

挂车承载梁断裂强度试验研究及数值模拟

王聪兴¹, 孙华克¹, 赵德祥²

(1.河南省工业学校, 河南 郑州 450011; 2.沈阳大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110044)

摘要: 为了解裂纹对重载挂车承载梁的影响, 通过三点弯曲试验得到承载梁所用材料的断裂韧度, 再利用 ANSYS 断裂力学分析功能对承载梁进行裂纹数值模拟分析, 通过对不同裂纹长度、不同形式单元类型建模, 采用有限元直接法和 J 积分法求得裂纹的应力强度因子, 并与试验所得断裂韧度进行比较。结果表明, 裂纹长度达到 23 mm 时, 应力强度因子接近于材料的断裂韧度。

关键词: 汽车; 重载挂车; 承载梁; 断裂强度; 试验研究; 数值模拟

中图分类号: U469.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)03-0008-04

重载挂车是大件运输必需设备, 具有载重量大、生产率高、运输成本低、维修保养方便等优点。承载梁是多轴重载挂车的关键部件, 其尺寸大, 自重重大, 负载也大, 经常受到变载荷作用, 疲劳断裂破坏是其主要失效方式。为了解裂纹对承载梁在实际载荷工况下工作的影响, 为重载挂车设计和使用提供指导, 该文以连云港某专用车厂生产的多轴重载挂车为研究对象, 依照断裂力学理论和国家标准, 使用有限元分析软件 ANSYS 和 WDW-200D 型万能试验机对其断裂强度进行研究。

1 裂纹扩展准则

断裂力学研究材料的断裂韧度、裂纹的扩展规律及裂纹体在给定外力作用下是否发生断裂。按裂纹尖端附近塑性变性区范围不同, 可分为线弹性和弹塑性断裂力学, 前者适用于大型构件和脆性材料的断裂分析, 后者适用于裂纹尖端附近有较大范围塑性区的情况。

结构断裂大致包括裂纹产生(或本身已存在)、裂纹扩展、内力再分配及弹塑性失效等连续几个过程, 判定裂纹在何种条件下失稳扩展的方法即为裂纹扩展准则。目前常用裂纹扩展准则有:

(1) 应力强度因子准则。应力强度因子 K_I 是表征外力作用下裂纹尖端附近应力场强度的一个参量, 由结构形状、尺寸、所受载荷形式决定。断裂韧度 K_{IC} 是发生裂纹扩展时应力强度因子的临界值, 与结构材料和环境有关, 可通过试验获知。当 $K_I = K_{IC}$ 时裂纹将失稳扩展。

(2) J 积分准则。J 积分在物理上可解释为变形功的差率, 是表征裂纹尖端应变集中特征的平均

参量。因 J 积分与路径无关, 可选择一条易求积分的路径简单地求得 J 积分, 并可预料存在一个裂纹开始扩展的临界值 J_{IC} , 当 $J = J_{IC}$ 时裂纹开始扩展。

(3) CTOD 准则。韧性材料的断裂主要取决于裂纹顶端的应变而不是应力, 而裂纹顶端的应变可由裂纹张开位移 CTOD (Crack Tip Opening Displacement) 描述, 因而这些材料的断裂取决于临界的裂纹张开位移。

2 试验研究

以承载梁母材为试验研究对象, 对带有疲劳预裂纹的缺口试样, 在三点弯曲加载下自动记录载荷 P 及裂纹嘴的张开位移 V 。按照标准规定的方法, 在 $P-V$ 曲线上求出裂纹的表观扩展量为 2% 时的载荷, 将该载荷代入相应试样的 K_I 表达式, 计算 K_{IC} 的条件值 K_Q (条件断裂韧度), 如果试验结果满足规定的有效性判据, 则 $K_{IC} = K_Q$ 。

2.1 试验设备

试验设备包括 WDW-200D 型万能试验机 (见图 1)、载荷传感器、夹式引伸仪、动态电阻应变仪、数据采集设备、计算机、读数显微镜、游标卡尺和钢板尺。

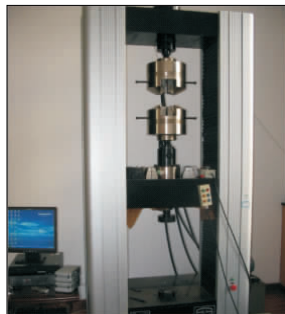
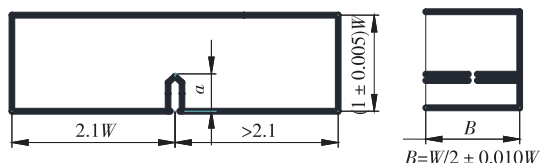


