

双频振动系统下空心轴下料寿命模型*

化春键^{1,2}, 任皓靖^{1,2}, 陆云健^{1,2}

(1. 江南大学机械工程学院 无锡, 214122) (2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室 无锡, 214122)

摘要 针对复合频率振动下空心轴的下料研究,建立了下料寿命与空心轴几何参数及加载状态之间的关系。推导出空心轴的V形切口尖端处应力强度因子(stress intensity factor,简称SIF),基于已搭建的双频振动系统,建立了动力学模型。在双频振动下通过绘制一维多级应力谱,得到V形切口处所受等幅名义应力,由此得到复合频率振动下的空心轴V形切口处的SIF值。根据SIF可以叠加的原理和疲劳裂纹寿命公式,获得复合频率振动下空心轴下料寿命模型。对该模型进行了分析并设计试验,得到的试验结果与模型规律一致。

关键词 复合频率振动; 双频振动系统; 带V形切口的空心轴; 应力强度因子; 下料寿命模型

中图分类号 TH113.1

引言

复合频率振动低应力加载技术通过复合频率的叠加振动加载。低频加载振幅较大,形成疲劳裂纹;高频加载频率高,振幅较小,使疲劳裂纹持续扩展^[1-2],最终能够加快疲劳裂纹的扩展速率,提高断面质量。将此技术应用于下料,可实现低周精密可控性下料,解决了常规下料方法裂纹扩展速率低、断面质量差等问题^[3-4]。空心轴常用于轴类构件的轻量化设计,在工程实际中应用越来越普遍^[5]。基于文献[2]提出的复合频率振动低应力加载技术,笔者研究了复合频率振动下空心轴的下料寿命模型。复合频率振动低应力加载技术需要建立断裂过程的下料寿命模型,在小范围屈服的条件下,SIF是研究此技术的一个重要参数^[6-7]。

针对复合频率振动下预置V形切口的空心轴下料寿命、几何参数及加载状态之间的关系,笔者推导出复合频率振动下的带V形切口的空心轴下料裂纹尖端应力强度因子计算式,在此基础上,建立双频振动系统下带V形切口的空心轴下料寿命与其几何参数的模型,分析得到影响规律,并设计试验验证了该规律。

1 带V形切口的空心轴裂纹尖端的SIF值计算

如图1所示,带V形切口的空心轴的几何参数包括切口深度 h 、张角 α 、切口处曲率半径 ρ 、V形切

口处截面半径 a 、空心轴外径 b 、空心轴内径 d 以及切口间距 L 。

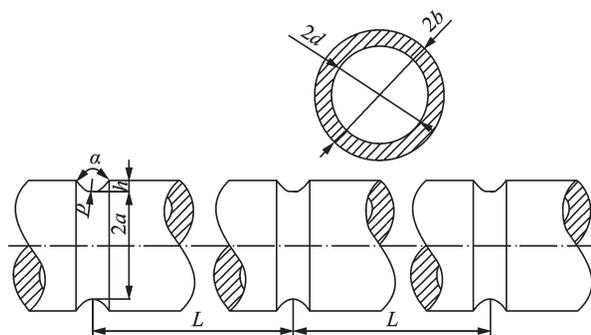


图1 带V形切口的空心轴几何参数示意图

Fig.1 Diagram of geometric parameters of V-groove hollow shaft

文献[8]分析了空心轴V形切口根部处于三相应力状态时,其应力场分布^[8]为

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left[\cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) - \frac{\rho}{r} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left[\cos \frac{\theta}{2} (1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) + \frac{\rho}{r} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \\ \tau_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left(\cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} - \frac{\rho}{r} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_z = 2\mu \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \\ \sigma_{xz} = 0 \\ \sigma_{yz} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

* 国家自然科学基金资助项目(61573168)

收稿日期:2019-01-23;修回日期:2019-02-28

其中: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为空心轴 V 形切口根部 x, y, z 方向上的应力; r, θ 为空心轴 V 形切口根部坐标系的极坐标; μ 为泊松比; τ 为剪切应力。

