

# 断裂面缺损定量分析及其对连杆强度的影响

石舟<sup>1,2</sup>, 寇淑清<sup>1,2</sup>  
(1. 吉林大学 锻锻工艺研究所, 吉林 长春 130025; 2. 吉林大学 材料科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

**摘 要:** 借助连杆裂解实验获得断裂接合面,利用逆向工程重构断裂面,建立带缺损的连杆模型,实现连杆断裂面缺损定量描述.探究不同尺寸、不同位置的缺损对连杆强度的影响,以此为依据制定加工中相关技术标准.通过模拟得出:随缺损尺寸增加,连杆承受的应力逐渐增加,连杆强度降低.缺损面积越大,其对连杆应力的影响越显著.同尺寸缺损当其位于接合面内部时,连杆的等效应力大于其位于接合面边缘,即内部缺损带来的危害高于边缘缺损.为保证连杆强度,缺损尺寸应满足:边缘缺损,当 $1.5\text{ mm} < b < 2.5\text{ mm}$ 时, $a \leq -1.125b + 5.0875$ ;面内缺损,当 $1.4\text{ mm} < b < 2.1\text{ mm}$ 时, $a \leq -1.143b + 4.8$ .

**关 键 词:** 连杆裂解;断裂面;缺损;定量描述;强度;控制标准

**中图分类号:** TK 406      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2019)01-0082-06

## Quantitative Analysis of Fracture Surface Defect and Its Effect on Strength of Connecting Rod

SHI Zhou<sup>1,2</sup>, KOU Shu-qing<sup>1,2</sup>  
(1. Roll Forging Research Institute, Jilin University, Changchun 130025, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China. Corresponding author: KOU Shu-qing, E-mail: kousq@jlu.edu.cn)

**Abstract:** The fracture joint surface was obtained by the fracture-split test and the fracture surface was reconstructed by reverse engineering. The connecting rod model with defect was built. The quantitative description of the fracture surface defect was realized. The effects of fracture surface defect of different sizes and positions on the strength of the connecting rod were explored, and the control standard of the relevant dimension in the processing process was formulated. The rules were obtained: with the defect size increasing, the stress of the connecting rod increases gradually and the strength of the connecting rod decreases. When the defect area is larger, the influence on the stress of the connecting rod becomes more significant. The stress of the connecting rod is greater when defect is inside the joint surface than that at the edge of the joint surface. In order to ensure the strength of the connecting rod, the defect size should meet: defect on edge, when  $1.5\text{ mm} < b < 2.5\text{ mm}$ ,  $a \leq -1.125b + 5.0875$ ; in-plane defect, when  $1.4\text{ mm} < b < 2.1\text{ mm}$ ,  $a \leq -1.143b + 4.8$ .

**Key words:** connecting rod fracture-split; fracture surface; defect; quantitative description; strength; control standard

采用裂解加工生产连杆,其断裂分离后的三维凹凸面直接取代传统机加工平面,实现连杆体与盖装配过程中的三维精确定位<sup>[1-2]</sup>.连杆在裂解加工中会产生各种缺陷,对断裂质量进行分析与检测是传统加工工艺中未曾涉及的新问题.断裂面缺损是断裂剖分产生的主要缺陷之一,不仅影响连杆产品外观,而且减少接合面面积,影响连杆承载能力及啮合精度,降低组件强度<sup>[2-3]</sup>,因此在连杆裂解加工中需加以控制.定量分析裂解连杆断裂面缺损对连杆使用性能的影响,并以此制

定连杆裂解加工的相关控制标准,对保证装配精度及产品质量极为重要. 目前,对于可见边缘缺损,主要参考同行数据对其极限尺寸加以限制,生产中由于面内缺损啮合后不可见,且缺少参考数据,仍无相应的控制标准<sup>[4-5]</sup>.

本文将连杆裂解实验、三维曲面重构技术及有限元模拟相结合,借助连杆裂解实验获得断裂接合面,通过逆向工程进行断裂面重构,根据生产中常见缺损形态,在断裂面上设置缺损,进而建立带缺损的连杆模型,实现裂解面缺损的定量描述,从保证连杆强度角度,探究不同尺寸、不同位置的断裂面缺损对连杆的影响,并确定相关的尺寸控制标准.

