

汽车发动机锻造连杆应力模拟与失效分析

李智杰

(东莞市技师学院 交通运输学院, 广东 东莞 523460)

摘要: 针对汽车发动机连杆因材料性能不足导致的失效问题, 以非调质钢 C70S6 为研究对象, 对汽车发动机连杆进行了应力模拟与失效分析。首先, 对断裂后的连杆进行了宏观、微观组织观察, 并对其力学性能进行了测试。随后, 运用 ANSYS Workbench 软件对连杆的等效应力、等效应变和等效弹性变形进行了模拟, 通过建立三维模型和设置合理的边界条件与载荷, 确定了应力集中区域。结果表明: 连杆呈现韧性断裂特征, 主要因为材料硬度偏高、韧性不足, 且最大应力与应变集中于连杆小头远离杆身部分。通过优化材料性能与结构设计, 可有效提升连杆的可靠性和使用寿命, 为汽车发动机关键部件的改进提供了理论依据与实践指导。

关键词: C70S6 钢; 连杆; 失效分析; 应力集中; 力学性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.04.004

中图分类号: U463.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 04-0019-06

Stress simulation and failure analysis of forged connecting rods for automobile engine

Li Zhijie

(School of Traffic and Transportation, Dongguan Technician College, Dongguan 523460, China)

Abstract: In response to the failure problem of automobile engine connecting rods caused by insufficient material properties, for non-quenched and tempered steel C70S6, stress simulation and failure analysis of automobile engine connecting rods were conducted. Firstly, the macroscopic and microscopic structures of the fractured connecting rods were observed, and their mechanical properties were tested. Subsequently, the equivalent stress, equivalent strain and equivalent elastic deformation of the connecting rods were simulated by software ANSYS Workbench, and the stress concentration area was determined by establishing a three-dimensional model and setting reasonable boundary conditions and loads. The results show that the connecting rod exhibits ductile fracture characteristics, mainly due to the high hardness and insufficient toughness of the material, and the maximum stress and strain are concentrated in the part of the small head away from the rod body of connecting rod. By optimizing material properties and structural design, the reliability and service life of the connecting rods is effectively improved, providing a theoretical basis and practical guidance for the improvement of key components for automotive engines.

Key words: C70S6 steel; connecting rods; failure analysis; stress concentration; mechanical properties

1 汽车发动机连杆简介

连杆作为汽车的“心脏”——发动机的核心部件, 在发动机工作过程中, 受膨胀气体交变压力和惯性力的作用, 通过连接活塞和曲轴, 使活塞在运动的同时带动曲柄做回转运动来输出动力。图 1 为典型的汽车发动机连杆, 连杆的小头与活塞销轴连接, 而大头则与曲柄销轴连接, 大头与小头之间则是通

过工字槽相连接^[1]。



图 1 汽车发动机连杆

Fig. 1 Connecting rod of automobile engine

连杆受力情况与其质量呈现一定的比例关系, 故减少连杆的质量, 可以减少机械损失, 从而提高发动机的效率。通过材料改进可以实现连杆的轻量化。作为发动机的重要部件, 连杆不仅需要高的抗拉和抗压强度以及足够的刚度和韧性, 还

收稿日期: 2024-06-04; 修订日期: 2024-09-16

基金项目: 2024 年度世赛成果转化省级重点专项 (KT2024131)

作者简介: 李智杰 (1969-), 男, 本科, 正高级讲师

E-mail: 543174651@qq.com

需要较高的疲劳强度^[2]。目前，应用较多的是调质钢 40Cr、35CrMo、45 钢和 42Cr，非调质钢 C70S6 和 36MnVS4 等，另外也有用钛合金材料、粉末烧结锻造连杆等。

如果使用调质钢来制造连杆，必须经过调质处理，而调质会导致工件产生变形甚至开裂。为了降低成本，汽车企业开始重视非调质钢的使用。微合金非调质钢是一种将轧制（或锻造）与热处理结合，省去调质（淬火+高温回火）工序的新型节能结构材料^[3]，因而在汽车制造业中获得了广泛应用^[4]。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料

