连杆裂断力参数的数值分析 及其裂断质量研究^{*}

王 力,陈 东,张永俊^{*} (广东工业大学 机电工程学院,广东广州 510006)

摘要:针对基于连杆裂断时所需裂断力的问题,利用断裂力学理论及有限元方法,采用K_{ic}判据对与拉杆位移、裂断力及应力强度因 子K₁三者关系展开了研究。通过数值分析求解了应力强度因子达到断裂韧性K_{ic}时拉杆所需的位移,以确定拉杆提供的裂断力。理 论分析结果显示:裂纹槽宽为0.2 mm、槽深为0.4 mm的BYD473连杆,拉杆在位移27.25 mm处,连杆应力强度因K₁达到断裂韧性K_{ic}, 此时连杆裂断所需的裂断力为32.75 kN,拉杆裂断力与应力强度因子K₁呈线性关系。采用实验的方法分析了连杆裂断所需的裂断 力及连杆的裂断质量。研究结果表明,连杆裂断时,所需的裂断力为32.75 kN,连杆裂断质量良好。数值分析与裂断实验数据对比 结果显示,数值分析误差为11.4%,数值分析结果良好,可为液压系统参数的确定提供理论依据。

关键词:连杆;裂断加工;裂断力;断裂质量;数值分析中图分类号:TH16;TG5 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2012)09-1015-04

Numerical analysis on splitting process and research on splitting quality for connecting rod

WANG Li, CHEN Dong, ZHANG Yong-jun

(School of Mechanial and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Aiming at the problem of calculating the fracture splitting force based on the fracture of connecting rod, fracture mechanics theory and finite element method was applied. The relationships of the fracture splitting force, stress intensity factor stress K_1 and bar displacement were researched based on K_{IC} criterion. The fracture splitting force was calculated since K_1 reached fracture toughness through finite element method. The results indicate that the fracture splitting force is 32.75 kN while connecting rod splitting and the linear relationship is shown for the connecting rod which crack width 0.2 mm and depth is 0.4 mm. Meanwhile, the fracture splitting force was inquired by experiment. The result indicates that it is 32.75 kN and has a good quality. Compared numeral analysis with experiment, its error is 11.4%. The result provides theoretical basis for hydraulic system parameters.

Key words: connecting rod; fracture splitting; fracture splitting force; fracture quality; numerical analysis

0 引 言

连杆裂断技术源于1986年美国福特公司的一件 专利,它大幅精简了工艺流程,提高了生产效率,降低 了成本,改善了连杆的综合力学性能,从上世纪90年 代初起该技术在发达国家开始应用并逐渐普及,我国 从1995年起开始引入,目前正进入推广期^[1-3]。该技 术通过预置裂纹槽,在拉杆施加裂断力,使得连杆大 头孔承受垂直于裂断面的径向载荷,使其在脆性断裂 的条件下剖分为杆体和盖两部分。此外,拉杆裂断力

收稿日期: 2012-04-18

基金项目:广东省科技计划资助项目(2009B010900008);广东省产学研资助项目(2010B090400381)

作者简介: 王 力(1987-),男,湖南沅江人,主要从事连杆裂断设备的研制及相关裂断工艺参数的数值分析方面的研究. E-mail:wanglinixing@ 163.com

大小决定了裂纹尖端的应力集中状态,对连杆裂断质 量影响巨大。实践结果表明,裂断力过大,不仅会降 低机床夹具的使用寿命,而且将会导致连杆裂断后大 头孔塑性变形过大,降低连杆盖与杆体的装配精度, 影响连杆的综合力学性能。因此合适的裂断力对连 杆裂断加工至关重要。

本研究利用有限元方法,应用弹线性断裂力学 K_{ic}理论作为断裂依据,分析基于线切割工艺加工的 裂断槽深为0.4 mm连杆的裂断力与断裂韧性之间的 关系,探索*K*_i达到K_{ic}时,拉杆的裂断力对连杆裂断质 量的影响。

1 裂纹深度与裂断力的力学关系

由断裂力学可知,张开型裂纹最容易实现低应力 脆性断裂。连杆裂断技术是以脆性断裂理论为基础, 通过制造裂纹槽,提高应力集中水平,从而在施加主 动载荷小于材料屈服强度的条件下,实现小变形的张 开型脆性解理断裂。

对于张开型脆性断裂,当裂纹尖端的应力强度 因子 K_1 达到线弹性材料的断裂韧性 K_{1c} 时,裂纹开始 启裂扩展^[4]。 K_{1c} 是材料特有的用来衡量弹线性材料 脆韧强度的力学参数,当裂纹尖端应力达到裂纹扩 展的临界强度时,应力强度因子 K_1 亦达到其相应的 临界值 K_{1c} ,它是与载荷大小、加载方式及裂纹长度无 关的恒定常量。因此 K_1 = K_{1c} 可建立连杆裂断时的断 裂准则:

$$K_{\rm I} \leq K_{\rm IC}$$
 (1)

)

$$K_{\rm I} = \sigma \sqrt{\pi a} \, \mathrm{Y} \tag{2}$$

$$F = \mathbf{k}\sigma$$
 (3)

