

Nd: YAG 激光烧蚀裂解加工技术模拟分析与实验研究*

于歌¹⁾ 杨慎华¹⁾ 王蒙¹⁾ 寇淑清¹⁾ 林宝君^{1)†} 卢万春²⁾

1) (吉林大学, 锻压工艺研究所, 长春 130022)

2) (长春轨道客车股份有限公司, 长春 130062)

(2011年11月10日收到; 2011年2月14日收到修改稿)

激光裂解技术能够极大改善发动机缸体主轴承座的加工质量并显著提高加工效率. 为探寻 Nd: YAG 激光烧蚀球墨铸铁材料裂解槽的裂解性能, 本文基于有限元法成功构建了发动机缸体主轴承座激光裂解加工过程仿真模型, 针对 QT500-7 球墨铸铁主轴承座的裂解参数进行了仿真分析. 研究表明: 在影响裂解质量的三个裂解槽几何参数中, 槽深较张角及曲率半径对裂解载荷的影响效应更为明显; 裂解载荷随槽深的增加而迅速降低, 随槽张角和曲率半径的增加而升高; QT500-7 球墨铸铁发动机缸体主轴承座激光裂解加工优化参数应为裂解槽深选为 0.5 mm, 裂解槽张角选为 60°, 裂解槽半径选为 0.2 mm. 有限元模拟分析结果得到了单向拉伸实验结果的验证. 本工作通过 ABAQUS 仿真模拟及大量裂解载荷试验确立了裂解槽几何形状的优化参数, 为显著降低裂解载荷和优化裂解工艺提供了数值参考, 有利于实现发动机缸体加工的快速发展和, 从而促进汽车工业实现绿色制造.

关键词: 激光裂解技术, 裂解槽, 球墨铸铁, 有限元法

PACS: 28.52.Av, 42.55.-f, 42.62.-b

1 引言

近年来, 物理激光技术取得了飞速发展, 广大科技工作者探索和研究了新的激光物理现象和新型高功率激光器^[1-5], 解决了高功率激光中光学、电学、热学和材料等方面的应用基础和关键技术、获得了高功率、高光束质量、高稳定性、长寿命的激光; 进行了激光与物质相互作用的研究, 促进了激光的应用和发展, 并力求能够进一步开发新的应用领域. 因此, 开展新型激光应用技术研究对于促进物理激光技术发展具有较为重要的现实意义.

本文基于激光工作原理、断裂力学、弹塑性力学及应力集中理论研究激光烧蚀后材料表面组织结构, 并在外力作用下实现其裂解加工, 实现了一项新的激光应用技术——激光裂解技术^[6]. 激光裂解加工技术作为一种既新颖, 又实用且突破传统加工理念的加工技术, 已经从根本上改变了传统加工方法, 是对传统加工方法的一次重大变革^[7].

与传统加工技术相比, 激光裂解加工技术具有简化工艺流程、节省机加工时间及加工设备, 制造精度高、降低生产成本等传统方法无可比拟的优点, 因而激光裂解技术具有广阔的市场应用前景^[8].

发动机缸体主轴承座裂解加工技术在国外的应用刚刚开始, 德国和美国的企业均进行了前期的研发, 截至目前, 两国发表的专利主要来自德国 BMW 公司、德国 Walzlager Schaeffler KG 公司、德国 KESSLER KG MASCH 公司和美国通用汽车公司. 美国通用汽车公司的设计为机械式芯轴裂解机构. BMW 公司的专利 DE19547388 为裂解槽拉刀机构, 增加了一道工序单独拉削裂解槽; 专利 US5716145 将断裂剖分面的设计成倾斜的结构, 安装螺栓困难; Walzlager Schaeffler KG 的专利 US5462366 将曲轴轴承座与缸体分体加工, 反而增加了定位面的加工量; 德国 KESSLER KG MASCH 公司的专利 US2004011842A1 是由液压缸推动芯轴内的推杆水平运动, 每个轴承盖上方均安装有背压油缸, 不适于多品种的生产^[9]. 激光烧蚀

* 国家自然科学基金 (批准号: 50375066) 和吉林省科技发展计划重大项目 (批准号: 20075003) 资助的课题.

† E-mail: linbj@jlu.edu.cn

应用于裂解技术已成为一个国家发动机缸体制造业和激光先进制造技术水平的重要标志. 为适应国际市场快速发展, 吉林大学锻工艺研究所应用激光烧蚀裂解理论对发动机连杆的裂解加工已经进行了深入的研究^[10-12], 基于此研发基础现将激光烧蚀技术应用于发动机缸体主轴承座裂解加工, 这是将激光物理理论应用于现代制造业的重大创新.

利用 Nd: YAG(Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet; Nd: Y3Al5O12) 固体激光烧灼裂解槽是裂解加工技术的关键步骤, 也是裂解加工的首要与核心工序. 裂解槽是形成应力集中的起点, 它的形状和参数影响着整个起裂过程, 并引导裂纹扩展方向, 直接关系到裂解载荷的大小和裂解质量.

