

# 基于虚拟标识的热加工过程单件质量数据追溯技术

曹圣泉<sup>1</sup>, 孙勇<sup>2</sup>

(1. 宝武特种冶金有限公司, 上海 200940; 2. 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 锻件在热加工过程由于温度较高、变形量较大, 难以应用射频识别、表面标识等传统方法进行识别, 从而导致单件锻件标识号与锻件工艺过程数据、质量数据难以准确对应与追溯。针对上述问题, 通过构建生产要素的编码系统, 为单件锻件赋予唯一的虚拟标识, 并结合生产工艺时序流程将生产链中各个环节的质量数据进行梳理与关联, 构建了以虚拟标识为主键的全流程质量数据模型, 形成以虚拟标识为追溯介质的单件质量数据全流程追溯技术。基于该技术构建了单件追溯系统, 实现了单件锻件工艺过程和质量数据的实时跟踪和分析决策, 最后, 探讨了这一创新方法对降低人工误差、提高生产透明度、以及对锻造行业精益生产的推动作用。

**关键词:** 锻件; 虚拟标识; 热加工; 质量数据追溯; 全流程管理; 精益生产

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.08.005

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 08-0029-09

## Single-piece quality data traceability technology on hot working process based on virtual identification

Cao Shengquan<sup>1</sup>, Sun Yong<sup>2</sup>

(1. Baowu Special Metallurgical Co., Ltd., Shanghai 200940, China; 2. China Academy of Machinery Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract:** Due to the higher temperature and larger deformation during the hot working process of forgings, it is difficult to use the traditional methods such as radio frequency identification (RFID) and surface identification for identification, resulting in inaccurate correspondence and traceability of the identification numbers of individual forgings with the process and quality data of forgings. Therefore, for the above problems, the unique virtual identifiers to individual forgings was assigned by constructing a coding system for production factors, and combining with the time sequence flow of the production process, the quality data of each link in the production chain were sorted and correlated. Then, a whole-process quality data model with the virtual identification as the primary key was constructed, forming the whole-process traceability technology of individual quality data with virtual identification as the traceability medium. Based on this technology, the individual traceability system was constructed, realizing real-time tracking and analyzing decision-making of the process and quality data for the individual forgings. Finally, the promotion effect was explored for reducing manual errors, improving production transparency and promoting lean production in the forging industry.

**Key words:** forgings; virtual identification; hot working; quality data traceability; whole process management; lean production

航空航天领域中, 大部分构件具有外形复杂、精密度高、结构功能一体化等显著特点<sup>[1]</sup>, 需要应对的设计和制造挑战往往超越常规, 每一个单独的零件, 无论大小, 均为精密工程的结晶, 承载着严格的质量监控标准和安全要求<sup>[2]</sup>。然而, 在当前的航空航天锻造领域, 质量管理方面仍存在诸多问题, 如控制手段相对匮乏, 难以有效监控和保证锻造过程的稳定性和一致性, 只能对存在的问题进行事后分析; 无法完成结构化质量信息管理, 无法自动完

成关键信息数据的筹划分析, 数据利用率较低, 数据共享程度不足; 信息孤岛现象普遍, 各业务系统之间的信息交互和协作不够顺畅, 无法便捷地完成历史质量问题建档, 无法为持续加强企业质量管理服务。更为严重的是, 锻件质量追溯能力不足已成为制约航空航天锻造领域发展的瓶颈之一<sup>[3-6]</sup>。

因此, 通过实施基于虚拟标识的单件质量数据全流程追溯技术, 赋予每一件锻件独特且唯一的身份编码, 帮助生产线各业务系统打通数据交互通道, 实现对产品从原材料到最终成品的全链条质量监控, 确保每个零部件的制造历史及检验结果得以详尽记录, 从而达到提高产品质量的一致性、稳定性及可

收稿日期: 2024-06-14; 修订日期: 2024-08-12

作者简介: 曹圣泉 (1975-), 男, 博士, 高级工程师

E-mail: caoshengquan@baosteel.com

追溯性的目的,推动航空航天领域的锻造企业能够实现对生产流程的精细化管理和持续优化。不仅增强了质量保证,满足了严格的行业标准和法规要求,更提升了产品的安全性。在问题发生时,系统能够迅速定位并召回问题部件,有效降低潜在风险。此外,追溯系统还提升了生产透明度,优化了供应链管理,有助于企业提升效率、降低成本,建立与客户的信任。

## 1 单件质量数据追溯流程

### 1.1 备料过程与虚拟编码系统

在航空航天领域的锻造车间生产过程中,备料环节作为首要步骤,涵盖了原材料采购、质量验收

并入库,以及精确下料等关键步骤。在此环节中,为确保生产流程的顺利进行,需对原材料的材质、规格、尺寸等详细信息进行采集,并对所采集的数据进行严格的质量检测<sup>[7]</sup>。此外,还需详细记录原材料的数量、重量以及具体的工艺参数和操作数据。