实验材料为某锻造有限公司提供的汽车连杆用 C70S6 非调质钢。锻造加热温度为 1220~1270 ℃，锻造时间为 10 s，成形后进行 870 ℃ 正火，保温 2.5~3.0 h 后风冷。C70S6 非调质钢连杆材料的成分如表 1 所示。

表 1 C70S6 非调质钢连杆的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of non-quenched and tempered steel C70S6 for connecting rod（%，mass fraction）

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.67~0.73	0.10~0.40	0.45~0.060	≤0.030	0.055~0.070	0.10~0.20
Mo	Ti	Cu	Al	V	B
≤0.10	≤0.010	≤0.25	≤0.050	0.030~0.060	≤0.0005

2.2 实验方法

宏观分析连杆表面缺陷情况，在金相显微镜下

观察试样的金相组织，通过扫描电镜观察断口形貌，对断口进行细致地研究，并分析断裂原因和断裂机制^[5]。对连杆进行力学性能测试，如硬度测试及拉伸实验，并采用有限元分析软件对汽车连杆进行模拟分析^[6]。

3 实验结果分析与讨论

3.1 宏观分析

根据汽车连杆的工作要求，连杆锻造产品的品质需均匀，连杆的表面不应存在使用上的裂纹、偏析或者腐蚀等缺陷。连杆的表面如图 2 所示，通过分析，未发现汽车连杆表面存在缺陷。



图 2 汽车连杆的照片
Fig. 2 Photo of automobile connecting rod

3.2 显微组织分析

3.2.1 金相分析

金相分析主要观察两个边缘组织的脱碳层深度以及心部组织中的铁素体与珠光体。连杆大头部位边缘的金相组织结构图如图 3a 所示。根据连杆的使用寿命要求，脱碳层的深度不得大于 0.15 mm。通过测量，得到该组织的脱碳层深度为 0.09 mm，因此，判定其脱碳层深度符合要求。心部组织的金相

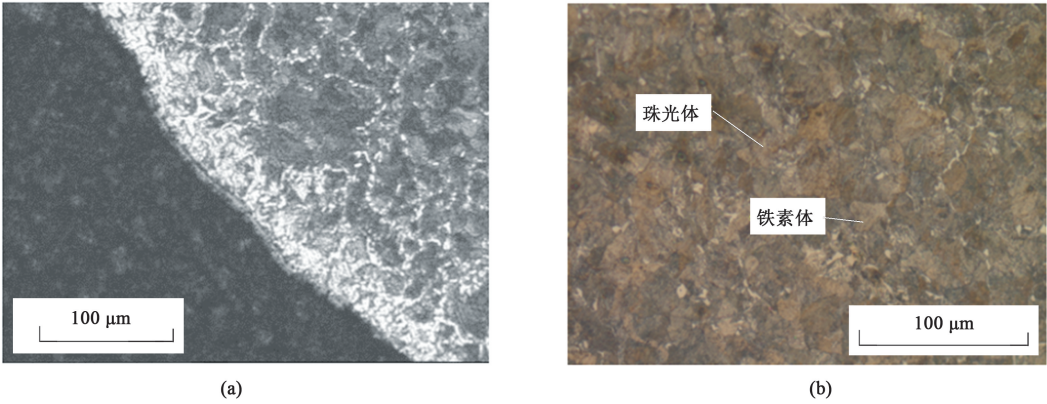


图 3 连杆的组织结构图
(a) 边缘处 (b) 心部
Fig. 3 Organizational structure diagrams of connecting rod
(a) Edge (b) Center

组织结构图如图 3b 所示，该连杆已进行了 2 h 的 850 ℃ 正火，可以看到其金相组织较为细密，不存在大块状、网状或者带状的碳化物。从图 3b 中可以看出，该组织是由典型的细片状珠光体和部分浅色的铁素体组成，还能看到少量的网状铁素体的存在，网状铁素体往往是碳含量低于 0.75% 的碳钢在过热后缓慢冷却时沿晶界析出的，其存在会增加钢材的脆性、降低钢材韧性。要求网状铁素体的含量不得超过 10%，由此可以判定组织中的网状铁素体的含量满足 NB/T 10068—2018^[7] 的要求。