## 1 连杆裂解加工及易致缺陷

### 1.1 连杆裂解加工过程

选自某轿车连杆为分析样件,大、小头孔直径分别为 43,18 mm,中心距为 133 mm,连杆材料为 C70S6,热锻制坯,锻后采用空气控制冷却,杆部取样测得材料力学性能参数如表 1 所示.

表 1 C70S6 材料力学性能参数				
Table 1	Mechanical performance parameters of C70S6			
材料	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	屈服强度 $R_{e0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$
C70S6	2.1E5	0.33	578	932

连杆裂解加工三道关键工序:

- 1) 采用自制 LNM-3 型激光切割设备预制裂纹槽,见图 1a. 在连杆大头孔内接合面位置加工两条对称切口,人为制造应力集中源. 激光加工参数为:峰值功率 2.8 kW,脉冲时间 0.4 ms,脉冲频率 45 Hz,切割速度 15 mm/s.
- 2) 在自制裂解设备上进行连杆胀断. 通过楔形拉杆推动胀套水平运动,在大头孔内施加垂直于理论断裂面的水平载荷,缺口根部形成高应力,继而产生裂纹. 随胀断载荷增大,缺口根部裂纹启裂,并快速定向扩展,实现连杆本体与连杆盖低耗能无屑断裂分离,如图 1b 所示.
- 3) 按要求的扭矩与转角对断裂剖分连杆装配螺栓,如图 1c 所示,并进行后续精加工(精镗大、小头孔,压衬套等).

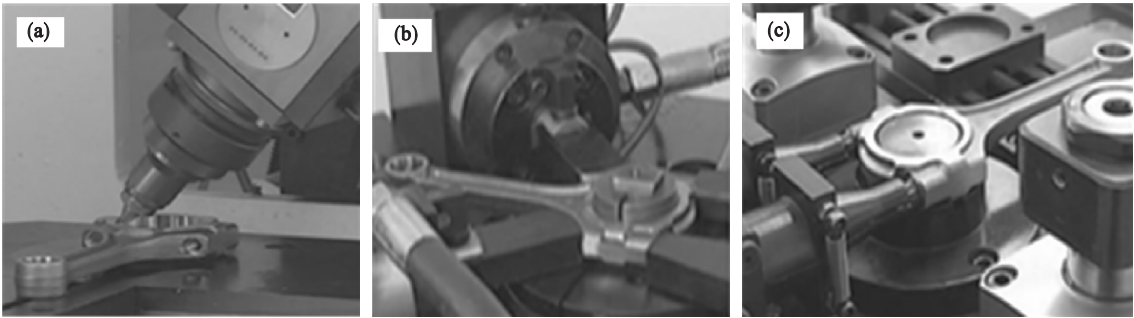


图 1 裂解加工过程  
Fig. 1 Fracture-split process  
(a)—加工裂解槽; (b)—剖分过程; (c)—装配螺栓.

### 1.2 裂解连杆缺陷及常见断面缺损

在连杆裂解加工三道关键工序中均可能产生加工缺陷,如裂解槽加工中出现两条切口深浅不一、位置不对称等;胀断剖分中形成断裂线偏移、缺损、大头孔失圆等;装配螺栓中产生错位、夹渣及扭矩超差等. 其中,有些缺陷保留至最终连杆产品,有些可在后续加工中清除掉.

在有缺口连杆脆性断裂过程中,断裂面表层会发生小块金属剥落而形成断裂面缺损;也可能出现颗粒半脱落(半粘连)现象,俗称夹渣,对此要在装配螺栓前人为除去夹渣,也造成断裂面缺

损. 缺损主要发生在断面内部和外缘. 面内出现的缺损装配螺栓后不可见;外缘出现缺损时,形成外轮廓爆口<sup>[5]</sup>.

由于后续加工中连杆断裂面及外缘不再加工,因此面内缺损及边缘缺损将保留在连杆产品上. 断裂面缺损形态、尺寸各异,如图 2 所示. 技术要求尚无国家和行业标准,目前企业仅依靠经验或参考同行数据,对外缘缺损提出不同程度的技术要求,具体是采用限制爆口长、宽两极限尺寸,要求爆口尺寸  $x \times y \leq 2.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ <sup>[6]</sup>,见图 2.

