

文章编号: 1001-4888(2017)06-0839-09

金属圆管抗卷曲劈裂变形吸能特性研究^{*}

代连朋, 潘一山, 王爱文

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 为研究小尺寸、高吸能比率的安全防护吸能元件及其吸能特性, 试验对比研究了壁厚 3mm 与 4mm、内径均为 26mm 的两种类型金属圆管在抗卷曲轴向劈裂过程中的变形及能量吸收特性, 并采用能量法分析了其吸能原理。研究表明: 试件劈裂吸能过程可分为“波动载荷”吸能阶段和“恒定载荷”吸能阶段, 恒定载荷值达 71.9~143.1kN, 相应的恒定载荷吸能量达 4.74~7.61kJ, 劈裂作用全程吸能总量达到 5.68~11.24kJ; 试件轴向劈裂变形稳定, 形成放射状“螺旋式”扩展管条或“非螺旋式”扩展管条; 试件劈裂过程主要是通过扩径塑性变形、管壁撕裂、管条摩擦、管条塑性展平耗散能量; 试件恒定载荷值及相应吸能量的试验结果与理论分析结果相符合。由此, 抗卷曲条件下金属圆管劈裂过程可实现恒定载荷的高效吸能作用。

关键词: 金属圆管; 轴向劈裂; 抑制卷曲; 恒定载荷; 吸能特性; 安全防护

中图分类号: X936

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-191

0 引言

吸能安全防护结构, 作为一种动力碰撞过程中的有效动能耗散装置, 广泛应用于航天、汽车、高速列车等交通工具中的高效耗能系统, 用以保障人身安全, 或保护其他重要结构, 大部分吸能安全防护装置是基于延性金属材料或结构的有效塑性变形或韧性撕裂实现吸收(耗散)动能的^[1,2]。

近年来, 延性金属管件因其良好的塑性变形、韧性撕裂耗能特性而受到国内外学者的广泛关注。目前广泛采用的金属管件吸能结构有三种: 一种是通过轴向压溃变形吸能^[3-6], 一种是通过薄壁金属管扩径塑性变形吸能^[7-9], 另外一种是通过薄壁金属管撕裂变形吸能^[10-14]。其中, 金属圆管的轴向撕裂卷曲以其较长吸能行程和恒定载荷优势在众多吸能结构中脱颖而出。Huang 等^[15]研究了铝和低碳钢两种材质的金属圆管的撕裂卷曲性能, 发现其撕裂卷曲模式稳定, 并采用理论方法预测了其扩展裂纹数目与卷曲半径大小的关系; Reddy 等^[16]主要研究了金属圆管在凹面扩径底座上的撕裂卷曲性能, 采用试验方法测试了其吸能能力, 试件吸能行程可达管长的 90% 以上; Atkins^[17]研究了延性金属圆管轴向撕裂裂纹数目的特征值现象, 研究发现劈裂裂纹数目取决于管件直径、金属强韧比等参数; 王蕊等^[18]研究了壁厚对金属圆管撕裂卷曲耗能的影响, 金属圆管壁厚对撕裂能和塑性弯曲变形能在总能耗中所占比例的影响较明显。以上研究在一定程度上揭示了金属圆管轴向撕裂卷曲耗能原理及影响因素, 但研究对象集中于内径 40~55mm、壁厚 0.4~3mm 薄壁圆管的撕裂自由卷曲行为, 恒定载荷水平处于 2.5~40kN, 吸能效率较低, 尚未通过优选试验管件参数等方式提升吸能效率、载荷水平及其平稳性。

本文在金属圆管轴向劈裂自由卷曲耗能特性的研究成果基础上, 采用试验方法研究了金属圆管抗卷曲轴向劈裂变形及吸能特性, 并采用能量法分析了其吸能原理。试验采用内径 26mm、壁厚 3mm 及

^{*} 收稿日期: 2016-09-27; 修回日期: 2017-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(51404131); 辽宁省煤炭资源安全开采与洁净利用工程研究中心开放基金(LNTU15KF11)

通讯作者: 潘一山(1964-), 男, 博士, 教授, 博导。主要从事固体力学和岩石力学的教学与研究。Email: panyish_cn@sina.com

4mm的小口径、厚壁金属圆管试件,理论分析得到恒定载荷与能量吸收率的解析表达式。试验保证了试件良好的吸能性能,同时降低了其结构尺寸、提高了吸能作用中恒定载荷水平,为小尺寸、高吸能比率元件的设计及其在吸能安全防护系统中的推广应用提供了试验参考和理论依据。

