

基于关键尺寸的锻造模具寿命预测方法

王玉国^{1,2}, 刘子康¹, 朱晓春², 谢 斌³, 郑 堃¹

(1. 南京工程学院 汽车与轨道交通学院, 江苏 南京 211167; 2. 南京工程学院 先进工业技术研究院, 江苏 南京 211167;
3. 南京康尼精密机械有限公司, 江苏 南京 210038)

摘要: 针对模具锻造加工过程中由于摩擦损耗引起尺寸变化而导致失效的问题, 提出了 1 种基于关键尺寸的模具寿命预测方法。首先, 基于模具渐变失效原理, 构建了锻造模具和锻造工件的关键尺寸与模具寿命的对应关系。然后, 研究了锻造模具全生命周期业务场景, 给出了模具寿命预测业务逻辑流程, 并提出了关键尺寸和模具实际寿命的采集方法。最后, 利用关键尺寸和实际寿命, 采用不同的拟合算法进行模具寿命预测。实例表明, 分析计算得出的拟合函数和拟合优度指数, 可针对不同使用场景选用特定拟合算法, 从而实现锻造模具寿命的准确预测。

关键词: 模具寿命; 模具失效; 关键尺寸; 数据拟合; 寿命预测

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.10.024

中图分类号: TG315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 10-0178-06

Forging mold life prediction method based on key dimensions

Wang Yuguo^{1,2}, Liu Zikang¹, Zhu Xiaochun², Xie Bin³, Zheng Kun¹

(1. School of Automobile and Rail Transit, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;
2. Advanced Industrial Technology Research Institute, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;
3. Nanjing Kangni Precision Machinery Co., Ltd., Nanjing 210038, China)

Abstract: For the problem of failure caused by dimensional changes due to friction losses during the forging process of mold, a mold life prediction method based on key dimensions was proposed. Firstly, based on the principle of gradual failure for mold, the corresponding relationship between the key dimensions of forging mold and forging workpiece and the mold life was constructed. Then, the entire lifecycle business scenario of forging mold was studied, the business logical process for predicting the mold life was provided, and a collection method for key dimensions and actual mold life was proposed. Finally, using key dimensions and actual life, different fitting algorithms were used for mold life prediction. Examples show that the fitting function and the goodness of fitting index obtained from analysis and calculation can be used to select specific fitting algorithms for different usage scenarios, so as to realize the accurate prediction of forging mold life.

Key words: mold life; mold failure; key dimension; data fitting; life prediction

模具是制造业的根基, 模具产业水平是一个国家制造业水平的标杆^[1]。在生产过程中, 中小型锻造企业不仅要满足生产精度要求, 还需节约成本, 而生产精度又与模具的精度密切相关, 这就需要对模具寿命进行相对精确的预测和评估以保证模具使用状态最佳, 并借助高效的信息化管理方法延长模具使用寿命, 从而实现企业低成本、高效率的作业需求^[2]。

李志刚等^[3]根据模具工厂的使用需求, 应用

STM32L151 单片机开发了模具寿命管理系统, 通过传感器记录模具打开和关闭的次数, 并将此信息进行采集与传输, 实现数据交互, 从而对模具寿命进行管理。黄忠等^[4]基于 Archard 磨损模型, 对冲压模具寿命进行了预测, 比较了单次磨损预测寿命法与平均值磨损预测寿命法的预测精度, 实现了冲压模具寿命预测。杨军等^[5]通过二维码扫码方式对采集信息进行存储, 实现生产信息与管理信息的交互, 从而实现舰船仓库的信息化管理。以上研究方法通过对模具寿命进行采集与储存, 并根据采集信息、采集频率以及信息储存开展模具寿命预测。此外, 还可以通过不同的试验方法和有限元仿真等数据处理方式对模具进行寿命预测。蔡力钢等^[6]将正交试验中的方差分析法与模锻加工过程中的有限元仿真

收稿日期: 2024-01-25; **修订日期:** 2024-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51805244); 南京工程学院先进工业技术研究院开放基金项目 (XJY202107)

