

裂解槽深度对减速器壳体轴承座裂解性能的影响

赵 勇, 金文明, 郑祺峰, 寇淑清

(吉林大学 材料科学与工程学院, 长春 130022)

摘 要: 采用 ABAQUS 进行了后桥减速器壳体轴承座裂解起裂模拟, 通过 J 积分和裂解槽尖端 Z 向拉应力探究了激光预制裂解槽深度对裂解载荷和变形的影响规律, 结果表明: 裂解槽在轴承座厚度中间面位置面对应节点的 J 积分在不同槽深的整个模拟加载过程中保持最大, 裂解起裂在此位置发生; 参考连杆裂解预估壳体轴承座裂解裂解载荷 603 kN 时, 槽深大于 0.7 mm 情况下轴承座厚度中间面位置面对应节点的模拟最大拉应力超过抗拉强度, 裂解起裂发生, 起裂时壳体轴承座仅仅在裂解槽起裂位置局部微小区域进入塑性状态; 根据 J 积分判据确定了不同裂解槽深度的模拟裂解载荷, 绘制和拟合了裂解槽深度和载荷曲线, 603 kN 对应槽深为 0.797 mm。并对激光预制 1.0 mm 深度的裂解槽进行裂解实验, 实际裂解载荷和模拟裂解载荷误差为 4.30%, 试件内径变化值为 0.16~0.24 mm, 小于轴承孔裂解加工允许塑性变形 (≤ 0.4 mm)。综合模拟分析结果并结合实际生产, 采用激光加工后桥减速器壳体轴承座裂解槽深度参数范围为 0.8~1.0 mm。

关键词: 裂解加工; 后桥减速器壳体轴承座; 裂解槽; 数值模拟; 裂解载荷

中图分类号: TK406 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)05-1552-07

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230865

Influence of cracking groove depth on cracking performance of bearing seat of reducer housing

ZHAO Yong, JIN Wen-ming, ZHENG Qi-feng, KOU Shu-qing

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

Abstract: Abaqus software is used to simulate the cracking of the bearing seat of the rear axle reducer housing. The influence of the depth of the laser prefabricated cracking groove on the cracking load and deformation is investigated through J -integral and Z -direction tensile stress at the tip of the cracking groove. The results show that the J -integral of the corresponding node at the middle wall thickness of the bearing seat remains at its maximum during the entire simulated loading process, and cracking occurs at this position. Referring to the cracking of the connecting rod, when the estimated cracking load of the shell bearing seat is 603 kN and the groove depth is greater than 0.7 mm, the simulated maximum tensile stress

收稿日期: 2023-07-10.

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-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 材料精密塑性成型技术. E-mail: zhao_yong@jlu.edu.cn

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

of the corresponding node at the middle position of the bearing seat wall thickness exceeds the tensile strength, and cracking occurs. When cracking occurs, the bearing seat housing only enters a plastic state in a small local area at the cracking position of the cracking groove; Based on the J -integral criterion, the simulated cracking load for different cracking groove depths is determined, and the cracking groove depth and load curve are plotted and fitted. The corresponding groove depth for 603 kN is 0.797 mm. And a cracking experiment is conducted on a laser prefabricated cracking groove of 1.0mm depth. The actual cracking load and simulated cracking load have an error of 4.30%, and the change in the inner diameter of the specimen is 0.16~0.24 mm, which is less than the allowable plastic deformation (≤ 0.4 mm) for bearing hole cracking processing. Based on the comprehensive simulation analysis results and combined with actual production, the depth parameter range of the cracking groove in the bearing seat of the rear axle reducer housing processed by laser is 0.8 mm to 1.0 mm.