为探寻 Nd: YAG 激光烧蚀球墨铸铁材料裂解槽的裂解性能, 本文采用数值模拟和断裂剖分实验对 QT500-7 球墨铸铁材料主轴承座激光裂解加工过程进行了研究. 此方法将三维凸凹断裂面替代传统加工面, 改变传统工艺中的分体加工方法, 断裂面作为后续加工及装备的基准, 简化接合面精确定位所需的复杂结构, 避免由诸多不良因素所造成的误差累积, 无需磨削加工工序, 使加工成本大大降低, 提高了产品质量. 本工作有利于实现发动机缸体制造的快速发展, 促进汽车工业实现绿色制造, 对于我国激光技术和汽车工业的发展具有重要的现实意义.

2 缸体主轴承座裂解原理

激光烧蚀裂解加工技术的理论基础为激光切

割理论^[13], 利用高辐射强度激光束作用于金属表面, 使金属表面产生相变、熔化、气化, 金属内部受到热压缩作用, 金属表面受到金属蒸气和等离子体膨胀所产生的骇波冲击, 并伴随等离子体喷射, 微观粒子发射, 等各种复杂物理现象. 金属材料吸收了外来激光提供的能量后, 将形成晶格点阵的原子激活进而使光能转换成热能, 并向表面内部进行热传导和热扩散^[14], 被熔化和气化的金属材料被辅助气体带走形成空洞或连续的凹槽, 实现切割. 由断裂力学原理和应力集中原理, 当物体受到垂直于断裂平面的正应力作用时, 将发生低应力脆性断裂, 即张开型断裂. 其特点是断裂时承受的应力较低, 通常远远低于材料的屈服强度, 塑性变形小, 断口方向与正应力垂直^[15].

发动机缸体主轴承座激光裂解加工技术通过激光在缸体主轴承座内孔两侧预制裂解槽, 从而形成初始裂纹源, 然后在裂解装备上施加垂直于预定断裂面的载荷引裂, 从而实现轴承座盖与体的无屑断裂剖分. 分离后的轴承座盖与体在断裂面处具有凹凸不平的三维结构特征, 能够实现后续加工及装配时盖、体之间的自然准确啮合, 相互锁定, 保证了二者之间的精确定位, 消除相对运动, 大幅度提高发动机缸体的整体强度, 减少轴承座中心孔变形, 使轴承座承载能力、抗剪切能力和装配质量大幅提高.

图 1 为发动机缸体主轴承座激光裂解过程示意图. 首先在轴承孔预剖分的平面应用 Nd: YAG 激光切割器烧蚀, 如图 1(a) 所示; 激光作用在裂解槽位置形成应力集中, 如图 1(b) 所示; 之后由胀断推

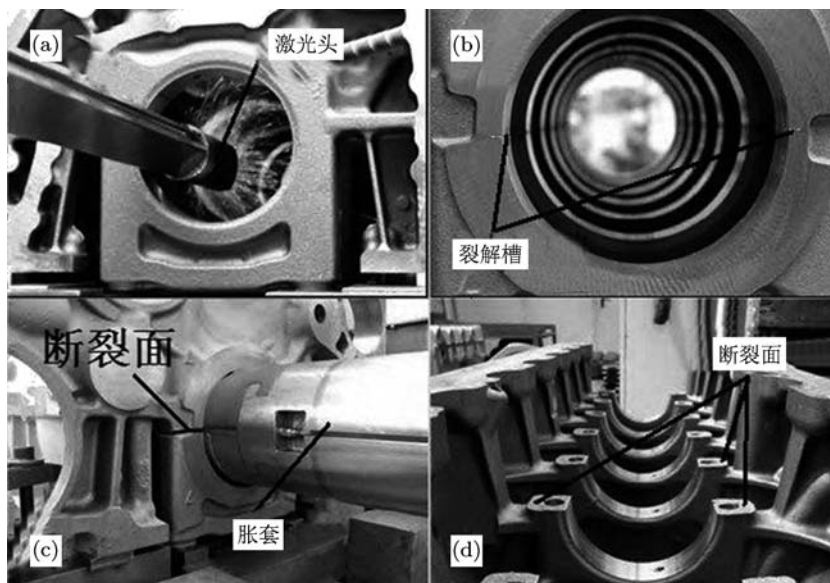


图 1 主轴承座裂解过程示意图 (a) 激光烧蚀裂解槽; (b) 烧蚀后裂解槽; (c) 胀断; (d) 胀断后的主轴承座机体

杆和背压装置共同施加垂直于预制断裂面的裂解载荷进行胀断,如图1(c)所示;胀断后的发动机缸体主轴承座如图1(d)所示.在整个加工工艺流程中,预制裂纹槽是裂解加工技术的关键步骤,也是裂解加工的首要与核心工序.预制裂纹槽的加工方法、几何尺寸及激光加工参数对缸体主轴承座裂解加工质量有决定性影响.图2为裂解装置三维仿真示意图.