作者简介: 王玉国 (1979-), 男, 博士, 副教授

E-mail: wanyuguo@njit.edu.cn

相结合，记录了模具在模锻试验中的磨损量，根据得到的数据，运用多项式拟合方法，推导出了模具在模锻过程中的累积磨损量与模锻次数之间的关系，绘制了关系曲线图，并将该曲线用于预测模具的使用寿命。杨子帅等^[7]通过建立模具的磨损模型，运用有限元方法分析研究了模具温度、锻造速率和模具材料等关键因素对汽车前轴辊锻模具磨损的影响。

目前，我国中小型锻造企业普遍采用自制模具来生产零件^[8]，针对该典型的模具应用业务场景，本文研究了基于关键尺寸的模具寿命预测方法。该方法适用于中小型锻造企业，通过人工测量、采集模具的关键尺寸，然后运用数据拟合方法，对在役模具的寿命进行动态评估，同时对已报废模具的关键尺寸进行标记，提取有效数据，从而精准、全面地预测同种型号模具的寿命。

1 基本原理

1.1 模具失效原理

在生产制造过程中，模具受到力的作用，在极小的冲裁间隙内容易产生塑性变形，凸模、凹模与材料的剪切面接触，会产生极大的摩擦力，从而引起模具材料的损耗，使得模具的外观尺寸发生变化，当超出使用标准的范围时会导致模具失效^[9-11]。在

生产过程中，还会因高速摩擦产生的摩擦力而产生热能，使得模具长时间处于高温状态下，在这种高温状态下极易造成毛坯与模具间发生冷焊附着，进而导致模具失效。此外，在高速运行以及强力挤压的工作状态下，也会造成模具的断裂^[12-13]。总体而言，模具失效形式主要有磨损、裂纹、分层、厚度变细、孔径变大、断裂、端面开裂以及长度变短等。

1.2 关键尺寸判断原理

对于断裂、端面开裂以及裂纹类失效形式，生产线的员工通过肉眼即可看出，一旦发生开裂，及时更换模具即可。但对于摩擦损耗、长度变短以及孔径变大等失效形式，属于长时间的渐变累积，生产人员难以用肉眼观察出模具是否仍符合生产精度的要求，故需借助关键尺寸的管理以精细判断模具是否失效。

关键尺寸包括模具关键尺寸和工件关键尺寸。模具关键尺寸，即满足生产线精度要求的单件模具的尺寸，包括模具实际尺寸、装配关键尺寸、最大极限尺寸、最小极限尺寸和预测报警尺寸；工件关键尺寸，即模具生产加工出工件的关键尺寸，包括工件的直径、总长度、同轴度、垂直度和拔模角等。其中，极限尺寸是指允许尺寸变化的 2 个临界值，分别为最大极限尺寸和最小极限尺寸。工件关键尺寸、模具关键尺寸与模具寿命间的关系如图 1 所示。

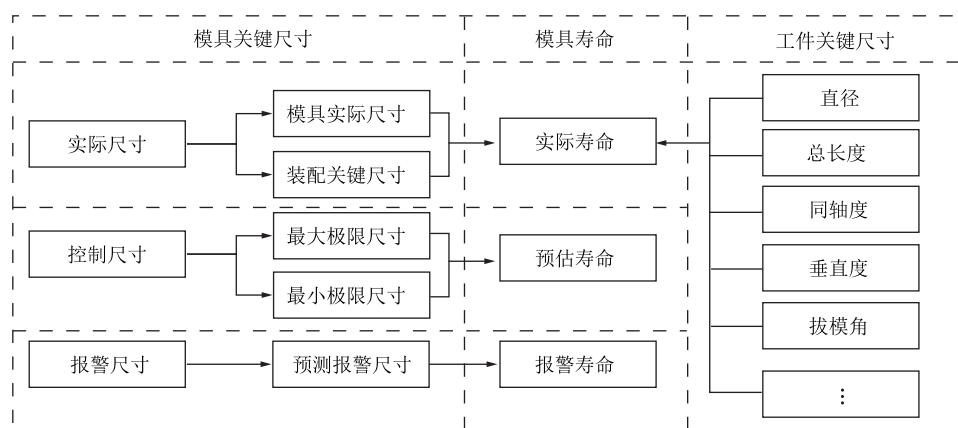


图 1 关键尺寸与模具寿命间的关系图

Fig. 1 Relationship diagram between key dimensions mold life

通过模具在锻造过程中使用次数与模具关键尺寸之间的关系，以及模具使用次数与加工工件关键尺寸之间的关系可以预测模具寿命。通过现场采集尺寸和模具寿命的数据，运用数据拟合方法对模具关键尺寸进行分析，在拟合中分析关键尺寸的变化与模具寿命之间的关系，可以对模具寿命进行精准