同时,在此环节中将以单件锻件为粒度生成唯一的虚拟标识。如图 1 所示,该技术能够确保备料过程中各环节数据之间的精确对应,可确保数据采集的时效性和准确性,实现数据的实时同步与更新,为后续的数据处理与分析提供坚实基础。

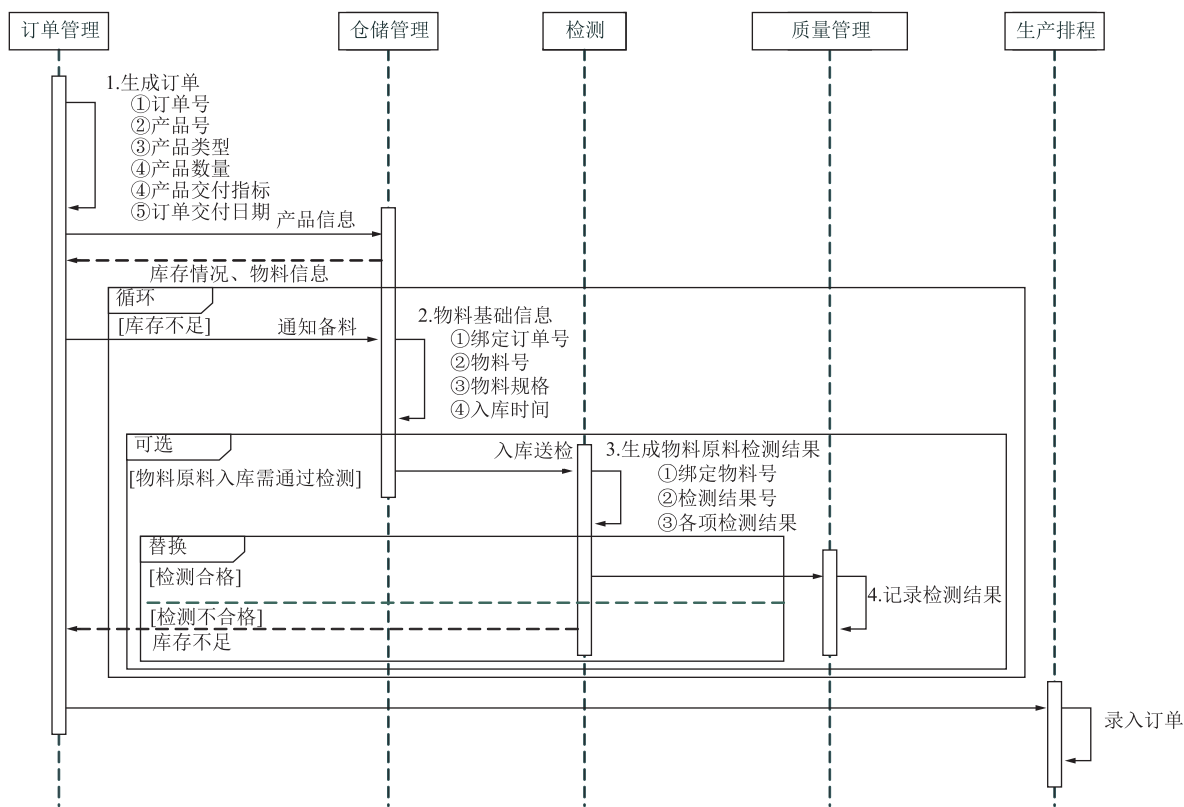


图 1 备料过程数据采集内容及相关业务系统协作示意图

Fig. 1 Schematic diagram of data acquisition content and related business system collaboration in preparation process

### 1.2 锻造成形过程数据采集

在锻造成形的过程中,采用先进的传感器技术和高效的数据采集系统,能够精准地捕捉并记录诸如温度、压力、位移和应变等关键参数。这一做法并非简单的数据收集,而是为了更加深入地分析这些数据,从而挖掘出可能存在的工艺问题以及潜在的改进空间,为后续的工艺优化提供有力的依据<sup>[8]</sup>。

首先,通过先进的传感器技术,能够在锻造过程中实时监测到各项关键参数的变化。这些传感器不仅具备高灵敏度和高精度,而且能够抵御锻造现

场的高温、高压等恶劣环境,确保数据的准确性和可靠性。如图 2 所示,数据采集系统负责将这些实时数据与其他业务系统数据进行快速、高效的收集和處理,为后续的数据分析提供坚实的基础。

在获得大量数据之后,可以利用数据分析技术对这些数据进行深入挖掘和分析。通过对数据的统计、对比和趋势预测,可以发现锻造过程中可能存在的问题,如温度过高导致的材料性能下降、压力过大引起的设备损坏等<sup>[9-10]</sup>。同时,还可以发现一些潜在的改进空间,如优化锻造工艺参数、提高设

