹簧冲击与阻尼性能之研究[D]. 中国台湾: 逢甲大学, 2006. Qiu Junkai, Qiu Changxun. Impact and damping properties of braided composite spiral spring with different fibers [D]. Taiwan, China: Fengjia University, 2006. (in Chinese)
- [15] 蔡念勋, 邱长坝. 碳纤维编织复合材料螺旋弹簧结构对弹簧常数之影响[D]. 中国台湾: 逢甲大学, 2003. Cai Nianxun, Qiu Changxun. The spring constant effect of different structure of carbon fiber braided composite coil spring [D]. Taiwan, China: Fengjia University, 2003. (in Chinese)
- [16] 林建甫, 邱长坝. 编织角度对复合材料螺旋弹簧疲劳性质研究[D]. 中国台湾: 逢甲大学, 2009. Lin Jianpu, Qiu Changxun. The study on fatigue properties of composite spiral spring with different braid angle [D]. Taiwan, China: Fengjia University, 2009. (in Chinese)
- [17] Faruk Frat Calm. Dynamic analysis of composite coil springs of arbitrary shape [J]. *Composites: Part B*, 2009, 40(3): 741—757.
- [18] Azzam B S. An optimum design for composite helical springs [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2010, 224(5): 347—353.
- [19] Oussama Zebdi, Rachid Boukhili, Franc Oistrochu. Optimum design of a composite helical spring by multi-criteria optimization [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2011, 28(11): 1713—1732.
- [20] 徐健, 周祝林. 纤维复合材料圆管的扭转剪切模量和弯曲剪切模量对比分析[J]. *玻璃钢*, 2001, 31(3): 1—6. Xu Jian, Zhou Zhulin. The comparative analysis of torsion shear modulus and bending shear modulus of fiber composite tube [J]. *Fiber Reinforced Plastics*, 2001, 31(3): 1—6. (in Chinese)