文献[9]根据 V 形切口根部的应力场分布公式, 推导其几何形状系数公式, 修正后为

$$G_a(b, d, h) = \sqrt{\rho/2h} + (G(b, d, h) - \sqrt{\rho/2h}) \cdot [1 - (\alpha/180^\circ)^{1+2.4\sqrt{\rho/h}}] \quad (2)$$

在本加载状态下, 空心轴主要为张开型裂纹状态。式(2)中, 无量纲值 $G(b, d, h)$ 为具有环形裂纹空心轴的修正系数, $G(b, d, h)$ 的取值^[10]如图2所示。图2中, 横坐标为空心轴 V 形切口深度与轴壁厚之比为 $h/(b-d)$, 其为无量纲值, 针对的是平均半径与壁厚之比不同的空心轴 $(b+d)/2(b-d)$ 。

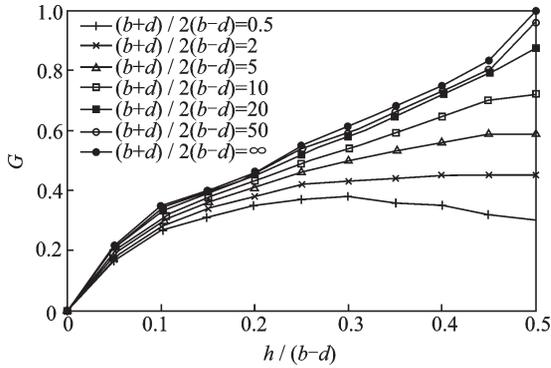


图2 具有环形裂纹空心轴修正系数取值

Fig.2 Correction coefficient value of hollow shaft with annular crack

空心轴 V 形切口处 SIF^[11]可以表示为

$$K = \sigma \sqrt{\pi h} G_a^{(b, d, h)} \quad (3)$$

其中: σ 为空心轴 V 形切口处所受名义应力值。

在空心轴 V 形切口处张开型裂纹状态下, 裂纹沿着 V 形切口所在截面垂直中性轴的方向扩展。

2 复合频率振动下空心轴 V 形切口尖端处 SIF 值计算

在复合频率振动下, 空心轴 V 形切口尖端处所受应力较为复杂, 无法直接代入式(3)。笔者通过应力谱的编制, 将其所受的复杂应力转化为多级等幅应力。本研究搭建的双频振动系统机械部分^[2]组成如图3所示。机械部分由2个变频电机分别给2对偏心块提供不同频率的转速。小变频电机的减速比为2:1, 大变频电机的减速比为1:1。一对小偏心块产生高频载荷, 一对大偏心块产生低频载荷。2对

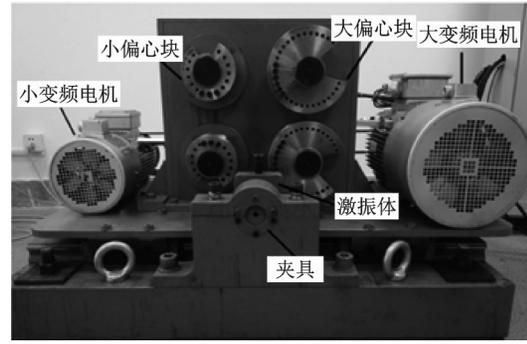


图3 双频振动系统机械部分

Fig.3 Dual-frequency vibration device mechanical part

上下对称排列的大、小偏心块通过激振体为空心轴提供复合频率振动的加载。图4为空心轴振动示意图, 空心轴一端在夹具上固定, 激振体带动空心轴另一端在导轨上做复合频率的振动。

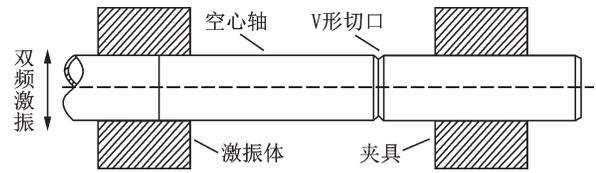


图4 空心轴振动示意图

Fig.4 Hollow shaft vibration diagram

空心轴受到单频振动时, 系统的动力学模型为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = 4m_1 \omega_1^2 d_1 \sin \omega_1 t \quad (4)$$