的预测。

1.3 模具关键尺寸采集

在模具借出与归还的循环过程中，需要模具仓库管理人员密切关注模具的关键尺寸，无论是借出归还，还是维修后归还，均需精确地记录每次归还时模具的关键尺寸和实际寿命，以保证数据统计结

$a、b、u、v、c_0、c_1、c_2、\cdots、c_n$ 为拟合系数； n 为多项式函数的阶数； S 为拟合误差； $f(x_i)$ 为多项式函数在第 i 个数据点 x_i 处的函数值， $i=1、\cdots、m$ ； m 为数据点个数； y_i 为第 i 个数据点的实际值。

为找到一个系数集合 $c_0、c_1、c_2、\cdots、c_n$ 使得 S 最小，以求解最小二乘法，可以令 S 对所有系数 $c_0、c_1、c_2、\cdots、c_n$ 的偏导数为零，即：

$$\frac{\partial S}{\partial c_j} = 0, j = 0, 1, 2, \cdots, n$$

(5)

求解式 (5) 所示的方程组可以得到系数 $c_0、c_1、c_2、\cdots、c_n$ 的最优解。

在数据拟合中，拟合优度指数 R^2 是一种用来评估拟合优度的统计量，它反映了数据点和拟合线（或曲线）之间的相似程度，取值范围在 0~1 之间。 R^2 值的计算方法如下。

首先，计算实际数据点和拟合线之间的残差平方和（Sum of Squares due to Error, SSE ）和总离差平方和（Total Sum of Squares, SST ）：

$$SSE = \sum (y_i - f_i)^2$$

(6)

$$SST = \sum (y_i - \bar{y})^2$$

(7)

式中： f_i 为第 i 个数据点的拟合值； \bar{y} 为实际数据点的平均值。

然后，通过式 (8) 计算 R^2 值：

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

(8)

其中， R^2 值越接近 1，表示拟合程度越好； R^2 值越接近 0，表示拟合程度越差。

2.3 模具寿命预测曲线图

模具寿命预测曲线图由多条曲线构成，其中包括最大极限尺寸曲线、最小极限尺寸曲线、拟合预测寿命曲线以及实际寿命曲线等。通过拟合曲线的变化可预测模具寿命，根据实际寿命预测曲线得出相对误差，从而实现模具寿命的精准预测，如图 3 所示。在最大与最小极限尺寸之间判断模具寿命的变化情况。由图 3 所示模具寿命预测曲线可知，预估寿命曲线与最小极限尺寸线交点的横坐标为预测的模具最大寿命，最大寿命和当前实际寿命的差值为模具的预测剩余寿命。

3 应用实例

以某公司生产的套筒模具为例，如图 4 所示，

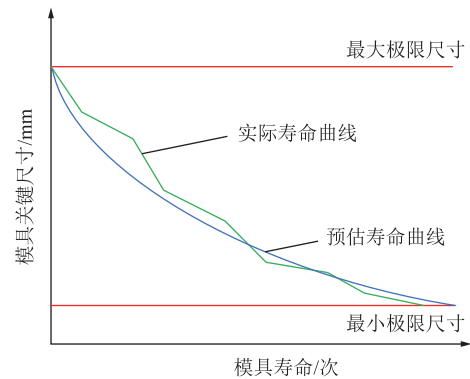


图 3 模具寿命预测曲线
Fig. 3 Prediction curves of mold life

模具的实际尺寸包括上模内径、上模外径、套筒直径和刃口尺寸等。以上模刃口尺寸为例，根据设计要求的規定，其中 1 个模具的刃口尺寸直径为 $\Phi 18.03$ mm，最大和最小极限尺寸分别为 $\Phi 18.12$ 和 $\Phi 17.94$ mm。经过若干次借出使用后，归还时由模具仓库人员记录每次借出使用后的模具使用次数及刃口尺寸，如表 1 所示。正常使用情况下，根据该模具的历史报废记录，已知该模具的最大报废寿命为 38500 次。