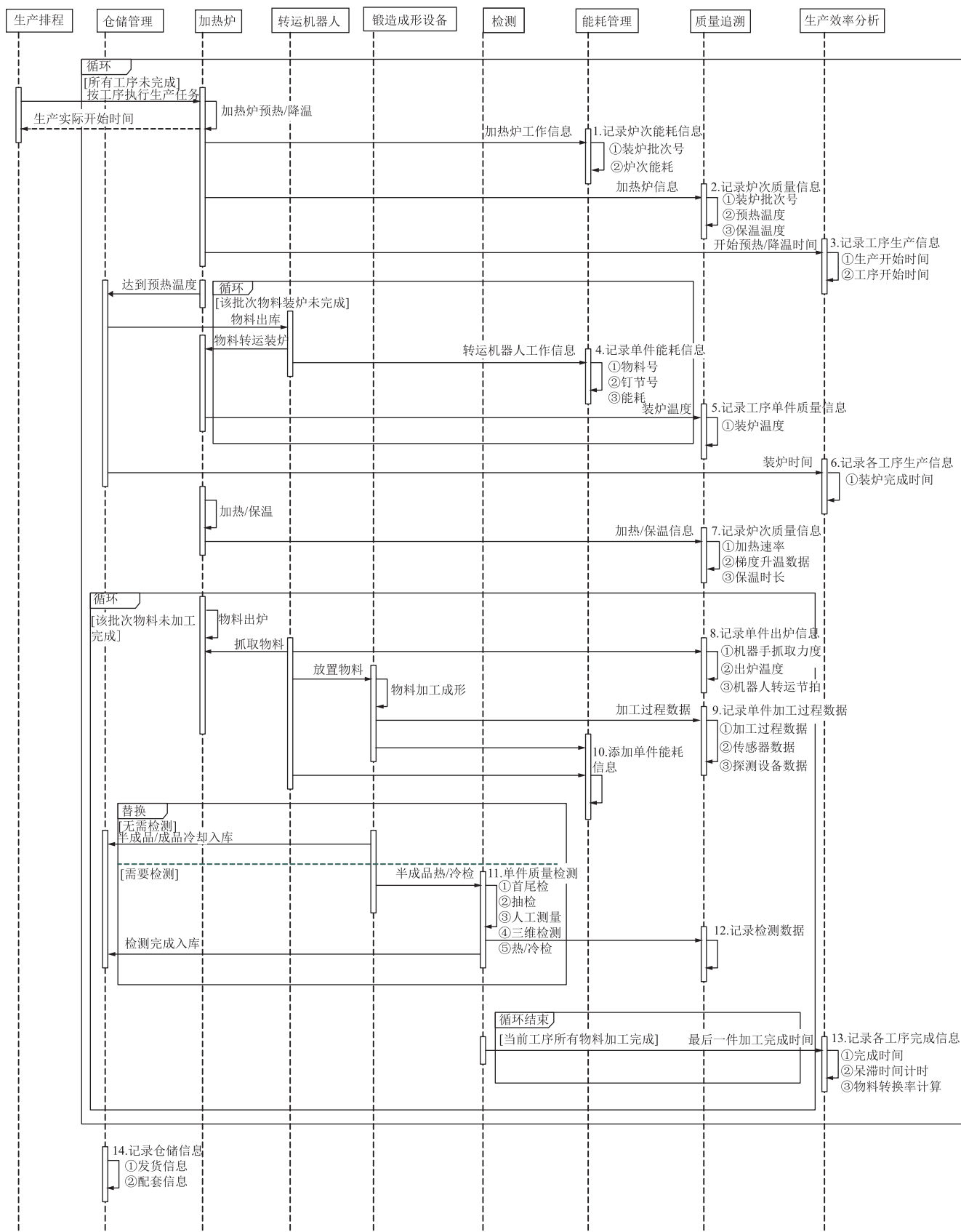


图 2 锻造成形过程数据采集内容及相关业务系统协作流程图

Fig. 2 Flow chart of data collection content and related business system collaboration in forging process

备性能等。

基于这些分析结果,可以进一步建立数学模型,实现锻造过程的精确预测和控制。这些模型不仅能够预测锻造过程中各种参数变化,还能够根据预测结果对工艺参数进行实时调整,从而确保锻造过程的稳定性和可靠性。

### 1.3 热处理过程数据采集

热处理是不可或缺的一环。通过热处理可以提高航空航天器所用的金属材料的强度、韧性及疲劳寿命,确保在极端环境下稳定运行。在航空航天领

域,金属材料热处理技术不仅涉及传统的加热、保温和冷却过程,而且融入了先进的计算机模拟技术和精密控制设备技术<sup>[11-13]</sup>。借助这些技术,工程师能够准确地预测金属在热处理过程中的组织演变和性能变化,从而优化处理参数,实现金属性能的最大化<sup>[14-16]</sup>。同时也是航空航天领域产品质量的重要保障。