其中: m 为激振体的质量; m_1 为小偏心块的偏心质量; ω_1 为小偏心块转动的角速度; d_1 为小偏心块的偏心距; c 为系统阻尼; k 为系统刚度。

瞬态解在本系统中没有意义, 故不做讨论, 仅需要讨论稳态解。

振幅历程公式为

$$x = \frac{1}{\sqrt{(\lambda_1^2 - 1)^2 + (2\xi\lambda_1)^2}} \frac{4m_1 d_1 \omega_n^2}{k} \sin(2\pi f_1 t - \varphi_1) \quad (5)$$

其中: $\omega_n = \sqrt{k/m}$; $\xi = c/2\sqrt{mk}$; $\lambda_1 = \omega_n/\omega_1$; 且设 $f_1 = \omega_1/2\pi$ 。

笔者选择线性递减单频振动的加载方式, 单频振动下的线性递减变频曲线如图5所示。振幅检测部分采用加速度传感器, 配合多功能数据采集系统和压电传感器, 确保得到的振幅数据的准确性。在线性递减的单频加载方式下, 通过振幅检测部分得到铝合金空心轴的振幅历程图, 如图6所示。

为了得到幅频曲线, 在 Matlab 中将振幅历程图进行傅里叶变换, 得到幅频曲线如图7所示。

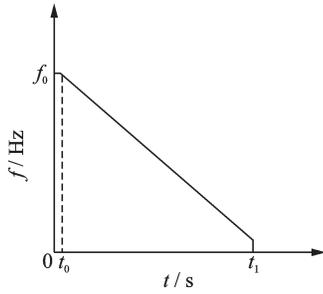


图 5 单频振动下的线性递减变频曲线

Fig.5 Linear decreasing frequency conversion curve under single frequency vibration

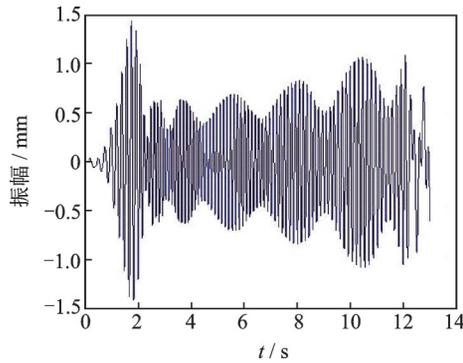


图 6 单频振动下铝合金空心轴的振幅历程图

Fig.6 Amplitude history diagram of aluminum alloy hollow shaft under single frequency vibration

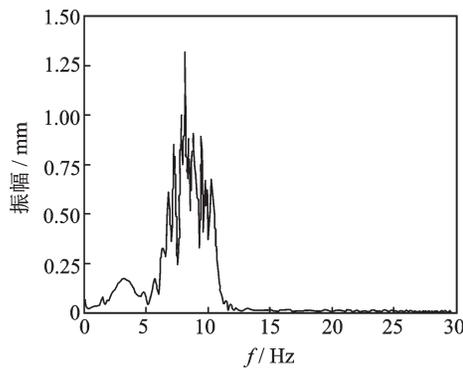


图 7 振幅历程图的傅里叶变换幅频曲线

Fig.7 Fourier transform of amplitude history diagram

由于本研究振幅的均值波动不大,因而采用波动中心法来编制适用于本研究系统的一维振幅谱。为了便于统计,采用各级振幅组中值来表示其振幅幅值,并用小波处理滤掉不产生疲劳损伤的次要振幅。本研究小波处理的阈值值设为 0.75 mm,得到双频振动系统一维多级振幅谱如表 1 所示。

根据材料力学相关知识,空心轴 V 形切口尖端处所受名义应力关系式为

$$\sigma = \frac{4M}{\pi a^3} = \frac{4}{\pi a^3} \frac{2EIx}{l^3} = \frac{8EIx}{\pi(al)^3} = \phi x \quad (6)$$

其中: M 为空心轴所受力矩; l 为受力力臂的长度,与

表 1 双频振动系统一维多级振幅谱

Tab.1 One-dimensional multi-level stress spectrum of dual-frequency vibration system