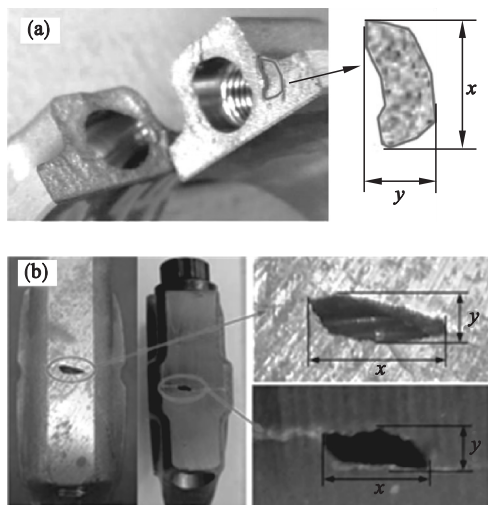


图 2 常见断裂面缺损及其描述形式

Fig. 2 Common fracture surface defects and their description forms

(a)一面内掉渣; (b)一外轮廓爆口。

## 2 含常见断裂面缺损的连杆几何建模

前期基于逆向思维采用三角面片法重构断裂面,目的是估算断裂面面积<sup>[7]</sup>,并不能用于连杆强度分析。

即使同一款连杆断裂面形态也不完全相同,但针对同种材料产品,采用相同的裂解加工工艺,其断裂面具有相似的结构形貌。对其进行分析,对同类产品的分析、设计具有普遍意义。对裂解连杆尤其是含断裂面缺损的裂解连杆进行数值分析时,几何模型构建的关键在于断面重构及断面缺损的处理,前者重在断裂面数据采集及曲面构造,后者在于缺损描述。

### 2.1 断面数据采集

为达到对断面定量描述的精度,首先要获取高质量的点云数据。鉴于连杆断裂面形貌特征及重构精度要求,运用 3500 型 PRO CMM 高速光学仪器采集连杆断面点云数据,连杆断面取自 1.1 节连杆裂解实验。断裂面及扫描后的点云数据见图 3。

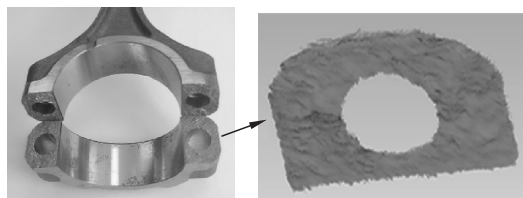


图 3 断裂面及点云数据

Fig. 3 Fracture surface and point cloud data

### 2.2 数据处理

数据测量过程会受环境光、图像处理算法、被测零件几何拓扑及光学遮挡等影响,不可避免地产生随机误差<sup>[8]</sup>,这些误差点会影响重构断裂面的真实程度。因此需进一步优化点云数据,将偏离主点云的孤点、重叠点以及噪音点删除。

### 2.3 构造 NURBS 曲面

过多的点云数据不利于参数化建模,需构造多边形曲面片。NURBS 具有强大形状定义功能,相比传统网格建模其能更好地控制物体表面的曲线度,创建出更逼真的造型<sup>[9]</sup>。根据四边域参数拟合曲面,调整曲面的节点矢量和权因子,利用参数  $u$  和  $w$  创建曲面的节点矢量,将多边形曲面片拟合成 NURBS 曲面,如图 4 所示,将创建的 NURBS 曲面导入 CAD,在断裂面的基础上建立连杆三维分析模型。

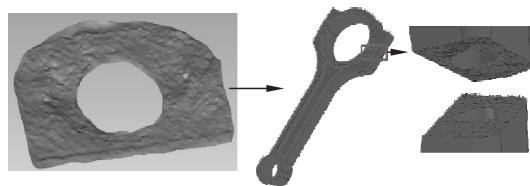


图 4 NURBS 曲面及连杆三维模型

Fig. 4 NURBS surface and 3D model of the connecting rod

### 2.4 断裂面缺损定量描述

目前企业惯用的爆口尺寸限制来源于外观考虑,尚无对连杆使用性能影响的依据;而面内缺损因其在连杆合装后不可见并未考虑和加以限制,也不进行检测。事实上,爆口不仅影响产品外观,同面内缺损一样,减小接合面面积并影响啮合,进而影响连杆和大头盖接合面的承载能力。定量分析连杆断裂面缺损对于连杆使用性能的影响远较外观更重要。因此,对于加工中断裂面缺损(面内与外缘)的限制应首先基于对使用性能影响的分析结果。