图 1 WDW-200D 型试验机

2.2 试验步骤

2.2.1 试样制备

试样材料为重型挂车承载梁所采用的某钢厂生产的高强度钢板,按规定尺寸制作 3 个试样,预制疲劳裂纹(见图 2)。



B 为试样厚度(mm); W 为试样宽度(mm); a 为裂纹长度(mm)。

图 2 试样尺寸

2.2.2 试样测量

在疲劳裂纹前缘韧带部分测量 3 次,取其平均值作为厚度 B 。在切口附近测量 3 次,取其平均值作为高度 W 。在裂纹两端关于裂纹对称地粘贴刀口片,刀口平行,间距等于夹式引伸计的标距。

将试样安放在三点弯曲夹具上,保证所加载荷的作用线通过裂纹;安装夹式引伸计,使刀口和夹式引伸计的凹槽配合好;将载荷传感器和夹式引伸计按图 3 所示连接到仪表和计算机上。以 2 mm/min 的速率进行加载,直到试样断裂。计算机自动绘制 $P-V$ 曲线。

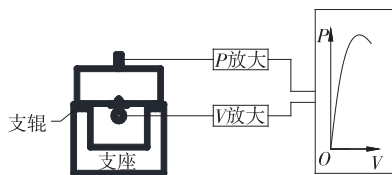


图 3 试验装置

如图 4 所示,用读数显微镜测量裂纹长度 a ,在 $0, 1/4B, 1/2B, 3/4B$ 和 B 处测量裂纹长度 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 ,取 $\bar{a} = 1/3(a_2 + a_3 + a_4)$ 作为裂纹长度的平均值。

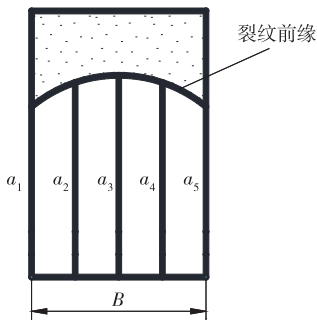


图 4 裂纹长度测量

2.3 数据处理

2.3.1 条件载荷 P_Q 的确定

在 $P-V$ 曲线(见图 5)中,过曲线的线性段作直线 OA ,并通过 O 作割线 OP_5 ,割线斜率为 OA 斜率的 95%,如果在 P_5 以前曲线上每一点的载荷都低于 P_5 ,则取 $P_Q = P_5$ [见图 5(a)];如果在 P_5 之前有一个超过 P_5 的最大载荷 P_{max} ,则取该最大载荷为 P_Q [见图 5(b)、(c)]。

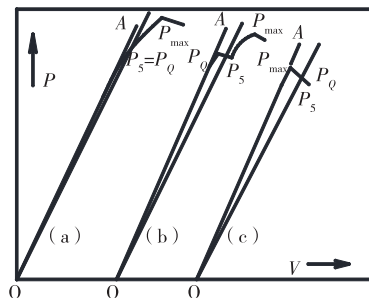


图 5 $P-V$ 曲线的 3 种基本类型

2.3.2 条件断裂韧性 K_Q 的计算

计算载荷比 P_{max}/P_Q (P_{max} 为试样所能承受的最大载荷),若 $P_{max}/P_Q \leq 1.10$,则按下式计算 K_Q :

$$K_Q = \left(\frac{P_Q S}{B W^{1/2}} \right) f \left(\frac{a}{W} \right) \quad (1)$$

式中: P_Q 为按图 5 确定的载荷值(kN); S 为弯曲试验跨距(mm); B 为试样厚度(mm); W 为试样宽度(mm); $f(a/W)$ 为试样的几何形状因子,可以直接查 GB/T 21143—2007 得到。

2.4 有效性校核

计算所得 K_Q 是否为 K_{IC} ,需满足以下条件:

(1) 裂纹厚度满足式(2),裂纹长度满足式(3),韧带尺寸 $(W-a)$ 满足式(4),载荷比满足式(5)。

$$B \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_s} \right)^2 \quad (2)$$

$$a \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_s} \right)^2 \quad (3)$$

$$(W-a) \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_s} \right)^2 \quad (4)$$

$$\frac{P_{max}}{P_Q} \leq 1.1 \quad (5)$$

式中: σ_s 为试验材料的屈服强度。

(2) 裂纹外观要求。 a_2, a_3, a_4 中的最大值与最小值之差不得超过 $2.5\%W$;表面裂纹 a_1, a_5 的长度不得小于裂纹平均值的 90%;裂纹面与试样横截面偏离不超过 10° 。

