

基于位移迭代的伺服电缸压力控制模型

高琳琪, 张 乔, 徐嘉梁, 万 强, 黄国燕, 毛 容

(四川航天川南火工技术有限公司, 四川 泸州 646099)

摘要: 为了解决传统伺服电缸压力机在扭矩模式下控制精度受系统阻尼影响, 不适用于大量程的压力控制的问题, 设计了一套伺服电缸压力机系统, 采用基于位移迭代的压力控制模型, 利用被压工件材料的压力与变形之间的本构关系, 通过调整电缸输出位移, 控制被压工件的变形量, 实现基于位移迭代的压力控制, 从而克服了系统阻尼对控制精度的影响, 使伺服电缸压力控制精度高于 $\pm 0.6\%$, 且压力越大, 控制精度越高。研究成果使得普通电缸也能够满足大量程、高精度压力控制的需求, 大幅降低了伺服电缸压力机系统的制造成本。

关键词: 伺服电缸; 压力控制; 位移迭代; 材料本构; 系统阻尼

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.026

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 04-0199-05

Pressure control model for servo electric cylinder based on displacement iteration

Gao Linqi, Zhang Qiao, Xu Jialiang, Wan Qiang, Huang Guoyan, Mao Rong

(Sichuan Aerospace South Sichuan Initiating Explosive Technology Co., Ltd., Luzhou 646099, China)

Abstract: In order to solve the problem that the control accuracy of traditional servo electric cylinder press in torque mode was affected by system damping and was not suitable for large range pressure control, a set of servo electric cylinder press system was designed and manufactured. Then, the pressure control model based on displacement iteration and the constitutive relationship between the pressure and deformation of the pressed workpiece material, the deformation amount of the pressed workpiece was controlled by adjusting the output displacement of electric cylinder to realize the pressure control based on displacement iteration. Thus, the influence of system damping on the control accuracy was overcome, the pressure control accuracy of the servo electric cylinder was higher than $\pm 0.6\%$, and the greater the pressure was, the higher the control accuracy was. The research results make that the ordinary electric cylinder can meet the needs of large range and high-precision pressure control and greatly reduce the manufacturing cost of the servo electric cylinder press system.

Key words: servo electric cylinder; pressure control; displacement iteration; material constitutive; system damping

伺服电缸是将伺服电机和丝杠组件一体化设计的模块化产品, 可以将伺服电机的旋转运动变为丝杠组件的往复直线运动, 从而将电机的扭矩转换为压力进行输出^[1-2]。基于此, 伺服电缸常作为高效的驱动单元应用在压力机系统的设计中^[3-4]。传统的伺服电缸压力机的控制方式是基于扭矩模式控制电缸运动^[5], 根据目标压力和电缸输出压力的误差调节伺服电机的扭矩, 进而调节电缸的输出压力。但是, 伺服电缸压力机结构自身存在的系统阻尼, 使电缸在运动状态下和静止状态下对相同大小的扭

矩转换出不同大小的压力, 从而影响系统的控制精度, 且电缸压力量程越大, 系统阻尼越大, 控制精度越低, 不适用于大量程的压力控制。因此, 本文设计了一套伺服电缸压力机系统, 通过采用基于位移迭代的压力控制模型, 利用电缸的输出位移调节电缸的输出压力, 从而克服系统阻尼影响, 提高系统压力的控制精度。