Key words: cracking processing; bearing seat of the rear axle reducer housing; cracking groove; numerical simulation; cracking load

0 引言

后桥减速器是汽车传动系统中的核心部件,通过锥齿轮传动实现动力的方向改变、转速降低和扭矩增大。其中,减速器壳体轴承座的作用是固定左右驱动车轮的轴向位置,确保减速器中的齿轮系和传动轴的稳定运行。其与轴承盖的连接方式和装配精度对主、从动齿轮的良好啮合至关重要^[1-3]。减速器壳体轴承座分为壳体和轴承盖两部分,用螺栓固定连接。传统的加工方式是将壳体与轴承盖分开加工,涉及铸造毛坯、粗加工、半精加工和精加工等工序,工艺复杂^[4,5],成本高昂^[6]。然而,随着裂解加工新工艺在连杆生产中的应用,将其应用于后桥减速器壳体轴承座的加工成为可能。这种新工艺可以省去传统工艺中的某些步骤,如轴承座结合面的机械加工和定位螺栓孔的半精和精加工。这种新工艺具有高质量、高效率、低成本、低能耗等优点,同时还可以从根本上改变后桥减速机壳体轴承座体和轴承盖的连接定位方式,提高装配精度、效率和良品率。

裂解加工工艺过程主要包括裂解槽加工和裂解等工序。裂解槽是影响裂解质量的关键因素之一^[7,8]。激光加工由于效率高、精度高,裂解质量稳定等优点,成为裂解加工工艺中预制裂解槽的主要加工方法^[9]。相对于已经成熟应用裂解工艺的连杆,后桥减速器壳体轴承座具有裂解断面尺寸大、裂解扩展路径长、材料没有专用开发的裂解材料等难点,因此,本文将基于后桥减速器壳体轴承座传统工艺应用材料,通过数值模拟和实验研究激光预制裂解槽参数对后桥减速器壳体轴承座

裂解性能的影响,为后桥减速器壳体轴承座裂解加工生产提供参考。

1 后桥减速器壳体轴承座的传统加工工艺与裂解加工工艺

后桥减速器壳体(见图1)轴承座的传统加工工艺:铣凸台,半精铣凸台,精铣凸台,钻孔,扩孔,镗孔,最后攻螺纹;后桥减速器轴承盖的传统加工工艺:铣平面,半精加工平面,精加工平面,钻孔,扩孔,镗孔^[10-12],后桥减速器壳体轴承座和轴承盖复位固定。后桥减速器壳体的裂解加工工艺:后桥减速器壳体轴承座整体加工,粗加工轴承安装孔,钻螺钉孔、激光加工裂解槽、裂解、后桥减速器壳体轴承座和轴承盖复位固定、精加工轴承安装孔。研究后桥壳体轴承座的裂解加工对提高汽车关键零部件制造水平具有实际意义。



图1 减速器壳体

Fig. 1 Reduction gear shell

2 有限元模型的建立

后桥减速器壳体轴承座的裂解过程是利用裂纹尖端的应力集中诱发裂纹,伴随着裂纹的萌生、

扩展,实现轴承盖与主体的分离。利用 J 积分作为材料断裂的判据,当 J 积分值达到临界值 J_{IC} 时,材料起裂,临界 J 积分所对应的载荷即为所求的裂解载荷。 J_{IC} 是材料的性能指标,只和材料的成分、组织结构有关^[13]。

2.1 材料性能参数

后桥减速器壳体为 RuT400,通过力学性能试验,得到材料的性能参数为:杨氏模量 $E=1.33 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\nu=0.27$,屈服极限为 310 MPa,抗拉强度为 400 MPa。根据资料得到材料的 $J_{IC}=5.646$ N/mm^[14,15]。

2.2 模拟模型的建立及边界条件的施加

由于裂解主要发生在圆环处,圆环以外的部分对轴承座裂解的影响微乎其微,故可以将圆环以外的部分忽略,单独对圆环处进行模拟研究。螺栓孔半径为 11.2 mm,内孔半径为 80 mm,外端圆弧半径为 109 mm,螺栓孔深度为 172 mm,螺栓孔间距为 195 mm。简化模型关于 YOZ 平面对称,为了提高计算效率,故采用 1/2 模型建模。简化模型如图 2 所示。