3 发动机缸体主轴承座模型

3.1 材料参数

发动机缸体多采用优质灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁等制造,它们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.本文选用牌号为QT500-7的球墨铸铁为缸体材料进行模拟分析,其弹性模量为 1.68×10^5 MPa,泊松比为0.24,断裂应力为506 MPa,名义屈服应力为365 MPa.

3.2 三维建模

发动机缸体轴承座裂解过程是六缸的轴承座

同时断裂,各轴承座受力特点相同,因此,取其中之一进行模拟分析即可研究发动机缸体各轴承座的受力情况.此外,基于轴承结构具有的对称性,以图3(a)对称面为中心取原模型的二分之一进行模拟分析.首先采用三维建模软件进行发动机缸体主轴承座的建模,然后导入ABAQUS环境下进行有限元分析.如图3(b)所示,圆形孔的尺寸为 $\phi 59_{-0}^{+0.074}$ mm,外端圆弧尺寸为 $\phi 100_{-0.2}^{0.1}$ mm,两侧宽度为 $100_{-0.207}^{0.120}$ mm,两螺栓孔间距为76 mm,两孔直径为 $\phi 10$ mm,轴承座厚度为 $21_{+0.1}^{0.2}$ mm.

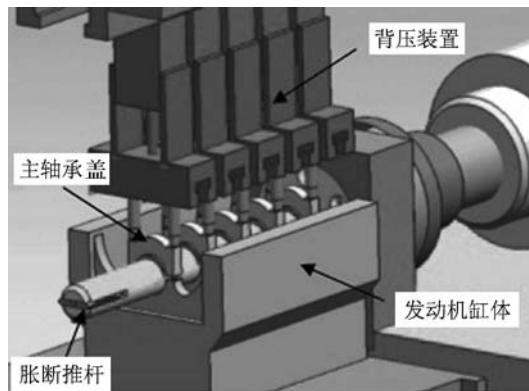


图2 主轴承座裂解装置示意图

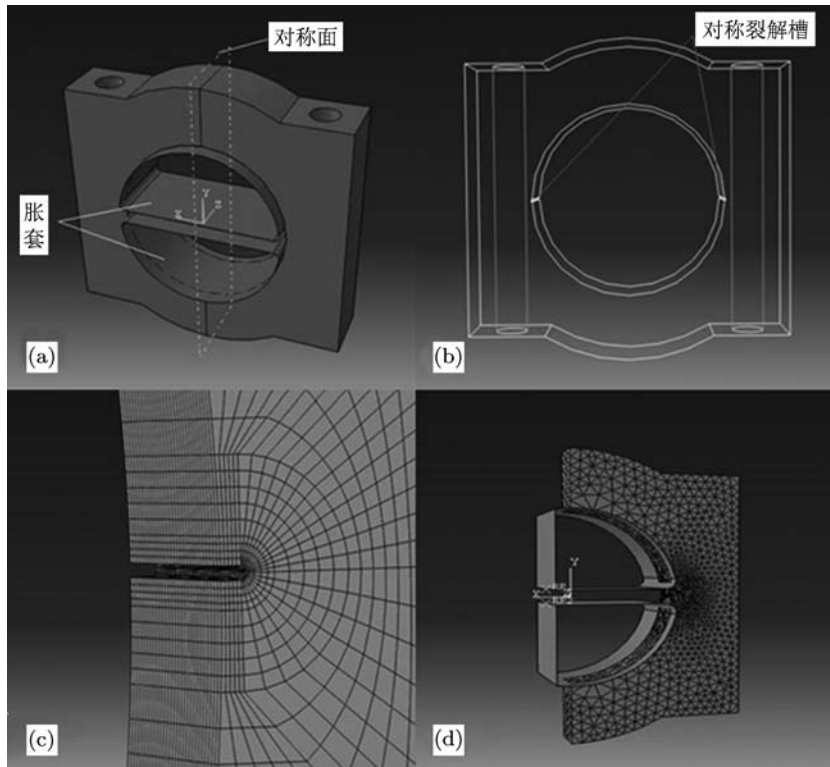


图3 主轴承座有限元简化模型 (a) 主轴承座实体建模; (b) 裂解槽几何位置; (c) 裂解槽网格局部放大; (d) 有限元模型

图 4 为德国卡尔蔡司 (ZEISS) EV018 扫描电子显微镜观察下的激光加工的预制裂解槽截面形貌, 因此按照裂解槽形态建模, 将裂解槽简化为 V 形槽. 为模拟裂纹尖端应力场的奇异性, 需要将部件划分为裂纹区与非裂纹区. 裂尖有较大的应力集中, 因此, 在裂尖区域应该划分细密网格来获得精确的应力和应变求解. 与应力应变求解不同的是, J 积分作为断裂力学中的能量标准, 不可以用粗糙的网格获得精确值, 并且只有六面体网格才能计算 J 积分值, 因此在网格划分时, 我们对裂尖部分单独分区并对求解区域的边界单独布种, 以保证裂尖区域的网格细密性和与外部粗糙网格区域的过渡. 裂纹区单元中采用 20 节点缩减积分六面体单元 (C3D20R); 非裂纹区单元中采用 10 节点修正四面体单元 (C3D10M), 此类型的单元适合于接触问题的分析, 实体显示模型如图 3(a) 所示. 为了更好地在裂纹区划分网格, 在裂纹区内部又划分几个区域, 图 3(c) 为裂纹区放大图. 