级数	幅值/mm	组频次	累积组频次
1	1.38	8.5	8.5
2	1.00	7.1	15.6
3	0.87	9.1	24.7
4	0.82	9.8	34.5
5	0.78	7.0	41.5

本研究设备下空心轴的加载位置有关; EI 为截面的抗弯刚度; x 为空心轴的振幅,即双频振动系统的振幅。

式(6)中,令 $\phi = 8EI/\pi(al)^3$,将一维多级振幅谱转化为 V 形切口尖端处所受一维多级应力谱。

V 形切口尖端处所受等效的等幅名义应力公式^[12]为

$$\Delta \bar{\sigma} = \sum (\Delta \sigma_g^2 p_g)^{1/2} \quad (7)$$

其中: $\Delta \bar{\sigma}$ 为 V 形切口处所受等效名义应力幅值; $\Delta \sigma_g$ 为第 g 级应力谱的应力幅值; p_g 为第 g 级应力谱出现的概率,即组频次与累积组频次之比。

将上述方法推广到复合频率振动的加载方式,以双频为例,当棒料受到双频振动时,根据系统的动力学模型,双频振动下的振幅历程公式为

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{1}{\sqrt{(\lambda_1^2 - 1)^2 + (2\xi\lambda_1)^2}} \frac{4m_1 d_1 \omega_n^2}{k} \\ \theta_2 = \frac{1}{\sqrt{(\lambda_2^2 - 1)^2 + (2\xi\lambda_2)^2}} \frac{4m_2 d_2 \omega_n^2}{k} \\ x = \theta_1 \sin(2\pi f_1 t - \varphi_1) + \theta_2 \sin(2\pi f_2 t - \varphi_2) \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\omega_n = \sqrt{k/m}$; $\xi = c/2\sqrt{mk}$; $\lambda_1 = \omega_n/\omega_1$; $\lambda_2 = \omega_n/\omega_2$; $f_1 = \omega_1/2\pi$; $f_2 = \omega_2/2\pi$; m_1, m_2 为大、小偏心块单片的偏心质量; ω_1, ω_2 为大、小偏心块转动的角速度; d_1, d_2 为大、小偏心块的偏心距。

双频振动加载选择线性递减的低频振动,并叠加恒频的高频振动加载方式,双频振动下的叠加变频曲线如图 8 所示。通过振幅检测设备,得到双频振动下铝合金空心轴的振幅历程,如图 9 所示。

同理,将振幅历程图转化为一维多级振幅谱,再将一维多级振幅谱转化为 V 形切口处所受一维多级应力谱,最后得到双频振动下 V 形切口处所受等效的等幅名义应力。当同一种类别的裂纹处于若干个载荷共同作用的情况下,可以先求解得到各个载荷单独作用下的 SIF,将各个载荷作用下的 SIF 值

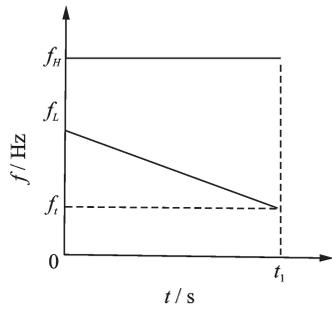


图8 双频振动下的叠加变频曲线

Fig.8 Superposition conversion frequency curve under dual frequency vibration

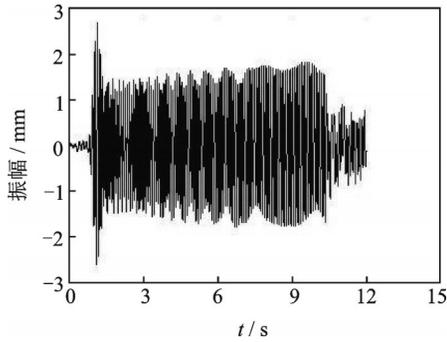


图9 双频振动下铝合金空心轴的振幅历程

Fig.9 Amplitude history diagram of aluminum alloy hollow shaft under dual frequency vibration

