

减速器壳体轴承座胀断加工断裂本质及参数

赵 勇, 杨佳乐, 金文明, 郑祺峰

(吉林大学 材料科学与工程学院, 长春 130022)

摘 要:为解决减速器壳体轴承座胀断载荷和预制应力槽参数设计问题,提出了基于弹塑性断裂力学小范围屈服断裂条件的胀断上限载荷理论计算方法。基于该方法,计算确定壳体轴承座简化样件胀断上限载荷为 538 kN;分别建立 0.8 mm~2.4 mm 深度的预制应力槽壳体轴承座简化样件有限元数值模型,进行胀断加工启裂数值模拟,依据临界 J 积分判据得出 0.8 mm~2.4 mm 系列槽深的壳体轴承座胀断启裂载荷,确定满足小范围屈服断裂条件的壳体轴承座胀断预制应力槽下限深度为 1.6 mm;铸造简化样件,采用激光预制应力槽进行壳体轴承座胀断加工试验,试验胀断载荷为 533.39 kN,槽深为 2.0 mm,合装后轴承孔直径最大变形为 0.18 mm,小于壳体轴承座胀断允许变形量(0.25 mm)。本文研究结果可为减速器壳体轴承座胀断工艺参数制定、胀断加工设备油缸和系统压力选择以及预制应力槽激光加工参数提供设计参考。

关键词:减速器壳体轴承座;胀断;预制应力槽;小范围屈服断裂;数值模拟

中图分类号:TK406 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)03-0681-08

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240727

Fracture nature and parameters of reducer bearing seat fracture-splitting

ZHAO Yong, YANG Jia-le, JIN Wen-ming, ZHENG Qi-feng

(College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: To design of the fracture-splitting load and the prefabricated stress groove parameters of the reducer housing bearing seat, a theoretical method for calculating the upper limit load of the fracture splitting based on the small-scale yield fracture condition of elastoplastic fracture mechanics was proposed. By this method, the upper limit load of the simplified sample of the reducer housing bearing seat was calculated to be 538 kN. Finite element numerical models were established for simplified sample of the reducer housing bearing seat with pre-fabricated stress groove depth range of 0.8 mm~2.4 mm. Numerical simulation analysis were conducted on the initiation crack of fracture splitting. By the critical J-integral criterion, the crack initiation loads for the 0.8 mm~2.4 mm series groove depth were calculated. The lower limit for fracture splitting the reducer bearing seat under the load of 538 kN was determined to be 1.6 mm; Simplified samples were cast. And laser prefabricated stress grooves were made and the splitting processing

收稿日期:2024-06-11.

基金项目:吉林省重点研发科技发展计划项目(20200401129GX).

作者简介:赵勇(1976-),副教授,博士.研究方向:先进制造加工技术与自动化装备.E-mail:yongge_zh@163.com

通信作者:郑祺峰(1977-),副教授,博士.研究方向:材料精密塑性成型技术.E-mail:zhengqi@jlu.edu.cn

experiments of the reducer housing bearing seat were done. The experimental load is 533.39 kN, and the groove depth is 2.0 mm; The maximum deformation of the bearing hole diameter after fracture splitting and assembly is 0.18 mm, which is less than 0.25 mm which is the allowable deformation of reducer housing bearing seat after fracture splitting. The above results can provide references for the fracture splitting process parameters of the reducer housing bearing seat, the selection of the cylinder and system pressure of the equipment, and the laser processing parameters of the prefabricated stress groove.

Key words: reducer housing bearing seat; fracture splitting; prefabricated stress groove; small-scale yield fracture; numerical simulation

0 引言

后桥减速器壳体是汽车驱动桥部件的重要零件,与减速器齿轮副等装配形成组件后整体装入后桥,实现驱动载荷的减速增扭和换向^[1,2]。后桥减速器壳体轴承座(以下简称壳体轴承座)是后桥减速器壳体上的重要结构,由轴承座体和轴承盖构成^[3,4]。

胀断加工技术是应用于断裂剖分类零件加工领域中一项新工艺,最早被用于连杆曲轴孔胀断加工,与传统加工技术相比具有加工工序少、节材节能、壳体复位啮合精度高、横向承载能力强等优点^[5-7]。该技术应用在剖分类零件的实际加工生产中可产生显著经济效益^[8,9]。

胀断载荷和预制应力槽深度是壳体轴承座胀断加工的两个重要关键参数,是胀断工艺及胀断设备设计的主要依据,本文从壳体轴承座胀断加工技术要求入手,分析壳体轴承座胀断加工的断裂本质,并结合弹塑性断裂力学小范围屈服理论和有限元数值模拟,确定壳体轴承座的胀断载荷和预制应力槽深度参数,并进行试验验证。