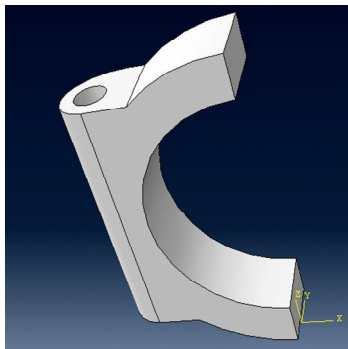


图 2 简化模型

Fig. 2 Simplified model

整个加载过程分两步:第一步对动套参考点施加的位移为 0.001 mm;第二步对动套参考点施加的位移为 3.5 mm,分析步数为 50。整个模型在 X 方向对称,对垂直于 X 方向的两个面施加 X 方向对称约束: $U1=UR2=UR3=0$,对定套的参考点施加完全固定约束: $U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$ 。边界条件如图 3 所示。

2.3 网格的划分

将部件剖分为裂纹区和非裂纹区。为得到较为准确的计算结果,特将裂纹区网格进行细化;非裂纹区对计算结果的影响不大,为提高计算效率将非裂纹区的网格适当粗化,模型采用六面体网格,网格单元为 C3D8R,网格划分如图 4 所示。

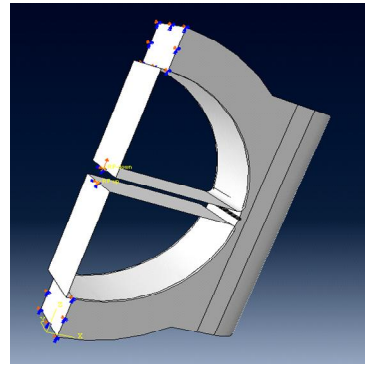


图 3 边界条件

Fig. 3 Boundary conditions

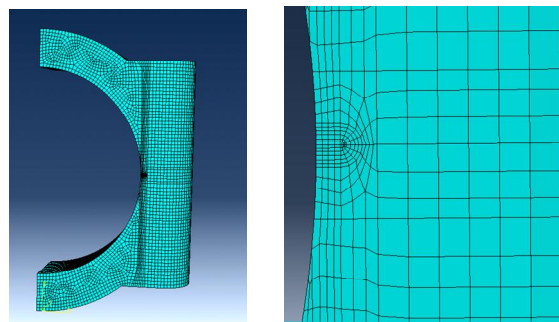


图 4 网格的划分

Fig. 4 Mesh of the model

本文采用线弹性断裂机理模拟后桥减速器壳体轴承座的裂解,输出 J 积分,根据 J 积分和载荷之间的关系求出裂解载荷。

3 槽深对减速器壳体轴承座裂解性能的影响

所选槽深依次为:0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 mm,槽宽为 0.1 mm。探究槽深对 J 积分、裂纹槽尖端最大拉应力、裂解载荷的影响规律。

3.1 槽深对 J 积分的影响

图 5 为 J 积分、裂纹尖端节点编号和增量步的关系。编号 0~20 节点分别为预制裂纹尖端从上端面到下端面的对应位置,裂纹尖端在壳体轴承座厚度中间面位置的对应节点编号为 10。

除了初始时刻外,对所有深度参数。所有加载时刻,裂纹前沿的 J 积分都在厚度中间面位置取得最大值,从厚度中间面位置往两侧上下断面位置逐渐减小,两侧端面附近位置由于约束状态改变导致 J 积分出现一个小波峰。