式中:K_{ic}—断裂韧性,常数;Y—裂纹及构件的几何形 状因子,常数;a—裂纹长度; σ —垂直裂纹的对称拉 伸力;k—拉杆楔形角、摩擦系数有关的常数。

从公式(2)可知,裂纹长度一定, σ 为定值。由公 式(3)可知, σ 与拉杆裂断力F呈线性关系。通过有限 元软件,对连杆裂断过程的受力进行分析以求解出 K_{Ic} , 就可求解出连杆断裂所需的裂断力。本研究以BYD轿 车473型号连杆为研究对象,其材料为高碳微合金非调 质钢 C7086。根据 GB1684-32 金属平面断裂韧性测试 方法,本研究进行三点弯曲试件实验,C7086 材料的弹 性模量断裂韧性值 K_{Ic} 为1 231 MPa·mm^{-12[5-7]}。

2 有限元模型的建立

在本研究分析中,笔者选取BYD轿车473型号连 杆,其大头孔内径为φ41.42 mm;厚为度18 mm;裂纹槽 宽为0.2 mm;尖端曲率半径为0.2 mm;槽深为0.4 mm; 弹性模量 *E* 为 210 GPa; 泊松比ν为0.3。

连杆裂断工艺动作如图1所示:当液压缸带动楔形 拉杆下行时,驱动动胀套向右运动,迫使静动胀套对大 头孔内表面施加垂直预置裂纹槽的正向压力,此时裂 纹尖端应力集中效应显著,当正向压力达到连杆断裂 的临界值时,裂纹沿裂纹槽尖端起裂扩展,使连杆实现 裂断。裂断时,连杆盖的肩部与顶销留有0.02 mm间 隙,小头孔与小头销为间隙配合,两者裂断过程中均 不受力,因此可取连杆大头端为分析对象。因为连杆 关于两孔中心线对称,为提高有限元分析效率,可取 楔形拉杆、动胀套、静胀套、连杆大头端的1/2为分析 对象。由于裂纹尖端具有应力奇异性,笔者把连杆裂 纹前端2 mm×3 mm区域分割为裂纹区域。预置裂断 槽深定义为裂纹深度,槽根部圆弧顶点定义为裂尖。 连杆网格单元定义为二次三维缩减积分单元 C30D20R,该单元在计算应力强度因子时可退化形成 楔形和圆锥体型奇异单元,来表征1/r阶奇异性^[8-10]。 动静胀套、楔形拉杆采用8节点六面体缩减积分单元 C3D8R。本研究在分析中对拉杆分别施加分步位移 载荷与对称约束,同时保留Z轴移动。针对静胀套设 置对称约束,同时限制Y,Z轴移动。连杆底面约束Z向移动并设置为对称约束,同时把连杆设定为刚体并 在质心处设置受力参考点,拉杆Z向拉力为连杆裂断 力。动胀套设置对称约束并保留Y轴的移动。拉杆 与动静胀套设置为有限滑移硬接触。动静胀套与连 杆设置为有限滑移硬接触。裂断连杆网格模型如图2 所示。本研究采用ABAQUS软件对裂断连杆进行起 裂分析。



3 结果处理

网格划分裂纹尖端积分层数为24,每层围线积分 数为6条。本研究取裂纹尖端每层围线区域的应力强 度因子K₁为分析对象。围线积分路径由裂纹尖端所 围绕的单元所构成,K₁计算结果表明在2、3、4、5层围 线处趋于恒定,第1、6条围线区域产生较大奇异值,其 原因是第1层围线内产生屈服现象,而第6条围线已 远离主导区,不能准确计算弹线性状态下的应力强度



因子*K*₁,故省去。本研究取每层围线3,4,5的应力强 度因子*K*₁求和并取三者的平均值*K*₈,随着位移增加, 当*K*₈等于K₁时,即可求出连杆裂断所需的裂断力。

20 mm~30 mm处拉杆位移与应力强度因子及裂断力的关系曲线如图3、图4所示。该关系曲线表明,拉杆位移传递的裂断力是以线性形式加载,此时应力强度因子的值也以线性趋势。图4表明,在拉杆位移为27.25 mm时,材料达到断裂韧性K_{IC},此时裂纹开始沿预置裂纹槽尖端起裂扩展。拉杆裂断力应力强度



因子关系曲线如图5所示。图5表明,应力强度因子 达到断裂韧性时,拉杆裂断力为32.75 kN,两者在裂断 力为10 kN~60 kN的区间内,两者呈线性关系。由公 式(2)可知当裂纹长度为定值时,裂断力与K₁呈线性 关系。由此说明该区间与理论分析拟合良好,也表明 了本研究所述方法求解连杆裂断所需的裂断力的正 确性。



4 实验验证与误差分析

本研究的实验在广东工业大学自行研制的"双油 缸连杆裂断机床"上进行,实物图如图6所示。连杆裂 断时,液压系统主油路压力峰值为4 MPa,换算裂断力 为37 kN,有限元分析结果为32.75 kN,误差为11.5%, 实验分析与有数值分析产生误差的主要原因是:有限 元计算的结果只是连杆的起裂阈值,连杆的后续裂纹 扩展也需消耗能量,而分析中并未把裂纹扩展所需的 位移和裂断力考虑在内;有限元技术把连杆裂断过程 理想化,而实际工程中由于锻造工艺、加工工艺、连杆 材料、机床稳定性等因素所带来的偏差亦未考虑。