1 壳体轴承座材料和结构简化

1.1 壳体轴承座简化几何

后桥减速器壳体如图 1 所示。壳体轴承座为典型的断裂剖分结构,可采用胀断新工艺,其胀断加工原理如图 2 所示。

根据壳体轴承座胀断加工原理,壳体轴承座基体部分对胀断加工几乎无影响,因此为方便试验和研究,采用简化壳体轴承座零件,尺寸如图 3 所示,其预定断裂位置(见图 3 中开槽位置)断裂面面积为 3 234 mm²(双侧)。

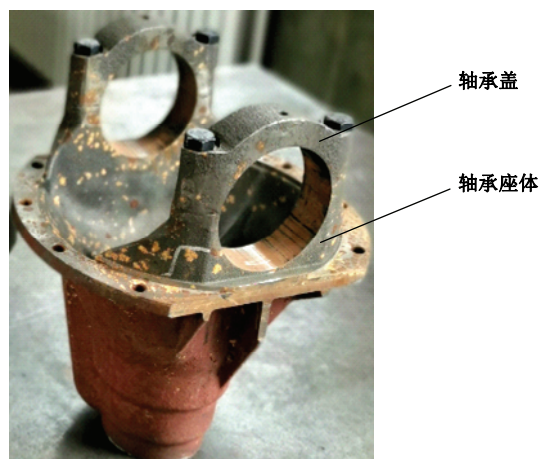


图 1 后桥减速器壳体

Fig. 1 Rear axle reducer housing

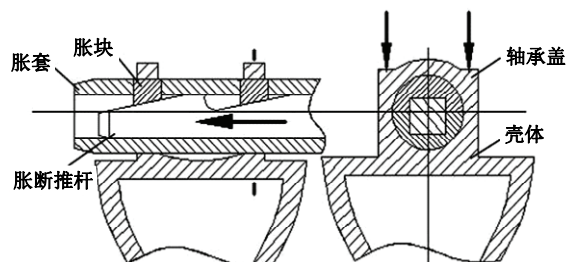


图 2 壳体轴承座胀断加工原理图

Fig. 2 Schematic of fracture splitting reducer housing bearing seat

1.2 材料组织和力学性能

球磨铸铁 QT450 具有较好的塑性、韧性和抗疲劳性,常用于制造受力较大且能承受震动和冲击的零件^[10]。壳体轴承座采用珠光体含量为 50% 的铸态 QT450,金相组织如图 4 所示。样件取样加工标准试样真实应力应变曲线如图 5 所示,材料参数如下:弹性模量 $E=1.56 \times 10^5$ MPa;泊松比 $\nu=0.25$,抗拉强度 $\sigma_b=565.813$ MPa,屈服应力 $\sigma_{0.2}=332.960$ MPa。通过三点弯曲试验测得材料的临界应力强度因子 $K_{IC}=57.8$ MPa $\cdot\sqrt{m}$ ^[11]。

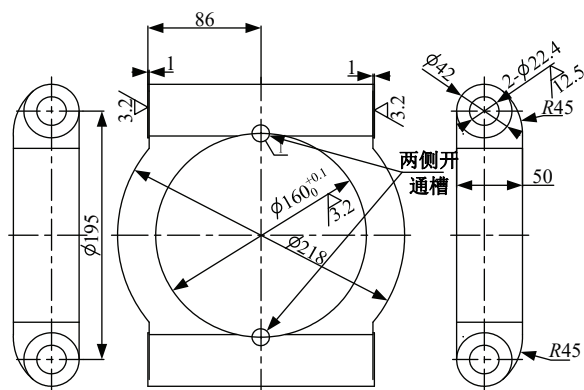


图3 简化壳体轴承座零件

Fig. 3 Simplified sample of the reducer housing bearing seat

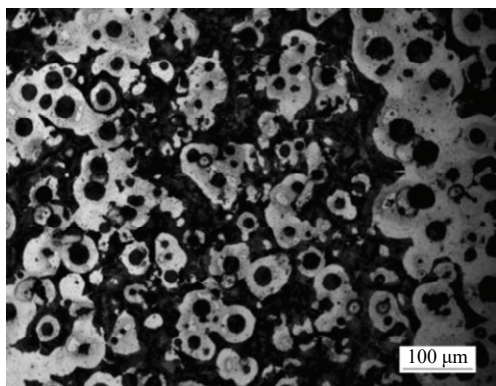


图4 试样金相组织(50%珠光体)