1 金属圆管抗卷曲劈裂试验

1.1 试验装置

试验采用自主设计的金属圆管抗卷曲轴向劈裂力学性能测试装置。该装置主要包括:承压基座、诱导劈裂基座、抗卷曲板、抗卷曲板定位螺栓等,试验装置如图1所示。诱导管件劈裂基座坡面角为 30° ,诱导劈裂基座上端设有防倾立柱,其高度为25mm。基座和抗卷曲板经刚化处理。

试验采用微机控制电液伺服压力试验机(YAW-2000型)对试件进行准静态压缩试验,加载系统最大静态载荷2000kN,压缩速率设置为0.3mm/s。试件劈裂试验过程为:1)组装测试装置,如图1,试件套于防倾立柱,圆管预制切口端接触诱导劈裂基座;2)试验机施加轴向载荷,随着压力增大,金属管切口由于应力集中而启动撕裂;3)试件劈裂产生自由卷曲管条,卷曲管条受到抑制板约束而展平形成抗卷曲劈裂效果,进而向前摩擦滑移;4)扩径-卷曲-展平行为重复出现,抗卷曲劈裂吸能过程不断进行。

1.2 金属圆管试件

试验管件选用低碳钢圆管,试件壁厚为3mm或4mm,内直径为26mm,长度为150mm;试件的一个端口加工有4或6条预制导裂切口,切口长度为4mm。试件如图2所示。试件主要化学成分与力学参数由相关试验测得,见表1。

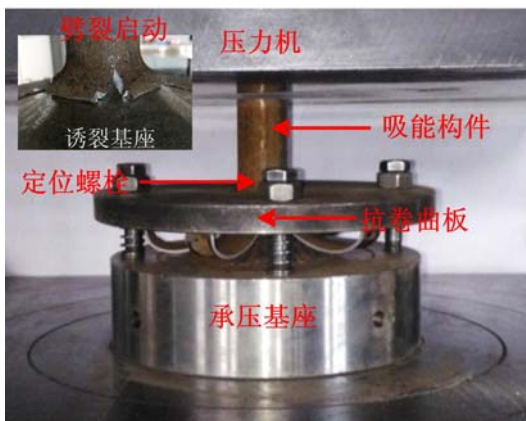


图1 金属管劈裂力学性能测试装置

Fig.1 The testing device of axial splitting



图2 金属圆管试件

Fig.2 The metal circular tube specimens

表1 试件主要化学成分与相关力学参数

Tab.1 Chemical composition and mechanical parameters of the specimens

母材成分	C	Mn	Si	P	S
含量比例(%)	0.14	0.48	0.25	0.021	0.018
力学性能	屈服点(MPa)	抗拉强度(MPa)	弹性模量(GPa)	伸长率(%)	
参数值	235~330	430~470	200	24~28	

2 试验结果与分析

主要采用以下指标评估不同参数试件的吸能特性:实际形成的稳定扩展裂纹数目 n_s 、最大峰值载荷 F_{max} 、恒定载荷 F_{cr} 、恒定载荷作用行程 δ 、恒定载荷行程效率 SE 、恒定载荷吸能量 Q_s 、吸能总量 Q 。

恒定载荷作用行程效率 SE 反映试件的轴向劈裂稳定变形能力,恒定载荷行程效率 SE 由恒定载荷作用行程 δ 除以试件轴向劈裂作用总行程得到,其定义为

$$SE = \frac{\delta}{L} \times 100\% \quad (1)$$

表2所示的数据为不同参数金属圆管试件抗卷曲劈裂试验结果。试验中试件编号规则:内径-壁厚-预制导裂切口数-试验次数,例如:试件编号26-4-6-1,代表内径26mm,壁厚4mm,预制导裂切口数为6,第1次试验。

表2 试件变形吸能特性试验结果

Tab. 2 Test results of deformation and energy-absorption properties of specimens

试件编号	裂纹数 $n_p(n_s)$	最大峰值载荷 F_{max} (kN)	恒定载荷 F_{ac} (kN)	恒定载荷作用行程 δ (mm)	行程效率 SE(%)	恒定载荷吸能量 Q _c (kJ)	吸能总量 Q(kJ)
26-4-6-1	6(4)	172.4	136.6	55.7	66.67%	7.61	11.01
26-4-6-2	6(6)	180.3	143.1	48.8	54.23%	6.98	11.24
26-4-4-1	4(4)	145.8	122.3	60.1	66.78%	7.35	9.99
26-4-4-6	4(4)	163.3	111.8	62.4	69.34%	6.97	9.75
26-3-6-1	6(6)	115.2	104.4	66.1	71.84%	6.90	8.34
26-3-6-5	6(5)	98.69	102.3	64.4	70.76%	6.59	8.25
26-3-4-1	4(4)	117.5	71.9	71.1	77.28%	5.11	5.77
26-3-4-2	4(4)	116.4	73.2	64.7	71.09%	4.74	5.68

