

发动机曲轴箱轴承座裂解加工数值分析

何东野,杨慎华,寇淑清

(吉林大学 辊锻工艺研究所,长春 130022)

摘要:预先精确计算裂解力参数,对于裂解设备设计及工艺过程的制定至关重要。应用 MSC. MARC 软件对捷达轿车发动机主轴承座(以 RuT380 材料为例)起裂过程进行数值模拟,得出了裂解力与 J 积分的关系曲线。根据 J 积分值与断裂韧性的关系,确定了临界 J 积分,采用线性插值的方法获得了裂解力,并进行了实验研究。实验结果表明:此方法也适用于不同结构、不同材料的其他分体类零件裂解加工时裂解力的确定。

关键词:材料合成与加工工艺;发动机;主轴承座;裂解力;蠕墨铸铁;数值分析

中图分类号:TK406 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2009)01-0078-05

Numerical analysis on fracture splitting technology of main bearing block of engine

HE Dong-ye, YANG Shen-hua, KOU Shu-qing

(Roll Forging Research Institute, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Pre-calculating precisely the parameters of the splitting force is significant for the design of the splitting equipment and working out the technological process. The software MSC. MARC was used to simulate the splitting process of the main bearing block (its material is vermicular graphite cast iron as example) in Jetta car engines, and the splitting force versus J -integral relationship was obtained. The critical J -integral value was determined from the J -integral versus fracture toughness relationship, and the splitting force was derived by the linear interpolation method. The experimental study was performed and results show that the proposed method can be used to determine the splitting for the other splitting parts with different shapes and materials.

Key words: materials synthesis and processing technology; engine; main bearing block; fracture splitting force; vermicular graphite cast iron; numerical analysis

裂解技术是分体类零件加工领域中一项新型加工工艺,其本质是利用材料的脆性,在人为制造裂解源的前提下,通过外力使其断裂,达到剖分体分离的目的,这就要求材料和结构既要满足零件的机械力学性能和使用寿命,又要适合裂解工艺的要求且要保证裂解质量^[1-2]。汽车发动机曲轴

箱轴承座的加工与连杆轴承孔的加工在结构、工艺流程方面都适合于裂解工艺。发动机缸体多采用优质灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁等制造,都具有良好的脆性和机械加工性能,适合于裂解加工工艺并容易加工裂解槽。曲轴箱轴承座具有多个轴承孔结构,因此裂解设备需要具备裂解多个轴

收稿日期:2007-10-12.

基金项目:国家自然科学基金项目(50375066).

作者简介:何东野(1960-),男,博士研究生.研究方向:材料精密加工与自动化. E-mail: hedy@jlu.edu.cn

承孔的能力。所以发动机曲轴箱轴承座较之连杆轴承孔更适合于裂解工艺,工艺更加复杂,效益更加明显^[3-5]。作者应用 MSC.MARC 软件对捷达轿车发动机曲轴箱轴承座(以 RuT380 材料为例)起裂过程进行数值模拟,从而确定裂解加工中合适的裂解力参数,并进行了实验验证。

1 裂解加工原理

裂解加工的原理是通过在曲轴箱轴承孔中心处设计并预制缺口(初始裂纹槽),形成应力集中,再主动施加垂直于预定断裂面的载荷进行引裂,当满足发生脆性断裂的条件时,在几乎不发生塑性变形的情况下,在缺口处规则断裂,实现轴承座体与盖的无屑断裂剖分^[5],如图 1 所示。

由于断裂面呈犬牙交错的自然形态,具有极高的配合精度,无需加工。在后续的轴承孔精加工及装配过程中,分离后的盖、体以断裂剖分的三

维曲面精确定位、自然啮合、装配。

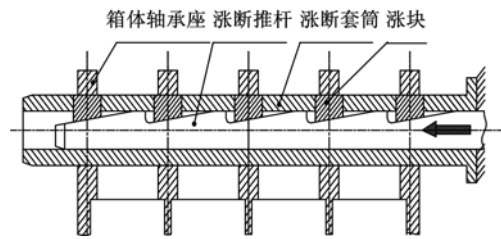


图 1 裂解机构简图

Fig. 1 Sketch map of fracture splitting organization

2 材料组织和力学性能

对铸态蠕墨铸铁 RuT380 进行数值模拟和实验研究,其相关材料参数如下:弹性模量 $E=1.33 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\mu=0.27$,名义屈服应力 $\sigma_{0.2}=310$ MPa,抗拉强度 $\sigma_b=400$ MPa。金相组织如图 2 所示。