Fig. 4 Metallurgical structure of specimen

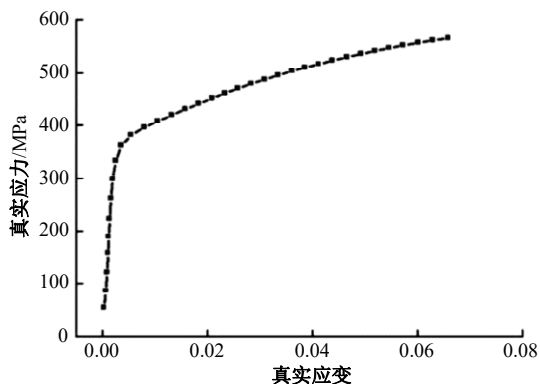


图5 QT450的应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of QT450

2 壳体轴承座胀断加工本质

2.1 壳体轴承座胀断加工断裂本质分析

壳体轴承座胀断加工首先要保证胀断后合装轴承孔的圆度精度,即要严格限制轴承孔在胀断过程中塑性变形,使胀断后体和盖的断口具有良好的啮合性。但壳体轴承座材料QT450,根据应力应变曲线有较好的塑性变形能力,胀断时轴承孔难免产生一定的塑性形变,因此在胀断加工过程

中,除了要限制壳体轴承座的宏观塑性变形外,还要限制裂尖塑性区的范围。因此,在壳体轴承座胀断过程中,首先要保证胀断载荷小于壳体轴承座预定断面的整体屈服载荷,以避免壳体轴承座产生宏观塑性变形。

为了限制裂尖区塑性变形范围,还需要分析裂尖的塑性变形区域状况。在前述壳体轴承座整体不发生屈服的情况下,根据弹塑性断裂力学,预制应力槽根部裂尖塑性区的周围被弹性形变区所包围,裂尖塑性区的力学状态也取决于周围弹性场,从而在裂尖塑性区中的形变引起的裂纹扩展所导致的断裂也可以由与其相关的外围弹性应力场判定^[12],当裂尖附近的塑性区域足够小,小到塑性变形仅发生在与几何尺寸相比很小的区域上,弹性应力强度因子将控制裂尖局部区域的变形,此时,弹塑性条件下的小范围屈服断裂的裂尖加载状况可用弹性断裂条件下的应力强度因子表征^[12]。因此弹塑性材料小范围屈服断裂可用弹性断裂条件下的应力强度因子求解,即弹塑性小范围屈服断裂由于发生塑性变形的区域可以忽略,近似发生了弹性断裂。

据此,满足壳体轴承座胀断加工后合装轴承孔圆度变化要求的胀断加工,可认为发生的是弹塑性小范围屈服断裂,即满足要求的胀断加工的断裂本质是弹塑性材料小范围屈服后的I型断裂。

2.2 基于小范围屈服断裂的胀断载荷

在经典断裂力学中,断裂载荷和预制应力槽参数是互为求解条件的,必须先知其一才能对另一个参数进行计算评估。壳体轴承座胀断,胀断载荷和预制应力槽参数都未知,都需要依据断裂力学理论进行设计,这不符合经典断裂力学设计的思维过程,根据经典断裂力学常规设计思维无法求解。

根据胀断加工的断裂本质是弹塑性材料小范围屈服后的I型断裂,文献[13]通过理论分析,给出小范围屈服断裂载荷 P 的条件为 $P \leq 0.5P_0$;有限元软件Abaqus通过对ASTM标准E-399关于 K_{IC} 试验中样件尺寸限制的逆向求解分析得出,当名义平均应力小于屈服应力的一半,即断裂载荷 $P \leq 0.5P_0$ 时,一般弹塑性小范围屈服断裂可用应力强度因子求解^[14]。

综上,可得出如下结论:若外载荷 P 满足条件

$P \leq 0.5P_0$ 时,则裂尖变形场仍由应力强度因子 K 环带所控制,所有外载荷和几何信息仍可汇聚为单参数 K 传至裂尖区域,以此决定裂尖区域的塑性变形大小和塑性区域尺寸,满足小范围屈服断裂假设,也就是说,当外载荷小于 $0.5P_0$ 时,裂尖塑性区的尺寸远小于裂纹尺寸^[14]。此结论可作为壳体轴承座胀断载荷的设计参考依据。