缺损随机产生,形状、尺寸、位置不尽相同,与连杆品种(材料、尺寸)、切槽方法、缺口加工质量、断裂加工中的加载、装卡与约束都有关系,具有偶然性且不规则。为分析断面缺损对连杆强度的影响,建模中需对缺损进行统一的数学描述。基于图 2 所述缺损形态及检测惯例,在图 4 连杆三维模型的基础上,建立以不等边椭球描述的缺陷模型,椭球长、短轴( $a, b$ )变化代表缺损尺寸变化,由于缺损一般在厚度方向尺寸较小,故定其尺寸  $c = 1 \text{ mm}$  保持不变。根据缺损的位置,分别建立边缘缺损(外轮廓爆口)和面内缺损(面内掉



渣)两种裂解连杆模型,如图 5 所示.从连杆使用性能角度分析,确定缺损面积和极限尺寸对连杆强度的影响规律,为制定技术要求提供依据.

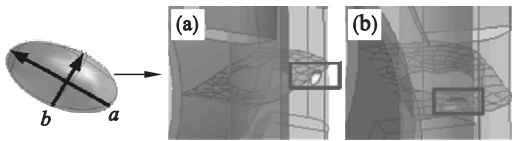


图 5 有缺损连杆建模

Fig. 5 Model of the connecting rod with defect

(a)一边缘缺损;(b)一面内缺损.

### 3 有缺损裂解连杆强度分析

在发动机运行过程中,气缸内的最大爆发压力是惯性力的 7 ~ 10 倍<sup>[10]</sup>.为方便计算,仅取连杆受力状态最恶劣的点火上止点(最大爆压工况),对带有不同尺寸缺损的裂解连杆进行强度分析.认为连杆在点火上止点时满足强度要求,则连杆在整个工作工程中均满足强度要求.

#### 3.1 接触与边界条件设置

连杆受力主要有气体作用力、惯性力、螺栓预紧力及小头与衬套、大头与轴瓦的过盈力,边界条件如图 6a 所示.连杆在工作中属运动构件,在进行静力学分析时消除其刚体位移,限制曲柄销所有的自由度.

图 6b 为连杆组件接触设置:衬套与小头孔、曲轴与大头定义过盈接触,连杆盖与螺栓定义摩擦接触,连杆与螺杆定义绑定接触,连杆盖与连杆采用完全粗糙接触,接合面无滑动自由度.

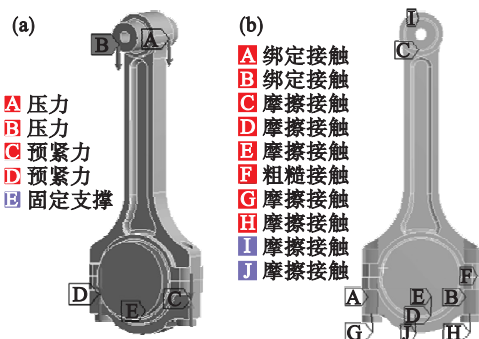


图 6 边界条件与接触设置

Fig. 6 Boundary conditions and contact settings

(a)一连杆载荷设置;(b)一接触设置.

#### 3.2 裂解连杆静强度分析

图 7 为缺损尺寸 2.5 mm × 1.5 mm (经验极限尺寸)的裂解连杆等效应力分布情况.可以看出连杆的最大应力出现在接合面上,且靠近缺损位置.在此尺寸下,无论缺损(矩形框内为缺损位

置)位于接合面边缘还是接合面内部,连杆的最大应力均低于 400 MPa,远低于材料的屈服极限,由此可知,带有 2.5 mm × 1.5 mm 缺损的连杆可以正常使用,目前应用中设定的缺损标准并不合理.

为进一步探究不同缺损尺寸与连杆应力的关系,应用 ANSYS workbench 优化分析模块,建立多组带缺损的连杆有限元模型,见表 2,分析不同缺损尺寸下连杆等效应力情况.