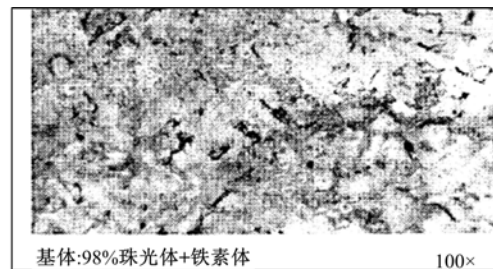
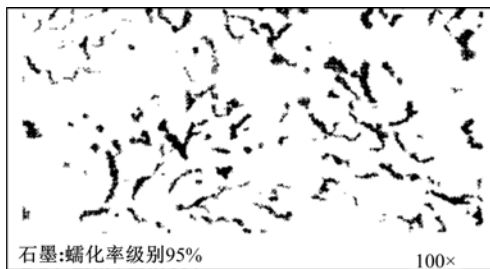


图 2 材料金相组织

Fig. 2 Metallurgical structure of material

3 数值模拟

3.1 箱体曲轴轴承座的建模及简化处理

三维实体造型是有限元数值模拟的基础,数值模拟的前处理阶段需要输入箱体的实体模型(或简化模型)以形成边界条件,根据发动机箱体轴承座结构及在裂解过程中的受力特点,捷达轿车四缸发动机箱体轴承座的简化模型如图 3 所示。

图中公称尺寸为:圆形孔直径 $\varphi=59$ mm, 外端圆弧直径为 100 mm, 两侧宽度为 100 mm, 两螺栓孔间距为 76 mm, 螺栓孔直径为 10 mm, 轴承座厚度为 21 mm。裂解槽深度 $h=0.5$ mm、张角 $2\alpha=20^\circ$ 、曲率半径 $r=0.2$ mm。

根据发动机箱体轴承座在裂解过程中的受力特点,将模型简化分割,由于四缸发动机箱体轴承座裂解过程是五个轴承座同时断裂,各轴承座受力特点相同,取其中之一进行模拟分析即可。将



图 3 发动机箱体轴承座三维图

Fig. 3 Three-dimensional model of engine crankcase bearing block

图 3 模型在裂纹槽对称面进行分割,由于轴承结构左右对称,故可略去原图的一半,这样进行有限元模拟分析的三维零件图就为原来的 1/2。

由于箱体尺寸相对较大,裂解过程中固定不

动,因此箱体下端采用完全固定约束,即: $U_x=U_y=U_z=U_{R_x}=U_{R_y}=U_{R_z}=0$,在箱体的圆弧对称面上,由于结构对称、载荷对称,因此对称分割面上的点在 X 方向无位移,即: $U_x=U_{R_y}=U_{R_z}=0$ 。

发动机箱体轴承座裂解时,由于箱体底端固定不动,胀断套筒对轴承座下半圆弧有径向压力,胀块对轴承座上半圆弧有径向胀力。并且由于是 I 型裂纹,只有径向力的 y 方向分量对裂纹起作用, x 方向分量相互平衡对裂纹不起作用,因此在施加载荷时仅需在上、下半圆弧裂面施加 y 方向载荷即可,在 Marc/metant 有限元模拟软件中,载荷的施加方式有多种,如节点载荷、线载荷、面载荷等,根据轴承座裂解加工工艺特点,在本文模拟分析中,选择节点载荷(point load),图 4 为轴承座载荷及约束的三维简化图。