根据前述断裂面积 $3\,234\text{ mm}^2$ (双侧)、材料屈服应力 $\sigma_{0.2}=332.960\text{ MPa}$,可确定壳体轴承座简化样件胀断上限载荷为 538 kN 。

3 轴承座胀断加工数值分析模型的建立及分析

3.1 轴承座胀断加工数值分析模型的建立

建立如图 6 所示壳体轴承座简化样件三维 CAD 模型,根据对称性,取 CAD 模型 1/2 导入 ABAQUS 模拟软件建立 CAE 模型进行模拟运算。图 6 右图为简化样件的有限元模型,根据工况,添加固定约束的刚体定套和仅能沿 Y 向运动的刚体动套,并添加图 6 左图所示的预制应力槽。为方便执行多种类深参数槽深的模拟,预制应力槽在 ABAQUS 参数化建模。对刚体动套参考点施加沿胀断方向 315 kN 的集中载荷作为胀断载荷。为评估胀断启裂,模拟前处理中设置计算出预制应力槽周围 J 积分。

3.2 胀断启裂判据

J 积分是弹塑性断裂力学中一个定量表征裂纹尖端应力、应变场强度的参量,具有积分路径无关性,易于计算。胀断启裂分析可用 J 积分判据,需要首先确定试验用 QT450 材料临界 J 积分,即 J_{IC} 。根据断裂力学理论,小范围屈服条件下,材料临界应

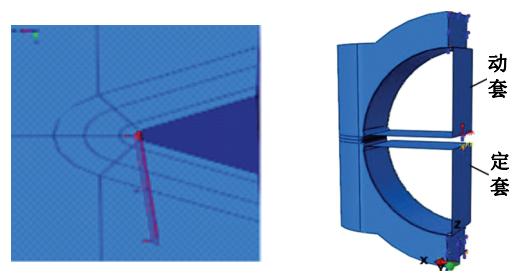


图 6 简化样件有限元模型

Fig. 6 Finite element model of simplified sample

力强度因子 K_{IC} 与 J_{IC} 可近似满足如下关系^[13]:

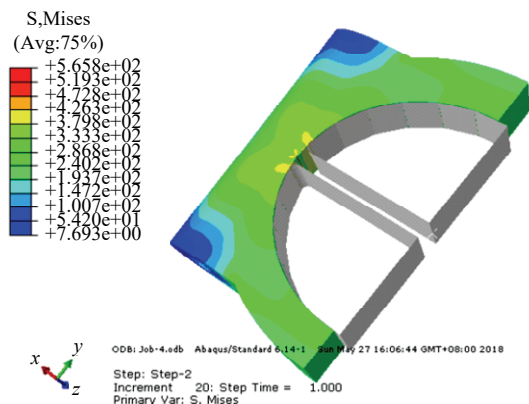
$$E \cdot J_{IC} = K_{IC}^2 (1 - \nu^2) \quad (1)$$

已知材料的临界应力强度因子 $K_{IC}=57.8\text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$,则可得 $J_{IC}=20.08\text{ N/mm}$ 。

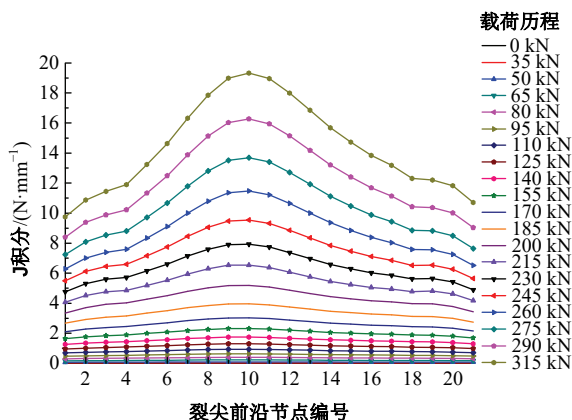
有限元前处理中,在简化样件有限元模型的预制应力槽区域设置多重围线积分,可方便在后处理中输出 J 积分计算值 J_I 。 J_I 随载荷的变化表征裂纹尖端应力、应变场强度的变化,也表示材料抵抗裂纹扩展的能力。根据 J 积分判据,当 $J_I \geq J_{IC}$ 时,可以判断裂纹启裂^[13]。