注: n_s 为实际形成的稳定扩展裂纹数目; n_p 为预制导裂切口数。

2.1 试件变形形态特征分析

图3给出了金属圆管试件经试验连续压载后的残余变形形态图。试件轴向劈裂后能够形成较为均匀的“放射状”管条,反映了轴向劈裂作用较稳定;试件劈裂裂纹具有螺旋上升式、轴向竖直上升式两种裂纹扩展形式,故形成的金属管条呈现“螺旋”管条(图3(a)(b)(c))和“非螺旋”管条(图3(d)),且壁厚越大试件螺旋程度越大。通过开裂管条边缘观察发现,“非螺旋”管条边缘材料沿裂纹扩展方向呈现丝状排布,而“螺旋”管条边缘材料显现较为均匀,这种现象可能与材料微观组织结构、弹塑性断裂力学裂纹扩展规律有关。



图3 试件残余变形形态

Fig. 3 The deformation modes of the specimens

由表2裂纹数 n_p 、 n_s 数据及图3试件残余变形形态可知,实际形成的稳定扩展裂纹数 n_s 在数值上并不一定等于预制导裂切口数 n_p ,特定参数试件形成的稳定扩展裂纹数 n_s 往往趋近于某一特定值。这是由于:试件劈裂过程中扩展裂纹出现了“扩展终止”现象而终止撕裂,使扩展裂纹数目减少,见图4(a)裂纹扩展状态图;扩展裂纹出现了“扩展增生”现象而导致一条裂纹变两条,使扩展裂纹数目增加,见图4(b)裂纹扩展状态图。结合图3(a)所示,试件预制6个导裂切口,但残余变形形态显示,部分导裂切口开裂极小长度后,出现了扩展终止现象,最终6个切口仅形成了4个稳定扩展裂纹。

壁厚3mm、4mm两种试件,预制4或6条导裂切口,轴向劈裂过程中由于裂纹“扩展终止”和“扩展增生”现象,试件形成的稳定扩展裂纹均倾向于4条,此现象与文献[10]中金属圆管轴向劈裂扩展裂纹数目具有特征值的结论相符。

进一步地,裂纹的“扩展终止”和“扩展增生”现象直接导致了试件劈裂能量中管壁撕裂耗能量大小

的变化,进而导致了试件轴向载荷的波动,即试件劈裂过程中裂纹扩展出现的“扩展终止”和“扩展增生”现象直接影响了劈裂作用过程的稳定性;对比载荷-位移曲线(如图5)发现,预制导裂切口数目越接近文献[10]中提到的稳定扩展裂纹数目特征值,圆管试件的轴向劈裂过程恒定载荷波动越小、曲线越平缓,这为此类吸能元件导裂切口数目设置提供了指导。

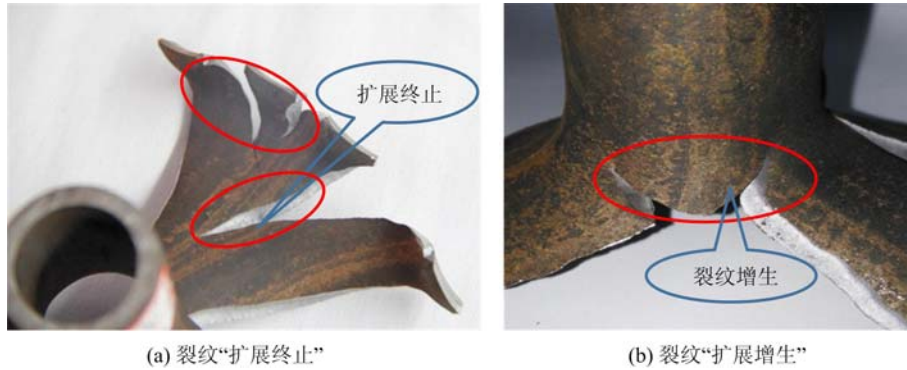


图4 试件裂纹扩展

Fig. 4 Crack propagation of components

2.2 试件吸能特性分析

试件在抗卷曲劈裂试验装置上的全程载荷-位移曲线如图5所示,(a)(b)(c)(d)分别表明试件26-4-6、26-4-4、26-3-6、26-3-4的载荷特征及吸能特性。显然,金属圆管试件轴向劈裂吸能过程依据载荷波动可分为“波动载荷”吸能阶段和“恒定载荷”吸能阶段。轴向载荷作用下试件吸能作用过程如下:

(1) 在加载的第①区间,试件下端口由于预加工导裂切口而形成的均匀管条沿导裂基座刚性面下滑,逐渐形成载荷-位移曲线的载荷峰值。接着,试件管条屈曲,随之曲线呈下降趋势。