2.5 试验结果

按以上要求对一组预制疲劳裂纹试样进行断裂

韧性试验,试样数据及试验结果见表1。

从表1可看出:试验所得材料的断裂韧性分别

表1 试样数据及试验结果

试样尺寸/mm			P_Q/kN	P_{\max}/kN	$K_Q/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$	$K_{IC}/$	$2.5(K_Q/\sigma_s)^2/$
高度 W	厚度 B	裂纹长度 a				$(\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$	mm
20.10	10.10	9.505	8.020	8.600	58.35	58.35	7.034
20.12	10.10	9.508	8.135	8.700	59.20	59.20	7.240
20.10	10.10	9.510	8.015	8.605	58.35	58.35	7.034

为 58.35、59.2、58.35 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$, 满足规范要求。

3 数值模拟

3.1 有限元分析过程

用 ANSYS 求解典型断裂参数, 首先进行弹性分析或弹塑性静力分析, 然后用特殊的后处理命令或宏命令计算所需断裂参数。

3.1.1 裂纹区域的模拟

断裂模型中的重要区域是围绕裂纹边缘的部位, 通常将 2D 模型的裂纹尖端作为裂纹边缘, 将 3D 模型的裂纹前缘作为裂纹边缘。在线弹性问题中, 裂纹尖端或裂纹前缘附近某点的位移随 $r^{1/2}$ (r 为裂纹尖端到该点的距离) 变化。裂纹尖端处的应力和应变是奇异的, 随 $r^{1/2}$ 变化, 故围绕裂纹尖端的有限单元是二项式的奇异单元, 即把单元边上的中心点放到 1/4 边上。

对承载梁断裂分析分别采用 3D 实体 Solid95 单元和 Solid45 单元、2D 平面应变 Plane82 单元、3D 实体 Solid186 单元和 Solid185 单元。在 2D 断裂模型中, 应用 ANSYS 中的 KSCON 命令围绕裂纹尖端的第一行自动产生奇异单元。在 3D 断裂模型中, 用宏命令从 Solid45 模型中生成 Solid95 裂纹尖端奇异单元, 从 Solid185 模型中生成 Solid186 裂纹尖端奇异单元。

3.1.2 断裂参数计算

在静力分析后即可通过后处理器计算断裂参数, 如应力强度因子、J 积分、能量释放率。

(1) 应力强度因子 K_I 的计算。后处理中的 KCALC 命令用于计算应力强度因子, 该命令仅适用于在裂纹区域附近具有各向同性材料的线弹性问题。有限元直接法利用有限元法求出裂纹尖端附近的一些节点的应力分量, 代入裂纹尖端应力的渐近表达式, 计算这些节点处的表现应力强度因子, 然后利用最小二乘法外推到裂纹尖端处得到裂纹尖端的

应力强度因子的数值解。应力强度因子的数学表达式如下:

$$K_I = \sqrt{2\pi} \frac{2GA}{1+k} \quad (6)$$

式中: G 为材料的剪切弹性模量; $A = |V|/\sqrt{r}$, ($r \rightarrow 0$), V, r 如图 6 所示; 在平面应力时 $k = (3-\nu)/(1+\nu)$, 在平面应变时 $k = 3-4\nu$; ν 为材料的泊松比。

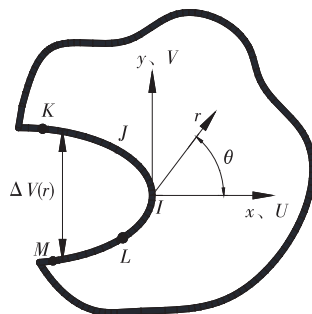


图6 裂纹尖端位置所使用的单元节点

(2) J 积分。2D 情况下 J 积分的表达式见式(7), 在线弹性条件下 J 积分与应力强度因子的关系见式(8)。

$$J = \int_{\gamma} \omega dy - \int_{\gamma} \left(t_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + t_y \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) ds \quad (7)$$