3.3 壳体轴承座胀断模拟结果分析

根据模拟结果,胀断加载过程中在预制应力槽局部产生应力集中,在预制应力槽根部出现应力极值位置,通过在预制应力槽周围设置围线积分可以计算加载过程中预制应力槽根部 J 积分。图 7 为 0.8 、 1.6 和 2.4 mm 槽深时,模拟终了时刻的 Mises 应力云图和预制应力槽根部的 J 积分随加载过程的变化情况,横轴为裂尖前沿节点编号,每一条曲线代表不同加载时刻裂尖前沿在厚度不同位置的 J 积分大小变化情况。由于厚度结构不对称,因此 J 积分裂尖前沿峰值位置不在厚度中间截面位置。



(a) 预制应力槽深 0.8 mm



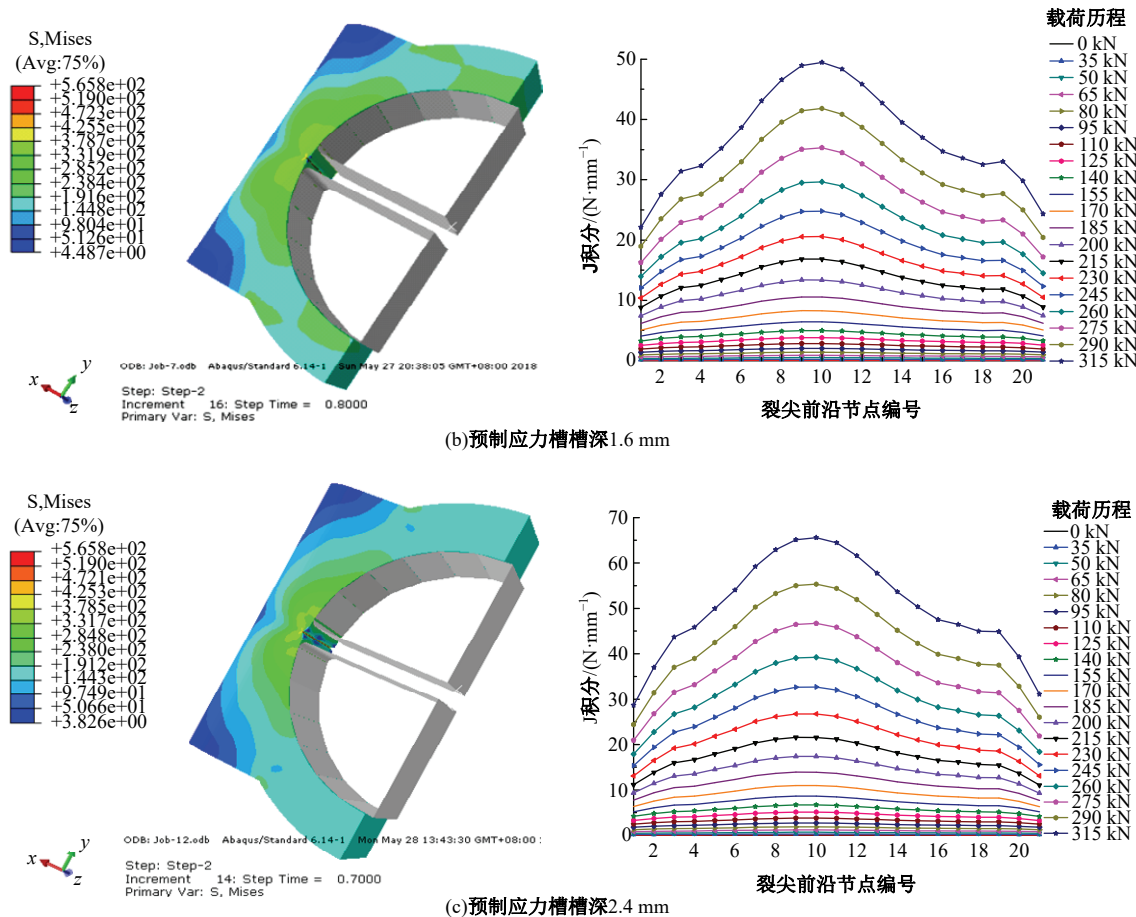


图 7 减速器壳体轴承座胀断模拟 Mises 云图及裂尖 J 积分载荷历程曲线

Fig. 7 Simulation Misses diagram and integral load curve of crack Tip J for fracture splitting of reducer housing bearing seat

提取不同槽深、不同加载时刻裂尖前沿 J 积分最大值位置的 J 积分,绘制该位置 J 积分随加载过程变化曲线,并绘制临界 J 积分 $J_{IC}=20.08 \text{ N/mm}$ 在图中的位置,如图 8 所示。