3.2.2 扫描电镜分析

图 4 为锻造后进行正火热处理的连杆断裂后的扫描电镜图（Scanning Electron Microscope，SEM）。

由图 4 可以发现：断口中均存在大量的韧窝，韧窝深浅可以说明材料的塑性高低，韧窝深表明已发生基体强化，应变硬化指数 n 值大，塑性差，伸长率小，反之则相反。图 4a 中的韧窝较深，断面起伏也较大，说明连杆韧性较高。

由图 4b 可以看出，韧窝的空洞中有大量的夹杂物。由于非金属夹杂物与基体金属的弹性、塑性有较大的差别，非金属夹杂物对金属的塑性和韧性的影响很大，所以金属在拉伸变形时，夹杂物不能发生相应的变形，因此，在其周围产生了越来越大的应力，使夹杂物和基体的界面产生微裂纹，随着变形不断进行，微裂纹不断形成和发展，形成空洞。空洞的不断扩大导致相邻空洞互相连接，最后断裂。

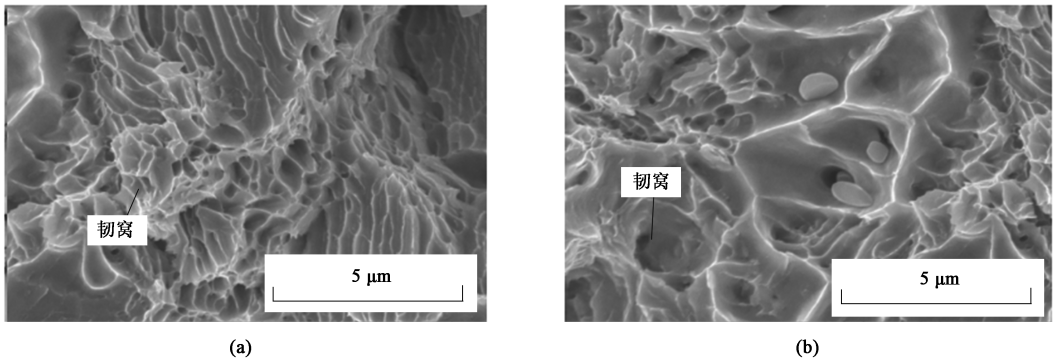


图 4 连杆断口的 SEM 图
(a) 韧窝 (b) 非金属夹杂物
Fig. 4 SEM images of connecting rod fracture
(a) Dimples (b) Non-metallic inclusions

3.3 力学性能测试与分析

3.3.1 硬度测试与分析

本次硬度实验采用 WHB-3000 数显布氏硬度，具体的取样位置如图 5 中“+”所示。测量后得到的布氏硬度值见表 2。

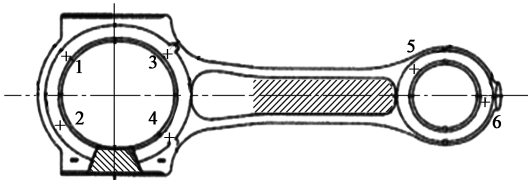


图 5 硬度测试取样点分布
Fig. 5 Distribution of sampling points for hardness testing

要求这 3 点的硬度值均不得低于 262 HB，但是不得高于硬度上限值 302 HB^[8]。通过仔细观察表 2 中的数据可知，与硬度要求进行对比，该连杆的整体布氏硬度值偏高，尤其是连杆的大头部分，数据上

表 2 连杆表面的布氏硬度值（HB）

Table 2 Brinell hardness values of connecting rod surface (HB)						
编号	1	2	3	4	5	6
数值	306.4	295.7	302.7	306.4	301.9	298.3

超出了要求的硬度上限值。对于汽车连杆，因为需考虑其自身的耐磨性，因此，应保证一定的硬度值，但是硬度过高将增加连杆的脆性，从而降低其抗冲击载荷的能力，在使用过程中容易发生脆断^[9]。