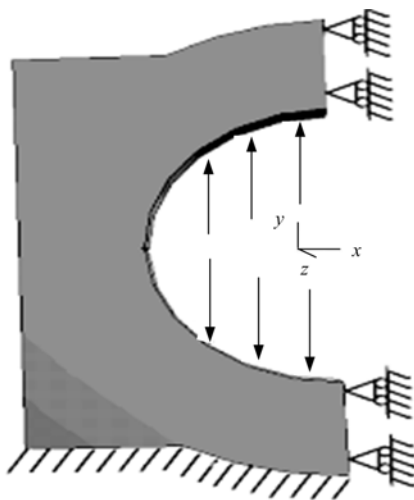


图 4 轴承座载荷及边界条件简化模型

Fig. 4 Loads and boundary conditions of bearing block

3.2 网格划分及奇异性

网格的划分为裂纹区与非裂纹区,预先在模型上留出裂纹区,然后在 Marc/metant 软件中对非裂纹区进行实体建模及网格划分,采用 127 号 8 节点四面体单元(见图 5(a))。然后,生成裂纹区实体模型,采用 21 号 20 节点八面体单元,由于裂纹区实际尺寸较小,放大的裂纹区网格如图 5(b)所示。通过 Glue 功能将非裂纹区与裂纹区的网格粘在一起(见图 5(c)),中心对称面与非裂纹区用 Touching 命令接触连接,最后激活 ID boundary conds 命令,完整的有限元网格模型及边界条件如图 5(d)所示。

对于弹塑性断裂力学,裂尖的应力与应变场产生 $1/r$ 的奇异性,二维情况下,这种奇异性可通

过带有 3 个重叠节点的三角形单元模拟,而对本文三维模型的分析,可采用 20 节点块体等参单元蜕化构造奇异单元来模拟裂纹前缘的应力场^[6],如图 6 所示。

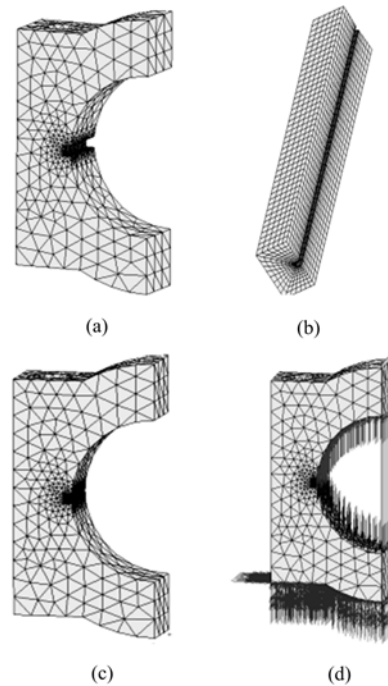


图 5 轴承座网格图

Fig. 5 Mesh graph of bearing block

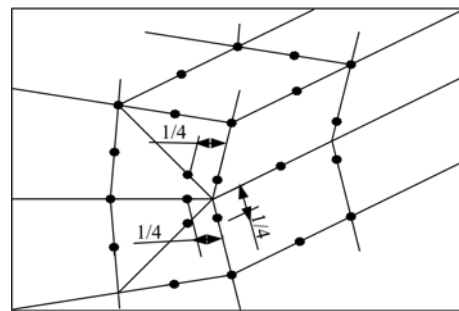


图 6 改进的 1/4 节点单元

Fig. 6 Ameliorated 1/4 node elements

本文采用扩展 J 积分法即 Lorenzi 算法来计算裂纹的 J 积分,并通过拓扑搜索(Topology Search)自动定义积分路径。拓扑搜索法是指程序首先自动选取与裂纹尖点相联系的所有单元的外轮廓线作为第一条积分路径,然后进一步搜索与第一条积分路径相联系的单元的外轮廓线作为第二条积分路径,以此类推,可以较方便地确定积分路径。分析中采用 30 步分步加载,每步增量 4.6 kN。裂纹尖端节点共 43 个, J 积分路径数目定义为 6 个,裂纹尖端节点的允差设为 0.001 mm。经模拟分析得到了每个增量步裂解力对应的所有裂尖节点的 J 积分数据。

3.3 结果处理

为了进行结果分析,必须先计算临界 J 积分, K_{IC} 与 J_{IC} 满足如下关系^[7]:

$$E \cdot J_{IC} = K_{IC}^2 (1 - \mu^2)$$

式中:弹性模量 $E = 1.33 \times 10^5$ MPa;泊松比 $\mu = 0.27$; J_{IC} 为临界 J 积分; K_{IC} 为临界断裂韧性。