1 伺服电缸压力机结构设计

伺服电缸压力机系统由电气柜、底座、产品放置工位、压力执行元件、压力传感器、伺服电机、丝杠组件和 C 字形安装支架等组成, 结构如图 1 所示。

其中, 电气板、伺服电机驱动器, 以及 PLC 控制系统等安装在电气柜内部, PLC 控制系统与伺服电机驱动器连接, 用于控制伺服电缸。C 字形安装

收稿日期: 2022-07-18; 修订日期: 2022-10-10

作者简介: 高琳琪 (1982-), 男, 工学学士, 研究员

E-mail: mymiao421@163.com

通信作者: 张 乔 (1995-), 男, 工学硕士, 工程师

E-mail: 18428331516@163.com

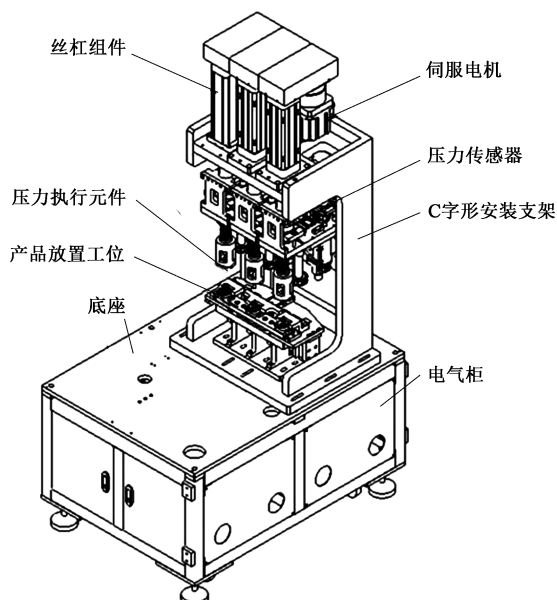


图 1 伺服电缸压力机系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of servo electric cylinder press system

支架安装在底座上, 3 台伺服电缸固定安装在同一 C 字形安装支架顶部的安装板上, 以实现 3 个工位同步压装, 大幅提升了加工效率。伺服电缸和伺服电缸输入轴之间通过同步带轮进行动力传送和转换。压力传感器安装于伺服电缸输出轴和压力执行元件之间, 用于实时采集伺服电缸压力机的输出压力。压力执行元件通常为压头、压杆等工装, 在伺服电缸输出轴的带动下直接作用于被压工件表面, 可以根据实际被压工件的尺寸及性质任意更换。PLC 控

制系统包括获取模块、第 1 处理模块、第 2 处理模块和控制模块。

2 基于位移迭代的压力控制模型

为了解决传统伺服电缸压力机在扭矩模式下的控制精度受系统阻尼影响, 不适用于大量程的压力控制的问题, 本文提出一种基于位移迭代的伺服电缸压力控制模型, 其核心思想是利用被压工件材料的压力与变形之间的本构关系, 通过调整伺服电缸输出位移, 控制被压工件的变形量, 实现基于位移迭代的压力跟踪控制。因为伺服电缸是以满扭矩进行位移调节, 因此, 该种方式可以避免输出压力受系统阻尼的影响。

基于位移迭代的伺服电缸压力控制模型的控制原理如图 2 所示: 首先, 伺服电缸带动压力执行元件向下移动作用于被压工件表面, 产生输出压力 $P(t)$, 压力传感器采集到该输出压力后与输入目标压力 P 进行比较, 计算出压力误差 $E(t)$; 将压力误差利用 PID 控制算法计算出压力调节值 $F(t)$; 然后, 将压力调节值带入被压工件的压力-变形的本构模型, 计算出位移调节值 $X(t)$, 实现将伺服电缸输出压力调节转换为输出位移调节; 最后, 控制伺服电缸带动压力执行元件移动相应的位移调节值, 使被压工件产生等效变形量; 压力传感器再次采集电缸输出压力并视情况迭代上述过程, 直至输出压力达到目标压力。模型中, $P(t)$ 、 $E(t)$ 、 $F(t)$ 、 $X(t)$ 均随时间 t 做周期性迭代变化。

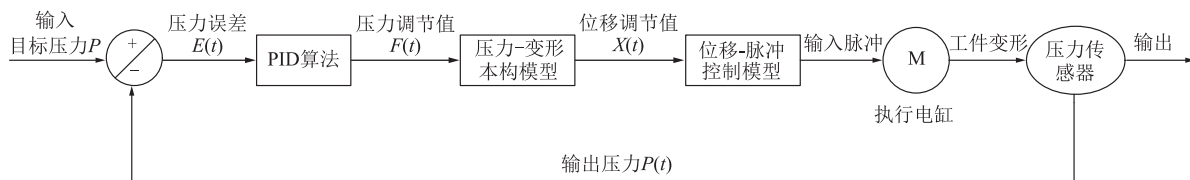


图 2 基于位移迭代的压力控制模型原理图

Fig. 2 Principle diagram of pressure control model based on displacement iteration