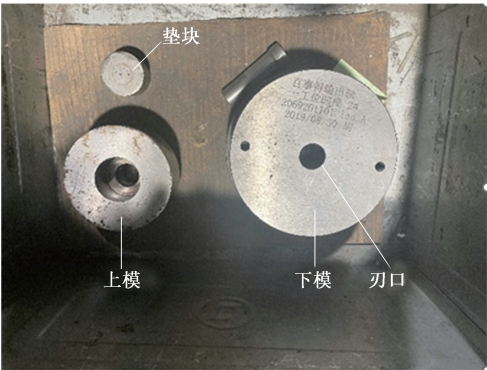


图 4 模具实物照片
Fig. 4 Object photo of molds

表 1 模具刃口尺寸实测变化量

Table 1	Measured variation amount in mold blade sizes						
记录次数/次	1	2	3	4	5	6	7
使用次数/次	4982	5250	5468	6600	4500	5326	6309
刃口尺寸/mm	$\Phi 18.02$	$\Phi 18.00$	$\Phi 17.99$	$\Phi 17.97$	$\Phi 17.96$	$\Phi 17.95$	$\Phi 17.94$
总磨损量/mm	0.02	0.04	0.05	0.07	0.08	0.09	0.10

利用模具刃口尺寸变化趋势进行多模型拟合分析，得到如图 5 所示的模具寿命拟合曲线图。

指数模型拟合函数如式 (9) 所示：

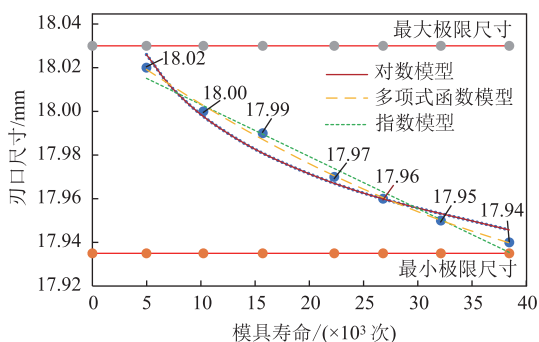


图 5 模具寿命拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of mold life

$$f_1(x) = 18.027e^{-1 \times 10^{-7}x} \quad (9)$$

对数模型拟合函数如式 (10) 所示:

$$f_2(x) = -0.039 \ln x + 18.361 \quad (10)$$

多项式函数模型拟合函数如式 (11) 所示:

$$f_3(x) = 3 \times 10^{-11}x^2 - 4 \times 10^{-6}x + 18.036 \quad (11)$$

式 (9)、式 (10) 和式 (11) 的拟合优度指数 R^2 分别为 0.9847、0.9653 和 0.9966, 可知多项式函数模型拟合结果求得的 R^2 更接近 1, 拟合程度较好。根据指数拟合函数分析, 当达到报废标准尺寸 $\Phi 17.94$ mm 时, 预测模具寿命为 36892 次; 根据对数拟合函数分析, 当达到报废标准尺寸 $\Phi 17.94$ mm 时, 预测模具寿命为 42761 次; 根据多项式拟合函数分析, 当达到报废标准尺寸 $\Phi 17.94$ mm 时, 预测模具寿命为 38221 次。综上, 采用多项式函数拟合模型拟合获得的预测寿命与最大报废寿命 38500 次最接近。根据以上结果分析, 本例模具选择多项式函数拟合模型拟合进行模具寿命的预测。

4 结论

(1) 针对中小型锻造企业模具使用现状, 研究模具失效问题, 提出了一种模具寿命预测方法。构建了锻造模具和锻造工件的实际尺寸、极限尺寸和报警尺寸等关键尺寸, 与模具的实际寿命、预测寿命和报警寿命的对应关系。