(2) 在加载的第②区间,随着第一区间管条屈曲结束,试件下端部发生塑性扩径变形,载荷曲线回升;载荷回升期间,圆管劈裂裂纹扩展,撕裂管条受力卷曲变形。

(3) 在加载的第③区间,试件撕裂扩展所形成的撕裂卷曲管条逐渐紧密触压上部卷曲抑制板,载荷呈现线性规律继续回升,直至管条顶端与卷曲抑制板接触后达到最大静摩擦阻力。至此,形成了“波动载荷”吸能阶段。

(4) 在加载的第④区间,管条顶端与卷曲抑制板触压达到最大静摩擦阻力,迫使管条向前滑动而产生稳定的滑动摩擦,管条产生了稳定的摩擦与塑性展平力学行为,整个试件压载过程变为“扩径-撕裂-卷曲-展平”的稳定劈裂破坏模式,载荷不断趋于稳定值,直至试验加载结束。至此,形成了“恒定载荷”吸能阶段。

圆管试件劈裂过程中观察发现,裂纹尖端出现连续性的塑性扩径变形、壁面撕裂、管条卷曲、管条卷曲塑性展平行为,这些力学行为连续出现,且具有良好的重复性,这正是圆管试件实现理想的恒定载荷吸能过程的关键,同时为理论分析中将试件劈裂耗能行为分为塑性扩径、裂纹撕裂、管条摩擦、管条塑性展平奠定了基础。

由图5试件载荷-位移曲线对比可知:

(1) 对于壁厚4mm试件: n_s 为6的试件恒定载荷值为135.4kN,大于 n_s 为4的恒定载荷值117.6kN;对于壁厚3mm试件: n_s 为6的试件恒定载荷值为102.5kN,大于 n_s 为4的恒定载荷值72.8kN。表明恒定载荷值与实际管壁撕裂裂纹条数 n_s 呈正相关。

(2) 当 n_s 为4:壁厚4mm的试件恒定载荷值为117.6kN,大于壁厚3mm的试件恒定载荷值72.8kN;当 n_s 为6:壁厚4mm的试件恒定载荷值为134.5kN,大于壁厚3mm的试件恒定载荷值102.5kN。表明恒定载荷值与试件壁厚呈正相关。

(3) 试件劈裂过程中波动载荷吸能行程仅占劈裂全程的前20%~40%,恒定载荷吸能行程占劈裂全程的后60%~80%。可知,金属圆管能够实现恒定载荷吸能作用,且恒定载荷吸能行程比例随着试件劈裂作用全程的增长而不断增大。