根据参考文献[8]的试验结果,取 $K_{IC} = 28.46$ MPa \cdot m^{1/2},经计算得 $J_{IC} = 5.646$ N/mm。

对应每一步增量,在每一个选取的裂尖节点处会按自动拓扑法确定 6 条积分路径,对应每一裂纹尖点的积分路径都会得到一个 J 积分值。

下面是以第 17 步的三个裂尖节点为例得到的结果:

```
start of increment 17
j-integral estimations:
crack tip node      path radius          j-integral value
.....
10388                4.4637E-02          6.8097E+00
10388                1.4052E-01          9.3570E+00
10388                3.0093E-01          1.0159E+01
10388                5.1955E-01          1.0307E+01
10388                8.0242E-01          1.0365E+01
10388                1.1522E+00          1.0383E+01
10390                4.4637E-02          6.9200E+00
10390                1.4052E-01          9.5167E+00
10390                3.0093E-01          1.0335E+01
10390                5.1955E-01          1.0483E+01
10390                8.0242E-01          1.0538E+01
10390                1.1522E+00          1.0554E+01
10392                4.4637E-02          6.9407E+00
10392                1.4052E-01          9.5054E+00
10392                3.0093E-01          1.0294E+01
10392                5.1955E-01          1.0428E+01
10392                8.0242E-01          1.0477E+01
10392                1.1522E+00          1.0489E+01
.....
end of increment 17
```

从上述结果可看出:对于每个裂纹节点的第三至第六积分路径的 J 积分值相差很小。证明了 J 积分值的守恒性。而第一和第二积分路径的 J 积分值与第三至第六积分路径的 J 积分值相差很大。这是由于第一、第二积分路径离裂尖太近,所以 J 积分值失真,数据处理时,只取裂纹尖点上的第三至第六条积分路径的 J 积分值,从而保证 J 积分值的守恒性。进一步取所有的裂纹节点的 J 积分值的平均值作为第 17 步增量的 J 积分值,此时裂解力为 78.2 kN,平均 J 积分值为 7.452 N/mm。依此处理方法,可以描出裂解力与 J 积分的关系曲线,如图 7 所示。

由图可看出: J_{IC} 位于第 14 步与第 15 步之间,其坐标值为(64.4, 5.611)和(69.0, 6.24)。利

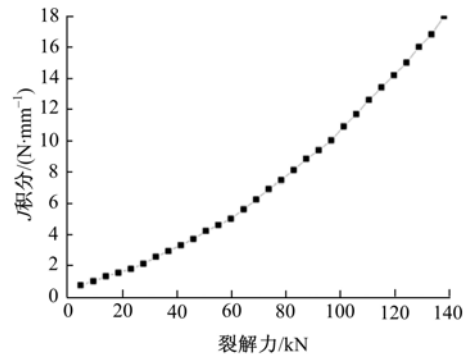


图 7 裂解力与 J 积分的关系曲线

Fig. 7 Relation curve between fracture splitting force and J integral

用插值法可以求得:当 $J = J_{IC} = 5.646$ N/mm 时,所对应的裂解力为 64.66 kN。根据对称性,则总裂解力阈值 $F = 2 \times 64.66 = 129.32$ kN。

4 实验验证

为了验证模拟分析的正确,在 CSS-88300 材料试验机上用专门设计的装置(见图 8)进行了实验验证,设备最大公称拉力为 300 kN,计算机的信号采集速率为 200 次/s,实验温度为室温,速度为 4 mm/s。试件裂解槽尺寸为:裂解槽深度 $h =$



图 8 CSS-88300 材料试验机及试验装置

Fig. 8 CSS-88300 material testing machine and testing set

0.5 mm、张角 $2\alpha = 20^\circ$ 、曲率半径 $r = 0.2$ mm。共实验 3 件(见图 9)。根据实验,平均裂解力为 137 kN(图 10 为实验曲线之一)。由计算可知,模拟值与试验值的误差为:

$$\mu = (137 - 129.32) / 137 \times 100\% = 5.6\%$$

由于 J_{IC} 对应的裂解力实际上是裂纹启裂的裂解力阈值,即满足预制裂纹槽启裂的最小力。理论上,裂纹启裂后能否快速扩展直至断裂,取决于裂纹扩展时的弹性释放能是否满足裂纹扩展对表面能的要求。如果弹性释放能大于表面能,裂纹能够自动扩展;反之,则必须提高外力克服表面