(2) 基于锻造模具用于日常生产的业务流程, 梳理新模入库、借出归还、尺寸检测、寿命记录和维修保养等全生命周期业务场景, 提出了关键尺寸和模具寿命的采集方法, 给出了模具寿命预测方法的实际业务逻辑流程, 对寿命预测方法的现场应用具有指导意义。

(3) 利用关键尺寸和实际寿命数据, 采用指数

拟合、对数拟合和多项式函数拟合等不同的拟合算法进行模具寿命预测。分析并计算得出对应的拟合函数和拟合优度指数 R^2 , 针对锻造模具的不同使用场景, 选用特定的数据拟合算法, 可以对模具寿命进行精准预测。

参考文献:

- [1] 吕彩琴, 王天骄, 李井吉, 等. 车用扭杆端头锻粗模具结构损伤及寿命研究 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (10): 216-222.
Lyu C Q, Wang T J, Li J J, et al. Research on structural damage and life of upsetting die for automotive torsion rod end [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (10): 216-222.
- [2] Shen L, Zhao J, Zhang Y Q, et al. Performance evaluation of titanium-based metal nitride coatings and die lifetime prediction in a cold extrusion process [J]. High Temperature Materials and Processes, 2021, 40 (1): 108-120.
- [3] 李志刚, 吕杰, 董小飞, 等. 基于单片机的模具寿命管理系统设计 [J]. 制造技术与机床, 2018 (6): 170-173.
Li Z G, Lyu J, Dong X F, et al. Design of mold life management system based on single chip microcomputer [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018 (6): 170-173.
- [4] 黄忠, 史召峰, 王理想. 工艺参数对汽车铝合金封板成形质量的影响及模具寿命预测 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (7): 107-111, 121.
Huang Z, Shi Z F, Wang L X. Influence of process parameters on forming quality for automobile aluminum alloy sealing plate and prediction of die life [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (7): 107-111, 121.
- [5] 杨军, 李鹏, 俞海勇, 等. 基于二维码识别的舰船仓库管理系统整体架构分析 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41 (20): 184-186.
Yang J, Li P, Yu H Y, et al. Architecture analysis of ship warehouse management system based on qr code recognition [J]. Ship Science and Technology, 2019, 41 (20): 184-186.
- [6] Cai L G, Liu H D, Pan J J, et al. Mold wear during die forging based on variance analysis and prediction of die life [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 37 (6): 872-883.
- [7] 杨子帅, 吴博雅, 李奇颖, 等. 汽车前轴成形模具磨损行为的实验与数值模拟研究 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (9): 188-195.
Yang Z S, Wu B Y, Li Q Y, et al. Experimental and numerical simulation study on wear behavior of forming die for automotive front axle beam [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 188-195.
- [8] 邝超鹏, 陶建华, 李庭泰, 等. 云制造环境下模具加工任务与制造资源服务匹配研究与应用 [J]. 制造技术与机床, 2023 (3): 51-59.
Kuang C P, Tao J H, Li T T, et al. Research and application of mold processing task and manufacturing resource service matching