由图 2 可知, 该模型的核心过程包括: (1) 获取压力调节值 $F(t)$; (2) 获取位移调节值 $X(t)$; (3) 控制伺服电缸移动相应位移调节值 $X(t)$ 。

2.1 获取压力调节值 $F(t)$

根据伺服电缸输出压力与目标压力的压力误差, 应用 PID 控制算法^[6-7] 计算压力调节值; 压力调节值计算公式如式 (1) 所示:

$$F(t) = k_p E(t) + k_i \sum_{j=0}^t E(j) + k_d [E(t) - E(t-1)] \quad (1)$$

式中: k_p 为设置的比例系数; k_i 为设置的积分系数; k_d 为设置的微分系数。

2.2 获取位移调节值 $X(t)$

材料本构模型是描述材料的力学特性的数学表达式^[8-9], 可以准确构建被压工件的应力和应变之间的关系。根据材料物理特性, 常见的有弹性模型、弹塑性模型、粘弹性模型等本构类型。其中, Johnson-Cook 弹塑性本构模型^[10-12] 对于中高速冲击、高应变率, 以及中高温环境下金属材料的强度极限以及失效过程描述十分准确。因此, 可以

用 Johnson-Cook 弹塑性本构模型描述金属工件在伺服电缸输出压力下的受压及变形关系。当被压工件为其他材料时, 可以选取其他适合的本构模型。Johnson-Cook 弹塑性本构模型表达式如式 (2)~式 (4) 所示:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \quad (3)$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (4)$$

式中: σ 为等效应力; ε 为等效应变; $\dot{\varepsilon}$ 为等效应变速率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变速率, 一般取 1 s^{-1} ; T 为实际温度; T_r 为室温温度; T_m 为材料熔点; A 、 B 、 C 、 n 、 m 为与材料物理特性相关的系数, 可以通过试验或查阅资料确定。式 (2) 中, 第 1 项为应变强化项, 第 2 项为应变率强化项, 第 3 项为温度软化项。

一般情况下, 加工过程在室温条件下进行, 因此, 式 (2) 的温度软化项可以简化为 1, 如式 (5) 所示:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}) \quad (5)$$

将式 (5) 转换为被压工件的压力与变形的关系, 如式 (6) 所示:

$$\frac{f}{S} = \left[A + B \left(\frac{x}{h} \right)^n \right] (1 + C\ln\dot{\varepsilon}) \quad (6)$$

式中: f 为压装压力; S 为压头与工件的接触面积; x 为工件变化量; h 为被压工件厚度方向的尺寸。

式 (6) 可以比较准确地描述被压工件受到的压力与其产生的变形量之间的关系。在实际伺服电缸压力控制时, 压力调节值 $F(t)$ 等效为压装压力 f , 位移调节值 $X(t)$ 等效为工件变形量 x 。因此, 将式 (1) 计算获取的压力调节值 $F(t)$ 带入式 (6) 即可获得当次迭代的位移调节值 $X(t)$ 。

2.3 控制伺服电缸移动相应的位移调节值 $X(t)$

伺服电缸的输入为脉冲, 输出为位移, 要控制伺服电缸移动相应的位移, 必须构建电缸输入脉冲与输出位移之间的控制模型, 如式 (7) 所示:

$$X(t) = \frac{y \times R \times \phi}{\omega \times I} \quad (7)$$

式中: y 为丝杠导程; R 为输入电机的脉冲数; ϕ 为电子齿轮比; ω 为伺服电机编码器分辨率, 即电机转动一圈对应的脉冲数; I 为电机与丝杠的减速比。

当伺服电缸设计完成后, y 、 ω 、 I 参数均已确定, 因此, 通过调整电子齿轮比, 可以灵活控制输入脉冲数和电缸位移调节值的关系。

本伺服电缸压力机系统中, 丝杠导程为 5 mm; 伺服电机编码器分辨率为 131072; 电机与丝杠的减速比为 2:1。

3 模型验证

3.1 被压工件压力-变形的简化本构模型

采用 Johnson-Cook 弹塑性本构模型虽可以准确地描述被压工件压力和变形的关系, 但实际应用时需要根据不同被压工件的材料拟合本构模型的系数, 前期工作量较大。同时, 若被压工件加工过程中存在冶金缺陷, 还可能出现压力过超的问题。因此实际应用时, 可以采用如式 (8) 所示的压力-变形简化本构模型。