根据图 8 可以得出不同槽深预制应力槽根部启裂时的载荷如下所示:槽深分别为 1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0、2.2、2.4 mm 时的载荷分别为 312、295、279、268、256、250、238、230 kN。其中,0.8 mm 槽深情况在模拟终了 J 积分未达到临界 J 积分值,因此未有数据。

根据以上数据,结合小范围屈服给出的壳体轴承座胀断上限载荷为 538k N(半模型为 269 kN),只有当槽深大于 1.6 mm 时,壳体轴承座胀断过程才符合小范围屈服的载荷条件。

在满足加工余量的情况下,采用较深的预制应力槽可获得较小的胀断载荷。但在后续精加工过程中,如果胀断预制应力槽深度过大,在精加工后会留有胀断槽痕迹,影响轴承座的质量。因此结合实际应用,通过进行不同槽深的塑性变形分

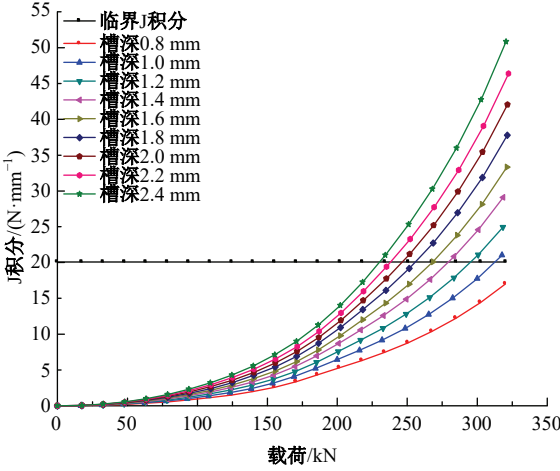


图 8 不同槽深的载荷和 J 积分间的关系

Fig. 8 Relationship between the load and J integral of different crack groove depths

析确定预制应力槽的最佳胀断槽深范围^[11]。

4 试验验证及分析

为验证模拟结果,根据简化模型铸造加工试件进行壳体轴承座简化样件胀断试验。预制应力

槽使用 HL62P 型 Nd:YAG 脉冲激光器加工,激光参数平均功率 62 W,峰值功率 3.2 kW,如图 9 所示。

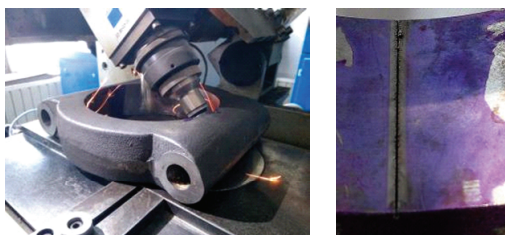


图 9 激光加工预制应力槽

Fig. 9 Laser cutting prefabricated stress groove

胀断设备采用 CSE-600 型胀断机床,如图 10 所示,设备所能提供的最大载荷为 600 kN。



图 10 减速器壳体轴承座简化样件胀断试验装置

Fig. 10 Experimental device for fracture splitting simplified samples of reducer housing bearing

图 11 为样件 1 胀断过程中压力变送器测得的胀断过程胀断缸液压系统压力曲线,其加载峰值压力为 10.2 MPa。

根据胀断油缸几何参数(活塞直径为 180 mm,活塞杆直径为 90 mm)、胀断楔入角为 8° 及摩

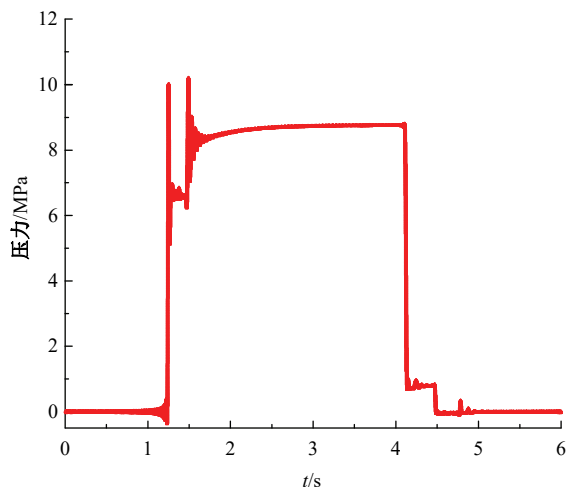


图 11 试样 1 胀断油缸压力曲线

Fig. 11 Cylinder pressure curve for fracture splitting No. 1 specimen

擦条件(摩擦因数 $\mu=0.11$),计算样件 1 胀断载荷为 533.39 kN。

胀断后样件 1 的断面如图 12 所示,用工具显微镜测量断面上槽深为 2.0 mm。根据 2 mm 预制应力槽深双侧模拟的载荷为 500 kN,与模拟结果间的误差为 6.7%,在误差允许范围内,试验结果与模拟结果基本吻合。误差造成原因是油缸拉力是按照几何尺寸以及系统压力直接计算,没有考虑油缸运动中的阻力因素所致。