3.3.2 拉伸实验

连杆的力学性能需满足标准 GB/T 228.1—2021^[10]，如表 3 所示。

取 3 个试样进行实验，试样被拉断后的工程应力-工程应变曲线如图 6 所示。根据工程应力-工程应变曲线处理的数据如表 4 所示。

通过观察分析以上数据，可以看出，材料的强

表 3 C70S6 非调质钢连杆的力学性能要求

Table 3 Mechanical property requirements of non-quenched and tempered steel C70S6 for connecting rod

参数	抗拉强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
数值	≥900	≥10	20~40

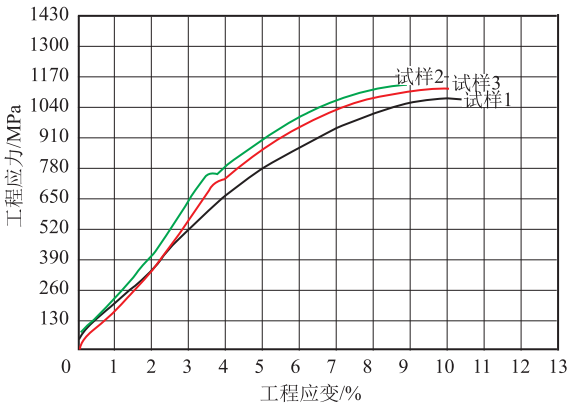


图 6 工程应力-工程应变曲线

Fig. 6 Engineering stress-engineering strain curves

表 4 拉伸实验结果

Table 4 Tensile test results

试样	拉力 F_m /kN	抗拉强度 R_m /MPa	弹性模量/MPa
1	14.24	1120	22668.57
2	14.56	1150	22429.68
3	12.98	1020	20758.48

度指标较高, 3 个试样的抗拉强度均高于 900 MPa, 达到了 1000 MPa 级别。由此可见, 加入的微量合金元素能明显使材料得到强化。而材料的断裂是由于

钢的硬度较高、韧性降低导致的^[11]。

表 5 为 3 个试样截面拉断前后的尺寸, 以及计算完成的试样断面收缩率和伸长率。

表 5 拉断前后试样尺寸和性能对比

Table 5 Comparison of sample sizes and properties before and after tensile fracture

试样	拉断前		拉断后		伸长率/%	断面收缩率/%
	平均长度/mm	截面积/mm ²	平均长度/mm	截面积/mm ²		
1	10	15.4330	11.03	12.2847	10.3	20.4
2	10	15.2388	10.98	12.0387	9.8	21.0
3	10	15.2272	11.01	12.0599	10.1	20.8

通过对 3 个试样的尺寸数据进行分析, 其伸长率和断面收缩率均接近下限 (伸长率为 10%, 断面收缩率为 20%), 其中, 试样 2 的伸长率低于下限^[7]。因此, 在硬度测试中, 试样的整体硬度偏高, 相比于采用相同工艺的正常连杆, 其韧性相对偏低, 伸长率和断面收缩率也较低。

3.4 汽车连杆的应力模拟及分析

为了研究连杆的失效方式和失效可能发生的部位, 应用 ANSYS 软件对连杆模型进行分析。

3.4.1 连杆变形分析

ANSYS 处理结果如图 7 所示。由图 7 可看出: 连杆小头远离连杆杆身的那一部分发生变形比较明显, 考虑到约束条件即大小头部分的扭曲度不超过 0.1 mm^[12], 对大头一端的圆柱孔施加无摩擦支撑, 所以大头部分变化不大, 两者之间的杆身部分则呈现出明显的梯度变化。从图 7 中可以看到, 等效应变最大值位于小头部分, 为 0.019034 (箭头所示)。