裂纹区的材料属性要考虑激光加工对此区域材料属性的影响 [16,17]. 本文采用有限元方法对带有激光加工裂解槽的主轴承座裂解过程进行了数值模拟, 模拟过程中的断裂判据是激光加工裂解槽情况下的等效断裂判据, 其小于材料原始状态的断裂韧性判据, 即由于采用激光加工工艺使裂解槽局部材料脆化, 有利于裂解槽起裂, 减小轴承座裂解载荷. 文中的模拟断裂载荷都是采用激光加工裂解槽情况下的等效断裂判据计算而得.

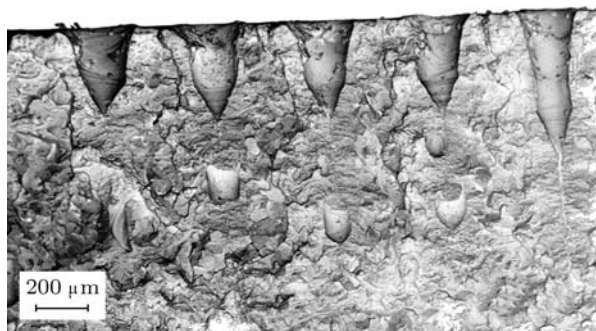


图 4 激光加工的预制裂解槽截面形貌

胀套与轴承座的接触属于硬接触问题, 对于动套和定套, 由于其强度和硬度都远大于缸体材料, 可以视作刚性体, 因此建模采用解析刚体, 取二分之一后网格模型如图 3(d) 所示. 分析中共有三个接触体, 即轴承座、动套和定套 (统称胀套). 轴承座分别与动套和定套定义为小滑动接触, 接触属性为法向“硬”接触. 由于缸体体积较大, 胀断时固定不

动, 因此, 缸体下端采用完全固定约束. 动套对轴承座上半圆弧有径向胀力, 定套对轴承座下半圆弧有径向压力, 因此对动套施加 0.5 mm 位移载荷, 对定套采用完全固定约束.

选取预制裂纹槽根部作为裂纹尖端, q 向量平行于裂纹表面. 通过指定不同的中间节点参数和裂纹尖端单元的退化性可以定义不同的应力奇异性. 裂纹尖端单元退化控制采用单一节点退化单元用以模拟 $r^{1/2}$ 阶奇异性. 分析中共有 41 个裂纹尖端节点, 输出裂纹尖端节点的 J 积分值作为后处理分析的对象, 每个裂尖节点选取 8 条积分路径, 取同一时刻所有裂尖节点 J 积分平均值作为该时刻的 J 积分值, 由此可得 J 积分与载荷的关系, 实验测得应力强度因子 K_{IC} 为 41.93 MPa·m^{1/2}, 根据 K_{IC} 与临界 J 积分 J_{IC} 的关系 [18] 为

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

计算得临界 J 积分为 9.862 N/mm, 最后采用线性插值法即可求得相应的裂解载荷.

4 模拟分析结果与讨论

近些年, 主轴承座裂解槽的位置大体没有变化, 但是通过逐渐优化的加工方法人们获得了最佳的裂解槽几何参数. 理想的裂解槽是在满足裂解工艺的同时, 在较小的裂解载荷作用下断裂, 以达到成品率高, 节约能源的目的 [19]. 因此, 裂解槽优化设计的最终目的是尽量减少轴承座的裂解载荷. 影响裂解载荷的裂解槽几何参数主要有三个: 槽深 h 、槽张角 α 和槽尖部曲率半径 r . 下面分别对这三个参数在胀断过程中对裂解力 F 的影响进行数值模拟分析.