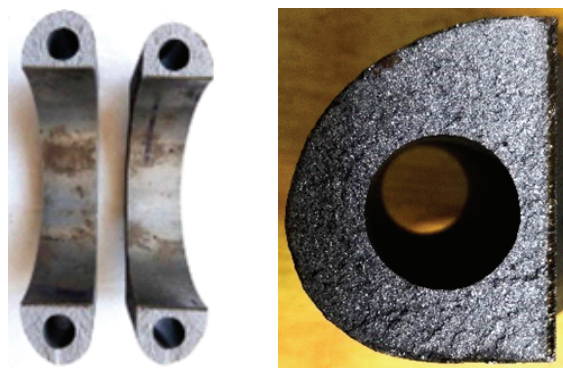


图 12 胀断后的试样 1 及断裂面

Fig. 12 No. 1 specimen and fracture section after fracture splitting

为评估胀断后大头孔变形情况,需要测量胀断前后大头孔变化情况,测量方式如图 13 所示。测量胀断并合装后样件 1 的 a 、 b 、 c 、 d 四个尺寸,测量数据如表 1 所示,最大直径差为 0.18 mm,小于壳体轴承座胀断后允许变形量(0.25 mm),满足胀断后轴承孔圆度要求。

图 14 为样件 2 的胀断结果,楔形拉杆走到行程结束时,样件未有发生启裂,胀断失败,表明轴

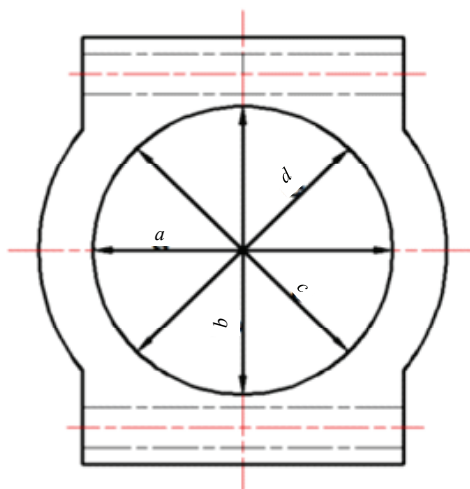


图 13 测量方式

Fig. 13 Measurement mode

表1 胀断加工前后试样尺寸
Table 1 Specimen size before and after
fracture splitting

情况	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	平均值
胀断前	160.04	160.00	160.02	160.00	160.02
胀断后	159.89	160.18	160.10	160.08	160.06

承孔在胀断载荷作用下发生了塑性变形,变形抵消了由于楔形拉杆下拉引起的胀套动套位移。由于无法测得断面槽深,仅能从上下端面估计激光预制应力槽深小于1.0 mm。分析其原因为激光切槽时轴承孔定位不准,导致轴承孔内壁与激光头之间距离变化,从而导致离焦量变化,致使同样激光能量参数情况下的预制应力槽深不同^[15]。

样件2在胀断试验装置极限载荷600 kN情况下未成功胀断表明,该样件胀断启裂载荷大于600 kN,同时也表明预制应力槽深小于下限槽深1.6 mm时,壳体轴承座简化样件胀断不再满足小范围屈服发生条件,将发生大范围屈服。

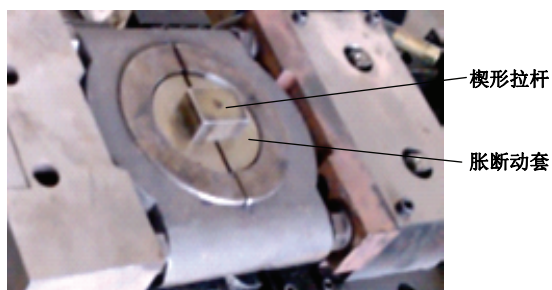


图14 样件2胀断

Fig. 14 Fracture splitting the No. 2 specimen

5 结 论

(1)根据壳体轴承座胀断加工轴承孔圆度要求,依据断裂力学相关理论确定胀断加工的小范围屈服断裂本质。

(2)依据小范围屈服断裂简化为弹性断裂计算的条件,确定试验用简化壳体轴承座胀断上限载荷为538 kN,壳体轴承座胀断载荷小于此载荷时,轴承座孔在胀断中的变形可满足壳体轴承座胀断加工轴承孔圆度要求。