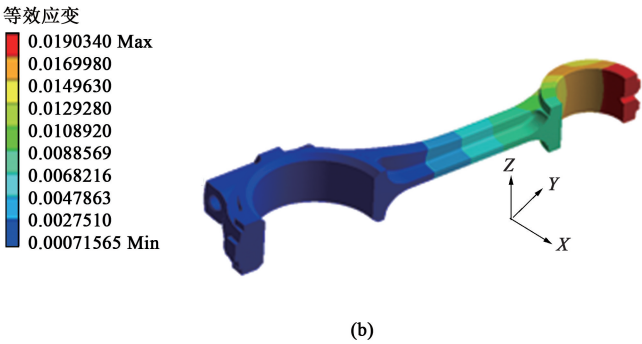
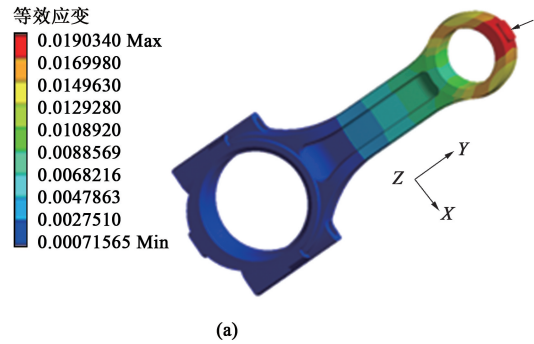


图 7 连杆等效应变云图

(a) 正视图 (b) 剖面图

Fig. 7 Equivalent strain nephograms of connecting rod

(a) Front view (b) Sectional view

3.4.2 等效应力分析

图 8 为 ANSYS 软件对连杆正面和剖面的等效应

力分析结果云图。从图 8 中可看出: 汽车连杆的等效应力从大头部分到小头部分并非有规律的线性变

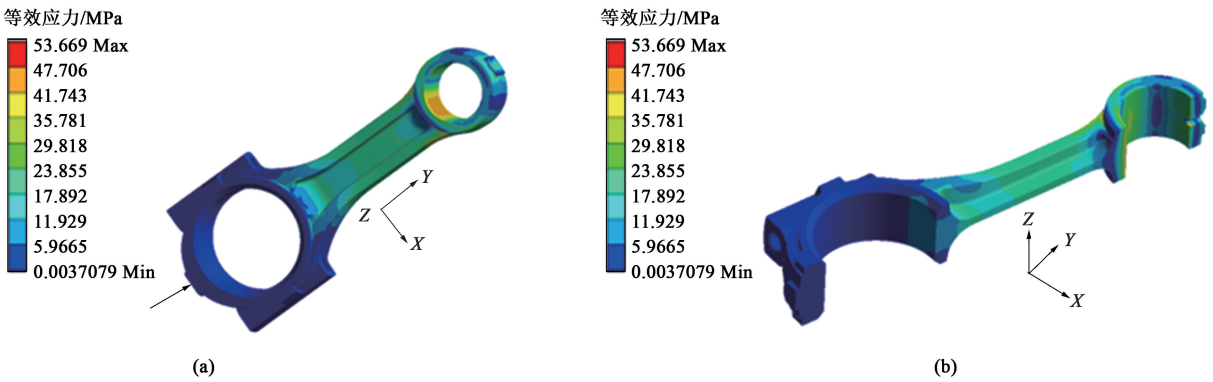


图 8 连杆等效应力云图
(a) 正视图 (b) 剖面图
Fig. 8 Equivalent stress nephgrams of connecting rod
(a) Front view (b) Sectional view

化，最大等效应力出现在连杆小头部分的圆柱内侧靠近杆身一边，最大等效应力值为 53.669 MPa。同时，连杆的杆身工字槽两端与小头连接处也出现了较大的应力^[13-14]。与变形分析一样，对大头一端的圆柱孔施加无摩擦支撑，因此，大头部分的等效应力值最小，为 3.7079×10^3 Pa（箭头所示）。