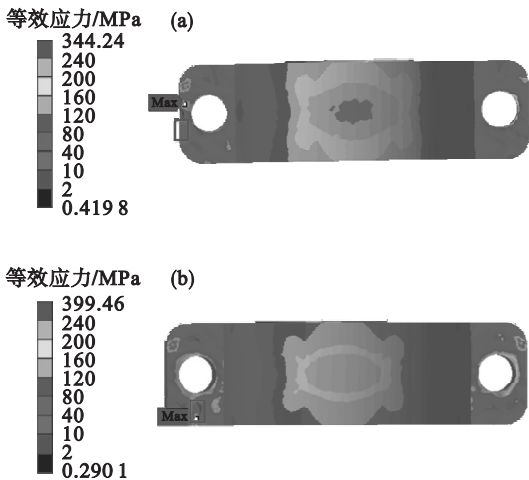


图 7 连杆等效应力分布

Fig. 7 Equivalent stress distribution of the connecting rod

(a)一缺损位于边缘;(b)一缺损位于内部.

表 2 缺损尺寸  
Table 2 Defect sizes

缺损位置	缺损尺寸/mm	
边缘	$2.2 \leq a \leq 3.4$	$1.2 \leq b \leq 2.4$
内部	$2.2 \leq a \leq 3.4$	$1.2 \leq b \leq 2.4$

图 8 为缺损半径变化对连杆应力的影响.从图 8a 可看出,当缺损短轴为定值 1.5 mm 时,长轴尺寸由 2.2 mm 增加到 3.4 mm,连杆等效应力先小幅减小后明显增加;同等尺寸的缺损,其位于接合面内部时连杆的应力高于其位于接合面边缘.由图 8b 可看出,当缺损长轴为定值 2.5 mm 时,短轴由 1.2 mm 增加到 2.4 mm,连杆等效应力逐渐增加;同尺寸下,缺损位于接合面内部时连杆的应力大于缺损位于接合面外缘.总结得出:当长轴和短轴其一为定值时,随着缺损面积增加,连杆应力增加.面内缺损对连杆强度的影响大于边缘缺损:一方面当缺损位于边缘时,实际作用于连杆上的面积小于其位于内部;二是当缺损位于边缘,相当于存在外部缺口,相比于同尺寸的内部缺损能够释放一部分应力集中,故内部缺损带来的

危害高于边缘缺损.

上述分析中缺损一轴为定值,但在实际中,缺损长轴与短轴的尺寸变化任意、无联系. 为此建立缺损长轴与短轴变化和连杆应力三者之间的关系,探究当两轴同时、任意变化时,缺损对连杆强度的影响.

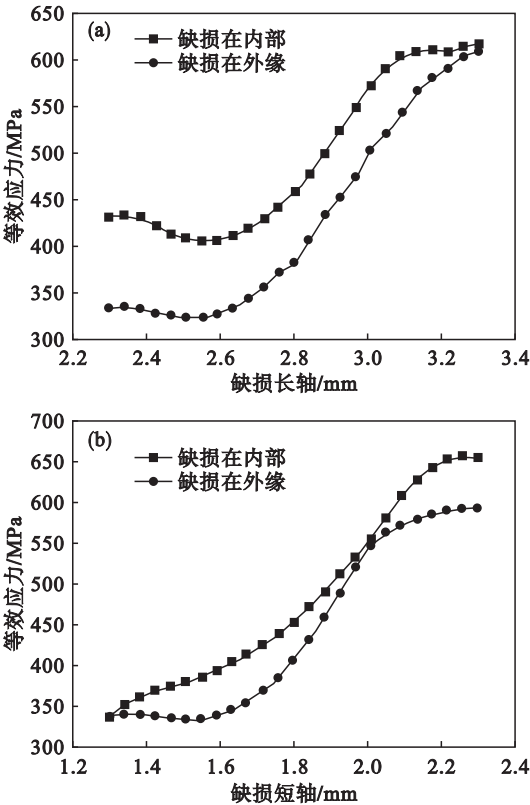


图 8 缺损半径变化对连杆应力的影响  
Fig. 8 Influence of defect radius change on the stress of the connecting rod  
(a)—短轴  $b$  为定值 1.5 mm;  
(b)—长轴  $a$  为定值 2.5 mm.

图 9 为缺损长轴、短轴与连杆最大等效应力三者之间的关系,其中短轴变化范围 1.2 ~ 2.4 mm,长轴变化范围 2.2 ~ 3.4 mm. 图 9a 为缺损位于接合面内部时连杆的应力,可看出,随长轴与短轴的增加,连杆最大等效应力逐渐增加. 图 9b 为缺损位于接合面外缘时连杆的应力,随长轴与短轴增加,连杆最大等效应力先小幅减小后大幅增加,说明缺损面积越大对连杆应力的影响越显著. 图 9 表明,随缺损长轴与短轴尺寸的增加,连杆等效应力的总体变化趋势逐渐增加,即连杆强度逐渐减小.