(3)预制0.8~2.4 mm深度的应力槽进行壳体轴承座的胀断数值模拟,分析模拟结果可知,当槽深大于1.6 mm时,模拟启裂载荷小于538 kN,据此可确定简化壳体轴承座胀断的预制应力槽深下限尺寸为1.6 mm。

(4)壳体轴承座简化样件胀断试验结果证明

了基于小范围屈服断裂条件的胀断上限载荷及在此基础上通过模拟确定的预制应力槽深下限载荷的合理性。

参考文献:

- [1] 廉相如, 王国权, 陈勇. 主减速器轴承载荷对重载卡车驱动桥壳疲劳特性影响[J]. 机械工程师, 2016, 2: 48-51.
Lian Xiang-ru, Wang Guo-quan, Chen Yong. Influence analysis of driving axle bearing loading on differential housing fatigue performance[J]. Mechanical Engineer, 2016, 2: 48-51.
- [2] 姚为民. 汽车构造下[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [3] 李新宁, 李才儿, 黄桂英, 等. 减速器壳体高速加工技术研究及其应用[J]. 制造技术与机床, 2014(1): 35-38.
Li Xin-ning, Li Cai-er, Huang Gui-ying, et al. Research and application of speed-reducer shell high speed processing technology[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2014(1): 35-38.
- [4] 寇淑清, 修亭亭, 金文明, 等. 后桥主减速器壳体轴承座材料裂解性能数值分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2019, 47(7): 121-127, 135.
Kou Shu-qing, Xiu Ting-ting, Jin Wen-ming, et al. Numerical analysis of material fracture splitting performance of rear axle's main reducer shell bearing seat [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(7): 121-127, 135.
- [5] Shi Zhou, Kou Shu-qing. Study on fracture-split performance of 36MnVS4 and analysis of fracture-split easily-induced defects[J]. Metals, 2018, 8(9): No. 696.
- [6] He B, Sun J, Chen S, et al. Crack analysis on the toothed mating surfaces of a diesel engine connecting rod[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 34: 443-450.
- [7] Kou S Q, Shi Z, Song W F. Fracture-splitting processing performance study and comparison of the C70S6 and 36MnVS4 connecting rods[J]. SAE International Journal of Engines, 2018, 11(4): 463-474.
- [8] 寇淑清, 宋玮峰, 石舟. 36MnVS4 连杆裂解加工模拟及缺陷分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2017, 47(3): 861-868.
Kou Shu-qing, Song Wei-feng, Shi Zhou. Fracture splitting simulation and defect analysis of 36MnVS4

- connecting rod[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2017, 47(3): 861-868.
- [9] Yang H Y, Kou S Q, Gao W Q, et al. Investigation of crack line offset of fracture splitting connecting rod[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 472: 100-104.
- [10] 张博. 浅谈 QT450-10 金相组织与力学性能的联系[J]. 冶金分析, 2008, 28(2): 1320-1322.
- Zhang Bo. The relation between microstructure and mechanical properties of QT450-10[J]. Metallurgical Analysis, 2008, 28(2): 1320-1322.
- [11] 修亭亭. 后桥减速器壳体轴承座材料裂解性能数值模拟及实验研究[D]. 长春: 吉林大学材料科学与工程学院, 2020.
- Xiu Ting-ting. Numerical simulation and experimental study on material fracture splitting performance of rear axles' reducer shell bearing seat[D]. Changchun: College of Materials Science and Engineering, Jilin University, 2020.
- [12] Ted L. Anderson, Fracture Mechanics Fundamentals and Applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [13] 杨卫. 宏微观断裂力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [14] 赵勇. 基于小范围屈服断裂的连杆胀断参数研究及应用[D]. 长春: 吉林大学材料科学与工程学院, 2011.
- Zhao Yong. Study on parameters of connecting rod fracture splitting based on fracture after small scale yielding and its application[D]. Changchun: College of Materials Science and Engineering, Jilin University, 2011.
- [15] 张冲, 王冠, 杨志刚, 等. 脉冲光纤激光切割连杆裂解槽工艺参量优化[J]. 激光技术, 2018, 42(3): 422-426.
- Zhang Chong, Wang Guan, Yang Zhi-gang, et al. Optimization of technology parameters for fracture splitting grooves of connecting rods fabricated by pulse fiber laser[J]. Laser Technology, 2018, 42(3): 422-426.