因此,采集热处理过程数据是确保航空航天器金属材料性能优越的关键步骤。图3为热处理过程中数据采集的时序流程,通过采集热处理过程中的

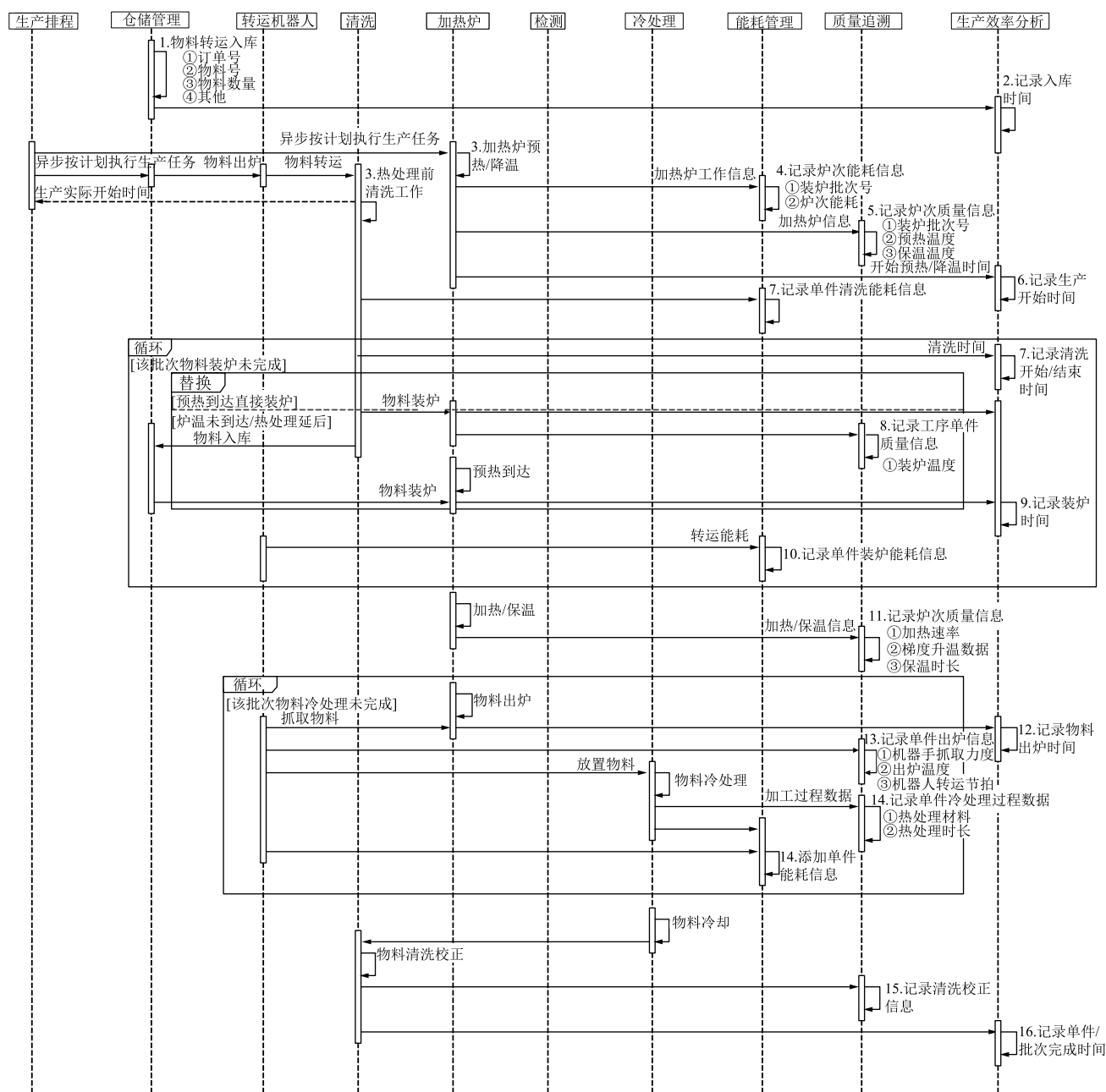


图3 热处理过程数据采集内容及相关业务系统协作流程图

Fig. 3 Flow chart of data collection content and related business system collaboration during heat treatment process

数据,能够深入了解金属在加热、保温和冷却各阶段的组织结构和性能变化,从而更加精确地掌握金属材料性能特点。在采集热处理过程中的数据时,需要关注多个关键参数,如加热速度、保温时间和冷却速率等。这些参数的变化将直接影响金属材料的微观结构和宏观性能。通过精确记录这些参数的变化,可以建立起金属性能与热处理工艺之间的对应关系,为后续的工艺优化和产品质量控制提供有力支持。