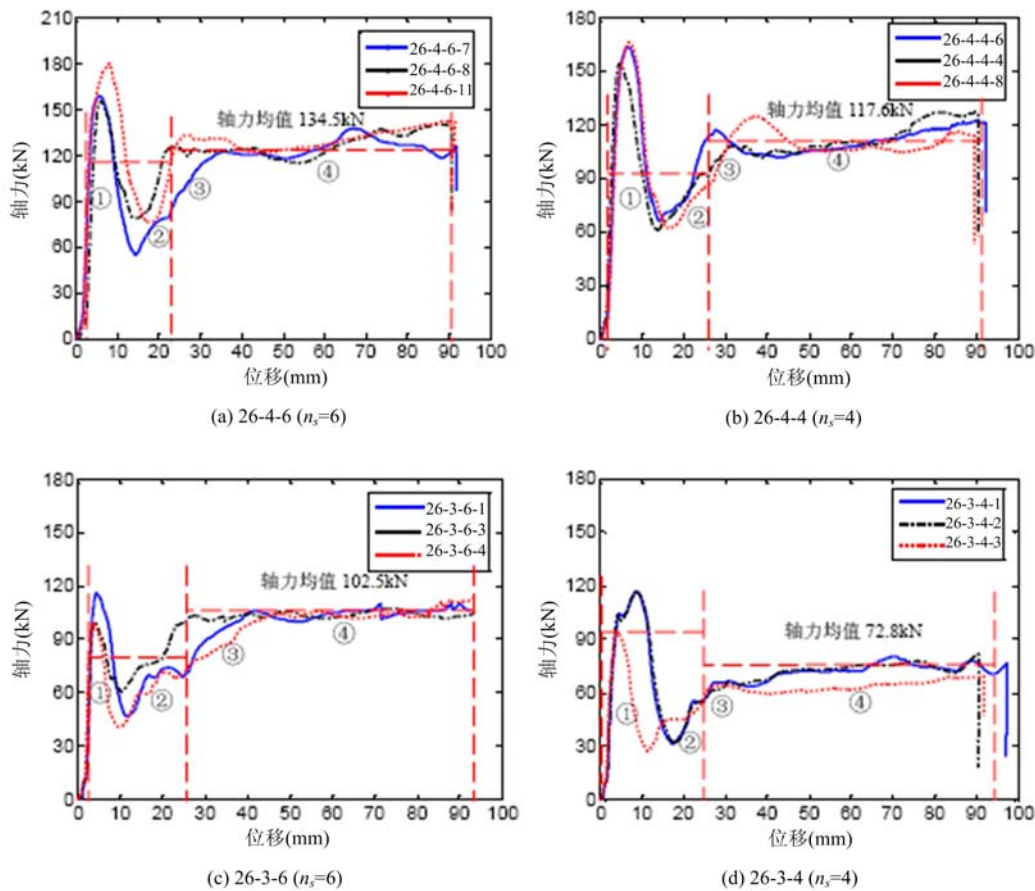


图 5 试件载荷—位移曲线

Fig. 5 The load-displacement curves of the specimens

3 金属圆管吸能特性理论分析

建立金属圆管抗卷曲轴向劈裂理论模型,对金属圆管劈裂过程中恒定载荷理论值、吸能量等参数进行推导计算,模型示意图如图 6 所示。在坡面角为 30° 刚性诱导劈裂基座上,加载速度为 v ,试件壁厚为 t ,内半径为 r_0 。

为了简化理论计算,现对理论模型做出如下假定:

- (1) 假设试件材料为理想的刚-塑性材料。
- (2) 在整个变形破坏过程中,金属圆管壁厚 t 保持不变,所有撕裂管条卷曲半径完全相等,呈对称分布。
- (3) 假设管壁扩径后撕裂而成的管条为平直状,即残余曲率半径为 ∞ ,则其周向曲率变化量为 $\rho = 1/r_0$ 。

由图 6 及试验过程分析,试件在抗卷曲条件下主要通过塑性扩径变形、管壁撕裂、诱导基座摩擦、抗卷曲摩擦、管条塑性展平耗散能量。

依据能量法^[15]可得劈裂过程中试件总能量变化率 ω :

$$\omega = \omega_p + \omega_t + \omega_{f1} + \omega_{f2} + \omega_u \tag{2}$$

式中, ω_p 为塑性扩径变形能量变化率, J/s; ω_t 为管壁撕裂能量变化率, J/s; ω_{f1} 为基座摩擦能量变化率, J/s; ω_{f2} 为抗卷曲管条摩擦能量变化率, J/s; ω_u 为管条展平能量变化率, J/s。

在裂纹尖端前的扩径塑性变形耗能区内,扩径塑性变形能量变化率 ω_p 包括:管壁轴向塑性弯曲能量变化率 ω_{p1} 、周向塑性弯曲能量变化率 ω_{p2} 、周向塑性拉伸能量变化率 ω_{p3} ,得

$$\omega_p = \omega_{p1} + \omega_{p2} + \omega_{p3} \tag{3}$$

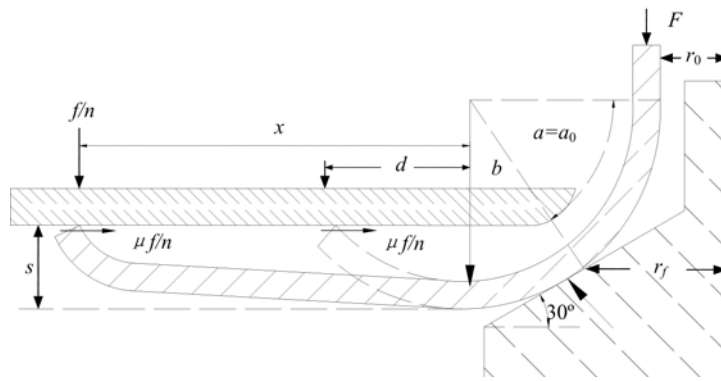


图6 吸能作用理论模型

Fig. 6 The theoretical model of energy absorbing action

圆管试件管壁轴向弯曲能量变化率:

$$\omega_{p1} = 2\pi r_0 M_0 v / b \tag{4}$$

由 $4M_0 = N_0 t$, 可得

$$\omega_{p1} = 2\pi r_0 N_0 v \left[\frac{t}{4b} \right] \tag{5}$$

式中, M_0 为单位管壁宽度塑性极限弯矩, N; N_0 为单位管壁宽度塑性极限膜力, N/m, $N_0 = Yt$, Y 为屈服极限应力, MPa; b 为管条卷曲半径, m。

周向弯曲能量变化率:

$$\omega_{p2} = 2\pi r_0 N_0 v \left[\frac{t}{4r_0} \right] \tag{6}$$

在裂纹尖端前, 由于管壁撕裂启动前发生径向塑性扩径, 此区域通过径向扩径角 $\alpha (0 \leq \alpha \leq \alpha_0)$ 表示。将裂纹尖端点处的圆管半径定义为圆管的撕裂半径 r_f , 见图6。