依据连杆材料的屈服极限 578 MPa,做应力等值线  $AB, CD$ , 见图 9,等值线以下的部分连杆应力小于屈服极限. 将等值线向底部投影,获得等值线以下区域缺损尺寸,如图 10 所示,  $A, B$  为面内

缺损的两极限点,  $C, D$  为边缘缺损的两极限点.  $CD$  线以下区域为许用边缘缺损尺寸范围,  $AB$  线以下区域为许用面内缺损尺寸范围.

可看出,连杆尺寸需满足:边缘缺损,当  $1.5 < b < 2.5$  时,  $a \leq -1.125b + 5.0875$ ; 面内缺损,当  $1.4 < b < 2.1$  时,  $a \leq -1.143b + 4.8$ . 在上述范围以内的缺损尺寸满足连杆使用强度要求.

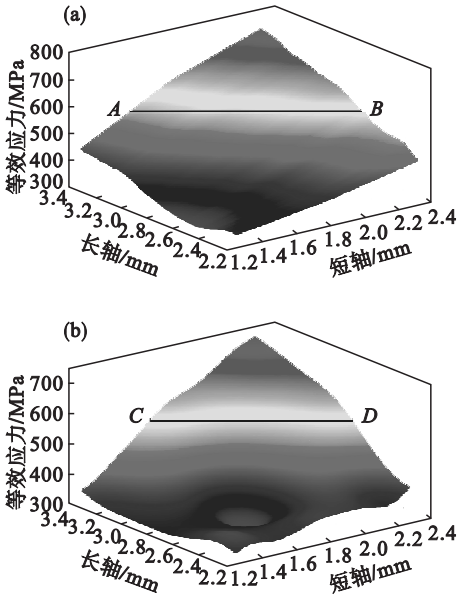


图 9 连杆等效应力随缺损尺寸变化情况  
Fig. 9 Equivalent stress of the connecting rod varying with defect sizes  
(a)—缺损位于内部; (b)—缺损位于边缘.

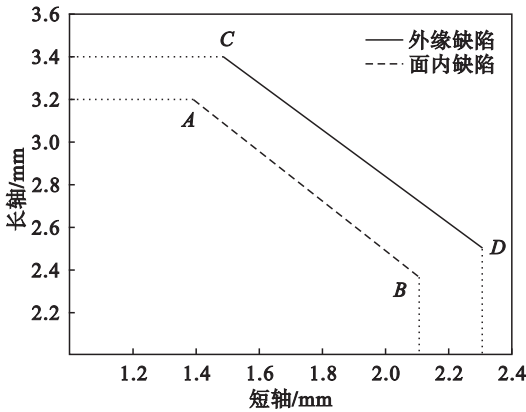


图 10 缺损尺寸范围  
Fig. 10 Defect size range

## 4 结 论

- 1) 通过裂解实验获取连杆断裂接合面,利用逆向工程,重构断裂面,根据生产中常见缺损形态,在断裂面上设置缺损,建立了带缺损的裂解连杆模型,实现断裂面缺损的定量描述.
- 2) 随缺损尺寸的增加,连杆应力逐渐增加,连杆强度降低;同尺寸下,缺损位于接合面内部时

连杆承受的应力大于其位于接合面外缘,即内部缺损带来的危害高于边缘缺损.缺损面积越大,裂解连杆强度越低.结果表明,生产加工中限定外缘尺寸的技术要求并不合理,而面内缺损带来连杆强度降低问题远比外观影响更重要.

3) 在保证裂解连杆强度的条件下,该轿车连杆缺损尺寸需满足:边缘缺损,当  $1.5\text{ mm} < b < 2.5\text{ mm}$  时,  $a \leq -1.125b + 5.0875$ ;面内缺损,当  $1.4\text{ mm} < b < 2.1\text{ mm}$  时,  $a \leq -1.143b + 4.8$ .对比生产中常用轿车连杆外缘爆口要求 ( $x \times y \leq 2.5\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ ),从连杆安全性考虑,该技术要求可适当放宽.