#### 1.4 锻造过程工艺参数多尺度平滑预处理方法

锻造过程关键工艺数据的稳定性、准确性和可靠性对于工艺稳定性和产品质量一致性的大数据分析至关重要。然而,由于锻压过程在高压、高温和高振动等恶劣环境下长时间服役时,其数据源存在非线性、不平稳、易被强烈背景噪声干扰等问题。本文通过 S-G (Savitzky-Golay Filtering) 滤波方法,对锻造过程中的成形位移、成形速度和成形力等关键工艺参数进行数据采集的高精度预处理,最大限度复原压力机加工过程的实际数据。S-G 滤波方法是一种基于局部最小二乘法的平滑滤波技术,用于消除时间序列数据中的噪声,这种方法在消除噪声的同时保留了数据的高阶导数信息,适用于锻造关键工艺参数需要保留数据锐度的场景。

S-G 滤波方法的核心思想是在每个数据点的局部邻域内拟合 1 个多项式,然后使用拟合得到的多项式值替换原始数据点。对于 1 个时间序列数据  $y(t)$ ,  $t$  为时间,  $t=0, 1, \dots, (N-1)$ , 其中,  $N$  为正整数,希望在每个数据点附近的邻域内拟合 1 个  $m$  阶多项式。对于每个数据点  $y(t)$ , 考虑其相邻  $(2k+1)$  个数据点,其中  $k$  为正整数,则可以在这个局部邻域内拟合 1 个  $m$  阶多项式,如式 (1) 所示。

$$P(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_m t^m \quad (1)$$

式中:  $P(t)$  为拟合的多项式;  $a_0 \sim a_m$  为拟合多项式系数。

目标是找到多项式系数  $a_0 \sim a_m$ , 使得在局部邻域内的拟合多项式与原始数据的平方误差最小,如式 (2) 所示。

$$E = \sum_{i=-k}^k [y(t+i) - P(t+i)]^2 \quad (2)$$

式中:  $E$  为拟合多项式与原始数据的平方误差;  $i \in [-k, k]$ ,  $k$  为正整数,用于确定窗长。

利用最小二乘法求解该优化问题,得到一个线性方程组,用于计算多项式系数。求解该线性方程组后,可通过拟合得到的多项式  $P(t)$  替换原始数据点  $y(t)$ 。对所有的数据点重复该过程,最终得到平滑后的时间序列数据。为简化计算,可以将 S-G 滤波表示为卷积计算,可预先计算 1 组卷积系数  $C_i (i=-k, \dots, k)$ , 平滑后的数据点如式 (3) 所示。通过该方式, S-G 滤波可以高效地应用于整个时间序列数据。

$$y'(t) = \sum_{i=-k}^k [C_i y(t+i)] \quad (3)$$

式中:  $y'(t)$  为平滑后的数据点。

通过现场高速采集系统对模锻压力机平衡缸气压数据进行采集,采样频率为 1000 Hz, 单个打击行程的采样时长为 8 s 以上,原始数据如图 4a 所示,数据噪声较大,难以对压力机工作过程中平衡缸的加载过程进行准确重构与利用。通过 S-G 滤波方法对原始数据进行处理,如图 4b 所示,其有效地去除了原有信号中的噪声信号,完全保留了确定性数据。

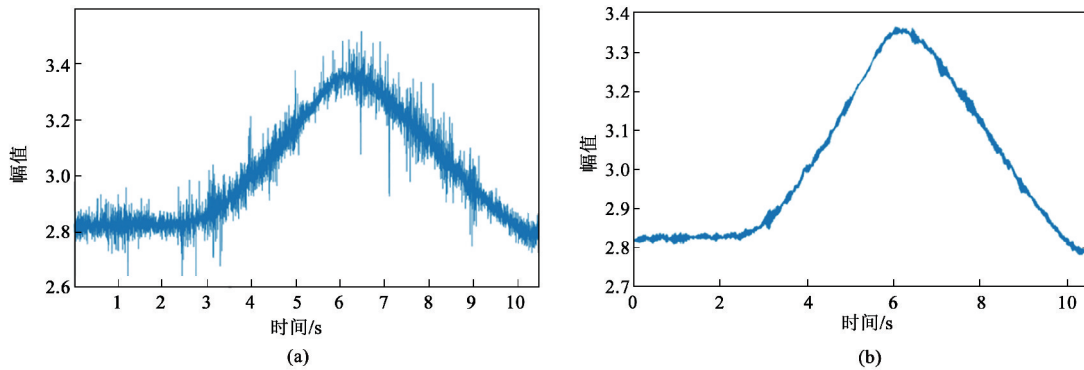


图4 锻造工艺过程数据预处理的效果

(a) 平衡缸气压原始数据 (b) 通过 S-G 滤波处理后的气压数据

Fig. 4 Effect of data pre-processing in forging process

(a) Original air pressure data of balance cylinder (b) Air pressure data processed by S-G filtering