周向应变增量为 $d\epsilon_\theta = \frac{dr}{r}$, 因而整个试验过程中累积总周向应变为 $\epsilon_\theta = \int_{r_0}^{r_f} \frac{1}{r} dr = \ln\left(\frac{r_f}{r_0}\right)$ 得周向拉伸能量变化率:

$$\omega_{p3} = 2\pi r_0 N_0 v \ln\left(\frac{r_f}{r_0}\right) \tag{7}$$

试件 n 条撕裂裂纹(数值上等于试件产生的实际裂纹数 n_s) 扩展中所消耗的能量速率为 ω_t :

$$\omega_t = n\varphi t v \tag{8}$$

式中, φ 为材料撕裂比功, kJ/m²。

圆管管壁撕裂形成的管条与坡面角为 30° 的导裂基座刚性面形成的滑动摩擦耗能速率:

$$\omega_{f1} = 2\sqrt{3}\mu Fv / 3 \tag{9}$$

式中, μ 为管壁与基座面间的摩擦因子, 取 0.25。

假设卷曲管条经过塑性展平过程, 呈平直状态, 得塑性展平耗能速率:

$$\omega_u = 2\pi r_0 N_0 v \left[\frac{t}{4b} \right] \tag{10}$$

抗卷曲壳的正压力 f 引起摩擦生热, 对塑性展平的管条列力矩平衡方程:

$$2\pi r_0 M_0 = fx - (f\mu)s \tag{11}$$

$$f = 2\pi r_0 M_0 / (x - \mu s) \tag{12}$$

式中, s 为抗卷曲板的设置高度, 即抗卷曲板的下表面与管条稳定伸展假想平面之间的距离, m; x 为当前状态下管条尖端点与卷曲中心水平间距, m。

在试验中 $s < d$, 估算 f 得

$$f = 2\pi r_0 M_0 / d = 2\pi r_0 N_0 \left[\frac{t}{4d} \right] \tag{13}$$

式中, d 为管条卷曲入射尖端点与卷曲中心水平间距, m 。

$$\text{因此, 摩擦生热耗能速率为 } \omega_{j2} = \mu f v = 2\pi r_0 N_0 \mu v \left(\frac{t}{4d} \right) \quad (14)$$

由试件整体的能量法可得试件恒定载荷值 F 和相应的吸能量 Q_s :

$$Fv = \omega_p + \omega_t + \omega_{f1} + \omega_{f2} + \omega_u \quad (15)$$

$$F = \frac{2\pi N_0 r_0 \left[\ln \frac{r_f}{r_0} + \frac{t}{2b} + \frac{t}{4r_0} + \frac{\mu t}{4d} \right] + n\varphi t}{1 - 2\sqrt{3}\mu/3} \quad (16)$$

$$Q_s = \int_{L_1}^{L_2} F dl \quad (17)$$

式中, Fv 代表功率; L_1 为恒定载荷起点位移坐标值; L_2 为恒定载荷终点位移坐标值。

算例: 测量试件 26-4-4-1 参数如下:

$t=4\text{mm}$, $r_0=13\text{mm}$, $Y=235\text{MPa}$, $r_f=21.46$, $b=10.06\text{mm}$, $d=9\text{mm}$, $\mu=0.25$, $n_s=4$, 依据文献 [1], φ 取 1040kJ/m^2 , 依据公式(15)得到试件恒定载荷 $F=111.2\text{kN}$; 由表 2 知, 试件 26-4-4-1 恒定载荷行程 60.1mm , 依据公式(16)计算得到恒定载荷作用阶段相应的吸能量 $Q_s=6.69\text{kJ}$ 。计算结果见表 3, 恒定载荷值 F 及其相应的吸能量 Q_s 的试验结果与理论分析结果相近, 误差不超过 11%。

表 3 试验及理论分析结果对比表

Tab. 3 The comparison of the results between experimental study and theoretical analyses

试件编号	恒载试验值 F_{av} (kN)	恒载理论值 F (kN)	相对误差	恒载吸能量 Q_s 试验值 (kJ)	恒载吸能量 Q_s 理论值 (kJ)	相对误差
26-4-6-1	136.6	126.4	7.47%	7.61	7.04	7.49%
26-4-6-2	143.1	135.8	5.10%	6.98	6.63	5.01%
26-4-4-1	122.3	111.2	9.08%	7.35	6.68	9.12%
26-4-4-6	111.8	120.3	7.60%	6.98	7.51	7.59%
26-3-6-1	104.4	110.3	5.65%	6.90	7.29	5.65%
26-3-6-5	102.3	93.8	8.31%	6.59	6.04	8.35%
26-3-4-1	71.9	64.3	10.57%	5.11	4.57	10.57%
26-3-4-2	73.2	69.5	5.05%	4.74	4.50	5.06%