4.1 裂解槽的槽深对裂解载荷的影响

为深入探求槽深对裂解的影响, 分别选取裂解槽张角 $\alpha_1 = 90^\circ$, 曲率半径 $r_1 = 0.1$ mm; $\alpha_2 = 20^\circ$, $r_2 = 0.05$ mm; $\alpha_3 = 60^\circ$, $r_3 = 0.2$ mm 这三种情况, 槽深 h 相应选取 $h_1 = 0.3$ mm, $h_2 = 0.4$ mm, $h_3 = 0.5$ mm, $h_4 = 0.6$ mm 及 $h_5 = 0.7$ mm, 研究 h 对裂解载荷的影响规律. 如图 5 所示模拟结果表明, 当槽深 h 增加时, 裂解载荷 F 显著下降, 二者近似线性关系. 以 $\alpha_3 = 60^\circ$, $r_3 = 0.2$ mm 为例, 当槽深度为 $h_1 = 0.3$ mm 时, 裂解载荷 $F_1 = 243.11$ kN; 当槽深度增大到 $h_5 = 0.7$ mm 时, 裂解载荷仅

为 $F_5 = 132.57 \text{ kN}$. 由此可得, 主轴承座裂解载荷随初始裂解槽深度的增加而迅速减小, 在加工工艺允许的条件下, 为了减小裂解载荷, 应当尽可能设计较深的预制裂解槽, 但由于缸体主轴承座机体和盖装配螺栓等工序要在胀断之后进行, 之后还需要对轴承孔进行精镗加工, 如果槽深设计过大, 精镗加工后可能会产生残余应力, 影响缸体的质量. 基于上述模拟结果及发动机缸体主轴承座后续加工尺寸预留需要, 本文取槽深 $h = 0.5 \text{ mm}$ 为最优值.

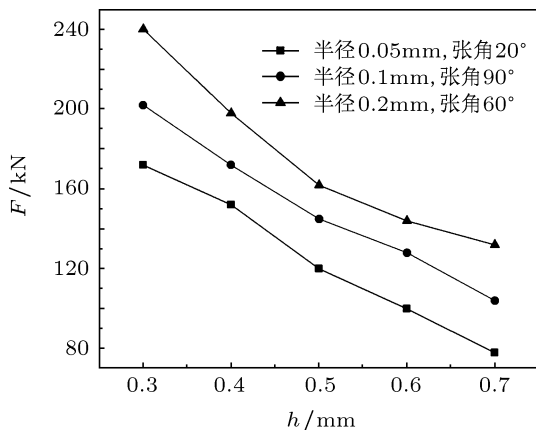


图5 裂解槽的槽深对裂解载荷的影响

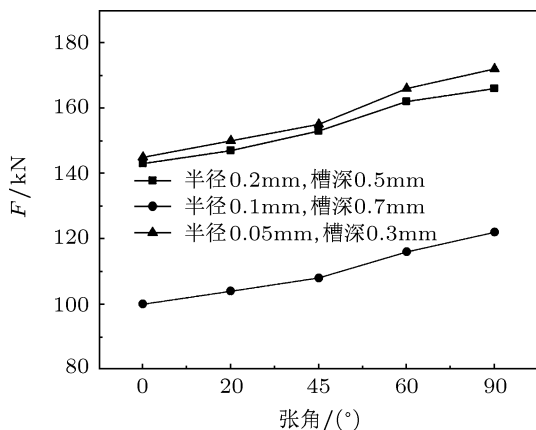


图6 激光加工中裂解槽的张角对裂解载荷的影响

4.2 裂解槽的张角对裂解载荷的影响

为探求初始裂解槽张角 α 对裂解载荷的影响趋势, 选取裂解槽深 $h_1 = 0.7 \text{ mm}$, 曲率半径 $r_1 = 0.1 \text{ mm}$; $h_2 = 0.5 \text{ mm}$, $r_2 = 0.2 \text{ mm}$; $h_3 = 0.3 \text{ mm}$, $r_3 = 0.05 \text{ mm}$ 三种情况, 只改变张角 α , 选取 $\alpha_1 = 0^\circ$, $\alpha_2 = 20^\circ$, $\alpha_3 = 45^\circ$, $\alpha_4 = 60^\circ$ 及 $\alpha_5 = 90^\circ$ 进行数值计算. 图6为计算得出的张角 α 与裂解载荷 F 的关系曲线, 图示曲线表

明, 以 $h_2 = 0.5 \text{ mm}$, $r_2 = 0.2 \text{ mm}$ 曲线为例, 张角在 0° — 90° 时, 裂解载荷 F 随着张角的增加而增大, 呈线性关系, 但增加幅度小. 当最小张角 $\alpha_1 = 0^\circ$ 时, 所需的裂解载荷 $F_1 = 143.72 \text{ kN}$ 最小; 在最大张角 $\alpha_5 = 90^\circ$ 处裂解载荷 $F_5 = 168.05 \text{ kN}$ 最大. 当张角增加到 20° , 45° , 60° , 90° 时, 裂解载荷递增的幅度分别为 4.05% , 4.70% , 3.85% 和 4.63% , 由此表明, 张角的变化对裂解载荷没有显著影响, 综合考虑断裂效率, 裂解加工质量, 加工的可行性等因素, 设计最优张角为 60° .