进行相互叠加^[13],获得多种类型载荷共同作用下的SIF值。复合频率振动下空心轴的V形切口处SIF值计算公式为

$$\Delta K^{\text{equ}} = \sum_{j=1}^m \Delta K_j = \sqrt{\pi h} G_{\alpha}^{(b,d,h)} \sum_{j=1}^m \Delta \bar{\sigma}_j \quad (9)$$

3 复合频率振动下带V形切口的空心轴下料寿命模型

笔者选用基于低周疲劳行为和I型裂纹尖端RKE(Rice-Kujawski-Ellyin)奇异场,并考虑近门槛区短裂纹行为的疲劳裂纹寿命公式^[14]为

$$\ln N_T = \int_{h_0}^{h_c} \frac{4\pi(n'+1)\sigma_c^2}{\Delta K^2 - \Delta K_{\text{th}}^2} dh \quad (10)$$

其中: h_0 为初始裂纹尺寸; h_c 为临界裂纹尺寸; ΔK_{th} 为裂纹扩展门槛值; n' 为应变硬化指数; σ_c 为屈服应力。

将式(3)代入式(10),积分式采用多段插值型数值积分。由于插值型数值积分的误差来源于对原式的二次求导,因而划分段数足够多,误差可以忽略不计。结合式(2)和式(9),得到基于双频振动系统复合频率振动下的下料寿命模型为

$$\left\{ \begin{aligned} \ln N_T &= \sum_{i=0}^n \frac{h_{i+1} - h_i}{2} \left[\frac{4\pi(n'+1)\sigma_c^2}{\Delta K_i^{\text{equ}2} - \Delta K_{\text{th}}^2} + \frac{4\pi(n'+1)\sigma_c^2}{\Delta K_{i+1}^{\text{equ}2} - \Delta K_{\text{th}}^2} \right] \\ \Delta K_i^{\text{equ}} &= \sum_{j=1}^m \Delta K_j = \sum_{j=1}^m \Delta \bar{\sigma}_j Y \\ Y &= \sqrt{\frac{\pi\rho}{2}} + \sqrt{\pi h_i} \left(G(b, d, h_i) - \sqrt{\frac{\rho}{2h_i}} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{\alpha}{180^\circ} \right)^{1+2.4\sqrt{\rho/h_i}} \right] \end{aligned} \right. \quad (11)$$

其中: ΔK_i^{equ} 为V形切口尖端处所受第*i*段等效应力强度因子幅值; Y 为与加载大小无关的无量纲值。

根据K判据^[15],当 $\Delta K = \Delta K_{\text{IC}}$,得到下料寿命模型中的断裂临界裂纹尺寸(积分上限) h_c 为

$$h_c = \Delta K_{\text{IC}}^2 / \pi G_{\alpha}^{(a/b)} \left(\sum_{i=1}^m \Delta \bar{\sigma}_i \right)^2 \quad (12)$$

其中: ΔK_{IC} 为断裂韧度;式(11)中第*n*+1段的裂纹深度 h_{n+1} 即为式(12)中临界裂纹尺寸 h_c 。

式(11)建立了复合频率振动下下料寿命与带V形切口空心轴的几何参数以及加载状态之间的模型。可以看出:下料寿命与复合频率振动下V形切口尖端处所受等效名义应力幅值 $\sum_{j=1}^m \Delta K_j$ 有关,复合频率振动下V形切口尖端处所受等效名义应力是各个单一频率振动下V形切口尖端处所受等效名义应力的累加,由于累加后的数值一定会更大,因而复合频率的振动加载方式会大幅缩短下料寿命,加速裂纹的扩展。由于空心轴的弹性模量 E 与V形切口尖端处所受名义应力正相关,因而模型中弹性模量 E 与下料寿命也是正相关。

在模型中, $b-d$ 为空心轴壁厚,这里 b 取12 mm,随着 d 的减小,空心轴壁厚会增大,结合图2, $G(b, d, h_i)$ 会减小,因而下料寿命会增大。V形切口张角 α 越小,下料寿命越短,这对整个模型的数值结果影响极小。由于V形槽的张角对槽底应力集中的影响程度很小,故一般V形槽夹角选取 90° ,以适应棒料两端车削 45° 倒角的需求^[16]。 h 对应V形切口深度,以 $b=6$ mm, $d=3.6$ mm, $\rho=0.2$ mm, $\alpha=90^\circ$ 的空心轴为例,分析了此因素对模型的影响,此时空心轴平均半径与壁厚之比为2,得到V形切口深度对模型影响关系,如图10所示。