$$X(t) = \frac{F(t)}{\nabla} + \partial \quad (8)$$

式中: ∇ 为位移转换系数; ∂ 为位移补偿系数。

其中, ∇ 是决定模型响应速度和精度的关键参数, 可以通过压力试验确定。具体为: 首先计算出伺服电缸按最小单位位移量变化时, 伺服电缸输出压力的变化量; 然后, 再将该压力变化量进行 1~2 倍放大, 即为系统的位移转换系数 ∇ 。 ∂ 是为了提高模型在后期逼近目标压力的速度, 可以让输出压力快速达到目标压力, 一般建议取 0~3 范围内的整数值。

3.2 试验验证

本系统采用 SENTO 普通型伺服电缸, 电缸量程为 0~15000 N, 控制 1 个脉冲电缸的输出位移为 0.001 mm。被压工件材料为 13Cr11Ni2W2MoV 不锈钢, 通过压力试验得出电缸每移动 0.001 mm, 压力增加量约为 12~15 N, 且在电缸量程范围内线性变化。因此, 将模型的位移转换系数 ∇ 取值为 $18 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。此外, 将位移补偿系数 ∂ 取值为 1。通过整定确定出 PID 算法中的各参数后, 将该简化本构模型和参数嵌入 PLC 控制系统, 设定目标压力后进行压力试验。图 3 为目标压力分别为 3000、6000、9000、12000 和 14000 N 时, 伺服电缸压力机 3 个工位同步压装时的输出压力-时间曲线。由图 3 可知, 各目标压力下的输出压力-时间曲线均很平稳, 表明该压力控制模型具有很好的控制稳定性。对图 3 中各曲线进行数据统计, 结果如表 1 所示: 5 个目标压力