## 2 全流程质量数据模型构建

通过基于虚拟标识的单件质量数据追溯与数据预处理技术,精准地采集了单件锻件与生产线各设备生产过程数据。在此基础上,为了满足不断提升的质量管理需求,进一步扩展数据的应用范围,需要深化数据分析的维度和深度。以单件追溯系统为基础,通过整合来自不同检测设备、传感器、业务系统等多元异构数据,并存储在多种不同的文件类型,如 CSV、XML、数据库表格及图像文件。从而提高锻造企业在工单、物料、设备、质量等关键管理要素的管理颗粒度,如:在锻件加热过程中,本系统通过接收加热炉的开闭信号、机器人位置数据以及机械臂移动数据,精确计算出锻件的装炉位置,据此构建锻件的装炉位置图。该图与制造企业生产过程执行(Manufacturing Execution System, MES)系统相结合,实时更新工单中各锻件的加工状态。同时,系统还收集加热炉的设备状态、加热温度、加热时长及保温时长等信息,为该批次工单中的各锻件生成完整的加热过程曲线。此外,通过 MES、移动设备管理(Mobile Device Management, MDM)、产品生命周期管理(Product Lifecycle Management, PLM)等系统的协同作用,实现了基于锻件编号的反向追溯机制,以此确保同批次产品的质量控制在能力。

因此,构建符合生产线特点和需求的数据模型尤为重要。针对锻造行业的特点,构建数据模型还需重点关注材料牌号、产品批次、生产设备等特征,以及工艺参数如温度、压力、变形速率等对产品质量的影响。在构建数据模型过程中,选择和构造这些特征,并将其转化为模型可理解的形式是关键。同时,考虑到航空航天领域锻造生产线的复杂系统特性,还需高度重视模型的解释性,以确保模型结果的可信度和透明度。如图 5 所示,通过 1 与 1 表示一对一,1 与 1...n 表示一对多关系,阐释了基于虚拟标识的物料信息与各业务系统之间的紧密联系。同时,图中展示了构建数据模型还需从各业务系统中提取工艺信息、质量检测信息、能源信息等有价值的信息。通过整合经过清洗、转换和标准化的锻造成形过程数据、热处理过程数据,构建准确、可靠、可解释、可扩展、可迭代的数据模型,从而实现从原材料入库至产品出库的单件全流程质量数据追溯。

## 3 单件追溯系统

在完成数据建模工作之后,构建了一套高效且

精准的生产追溯体系。该体系以单件锻件虚拟标识作为核心要素,借助精细化的管理策略,确保了每一件产品从原材料采购、生产加工直至最终交付客户手中的全过程均可实现有效追溯,最终形成具有可靠、精确的质量报表,如图 6 所示。

此外,依托全流程质量数据模型,通过在生产现场部署先进的传感器和采集设备,实时汇集生产过程中的各项关键数据,并将其传输至数据中心进行集中处理与分析,锻造企业可充分利用该模型进行统计过程控制(Statistical Process Control, SPC)能力分析,如图 7 所示。

同时,基于该模型,锻造企业可充分利用物联网、大数据分析和人工智能等前沿技术,这些数据涵盖了原材料的批次信息、生产设备的实时运行状态、生产人员的操作记录等多个方面,为后续的产品质量追溯、工艺优化、预测分析等工作提供了坚实可靠的数据支撑。

## 4 结语

提出一种依托虚拟标识技术的单件质量数据全流程追溯体系,旨在有效应对航空航天领域多品种、小批量锻造生产线中单件锻件加工过程中的实时追溯挑战。通过精心构建融入生产要素的虚拟标识体系,为每件锻件赋予独一无二的身份标识,并紧密结合生产工艺时序流程,将生产链中的各个环节有机串联,从而确保单件锻件工艺过程和质量数据的实时跟踪与精准分析决策。该技术不仅有助于显著减少人为错误、提升生产过程的透明度,更能推动实现精益生产目标,并在航空航天领域的质量控制中展现出不可或缺的重要性。

此外,本文还通过详尽的时序图梳理了锻造生产线各环节所需采集的数据、工艺过程以及需交互的业务系统;并详细阐述了基于该技术构建全流程质量数据模型时需注意的关键事项。通过构建全流程质量数据模型,锻造企业将获得强大的数据分析能力,并得以充分利用物联网、大数据分析和人工智能等前沿技术,为提升生产效率和水平奠定坚实基础。

### 参考文献:

- [1] 肖路. 航天构件低压铸造与热成形工艺参数优化 [D]. 成都: 电子科技大学, 2024.  
Xiao L. Optimization of Low Pressure Casting and Hot Forming