5 裂断力对连杆裂断质量的影响

为衡量拉杆施加的裂断力为37 kN时连杆的断裂 质量,该实验取裂纹槽宽为0.2 mm,槽底曲率半径为 0.2 mm,槽深为0.4 mm,BYD 轿车473 型号连杆10

根。根据广东四会实力连杆有限公司的检验标准,通 过测量连杆胀断前和合装后的3个尺寸*d*₁、*d*₂和*d*₃的 变化情况来判断连杆断裂面的质量,连杆测量尺寸图 如图7所示。



图7 连杆测量尺寸图

评判依据如下:

△d为连杆胀断前和合装后的最大变形量, △d=|胀断前的 d_i -合装后的 d_i |,该值过大会导致后续 精加工余量不足,产生废品,因而越小越好,取△ d_i <0.30 mm合格。

连杆合装后连杆内圆孔圆柱度误差如表1所示, 连杆合装后发生了塑性变形,其原因是绝大多数工程 材料都在脆性中都会不可避免的产生小范围的屈服 变形。内圆孔最大圆度偏差发生在 d₃ 处, d₂ 居中, d₁ 最小。三者的变形尺寸小于裂纹尺寸及构件尺寸,因 此,裂断力为37 kN时,连杆断裂性质为脆性断裂。由 表1可知,连杆的内圆孔圆柱度误差均在0.3 mm 以 下,因此,拉杆施加的裂断力为37 kN时,连杆的裂断 质量良好,可满足生产要求。

6 结束语

基于断裂力学理论及有限元分析原理,本研究对 基于线切割裂纹槽的BYD473连杆裂断所需裂断力进 行了数值分析;同时,通过实验分析测量了连杆裂断时 所需的裂断力,研究了载荷对连杆裂断质量的影响。数 值分析结果表明:裂纹槽宽0.2 mm、槽深0.4 mm的 BYD473连杆,拉杆在位移27.25 mm处,连杆应力强度 因子K₁达到断裂阈值K₁,此时连杆裂断所需的裂断力

	表1 连杆内孔圆度测量数据						
裂断前直径	断后90°	断后44°	断后5°	$ riangle d_1$	$ riangle d_2$	$ riangle d_3$	
/mm	d₃/mm	d₂/mm	d_1 /mm	/mm	/mm	/mm	
41.48	41.75	41.59	41.40	0.27	0.11	-0.08	
41.44	41.65	41.55	41.38	0.21	0.11	-0.06	
41.45	41.69	41.55	41.38	0.24	0.10	-0.07	
41.48	41.60	41.50	41.42	0.12	0.02	-0.06	
41.44	41.71	41.57	41.40	0.27	0.13	-0.04	
41.48	41.69	41.51	41.37	0.21	0.03	-0.11	
41.48	41.72	41.54	41.43	0.24	0.06	-0.05	
41.48	41.7	41.57	41.41	0.22	0.07	-0.07	
41.48	41.64	41.55	41.41	0.16	0.07	-0.07	
41.48	41.65	41.55	41.41	0.17	0.07	-0.07	

为32.75 kN,拉杆位移与裂断力及应力强度因子K,呈 线性关系。实验分析表明:连杆裂断时所需的裂断力 为37 kN,该载荷裂断的连杆质量良好。数值分析与 裂断实验分析的裂断力相比,数值分析误差为 11.4%。数值分析结果良好,该结果为液压系统参数 的确定提供了理论依据。

参考文献(References):

- [1] 邓伟辉,张永俊. 连杆涨断加工技术现状与展望[J]. 机电 工程技术,2008,37(4):55-59.
- [2] 杨慎华,寇淑清,谷净巍,等.发动机连杆裂断加工新技术[J].哈尔滨工业大学学报,2000,32(3):129-131.
- [3] 李树军. 连杆裂解集装的研制[D]. 广州:广东工业大学 机电工程学院,2010.
- [4] 范天佑. 断裂理论基础[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [5] 张志强,杨慎华,寇淑清,等.发动机连杆裂断加工数值分析[J].内燃机工程,2006,27(3):62-65.
- [6] 王彦菊.发动机连杆裂解过程数值模拟及裂解参量分析 [D].长春:吉林大学辊锻工艺研究所,2009.
- [7] 李志宏,成锦龙,卢文东.上升式框架锯连杆断裂失效分析[J]. 机电工程技术,2010,39(12):110-114.
- [8] RAJU I S. Calculation of strain energy release rates with higher order and singular finite elements [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1987, 28(3):251–274.
- [9] 张 婷,胡兆吉,涂文锋. 基于参考应力法的蠕变断裂参量的特性研究[J]. 轻工机械,2010,28(2):48-51.
- [10] SIMULA Company. Modeling Fracture and Failure with ABAQUS[K]. SIMULA Company, 2006.

[编辑:张 翔]