图 5 中所有深度所有时刻厚度中间面位置(节点 10)裂纹前沿的 J 积分最大值表明:该位置为后桥减速器壳体轴承座裂解模拟中首先起裂位

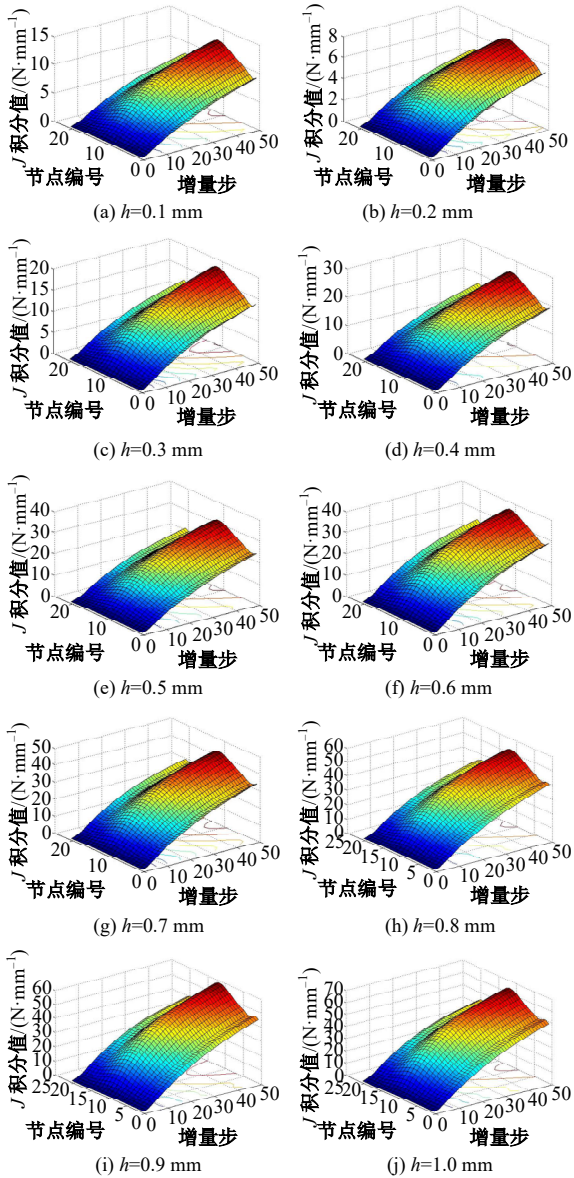


图 5 不同槽深所对应 J 积分、增量步和节点编号的空间关系

Fig. 5 Spatial relationship among J integral, nodes, increments of different depths

置,裂解过程中,裂纹首先在该位置起裂并迅速扩展至整个截面。

3.2 槽深对裂纹槽尖端 Z 向拉应力的影响

模拟采用后桥减速器壳体轴承座样件裂解单侧断裂面积为 $1\,945\text{ mm}^2$,参考连杆裂解载荷为断面整体屈服载荷 $1/2$ ^[16],预估后桥减速器壳体轴承座整体裂解载荷为 603 kN 。

图 6 为模拟裂解载荷为 600 kN (对应模拟加载第三十增量步)时 $0.1\sim 1.0\text{ mm}$ 槽深与裂解槽在轴承座厚度中间面位置面对应节点 Z 向拉应力

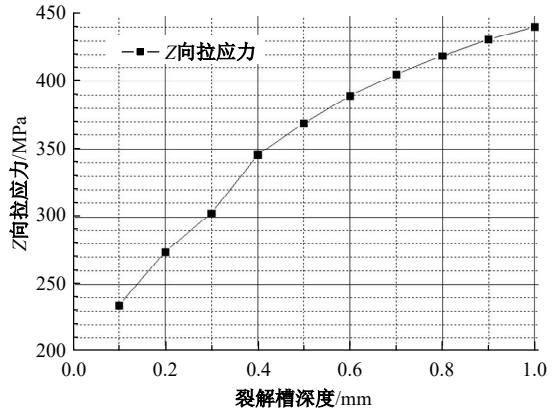


图 6 不同槽深对应的裂纹槽尖端 Z 向拉应力值

Fig. 6 Curve of Z-direction tensile stress at crack tip vs. groove depth

(S_{33})值曲线。

参考图 7 当裂解载荷为 600 kN ,槽深为 0.7 mm 以上时,裂解槽在轴承座厚度中间面位置面对应节点拉应力达到并超过了材料抗拉强度 400 MPa 。因此,根据最大拉应力判据可知,当槽深大于 0.7 mm 时,引起壳体轴承座裂纹萌生即裂解起裂的裂解载荷小于 600 kN 。