通过以上对载荷值、吸能量解析式的理论推导, 结合试验结果, 可进一步分析如下:

(1) 圆管抗卷曲劈裂理论上并非是精确的恒定阻力撕裂过程。由公式(12)可知, 随着管壁撕裂, 撕裂管条稳定扩展, 其力臂 x 越来越大, 导致正压力 f 非线性降低, 管条摩擦耗能能力越来越小。然而, 研究表明, 圆管抗卷曲劈裂过程中的阻力值降低量在高承载阻力吸能构件的工程设计中, 完全可忽略不计, 可视构件具有工程上的恒阻吸能特性。

(2) 由抗卷曲板的正压力 f 的理论计算可知, 抗卷曲板的设置高度 s 对于摩擦吸能有重要影响。根据公式(12), s 设计值越大, 正压力 f 越大, 摩擦吸能量增大; 针对理论假设中第 3 条“假设管壁扩径后撕裂而成的管条为平直状, 即残余曲率半径为 ∞ ”, s 设计值的大小将直接影响撕裂管条的展平程度, 进而影响理论计算误差的大小。

(3) 通过上述理论与试验综合分析, 金属圆管抗卷曲劈裂过程中吸能效果的主要影响因素为圆管壁厚、材质、内径、预制切口数目、诱导劈裂基座坡面角、抗卷曲板的设置高度等。

4 结论

通过以上对金属圆管抗卷曲轴向劈裂试验研究与理论分析, 得出以下结论:

(1) 试件劈裂吸能过程依据载荷波动可分为“波动载荷”吸能阶段和“恒定载荷”吸能阶段。波动载

荷作用下的劈裂行程仅占劈裂全程的前 20%~40%;恒定载荷作用下的劈裂行程占后 60%~80%,并随着总行程的增长而不断增大。

(2) 圆管试件壁厚、预制切口数是试件裂纹扩展稳定性、恒定载荷水平、吸能效率的重要影响因素。劈裂裂纹具有螺旋上升式、轴向竖直上升式两种裂纹扩展形式,壁厚越大螺旋程度越大。

(3) 试件劈裂过程中裂纹扩展出现“扩展终止”与“扩展增生”现象,实际形成的稳定扩展裂纹数 n_s 在数值上并不一定等于预制导裂切口数 n_p 。

(4) 金属圆管抗卷曲轴向劈裂过程能够实现稳定的劈裂吸能效果。与以往金属圆管劈裂自由卷曲过程相比,试件管径大幅度降低至 26mm、恒定载荷值大幅提升至 71.9~143.1kN,载荷值与吸能量的试验结果与理论分析结果误差不超过 11%。验证了金属圆管吸能装置设计向小管径、高吸能比率的方向发展的可行性。

参考文献:

- [1] 余同希, 卢国兴. 材料与结构的能量吸收[M]. 华云龙译. 北京:化学工业出版社, 2005:110-115 (YU Tongxi, LU Guoxing. Energy absorption [M]. Translated by HUA Yunlong. Beijing:Chemical Industry Press, 2005:110-115 (in Chinese))
- [2] 余同希. 利用金属塑性变形原理的碰撞能量吸收装置[J]. 力学进展, 1986, 16(1):28-37 (YU Tongxi. Impact energy absorbing devices based upon the plastic deformation of metallic elements[J]. Advances in Mechanics, 1986, 16(1):28-37 (in Chinese))
- [3] 潘一山, 马箭, 肖永惠, 等. 矿用防冲吸能支护构件的数值分析与实验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(2):231-238 (PAN Yishan, MA Xiao, XIAO Yonghui, et al. Numerical analysis and experimental study of a coal mine anti-impact and energy-absorption supporting component[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(2):231-238 (in Chinese))
- [4] 袁潘, 杨智春. 复合材料/铝复合管轴向准静态及冲击压溃的吸能特性[J]. 振动与冲击, 2010, 29(8):209-213, 253 (YUAN Pan, YANG Zhichun. Numerical study on energy absorption of aluminum-composite hybrid tubes under axial quasi-static and impact crushing[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(8):209-213, 253 (in Chinese))
- [5] 李志斌, 虞吉林, 郭刘伟. 具有诱导结构的铝合金薄壁方管轴向压缩吸能性能试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(6):346-352 (LI Zhibin, YU Jilin, GUO Liuwei. Experimental investigations on the energy absorption behavior of aluminum tubes with inductive structures subjected to axial loading[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(6):346-352 (in Chinese))
- [6] 彭军. 金属矩形管轴压失效模式与能量吸收特性研究[D]. 浙江大学, 2006 (PENG Jun. Failure mode and energy absorbing of metallic rectangular tubes subjected to axial compression[D]. Zhejiang University, 2006 (in Chinese))
- [7] 吴鸿超, 梁增友, 冯阳, 等. 薄壁金属管在中高速冲击下的缓冲特性研究[J]. 应用力学学报, 2016, 33(2):325-331, 377-378 (WU Hongchao, LIANG Zengyou, FENG Yang, et al. Energy absorption characteristics of the expansion of thin-walled circular metal tubes by middle-speed and high-speed impact of a rigid cylinder[J]. Journal of Applied Mechanics, 2016, 33(2):325-331, 377-378 (in Chinese))
- [8] 罗昌杰, 刘荣强, 邓宗全, 等. 薄壁金属管塑性变形缓冲器吸能特性的试验研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(4):101-106, 234 (LUO Changjie, LIU Rongqiang, DENG Zongquan, et al. Experimental investigations of an energy absorber based on thin-walled metal tube's plastic deformation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(4):101-106, 234 (in Chinese))
- [9] 杨巨文, 唐治, 何峰, 等. 矿用扩径式吸能构件吸能防冲特性研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(8):134-138, 143 (YANG Juwen, TANG Zhi, HE Feng, et al. Energy absorption and anti-impact properties of mine diameter-expanding energy absorption components [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(8):134-138, 143 (in Chinese))
- [10] 余同希. 方管能量耗散装置的研究[J]. 应用力学学报, 1985, 2(2):27-36 (YU Tongxi. A study on energy dissipation device by square tubes [J]. Journal of Applied Mechanics, 1985, 2(2):27-36 (in Chinese))