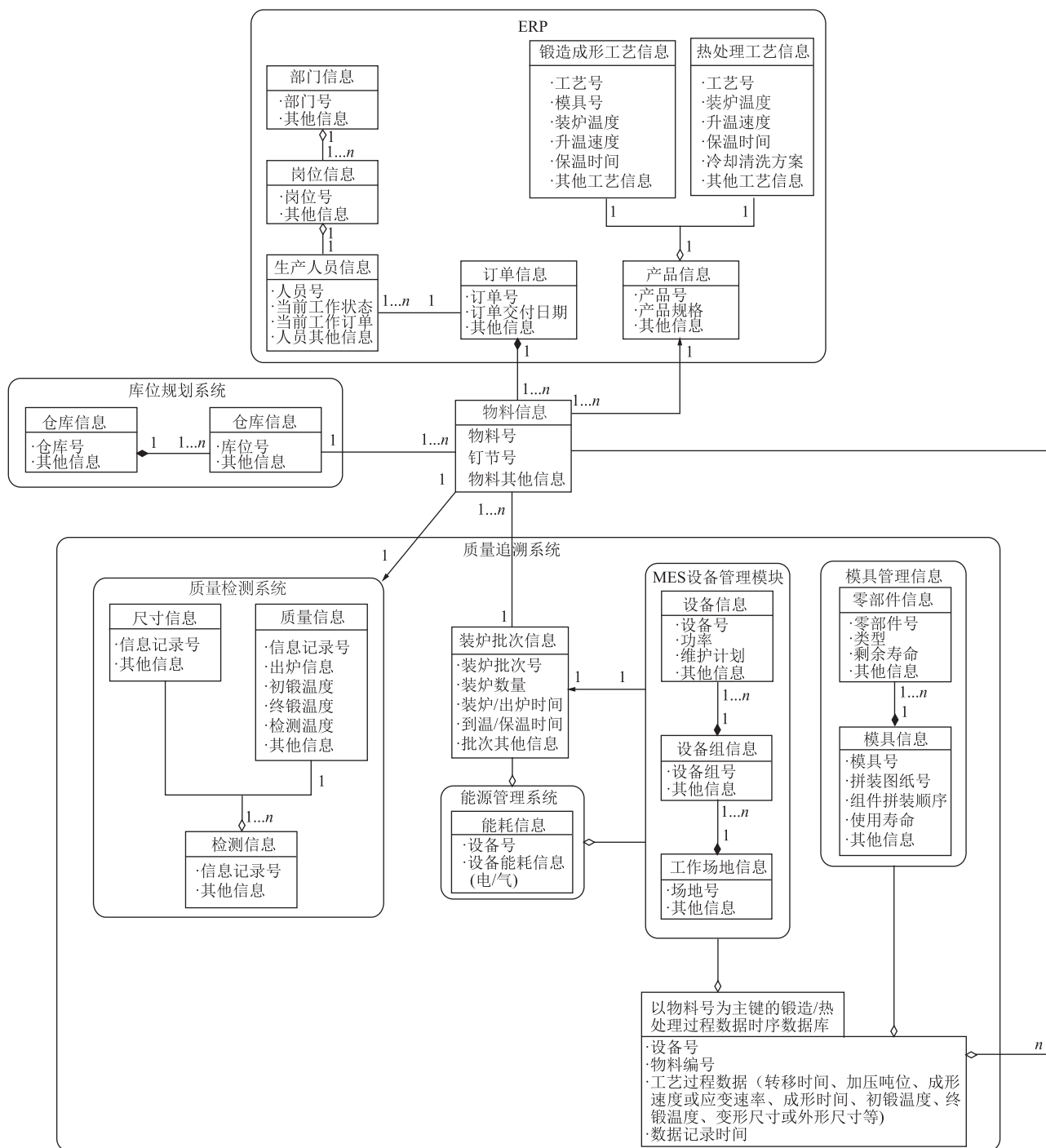


图5 基于虚拟标识的全流程质量数据模型

Fig. 5 Whole-process quality data model based on virtual identification

Process Parameters for Aerospace Components [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.

- [2] 彭宇升. 航空锻造数字化质量管理关键技术研究 [D]. 北京: 中国机械科学研究总院集团有限公司, 2023.

Peng Y S. Research on Key Technologies of Aviation Forging Digital Quality Management [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., 2023.

- [3] 刘君, 邹朝江, 张立红, 等. 航空精密环锻件柔性绿色自动化制造生产线探索 [J]. 锻造与冲压, 2024 (9): 30, 32,

34, 36.

Liu J, Zou C J, Zhang L H, et al. Automatic, flexible and green manufacturing lines for precision ring forging for aviation industry [J]. Forging & Metalforming, 2024 (9): 30, 32, 34, 36.

- [4] 凌云汉. 锻造铝合金车轮单件全流程质量追溯系统关键技术研究 [D]. 北京: 中国机械科学研究总院集团有限公司, 2019.