图 7 所示为 $0.7\sim 1.0\text{ mm}$ 4 种槽深情况下,裂

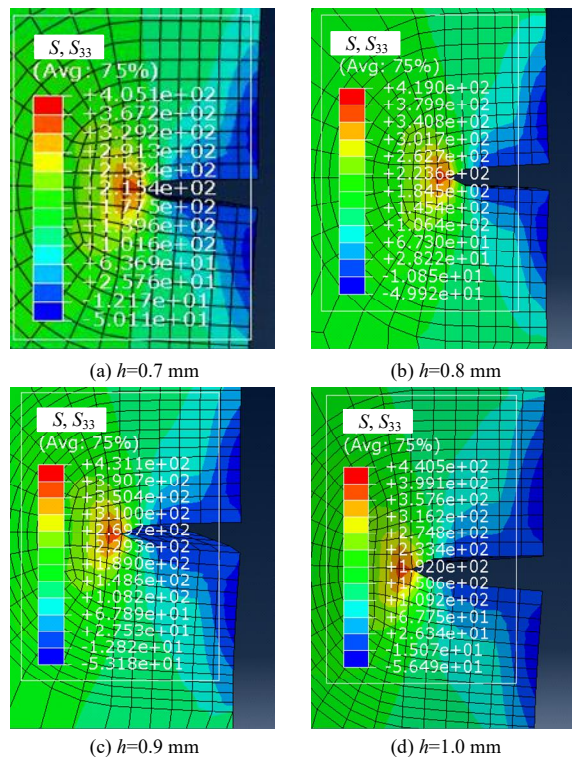


图 7 不同槽深对应的裂纹槽尖端 Z 向拉应力值云图

Fig. 7 Z-direction tensile stress contours of crack tip for different depths

解载荷 600 kN 时,轴承座厚度中间面位置裂纹槽尖端 Z 向最大拉应力(S_{33})云图。根据云图所示,随着槽深增加,裂纹槽尖端 Z 向最大拉应力逐渐增加,裂纹槽尖端的应力集中程度增大。云图中仅在裂解槽尖端位置,即裂解槽起裂位置局部微小区域最大拉应力超过材料屈服极限进入塑性状态,其余绝大部分区域最大拉应力远小于材料屈服极限。这表明在模拟裂解载荷 600 kN 时,当槽深大于 0.7 mm 时,壳体轴承座裂解仅在裂解槽根部起裂位置局部微小区域发生塑性变形,可满足壳体轴承座裂解加工塑性变形要求。

3.3 槽深对裂解载荷的影响

图 8 为根据 J 积分判据确定的裂解载荷和槽深的关系曲线,随着激光预制裂解槽槽深的增加裂解载荷逐渐减小,并且减小的速度越来越慢。槽深越大裂解槽尖端的应力集中程度越大,裂解槽尖端的裂解载荷越小。当槽深由 0.1 mm 增加到 1.0 mm 时,裂解载荷的变化幅度为 137.88 kN。当槽深为 1.0 mm 时裂解载荷取得最小值,为 575.12 kN。可见激光预制裂解槽槽深对裂解载荷的影响具有显著性。

根据前述预估后桥减速器壳体轴承座整体裂解载荷 603 kN,则根据图 8 可以得出 J 积分判据下满足壳体轴承座裂解加工塑性变形要求的最小槽深参数为 0.797 mm,与最大拉应力判据得出的最小槽深参数 0.7 mm 有较好的一致性。