式中: γ 为围绕裂纹尖端的积分路径; ω 为应变能密度(单位体积的应变能); t_x, t_y 分别为 x, y 轴的引力向量; u 为位移向量; s 为路径 γ 的距离。

$$J = \frac{1-\nu^2}{E} K_I^2 \quad (8)$$

式中: E 为材料的弹性模量。

3.2 有限元模型

对重载挂车承载梁结构进行简化处理, 取裂纹长度 a 分别为 10、15、20、23 mm, 根据对称关系, 建立 1/2 有限元模型(见图 7), 进行实际工况的加载和约束, 然后求解。



图 7 有限元模型

3.3 模拟结果

通过结构静力分析,在后处理模块得到裂纹尖端的应力强度因子,输出结果见表 2。

表 2 数值模拟计算结果

裂纹长度/ mm	Solid45 单元输出结果		Plane82 单元输出结果		Solid185 单元输出结果	
	$K_I/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$	$J/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$	$K_I/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$	$J/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$	$K_I/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$	$J/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$
10	34.67	34.14	34.56	34.48	34.59	34.26
15	44.08	43.41	43.95	43.84	43.98	43.56
20	53.49	52.68	53.33	53.19	53.37	52.85
23	57.26	56.39	57.08	56.94	57.12	56.57

4 结论

从模拟计算结果来看,在载荷 P 作用于梁的中间位置, $P=200\ 000\ \text{N}$ 的载荷工况下,预制裂纹长度与应力强度因子正相关。当裂纹长度达到 23 mm 时,应力强度因子接近于材料的断裂韧度,即裂纹接近于失稳状态。

裂纹失稳后是扩展下去还是止裂主要取决于阻力的大小。在工程设计中,可人为提高阻力值,如:提高材料韧性;在裂纹前方增加韧性较高的条板材料,裂纹扩展到该板条前面时将可能止裂;在裂纹前面增加加肋板,提高截面的厚度。这些机械止裂方法在工程上是行之有效的。

在工程上,避免裂纹失稳扩展极为重要,被认为是断裂力学研究中最重要的问题之一。从这个意义上说,文中研究方法和计算结果可为重载挂车的设计和提供重要参考。

参考文献:

[1] 乐国臣.组合挂车发展趋势[J].上海公路,2002(4).
[2] 赵德祥.多轴重载挂车关键部件现代设计方法研究[D].北京:北京科技大学,2007.

[3] 赵耀.裂纹损伤圆柱壳承载能力的实验研究[J].华中理工大学学报,1998,26(5).
[4] 陈帅志,赵勇,雷尹嘉,等.含缺陷材料冲击断裂的动态焦散线试验研究[J].科学技术与工程,2017,17(23).
[5] Rice I R.A path independent integral and the approximate analysis of strain concentrations by notches and cracks[J].Journal of Applied Mechanics,1968,35(2).
[6] Wells A A. Application of fracture mechanics at and beyond general yield[J].British Welding,1963(10).
[7] GB/T 21143—2007,金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法[S].
[8] 陈佳,张英波.合金元素对 A7N01 铝合金焊接接头断裂韧性的影响[J].机械,2018,45(4).
[9] 童谷生,鲁艳超.含 I 型裂纹的普通混凝土梁断裂特性的试验研究[J].科学技术与工程,2018,18(4).
[10] 王登田.7050 铝合金法兰盘表面淬火残余应力和拉伸断裂有限元分析[J].机械,2017,44(5).
[11] 黄伟丰,裴进浩,郭志强.多裂纹相互作用下断裂行为的边界元分析[J].科学技术与工程,2018,18(8).
[12] 田芳,王涛,石琴.全承载式客车车身结构有限元分析[J].客车技术与研究,2012(1).

收稿日期:2019-02-21

(上接第 7 页)

3 结语

汽车启停系统能改善汽车的燃油经济性和排放性能,但会给电子控制系统的电源提出新的要求,需对电控系统的电路进行重新设计。该文介绍了 3 种汽车电控系统电源方案,分析了各方案的特点,为开发简单、低成本的汽车启停系统提供参考和借鉴。

参考文献:

[1] 毛雅风.启停发动机电控系统研究与开发[D].武汉:武汉理工大学,2013.
[2] 邢宇,陈庆樟,许广举,等.汽车智能启停系统的控制算法研究[J].汽车工程学报,2013,3(4).
[3] NCV8876:汽车级高频启停升压控制器参考方案[J].世界电子元器件,2013(12).

收稿日期:2018-12-26