3.4.3 汽车连杆等效弹性应变分析

图 9 为 ANSYS 软件对连杆正面和剖面的等效弹性应变分析结果云图，通过观察云图可以看出，连

杆小头部分的圆柱内侧靠近杆身一侧的表面等效弹性应变出现了最大值，为 2.5573×10^{-4} （箭头所示）。此外，连杆的杆身工字槽底部连接小头部分也呈现出了较大的值，而杆身的其他部分相对连杆整体来说等效弹性应变值变化起伏不大。因为约束条件，连杆大头部分的等效弹性应变值为最小值。考虑到杆身两侧连接小头部分也出现较大的应变值，因此，连杆的杆身部分采用工字槽加强结构，在连杆工作时能够承受更大的压力和惯性扭矩，从而提高连杆的使用寿命。

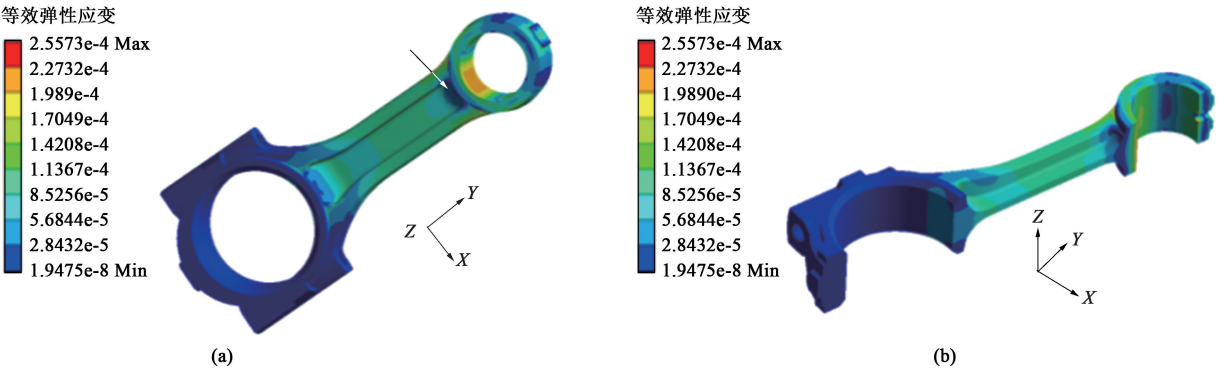


图 9 连杆等效弹性应变云图
(a) 正视图 (b) 剖面图
Fig. 9 Equivalent elastic strain nephgrams of connecting rod
(a) Front view (b) Sectional view

4 结语

通过对连杆进行实验分析发现，其表面不存在裂纹、偏析、腐蚀或者其他有害性缺陷。连杆

的失效原因在于硬度偏高、韧性不足。等效应力、等效应变和等效弹性应变分析发现，最大等效应力值和最大等效应变值均出现在连杆小头部分的圆柱内侧靠近杆身一侧的表面，连杆的杆身两端连接小头部分的应力和应变也呈现出较大值，杆

身采用工字槽结构可使其在工作时承受更大的压力和惯性扭矩。

参考文献:

- [1] 胡小青. 基于 ANSYS workbench 的汽车发动机连杆力学性能分析 [J]. 制造业自动化, 2014, 36 (4): 107-109.
Hu X Q. Mechanical performance analysis of automotive engine connecting rod based on ANSYS workbench [J]. Manufacturing Automation, 2014, 36 (4): 107-109.
- [2] 曾正明. 机械工程材料手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
Zeng Z M. Mechanical Engineering Materials Handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [3] 缪桃生, 蒋鹏. 非调质钢在汽车曲轴、连杆锻件上的应用研究 [J]. 锻压技术, 2010, 35 (6): 1-5.
Miu T S, Jiang P. Application research on non-quenched and tempered steel for automotive forging of crankshaft and connecting rod [J]. Forging & Stamping Technology, 2010, 35 (6): 1-5.
- [4] 李新平, 熊剑, 赵韩飞, 等. 热规范对 35MnVS 非调质钢连杆锻件组织和硬度的影响 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (1): 101-103.
Li X P, Xiong J, Zhao H F, et al. Effect of thermal specification on microstructure and hardness of 35MnVS non-quenching and tempering steel connecting rod forgings [J]. Hot Working Technology, 2023, 52 (1): 101-103.
- [5] 应天松, 杨阳, 曾兴豪, 等. 基于有限元法的农用车辆发动机连杆动静特性分析 [J]. 现代农业科技, 2024 (4): 171-177.
Ying T S, Yang Y, Zeng X H, et al. Dynamic and static characteristics of connecting rods in agricultural vehicle engines based on finite element method [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024 (4): 171-177.
- [6] 甫圣焱, 郑彬, 文超. 不同材料属性的发动机连杆有限元分析 [J]. 机械设计, 2021, 38 (2): 152-154.
Fu S Y, Zheng B, Wen C. Finite element analysis of engine connecting rod with different material properties [J]. Journal of Machine Design, 2021, 38 (2): 152-154.
- [7] NB/T 10068—2018, 含稳定化学元素不锈钢管道焊后热处理规范 [S].
NB/T 10068—2018, Specification for post-weld heat treatment of stabilized element-containing stainless steel piping [S].
- [8] 况驰, 李晶, 胡俊峰, 等. 基于 Ansys Workbench 的研磨仪连杆优化设计 [J]. 机械传动, 2023, 47 (6): 57-64.
Kuang C, Li J, Hu J F, et al. Optimal design of the connecting rod of vibration grinding mills based on Ansys Workbench [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2023, 47 (6): 57-64.
- [9] 张创科, 蒋登科, 许婕, 等. 空压机铝连杆疲劳强度分析 [J]. 机械设计与研究, 2019, 35 (2): 127-131.
Zhang C K, Jiang D K, Xu J, et al. Fatigue analysis of the aluminum connecting rod of air compressor [J]. Machine Design and Research, 2019, 35 (2): 127-131.
- [10] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].
GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [11] 范东祥, 范纪华, 许侃雯, 等. 不同特性材料连杆的模式分析 [J]. 机械工程与自动化, 2017 (2): 55-56.
Fan D X, Fan J H, Xu K W, et al. Modal analysis of connecting rod of different characteristic materials [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2017 (2): 55-56.
- [12] 朱奇, 龙华, 周志红, 等. 多臂节机械臂架系统连杆组参数化建模及优化设计 [J]. 机械传动, 2021, 45 (3): 75-81.
Zhu Q, Long H, Zhou Z H, et al. Link group parametric modeling and optimal design in multi-arm mechanical arm system [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45 (3): 75-81.
- [13] 王奕敏. 汽车发动机连杆的优化设计 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
Wang Y M. Optimal Design of Automotive Engine Connecting Rod [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [14] 贾德文, 孙艳, 邓伟, 等. 连杆模锻工艺参数优化 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (2): 1-13.
Jia D W, Sun Y, Deng W, et al. Optimization of die forging process parameters for connecting rod [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (2): 1-13.

(上接第 6 页)

- [9] 汪拥进, 占克勤, 裴薇, 等. 真空气淬工艺对模具钢 Cr12MoV 组织和性能的影响 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (5): 226-234.
Wang Y J, Zhan K Q, Pei W, et al. Influence of vacuum gas quenching process on microstructure and properties of Cr12MoV die steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (5): 226-234.
- [10] 张颖, 孙小巍, 宁安刚, 等. Q460GJD 钢在多向锻造后热处理过程中的奥氏体晶粒长大行为 [J]. 机械工程材料, 2022, 46 (10): 44-48, 55.
Zhang Y, Sun X W, Ning A G, et al. Austenite grain growth behavior of Q460GJD steel during heat treatment after multidirectional forging [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2022, 46 (10): 44-48, 55.
- [11] 王笑驰, 左鹏鹏, 吴晓春. SDP1 塑料模具钢锻造过程组织演变的数值模拟 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (2): 16-28.
Wang X C, Zuo P P, Wu X C. Numerical simulation of microstructure evolution for SDP1 plastic die steel during forging process [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (2): 16-28.
- [12] 张慧丽, 周正南. 锻造温度对新能源汽车电池镁基贮氢合金性能的影响 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (2): 31-36.
Zhang H L, Zhou Z N. Influence of forging temperature on performance of magnesium-based hydrogen storage alloys for new energy vehicle battery [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (2): 31-36.