因此,考虑裂解精确复位后轴承孔精加工余量的要求,取后桥减速器壳体轴承座裂解槽深推荐参数为 0.8~1.0 mm。

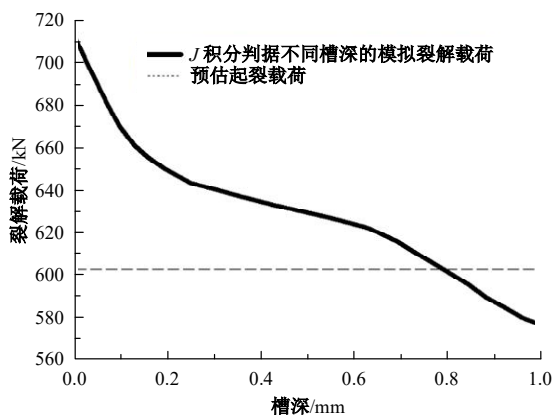


图 8 槽深与裂解载荷之间的关系及其拟合曲线
Fig. 8 Relationship between depth and cracking load and its fitting curve

4 减速器壳体轴承座的裂解实验

为了研究裂纹槽对后桥壳体轴承座裂解过程的影响,在现有裂解设备上进行了裂解加工实验,检验数值模拟结果。通过测量减速器壳体轴承座内径在裂解加工前后的尺寸,计算得到内径的变形量,检验裂解加工质量;将实际裂解载荷和模拟裂解载荷进行对比,验证模拟结果的可靠性,如图 9 所示。

4.1 实验准备及实验过程

在吉林大学自主研发的裂解加工设备上进行裂解加工实验,利用 YAG 激光加工设备加工深度为 1.0 mm,宽度为 0.1 mm 的裂解槽。裂解设备主油缸压力为 12 MPa,胀断楔块下拉速度为 110 mm/s,行程为 30 mm,楔块斜角为 8°。为了计算试件内径变化量,测量 a 、 b 方向的尺寸,如图 10 所示,测量所得数据如表 1 所示。



图 9 裂解设备及试件
Fig. 9 Fracture split specimen

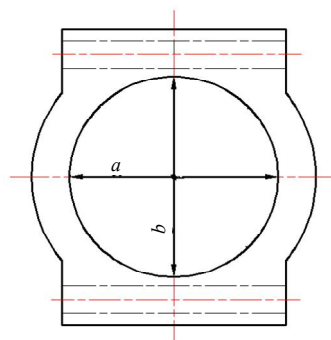


图 10 测量方式
Fig. 10 The measurement mode

表 1 裂解加工前尺寸

Table 1 Size of the specimen before fracture splitting		
编号	a 方向尺寸/mm	b 方向尺寸/mm
1	160.01	160.00
2	160.10	160.06
3	160.05	160.03

4.2 实验结果分析

后桥减速器壳体轴承座内径变化量如表 2 所示:直径的变形量为 0.16~0.24 mm,在实际生产所要求的小于 0.25 mm 范围内。实验所测得的

表2 裂解加工后尺寸

Table 2 Size of the specimen after fracture splitting

编号	mm			
	a方向尺寸	b方向尺寸	变形量a	变形量b
1	160.24	159.82	0.23	0.18
2	160.30	159.82	0.20	0.24
3	160.21	159.80	0.16	0.23

裂解载荷依次为:601.15、600.58、601.09 kN,模拟裂解载荷为575.12 kN,误差在允许的范围(≤0.4 mm)。深度1.0 mm、宽0.1 mm裂纹槽的实验结果与模拟结果一致,验证了模拟结果的可靠性。