由图10可知,预置的切口深度越深, Y 值会越大,因而下料寿命越短。为了分析切口处曲率半径 ρ 对整个模型的影响,同样以 $b=6$ mm, $d=3.6$ mm, $h=1$ mm, $\alpha=90^\circ$ 的空心轴为例,得到V形切口处曲率半径对模型的影响关系,如图11所示。

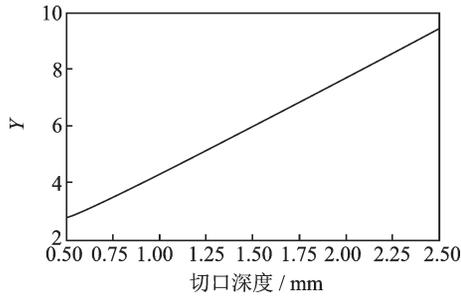


图 10 V形切口深度对模型影响关系

Fig.10 Relation chart of effect of V-shaped incision depth on model

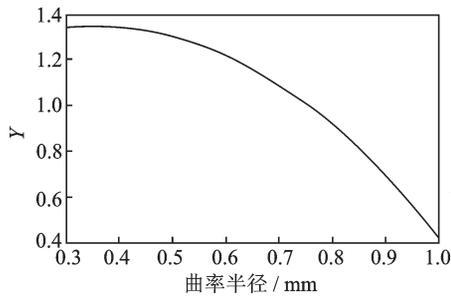


图 11 V形切口处曲率半径对模型影响关系

Fig.11 Relation chart of effect of curvature radius at the V-shaped incision on model

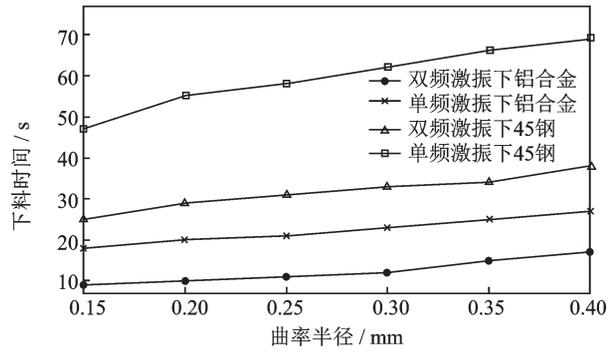
由图 11 可知,随着切口处曲率半径增大, Y 值减少,因而下料寿命变长。 $h_{n+1}(h_c)$ 为临界裂纹尺寸,临界裂纹尺寸受断裂韧度 ΔK_{IC} 、加载大小以及带 V 形切口空心轴的几何形状修正系数 $G_a^{(a/b)}$ 影响,随着偏心块级数增大,会使下料时临界裂纹尺寸提前到来。

4 试 验

为了验证寿命模型规律的正确性,笔者设计了双频振动下料试验。综合考虑低应力加载技术^[17]和双频振动系统的实际情况,选用 45 钢和铝合金空心轴, b 取 6 mm。通过双频振动系统的偏心块级数,确立双频振动加载大小,偏心块级数根据裂纹萌生条件确定^[3]。

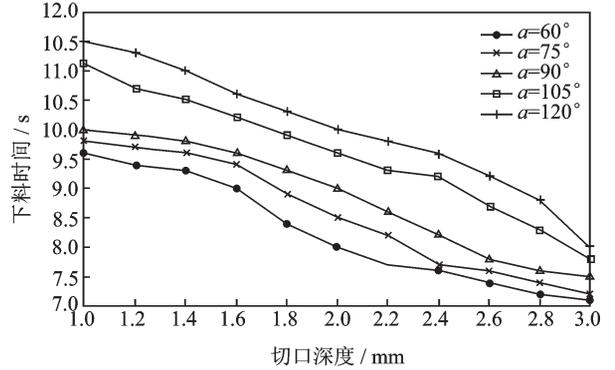
对不同几何参数的带 V 形槽空心轴进行振动加载试验。由于试验中频率控制曲线不变,因而下料寿命可近似看作下料时间。通过试验得到几何参数不同的空心轴下料时间,如图 12 所示。