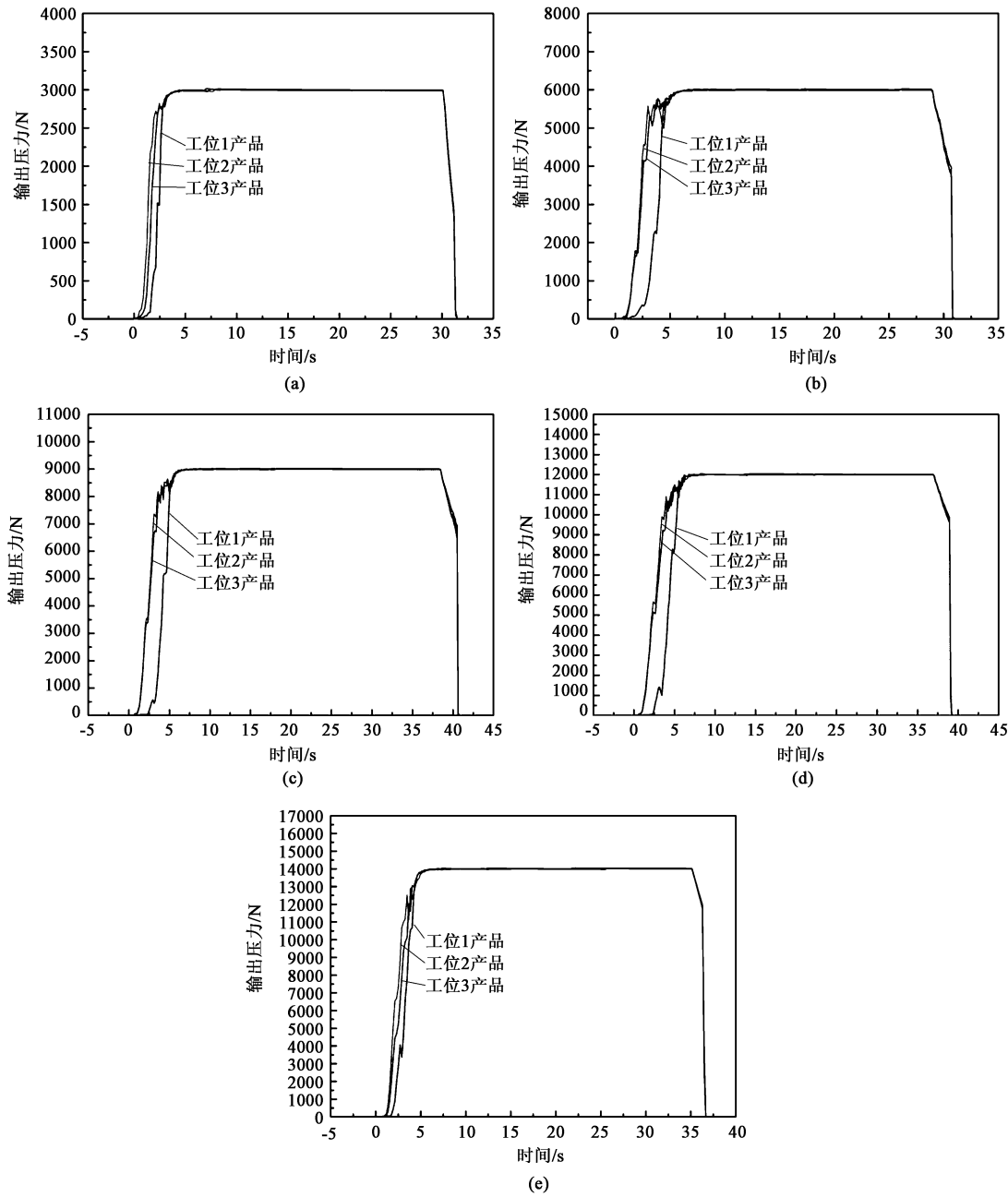


图 3 不同目标压力下的伺服电缸输出压力-时间曲线

(a) 3000 N (b) 6000 N (c) 9000 N (d) 12000 N (e) 14000 N

Fig. 3 Output pressure-time curves of servo electric cylinder under different target pressures

表 1 不同目标压力下的伺服电缸输出压力-时间曲线数据统计

Table 1 Statistical of output pressure-time curve data of servo electric cylinder under different target pressures			
目标压力/N	最小压力误差/N	最大压力误差/N	压力控制精度/%
3000	-18.3	13.0	-0.60~0.43
6000	-20.0	17.0	-0.33~0.28
9000	-21.0	20.6	-0.23~0.23
12000	-28.0	33.3	-0.23~0.28
14000	-23.3	35.6	-0.16~0.25

下的稳定最大和最小压力分别为 (2982 N、3013 N)、(5980 N、6017 N)、(8979 N、9021 N)、(11972 N、12033 N)、(13977 N、14036 N); 压力控制精度分别达到-0.61%~0.43%、-0.33%~0.28%、-0.23%~0.23%、-0.23%~0.28%、-0.16%~0.25%。结果表明, 采用该种压力控制模型不仅能将伺服电缸的满量程压力控制精度均控制在±0.6%以内的较高水平; 同时, 随着目标压力的增大, 压力控制精度变高, 特别适用于大量程压力控制。

综上所述, 相较于传统的通过提高电缸参数指标、降低电缸的阻尼系数来提高系统控制精度的方法, 通过采用本文的基于位移迭代的压力控制模型, 使得传统伺服电缸 (非低阻尼电缸) 也能够满足大量程高精度压力控制的要求。

4 结语

本文设计了一套伺服电缸压力机系统, 提出了基于位移迭代的压力控制模型, 并给出了详细的模型运行过程。压力试验结果表明: 该种压力控制模型可使伺服电缸压力机的满量程压力控制精度高于 $\pm 0.6\%$, 且随着目标压力的增大, 控制精度增高, 有效地解决了传统伺服电缸压力机在扭矩模式下的控制精度受系统阻尼影响, 不适用于大量程的压力控制的问题。