4.3 裂解槽的曲率半径对裂解载荷的影响

为进一步分析裂解槽曲率半径对裂解载荷的影响, 基于有限元分析, 分别选取裂解槽张角 $\alpha_1 = 90^\circ$, 槽深 $h_1 = 0.3 \text{ mm}$; $\alpha_2 = 20^\circ$, $h_2 = 0.7 \text{ mm}$; $\alpha_3 = 60^\circ$, $h_3 = 0.5 \text{ mm}$ 三种情况, 改变曲率半径 $r_1 = 0.05 \text{ mm}$, $r_2 = 0.1 \text{ mm}$, $r_3 = 0.2 \text{ mm}$ 及 $r_4 = 0.3 \text{ mm}$. 模拟结果如图7所示, 从曲线可以看出, 随着曲率半径 r 的增加, 裂解载荷 F 随之增加. 由此可得, 在实际加工条件允许的情况下, 预制裂解槽应尽量选用小的曲率半径. 传统加工工艺多用拉削方式加工裂解槽^[20], 过小的曲率半径对拉刀的尺寸要求很高, 且磨损严重, 减短拉刀的使用寿命, 而采用激光加工, 通过数控机构调整激光束参数, 能够达到曲率半径 $r = 0.05 \text{ mm}$ 以下, 根据图7中的模拟结果, 当 $r = 0.2 \text{ mm}$ 时, 是曲率半径与载荷关系的一个拐点, 考虑激光对金属材料的物理作用取决于离焦量、作用时间、功率密度、峰值等多方面因素, 设计最优曲率半径 $r = 0.2$.

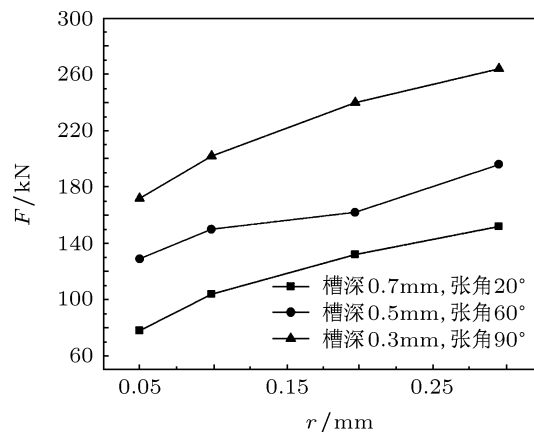


图7 槽根部曲率半径对裂解载荷的影响

5 实验及误差分析

为了证明上述数值模拟计算的有效性,在 CSS-88300 材料试验机 (图 8) 上,进行了单向拉伸实验^[21,22].保持半径 $r = 0.2 \text{ mm}$,槽深 $h = 0.5 \text{ mm}$ 不变,采用不同离焦量和脉宽,用激光加工张角 $\alpha = 20^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 的四种裂解槽,每个张角试验三件.测得平均裂解力分别为 156.45 kN, 161.48 kN, 165.28 kN, 174.94 kN;与模拟裂解载荷的误差分别为 5.2%, 4.4%, 1.9%, 4.1%.

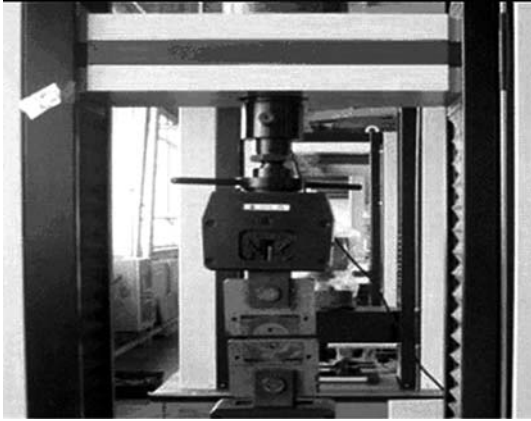


图 8 CSS-88300 材料试验机

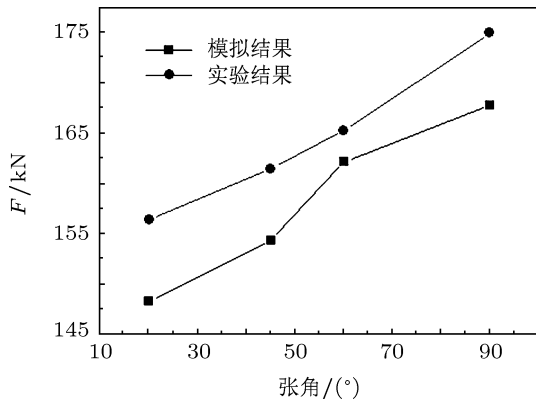


图 9 实验与模拟结果比较

裂解载荷模拟计算值与实测值的差异由图 9 表示,误差范围在 5.5% 以内,证明了模拟方法的有效和可靠性.裂解载荷模拟计算值与实测值存在的差异归因于数值模拟中计算的临界 J 积分对应的裂解力实际上是裂纹启裂的裂解力阈值^[23],也就是裂纹槽起裂在理论上所需的最小力,而实验上裂解载荷达到阈值时,未必能够保证裂纹自动扩展,裂纹自动扩展是由表面能、弹性释放能和材料本身的性能所决定的,由此产生了实验裂解载荷与模

拟计算值之间的误差.