- in cloud manufacturing environment [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2023 (3): 51-59.
- [9] 金飞翔, 董奇, 徐梦洁, 等. 基于有限元铝合金复杂精密锻造模具失效分析及优化 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (2): 180-184.
- Jin F X, Dong Q, Xu M J, et al. Failure analysis and optimization on aluminum alloy complex precision forging mold based on finite element [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (2): 180-184.
- [10] 陆宝山, 王雷刚, 季业益, 等. 金属成形热力耦合模拟与模具失效机制研究 [J]. *塑性工程学报*, 2019, 26 (3): 33-40.
- Lu B S, Wang L G, Ji Y Y, et al. Study on thermo-mechanical coupling simulation of metal forming and failure mechanisms of forging die [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2019, 26 (3): 33-40.
- [11] 丁涛, 江勇, 汪永明. 3 自由度折弯模具关键尺寸精密检测机械臂设计 [J]. *机械设计*, 2012, 29 (5): 63-66, 72.
- Ding T, Jiang Y, Wang Y M. Design of manipulator for precision detecting key dimensions of 3-DOF bending mold [J]. *Journal of Machine Design*, 2012, 29 (5): 63-66, 72.
- [12] Seo Y H. Development of smart cold forging die life cycle management system based on real-time forging load monitoring [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12 (1): 13297.
- [13] 陈心, 王丽阁, 王恩泽. 铝锭模具失效分析及对策 [J]. *铸造*, 2020, 69 (7): 769-773.
- Chen X, Wang L G, Wang E Z. Failure analysis and countermeasure of aluminum ingot mold [J]. *Foundry*, 2020, 69 (7): 769-773.
-
- (上接第 172 页)
- [3] 何志坚, 张莹, 徐果. 机械压力机分体式离合器制动器的结构及维护方法 [J]. *装备制造技术*, 2017 (7): 196-197, 208.
- He Z J, Zhang Y, Xu G. Construction and maintenance method of split clutch brake of mechanical press [J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2017 (7): 196-197, 208.
- [4] 宋玉泉, 王明辉, 宋家旺, 等. 精成形辊锻机 [J]. *塑性工程学报*, 2007, 14 (1): 72-75.
- Song Y Q, Wang M H, Song J W, et al. Precision forming roll-forging machine [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2007, 14 (1): 72-75.
- [5] 陈杰鹏. 1250 mm 辊锻机关键部件静力学与动力学分析 [D]. 北京: 中国机械科学研究总院集团有限公司, 2013.
- Chen J P. Statics and Dynamic Analysis of the Key Component of 1250 mm Roll-forging Machine [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., 2013.
- [6] 石一馨, 杨勇, 李海涛, 等. 1600 mm 辊锻机及其在轨道交通用车轴生产中的应用 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (6): 209-213.
- Shi Y Q, Yang Y, Li H T, et al. 1600 mm roll forging machine and its application in production of axles used in rail transit [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (6): 209-213.
- [7] 龚立巍, 许楠, 袁佳俊, 等. 门式压力机干式离合器故障浅析 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2021, 56 (3): 23-29.
- Gong L W, Xu N, Yuan J J, et al. Analysis on the failure of dry clutch of gantry press [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2021, 56 (3): 23-29.
- [8] 李雪, 赵升吨, 崔敏超, 等. 湿式离合制动器在热模锻压力机上的应用现状分析 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2015, 50 (1): 16-21.
- Li X, Zhao S D, Cui M C, et al. Application status analysis of wet clutch/brake in hot die forging press [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2015, 50 (1): 16-21.
- [9] 张军. 超大型低惯量干式摩擦离合器制动器设计研究 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2020, 55 (5): 27-30.
- Zhang J. Design and research of super large low inertia dry friction clutch brake [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2020, 55 (5): 27-30.
- [10] 严宏志, 张美玉, 赵鹏, 等. 弹簧间隙大小及均匀性对离合器动态性能的影响 [J]. *机械设计与研究*, 2017, 33 (3): 82-86.
- Yan H Z, Zhang M Y, Zhao P, et al. The effect on the performance of spring clutch in different conditions of gap size and uniformity of the spring [J]. *Machine Design and Research*, 2017, 33 (3): 82-86.
- [11] 陈 H, 孙 Y. Development and application of reliability test platform for high-speed punch machine clutch brake system [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31 (1): 53-61.
- [12] 谢光焯. 机械压力机摩擦离合器与制动器摩擦块的计算 [J]. *锻压机械*, 1993 (5): 26-28.
- Xie G X. Calculation of friction blocks for friction clutches and brakes in mechanical press [J]. *Metallforming Machinery*, 1993 (5): 26-28.
- [13] Kwon B, Kim H. Dynamic analysis of shift quality for clutch to clutch controlled automatic transmission [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 14 (12): 1348-1357.
- [14] 端武治, 刘俊, 倪胜伟, 等. 一种机械压力机分体式离合器制动器的控制气路 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2019, 54 (2): 36-38.
- Duan W Z, Liu J, Ni S W, et al. One kind of split clutch brake gas path control for mechanical press [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2019, 54 (2): 36-38.
- [15] 陈钟秀, 顾飞燕, 胡望明. 化工热力学 [M]. 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- Chen Z X, Gu F Y, Hu W M. Chemical Engineering Thermodynamics [M]. 3rd Edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.