参考文献：

[ 1 ] Wang B,Li M, Yang Y, et al. Note: double-beveled multilayer stagger-split die for a large volume high-pressure apparatus[ J ]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86 ( 8 ):086106.

[ 2 ] 杨宏宇. 连杆断裂剖分过程数值模拟及主要裂解缺陷分析 [ D ]. 长春:吉林大学,2014.

( Yang Hong-yu. Numerical simulation of connecting rod fracture process and analysis on main fracture splitting defects [ D ]. Changchun;Jilin University,2014. )

[ 3 ] Fukuda S,Eto H. Development of fracture splitting connecting rod[ J ]. *Jsaе Review*,2002,23( 1 ):101 – 104.

[ 4 ] Yang H,Kou S,Gao W, et al. Analysis on technology and

defects of fracture splitting of automobile engine connecting rod [ J ]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2015,229( 9 ):1603 – 1613.

[ 5 ] Gu Z,Yang S,Ku S, et al. Fracture splitting technology of automobile engine connecting rod [ J ]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, 25 ( 9 ):883 – 887.

[ 6 ] 寇淑清,杨宏宇,赵勇,等. 裂解连杆断裂面三维重构与缺损尺寸分析[ J ]. 东北大学学报( 自然科学版 ),2014,35 ( 4 ):574 – 578.

( Kou Shu-qing, Yang Hong-yu, Zhao Yong, et al. 3D reconstruction and defect dimension analysis of fracture surface for fracture splitting connecting rods[ J ]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science )*, 2014, 35 ( 4 ): 574 – 578. )

[ 7 ] Shi Z,Kou S Q. Inverse reconstruction of fracture splitting connecting rod and its strength and fatigue life[ J ]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*,2018,18( 3 ):619 – 627.

[ 8 ] Wang B,Li M, Yang Y, et al. Numerical simulation of multilayer stagger-split die and experiment on the bearing capacity[ J ]. *High Pressure Research*,2015,35( 4 ):388 – 395.

[ 9 ] Hughes T J R, Cottrell J A, Bazilevs Y. Isogeometric analysis;CAD, finite elements,NURBS, exact geometry and mesh refinement [ J ]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*,2005,194( 39 ):4135 – 4195.

[ 10 ] Keita O,Hedhli T,Bessrou J. Model for dynamic behavior of the crankshaft of an air cooled diesel engine subjected to severe functioning[ J ]. *International Journal of Automotive Technology*,2014,15( 5 ):823 – 833.



( 上接第 57 页 )

[ 7 ] Mei D,Xing F,Wen M,et al. Numerical simulation of mixed convection heat transfer of galvanized steel sheets in the vertical alloying furnace [ J ]. *Applied Thermal Engineering*, 2016,93:500 – 508.

[ 8 ] 孙用军. 辽西钒钛磁铁矿直接提钒焙烧竖炉气固传热数值计算[ D ]. 沈阳:东北大学,2015.

( Sun Yong-jun. Numerical study of gas-solid heat transfer on roasting shaft furnace for vanadium titano-magnetite in western Liaoning province [ D ]. Shenyang; Northeastern University,2015. )

[ 9 ] Mahmoudi Y, Maerefat M. Analytical investigation of heat transfer enhancement in a channel partially filled with a porous material under local thermal non-equilibrium condition[ J ]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, 50 ( 12 ): 2386 – 2401.

[ 10 ] Nakayama A,Kuwahara F,Sugiyama M, et al. A two-energy equation model for conduction and convection in porous media [ J ]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,2001, 44( 22 ):4375 – 4379.

[ 11 ] 王国胜,董辉,蔡九菊. 球团竖炉热工过程解析与模拟[ J ]. 钢铁,2004,39( 4 ):60 – 63.

( Wang Guo-sheng, Dong Hui, Cai Jiu-ju. Analysis and simulation of thermo process in pelletizing shaft furnace[ J ]. *Iron and Steel*,2004,39( 4 ):60 – 63. )

[ 12 ] 邵颖聪. 辽西钒钛磁铁矿直接提钒焙烧浸出工艺及竖炉热工过程研究[ D ]. 沈阳:东北大学,2015.

( Shao Ying-cong. Experimental study on roasting and leaching process of compact extracting vanadium process and analysis on thermo process in roasting shaft furnace [ D ]. Shenyang;Northeastern University,2015. )