从图 12(a)可以看出,对于 45 钢和铝合金空心轴,相比于单频振动加载方式,双频振动下的下料时间会大幅减少,不论单频还是双频的加载方式,45 钢空心轴下料时间都大约为铝合金的 3 倍。从图 12(b)可以看出,其他几何参数不变,随着空心轴 V 形切口深度的增加,下料时间会逐渐减少,且对于 V 形切口处张角分别为 $60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ$ 和 120° 的空心轴来



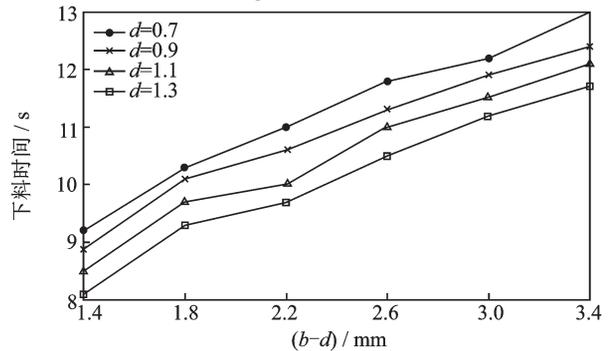
(a) 加载方式与不同材料对下料时间的影响

(a) Effect of loading mode and different material on cutting time



(b) V形切口深度与V形切口处张角对下料时间的影响

(b) Effect of Depth of V-shaped incision and angle of V-shaped incision on cutting time



(c) 空心轴壁厚与空心轴内径对下料时间的影响

(c) Effect of thickness and inner diameter of hollow shaft on cutting time

图 12 几何参数不同的空心轴下料时间

Fig.12 Cutting time of hollow shaft with different parameters

说,下料时间会随着 V 形切口处张角的增大而延长。从图 12(c)可以看出,下料时间与空心轴的壁厚和内径也有关系,其他几何参数不变,当空心轴壁厚分别设为 1.4, 1.8, 2.2, 2.6, 3.0 和 3.4 mm 时,下料时间与空心轴壁厚为正相关的关系。综上所述,上述试验结果与笔者下料寿命模型分析得到的规律一致。

5 结 论

1) 将复合频率振动下空心轴的 V 形切口尖端处所受的复杂应力转化为一维多级应力谱,通过式(7)转化为 V 形切口尖端处所受等效的等幅名义应力。

2) 通过复合频率振动下V形切口尖端处SIF值与空心轴几何参数之间关系,建立复合频率振动下的下料寿命模型,分析该模型规律并设计试验,得到的试验结果与模型规律一致。