单向拉伸实验结果表明材质为球墨铸铁 (QT500-7) 的发动机缸体主轴承座激光裂解加工过程中,相同参数的裂解槽张角选为 60° 时,模拟裂解载荷的误差最小,故此材质发动机缸体主轴承座激光裂解加工优化参数应为裂解槽深 $h = 0.5 \text{ mm}$,裂解槽角度 $\alpha = 60^\circ$,裂解槽半径 $r = 0.2 \text{ mm}$.通过实验对数值模拟结果进行比较,验证了数值模拟的有效性和准确性.

6 结论

本工作基于有限元方法,利用 ABAQUS 软件建立了发动机缸体曲轴轴承座数值模型,将网格划分成裂纹区和非裂纹区,系统地开展了缸体主轴承座激光裂解工艺有限元模拟分析,详细地分析了型号 QT500-7 球墨铸铁材料发动机缸体主轴承座初始裂解槽的几何参数对裂解载荷的规律.

研究结果表明:在影响裂解质量的关键参数中,裂解槽的深度 h 较裂解槽的张角 α 及半径 r 对裂解载荷的影响效应更为明显,应作为主轴承座激光裂解加工首要考虑的因素.在加工工艺允许的条件下,为了减小裂解载荷,应当尽可能选用比较深的预制裂解槽.但是如果槽深过大可能导致产生残余应力,从而对后续的主轴承座机体、盖装配螺栓等工作带来不利影响,因此需要根据实际情况选择适当的槽深;裂解载荷随裂解槽曲率半径和张角的减小而降低,根据线弹性断裂力学在小范围屈服理论中的应用,较小的张角和曲率半径增加了裂纹尖端应力场,有利于裂纹扩展;材料型号为 QT500-7 的球墨铸铁发动机缸体主轴承座激光裂解加工优化参数应为裂解槽深选为 $h = 0.5 \text{ mm}$,裂解槽角度 $\alpha = 60^\circ$,裂解槽曲率半径 $r = 0.2 \text{ mm}$.上述分析结果通过材料试验机得到了有效的验证.在实际加工过程中,不仅要保证适当的槽深、张角及曲率半径,而且应保证轴承座中心两侧的切口位置对称及几何参数一致,减少尺寸偏差,从而保证最终获得两个高质量的断裂剖面.若两侧切口几何参数不一致,则易导致撕裂或单边裂解缺陷.

优化之后的裂解槽参数有效降低了裂解载荷,减小轴承座在胀断过程中的变形,从而显著提高了主轴承座的裂解质量,为汽车发动机关键部件裂解性能的进一步提高提供了数值参考,有利于实现发动机缸体的低成本、高效能绿色制造,促进汽车工业在低能耗下快速发展.