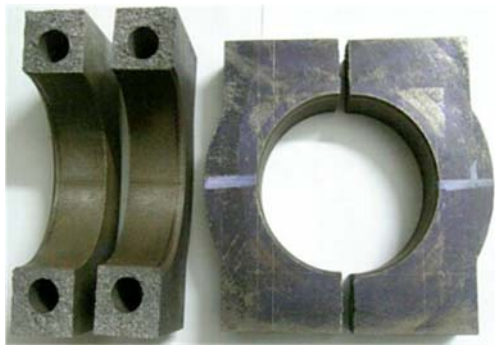


图 9 试件

Fig. 9 Testing parts

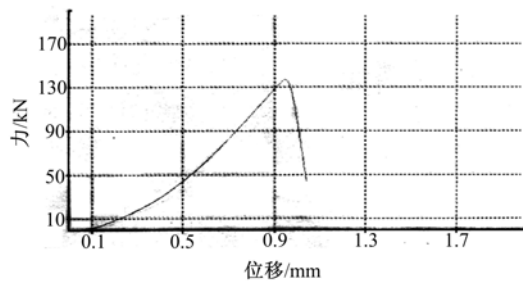


图 10 裂解力实验曲线

Fig. 10 Experiment curve of fracture splitting force

能,裂纹才能自动扩展。可见裂解力达到裂解力阈值时,未必能够保证裂纹自动扩展,这由材料的性能所决定。因此,本文将达到裂解力阈值时的裂解力视为断裂的裂解力(即保证裂纹自动扩展的力)与实验得到断裂的裂解力结果进行比较,无疑会带来一定的误差。

5 结束语

曲轴箱轴承座裂解加工工艺是随着汽车工业的发展而产生的一种新型加工工艺。应用 MSC.MARC 软件对发动机曲轴箱轴承座裂解过程进行了数值分析,采用了 20 节点块体等参单元蜕化构造奇异单元来模拟裂纹尖点的奇异性,得出了裂解力与 J 积分的关系曲线,根据 RuT380 材料的临界 J 积分值,确定了裂解加工所需的裂解力。实验表明:此方法适用于不同结构、不同材料

的其他剖分类零件裂解加工时裂解力的确定。为设计裂解设备及制定工艺参数提供了可靠的数据,并奠定了坚实的理论基础。

参考文献:

- [1] Fukuda S, Eto H. Development of fracture splitting connecting rod[J]. J SAE Review, 2002, 23(1): 101-104.
- [2] 寇淑清, 杨慎华, 赵勇, 等. 发动机连杆裂解加工及其关键技术[J]. 吉林大学学报:工学版, 2004, 34(1): 85-90.
Kou Shu-qing, Yang Shen-hua, Zhao Yong, et al. Fracture-splitting process of engine connecting rod and its key techniques[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2004, 34(1): 85-90.
- [3] Mohamed A Fetouh. Method for making a split bearing assembly[S]. United States Patent, 4569109.
- [4] 何东野, 杨慎华, 寇淑清. 发动机曲轴箱轴承座裂解加工新工艺[J]. 新技术新工艺, 2007(9): 43-46.
He Dong-ye, Yang Shen-hua, Kou Shu-qing. The new fracture splitting technology of crankcase bearing block of engine[J]. New Technology and New Process, 2007(9): 43-46.
- [5] Hahnel Michael, Wisniewski Horst. Device for fracture-splitting a workpiece[S]. United States Patent: US2002070257.
- [6] 航空航天工业部科学技术研究院. 弹塑性断裂力学工程应用指南[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991: 235-248.
- [7] Folch L C A, Burdekin F M. Application of coupled brittle ductile model to study correlation between Charpy energy and fracture toughness values[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 63: 57-80.
- [8] 朱成九, 张安哥. 蠕墨铸铁断裂韧度的试验研究[J]. 机械强度, 2007, 29(2): 310-314.
Zhu Cheng-jiu, Zhang An-ge. Experimental study-fracture toughness of vermicular cast iron[J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(2): 310-314.