5 结束语

在实际生产中裂解槽的深度是裂解加工的重要参数之一,该参数过大直接影响后续精加工的加工量,增加了制造成本;参数过小,会增大裂解设备的裂解力,增加裂解设备的制造成本,且容易导致裂解过程中大头孔塑性变形,造成轴承孔内径圆度超差,因此,确定合理的裂解槽参数,对裂解质量尤为重要。激光所预制裂纹槽的起裂点都位于裂纹槽尖端处,位于轴承座裂纹槽尖端中间位置。针对实验采用的减速机壳体轴承座规格尺寸,为了保证其在裂解过程中仅在裂解槽根部局部区域产生微小塑性变形,裂解后的轴承孔径变形量能够满足要求,并满足后续精加工余量要求,建议采用激光预制裂解槽深范围为0.8~1.0 mm。预制加工深度为1.0 mm激光预解槽的试件进行裂解实验,实际测得的裂解载荷与模拟载荷之间的误差为4.30%,在允许的范围,验证了模拟结果的准确性。试件内径变形量为0.16~0.24 mm,变形较小,裂解质量较好。本研究为裂解设备的设计、工艺过程的制定提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 陆刚. 重型车驱动桥及其主要部件结构[J]. 商用车与发动机, 2009(47): 74-76.
Lu Gang. Driving axle & main parts of heavy commercial vehicle[J]. CVE, 2009(47): 74-76.
- [2] 姚为民. 汽车构造下[M]. 北京:机械工业出版社, 2022.
- [3] 瑞佩尔. 图解汽车变速器原理与构造[M]. 北京:化学工业出版社, 2022.
- [4] 江业君, 张家政. 后桥主减速器壳体加工工艺探索[J]. 客车技术, 2005(1): 37-38.
Jiang Ye-jun, Zhang Jia-zheng. Exploration on processing technology of rear axle main reducer housing[J]. Bus Technology, 2005(1): 37-38.
- [5] 刘景涛. 汽车驱动桥主减速器总成预加载荷研究及系统实现[D]. 杭州:浙江大学机械与能源工程学院, 2009.
Liu Jing-tao. The research of pre-load for main reducer of automobile's driving axle and the system development[D]. Hangzhou: School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, 2009.
- [6] Zhou S, Kou S Q. Study on fracture-split performance of 36MnVS4 and analysis of fracture-split easily-induced defects[J]. Metals, 2018, 8(9):0809696.
- [7] Yang H Q, Kou S Q, Li Z Y, et al. 3D interconnected nitrogen-self-doped carbon aerogels as efficient oxygen reduction electrocatalysts derived from biomass gelatin[J]. RSC Advances, 2019, 69(9): 40301-40308.
- [8] 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.
- [9] 杨慎华, 寇淑清, 何东野, 等. 发动机缸体主轴承座裂解槽激光加工设备[P]. 中国:CN20071005511.3.
- [10] 王科. 减速器壳体的铸造工艺设计[J]. 汽车知识, 2023, 23(4): 96-98.
Wang Ke. Casting process design of reducer shell[J]. Automotive Knowledge, 2023, 23(4): 96-98.
- [11] 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's high speed processing technology[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2014(1): 35-38.
- [12] 李金华, 王海涛, 郑敬超. 高端乘用车减速器壳体加工方案[J]. 汽车工艺师, 2015(3): 24-25.
Li Jin-hua, Wang Hai-tao, Zheng Jing-chao. Machining scheme of reducer shell for high-end passenger cars[J]. Automotive Engineer, 2015(3): 24-25.
- [13] 孟令健, 张孟泉, 李玉娟, 等. 蠕墨铸铁RuT400与RuT450的拉伸与疲劳性能[J]. 上海金属, 2020, 42(4): 18-25.

- Meng Ling-jian, Zhang Meng-xiao, Li Yu-juan, et al. Tensile and fatigue properties of vermicular graphite cast Irons RuT400 and RuT450[J]. Shanghai Metals, 2020, 42(4): 18-25.
- [14] 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/reducers shell bearing seat[D]. Changchun: College of Materials Science and Engineering, Jilin University, 2020.
- [15] 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.
- Kou Shu-qing, Xiu Ting-ting, Jin Wen-ming, et al. Numerical analysis of cracking performance of rear axle main reducer housing bearing housing material [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(7): 121-127.
- [16] 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.