- [11] 王蕊, 刘志芳, 程国强, 等. 不同壁厚金属圆管撕裂卷曲破坏的实验与理论分析[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(5):554-557 (WANG Rui, LIU Zhifang, CHENG Guoqiang, et al. Experimental study and theoretical analysis on splitting and curling steel tube with different thickness [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2004, 35(5):554-557 (in Chinese))
- [12] Karagiozova D, Nurick G N, Chung K Y S. Energy absorption of aluminium alloy circular and square tubes under an axial explosive load[J]. Thin-Walled Structures, 2005, 43(6):956-982.
- [13] 程海帆, 董美伶, 刘志刚, 等. 薄壁金属圆管撕裂消能研究[J]. 重庆交通大学学报, 2015, 34(6):133-136 (CHENG Haifan, DONG Meiling, LIU Zhigang, et al. Energy dissipation of splitting of thin-walled metal tube [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2015, 34(6):133-136 (in Chinese))
- [14] Jin S Y, Altenhof W. An analytical model on the steady-state deformation of circular tubes under an axial cutting deformation mode[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(2):269-279.
- [15] Huang X, Lu G, Yu T X. On the axial splitting and curling of circular metal tubes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44:2369-2391.
- [16] Reddy T Y, Reid S R. Axial splitting of circular metal tubes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1986, 28(2):111-131.
- [17] Atkins A G. On the number of cracks in the axial splitting of ductile metal tubes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1987, 29(2):115-121.
- [18] 王蕊, 秦庆华, 程国强, 等. 壁厚对金属圆管撕裂卷曲耗能影响的研究[J]. 力学学报, 2005, 37(2):244-248 (WANG Rui, QIN Qinghua, CHENG Guoqiang, et al. Research for the influence of thickness on the energy distribution of splitting and curling circular steel tube[J]. Acta Mechanica Sinica, 2005, 37(2):244-248 (in Chinese))

Study on Energy Absorption Characteristics of a Metal Circular Tube Subjected to Curling Splitting Deformation

DAI Lian-peng, PAN Yi-shan, WANG Ai-wen

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: In order to develop safety protection energy absorbing element with small size and high energy absorption ratio and its energy absorption characteristics, the deformation and energy absorption characteristics were experimentally and comparatively studied for two kinds of metal circular tube with the same 26mm inradius but different wall thicknesses (3mm and 4mm respectively) during curling axial splitting deformation process. The energy absorption principle was analyzed by energy method. Results show that the process of specimen's splitting energy absorption can be divided into two stages: "fluctuant load" energy absorption stage and "constant load" energy absorption stage; the constant loads are within a range of 71.9kN-143.1kN; the corresponding energy absorption values reach up to 4.74kJ-7.61kJ; and the total value of energy absorption in splitting process reaches up to 5.68kJ-11.24kJ. Specimen's axial splitting deformation is stable, producing radial spiral expansion strips or non-spiral straight strips. Axial splitting behavior dissipates energy by plastic deformation of diameter expansion, splitting of tube wall, friction among strips and plastic flattening of strips. The experimental values of constant load and corresponding energy absorption agree with experimental results. Therefrom, the splitting process of metal circular tube in curling deformation can achieve efficient energy-absorption action under constant axial loading condition.

Keywords: metal circular tube; axial splitting; curling inhibition; constant load; energy-absorption property; safety protection