参 考 文 献

- [1] 化春键,袁浩.一种新型高低频复合振动装置的研究[J].机械设计与制造工程,2016,45(2):90-94.
HUA Chunjian, YUAN Hao. Study on a new type of high and low frequency composite vibration device[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2016, 45(2): 90-94. (in Chinese)
- [2] 化春键,陆云健,袁浩.新型双变频振动结构及其振动特性研究[J].现代制造工程,2018(6):1-5,11.
HUA Chunjian, LU Yunjian, YUAN Hao. Research on new double-frequency vibration structure and its vibration characteristics[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018(6): 1-5, 11. (in Chinese)
- [3] 张立军,赵永瑞,赵升吨.预制棒料V型槽尖端裂纹实验装置的改进[J].制造技术与机床,2012(10):128-130.
ZHANG Lijun, ZHAO Yongrui, ZHAO Shengdun. Improvement of experimental device for prefabricating V-shaped notch tip crack [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2012(10): 128-130. (in Chinese)
- [4] 赵仁峰,赵升吨,钟斌,等.低周疲劳精密下料新工艺及试验研究[J].机械工程学报,2012,48(24):38-43.
ZHAO Renfeng, ZHAO Shengdun, ZHONG Bin, et al. Experimental study on new low cycle fatigue precision cropping process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(24): 38-43. (in Chinese)
- [5] 杨程,路星星,孙跃,等.空心轴成形技术研究现状[J].锻压技术,2018,43(1):1-8.
YANG Cheng, LU Xingxing, SUN Yue, et al. Research status of hollow shaft forming technology [J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43(1): 1-8. (in Chinese)
- [6] 宫经全,张少钦,李禾,等.基于相互作用积分法的应力强度因子计算[J].南昌航空大学学报(自然科学版),2015,29(1):42-48.
GONG Jingquan, ZHANG Shaoqin, LI He, et al. Computation of the stress intensity factor based on the interaction integral method [J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2015, 29(1): 42-48. (in Chinese)
- [7] 贾旭,胡绪腾,宋迎东.基于三维裂纹尖端应力场的应力强度因子计算方法[J].航空动力学报,2016,31(6):1417-1426.
JIA Xu, HU Xuteng, SONG Yingdong. Calculation method of stress intensity factor based on the three-dimensional stress field at the crack tip [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(6): 1417-1426. (in Chinese)
- [8] 赵仁峰,郑建明,王权岱,等.不同类型缺口对管材精密下料过程中微裂纹萌生的影响[J].塑性工程学报,2018,25(1):276-282.
ZHAO Renfeng, ZHENG Jianming, WANG Quandai, et al. Influence of different type notches on micro cracks initiation in the tubes precision blanking process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(1): 276-282. (in Chinese)
- [9] 化春键,陆云健,袁浩.双频振动载荷下带V型槽铝合金棒料的断裂行为[J].中国机械工程,2017,28(14):1753-1758.
HUA Chunjian, LU Yunjian, YUAN Hao. Fracture behavior of aluminum alloy bars with V-shape notches under dual frequency vibration loads [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(14): 1753-1758. (in Chinese)
- [10] 中国航空研究院.应力强度因子手册[M].北京:科学出版社,1993:404-407.
- [11] MADIA M, BERETTA S, SCHÖDEL M, et al. Stress intensity factor solutions for cracks in railway axles [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 78(5): 1100-1103.
- [12] 张晓斌.中国标准动车组轮轴载荷谱与应力谱的试验研究[D].北京:北京交通大学,2018.
- [13] 程靳,赵树山.断裂力学[M].北京:科学出版社,2006:88-93.
- [14] 王玉光,吴圣川,李忠文,等.一种基于低周疲劳特性的含缺陷车轴剩余寿命预测模型[J].铁道学报,2018,40(11):27-32.
WANG Yuguang, WU Shengchuan, LI Zhongwen, et al. A low cycle fatigue characteristics based residual life prediction model for railway axles with flaws [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(11): 27-32. (in Chinese)
- [15] 化春键,赵升吨,宋涛,等.V型槽几何参数对裂纹萌生的影响规律[J].西安交通大学学报,2004(9):947-950.
HUA Chunjian, ZHAO Shengdun, SONG Tao, et al. Influence of the geometric parameters of the V shaped groove on initialization of ideal crack in precision cropping [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004(9): 947-950. (in Chinese)
- [16] 李瑞霞,赵力,齐双强,等.轨道车辆车轴强度及疲劳裂纹扩展寿命分析[J].机车电传动,2013(2):74-77,84.
LI Ruixia, ZHAO Li, QI Shuangqiang, et al. Analysis of rail vehicle axle strength and fatigue crack propagation life [J]. Electric Drive for Locomotives, 2013(2): 74-77, 84. (in Chinese)
- [17] ZHANG L J, ZHAO S D, LEI J, et al. Investigation on the bar clamping position of a new type of precision cropping system with variable frequency vibration [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(7): 1125-1131.



第一作者简介:化春键,男,1975年6月生,博士、副教授。主要研究方向为金属棒料在振动载荷下的断裂机理研究、机器视觉应用技术研究与机电一体化。曾发表《双频振动载荷下带V型槽铝合金棒料的断裂行为》(《中国机械工程》2017年第28卷第14期)等论文。
E-mail: 277795559@qq.com