参考文献:

- [1] 陈超, 赵升吨, 崔敏超, 等. 电动缸的研究现状与发展趋势 [J]. 机械传动, 2015, 39 (3): 181-186.
Chen C, Zhao S D, Cui M C, et al. Research status and development trend of electric cylinder [J]. Mechanical Transmission, 2015, 39 (3): 181-186.
- [2] 燕晨耀, 吝继锋, 张清勇. 基于复合控制的电动式伺服力加载系统设计与测试 [J]. 工程与试验, 2021, 61 (1): 61-65.
Yan C Y, Lin J F, Zhang Q Y. Design and test of electric servo force loading system based on compound control [J]. Engineering and Testing, 2021, 61 (1): 61-65.
- [3] 周占怀. 伺服电动缸压装控制系统设计与分析 [J]. 机械工程与自动化, 2021, (2): 169-171, 174.
Zhou Z H. Design and analysis of press mounting control system of servo electric cylinder [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2021, (2): 169-171, 174.
- [4] 曹嘉佳. 基于伺服电缸的定位控制系统设计 [J]. 山东工业技术, 2018, (22): 107.
Cao J J. Design of positioning control system based on servo electric cylinder [J]. Shandong Industrial Technology, 2018, (22): 107.
- [5] 冯伟, 钱昌年, 胡翔宇, 等. 一种提高火箭电动伺服系统动态性能的方法 [J]. 上海航天, 2016, 33 (S1): 112-116.
Feng W, Qian C N, Hu X Y, et al. A method to improve the dynamic performance of rocket electric servo system [J]. Shanghai Aerospace, 2016, 33 (S1): 112-116.
- [6] 徐锋, 张嫣华. 数字控制系统的 PID 算法研究 [J]. 机床电器, 2008, 35 (6): 8-10, 19.
Xu F, Zhang Y H. Research on PID algorithm of digital control system [J]. Machine Tool Electrical Appliances, 2008, 35 (6): 8-10, 19.
- [7] 郭楠, 李智. 专家 PID 算法在伺服系统中的应用与仿真 [J]. 机械工程与自动化, 2009, (6): 61-63.
Guo N, Li Z. Application and simulation of expert PID algorithm in servo system [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2009, (6): 61-63.
- [8] 路纯红, 白鸿柏. 粘弹性材料本构模型的研究 [J]. 高分子材料科学与工程, 2007, (6): 28-31.
Lu C H, Bai H B. Study on constitutive model of viscoelastic materials [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2007, (6): 28-31.
- [9] 彭鸿博, 张宏建. 金属材料本构模型的研究进展 [J]. 机械工程材料, 2012, 36 (3): 5-10, 75.
Peng H B, Zhang H J. Research progress on constitutive models of metallic materials [J]. Mechanical Engineering Materials, 2012, 36 (3): 5-10, 75.
- [10] 董菲, Guenel Germain, Jean Lou Lebrun, 等. 有限元分析法确定 Johnson-Cook 本构方程材料参数 [J]. 上海交通大学学报, 2011, 45 (11): 1657-1660, 1667.
Dong F, Guenel G, Jean L L, et al. Determination of material parameters of Johnson cook constitutive equation by finite element analysis [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45 (11): 1657-1660, 1667.
- [11] 宋飞飞. 钛合金高速变形过程中 Johnson-Cook 模型参数的确定与校验 [J]. 钛工业进展, 2016, 33 (1): 46.
Song F F. Determination and verification of Johnson-Cook model parameters during high-speed deformation of titanium alloys [J]. Titanium Industry Progress, 2016, 33 (1): 46.
- [12] 李新建, 叶贵根, 王志敏, 等. Ti-6Al-4V 合金高速切削仿真 Johnson-Cook 本构参数优化 [J]. 机械强度, 2022, 44 (2): 474-479.
Li X J, Ye G G, Wang Z M, et al. Simulation of high speed cutting of Ti-6Al-4V alloy and optimization of Johnson-Cook constitutive parameters [J]. Mechanical Strength, 2022, 44 (2): 474-479.