- [1] Gault B, Chen Y M, Moody M P, Ohkubo T, Hono K, Ringer S P 2011 *J. Appl. Phys.* **10** 094901
- [2] Sawyer C A, Guzman J, Boswell-Koller C N, Sherburne M P, Mastandrea J P, Bustillo K C, Ager J W, Haller E E, Chrzan D C, 2011 *J. Appl. Phys.* **10** 094307
- [3] Lin Y F, Zh G, Zhu H Y, Huang C H, Li A H, Wei Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3909 (in Chinese) [林燕凤, 张戈, 朱海勇, 黄呈辉, 李爱红, 魏永 2009 物理学报 **58** 3909]
- [4] Yu B H, Dai N L, Wang Y, Li Y H, Ji L L, Zheng Q G, Lu P X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5821 (in Chinese) [余本海, 戴能利, 王英, 李玉华, 季玲玲, 郑启光, 陆培祥 2007 物理学报 **56** 5821]
- [5] Shao D, Hu B, Zheng Q G 2009 *Laser and Advanced Manufacturing Technology and Equipment Integration* (Beijing: Science Press) p56 (in Chinese) [邵丹, 胡兵, 郑启光 2009 激光先进制造技术与设备集成 (北京: 科学出版社) 第 56 页]
- [6] Zheng Q F 2010 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Jilin University) (in Chinese) [郑祺峰 2010 博士学位论文 (长春: 吉林大学)]
- [7] Akihiro MATSUGASAKO 2011 *KOBELCO Technol Rev.* **30** 57
- [8] Zhao Y, Yang S H, Zheng Q F, Jin W M 2011 *J. JLU* (Engineering and Technology Edition) **41** 984 (in Chinese) [赵勇, 杨慎华, 郑祺峰, 金文明 2011 吉林大学学报 (工学版) **41** 984]
- [9] Liu Z F, Yang Z G, He S K, Jiang S H 2011 *Modern Components* **3** 48 (in Chinese) [刘赞丰, 杨志刚, 何善开, 江水浩 2011 现代零部件 **3** 48]
- [10] Yang S H, Kou S Q, Gu Z W, Jin W M, Zhao Y 2000 *J. Hit* **32** 129 (in Chinese) [杨慎华, 寇淑清, 谷铮巍, 金文明, 赵勇 2000 哈尔滨工业大学学报 **32** 129]
- [11] Kou S Q, Yang S H, Zhao Q H, Zhang Z Q 2007 *J. Hit* **39** 1147 (in Chinese) [寇淑清, 杨慎华, 赵庆华, 张志强 2007 哈尔滨工业大学学报 **39** 1147]
- [12] Zheng L M, Kou S Q, Yang S H, Li L L, Li F 2010 *Opt. Laser Technol.* **42** 985
- [13] Amit S, Vinod Y 2012 *Opt. Laser Technol.* **44** 159
- [14] Lu J, Ni X W, He A Z 1996 *Laser and Material Interaction Physics* (Beijing: Mechanical Industry Press) pp35–37 (in Chinese) [陆建, 倪晓武, 贺安之 1996 激光与材料相互作用物理学 (北京: 机械工业出版社) 第 35—37 页]
- [15] Fan T Y 1978 *Fracture Mechanics* (Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press) p333 (in Chinese) [范天佑 1978 断裂力学基础 (南京: 江苏科学技术出版社) 第 333 页]
- [16] A F M Arif, Bekir Samir Yilbas Thermal 2008 *Int J Adv Manuf Technol.* **37** 698
- [17] Zhang D, Harris S J, McCartney D G, Pashby I R, Powell J, Shipway P H, Voisey K T 2008 *Mat. Sci. Eng. A* **489** 273
- [18] Xie D, Qian Q, Li C A 2009 *Numerical Methods and Engineering Applications of Fracture Mechanics* (Beijing: Science Press) p145 (in Chinese) [解德, 钱勤, 李长安 2009 断裂力学中的数值计算方法与工程应用 (北京: 科学出版社) 第 145 页]
- [19] Filippo Berto 2012 *Int. J. Fatigue.* **38** 188
- [20] He D Y 2009 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Jilin University) (in Chinese) [何东野 2011 博士学位论文 (长春: 吉林大学)]
- [21] Zhang X Z, Cai, Q Z, Chen, Q F, Zhou, G F, Xiong Y Z 2011 *Research on Iron and Steel* **39** 15 (in Chinese) [张贤忠, 蔡启舟, 陈庆丰, 周桂峰, 熊玉彰 2011 钢铁研究 **39** 15]
- [22] Zhang X Z, Cai, Q Z, Chen, Q F, Zhou G F, Xiong Y Z 2011 *J. Mater Sci.* **46** 1789
- [23] Boo K S, Cho H S 1990 *Proc. Instn. Mech. Engrs.* **204** 175
- [24] Wang J W 2011 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Jilin University) (in Chinese) [王金伟 2011 博士学位论文 (长春: 吉林大学)]

Finite element analysis and experimental studies on fracture splitting processing by Nd: YAG laser ablation*

Yu Ge¹⁾ Yang Shen-Hua¹⁾ Wang Meng¹⁾ Kou Shu-Qing¹⁾
Lin Bao-Jun^{1)†} Lu Wan-Chun²⁾

1) (*Roll Forging Research Institute, Jilin University, Changchun 130025, China*)

2) (*Changchun Railway Vehicles Co. LTD, Changchun 130062, China*)

(Received 10 November 2011; revised manuscript received 9 January 2012)

Abstract

Laser fracture splitting technology significantly improves the processing quality and efficiency of engine crankcase main bearing block. In order to research the splitting mechanism of ductile iron material fracture notch cauterized by Nd: YAG Laser, the FE model of fracture splitting processing of engine crankcase main bearing block has been developed successfully. The splitting parameters of ductile iron material (QT500-7) main bearing block is analyzed. The numerical simulation results indicate that: among all the key parameters affecting the quality of fracture splitting, the effect of notch depth on fracture splitting load is more obvious than that of the notch opening angle and radius. The value of splitting load decreases rapidly with the increasing notch depth, while the splitting load increases with the increasing notch angle and radius. The optimum value of the notch depth, angle, and radius should be respectively at 0.5 mm, 60°, and 0.2 mm. The results have been proved by experiments. The optimum parameters obtained from the ABAQUS simulation and experiments provide a numerical reference for significantly reducing the splitting load and optimizing the fracture splitting process, help to achieve the rapid development of engine block process and promote the green manufacture of automobile industry.

Keywords: laser fracture splitting technology, notch, ductile iron, finite element method

PACS: 28.52.Av, 42.55.-f, 42.62.-b

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.50375066), and the Key Science and Technology Foundation of Jilin Provincial (Grant No. 20075003).

† E-mail: linbj@jlu.edu.cn