Ling Y H. Research on the Technology of the Whole Process Quality Traceability System for Single Forging Aluminum Alloy Wheel

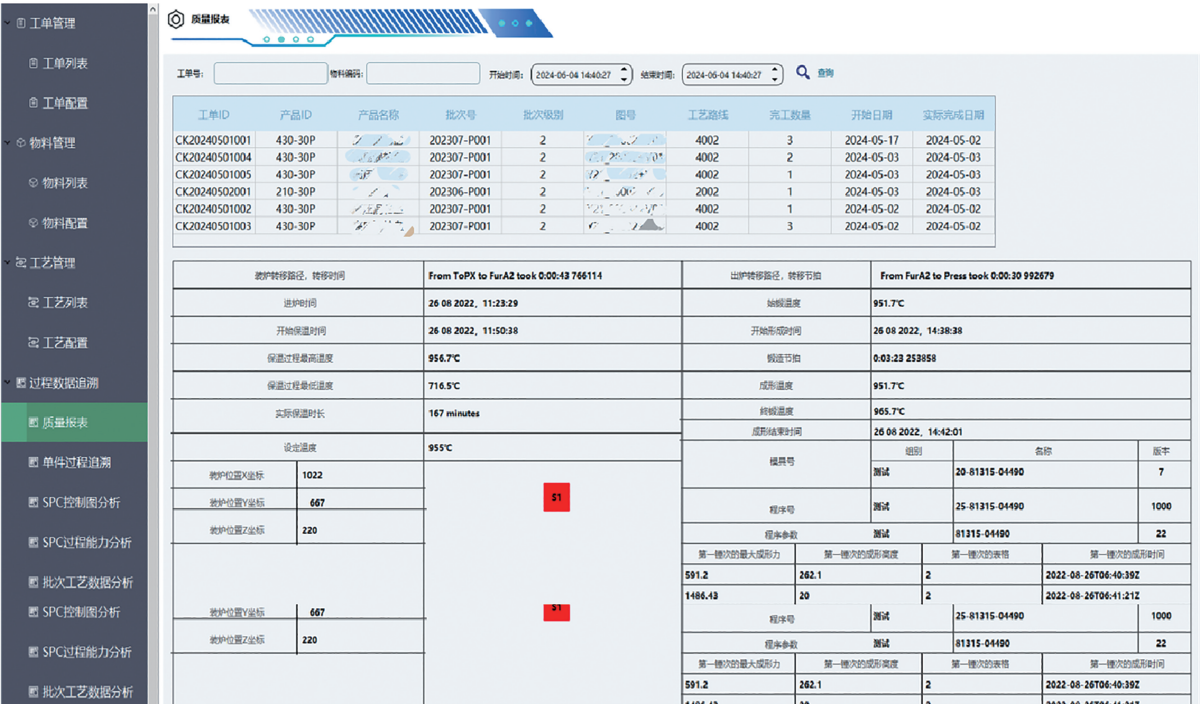


图 6 数字化质量报表界面  
Fig. 6 Interface of digital quality report

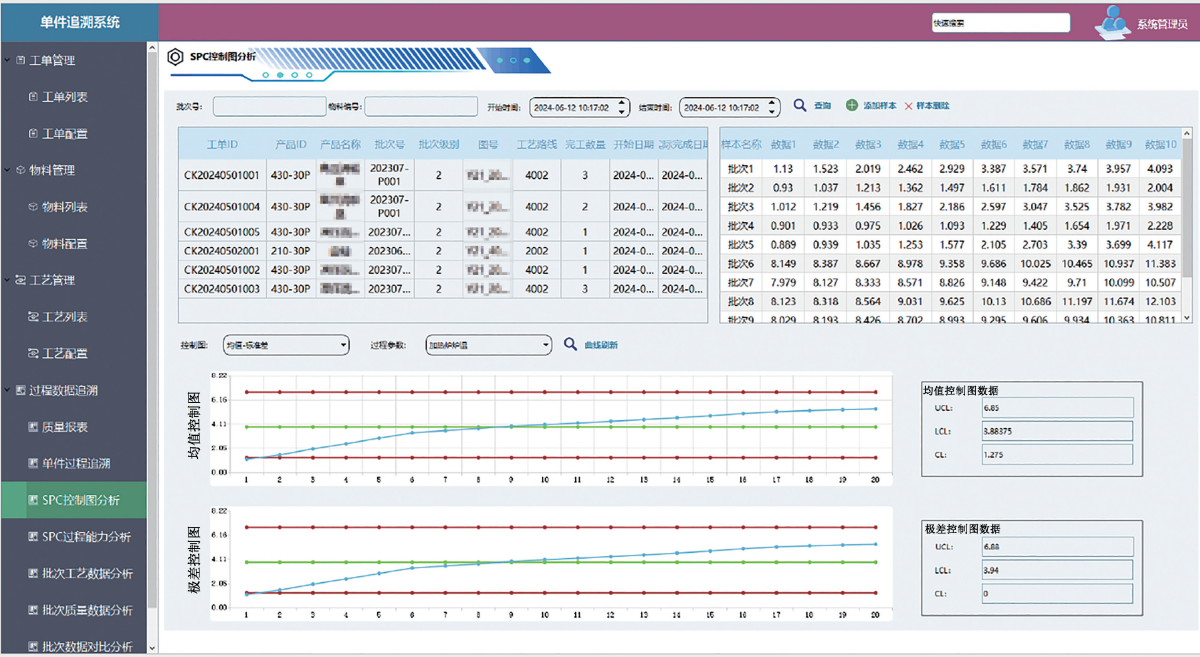


图 7 SPC 能力分析界面  
Fig. 7 Interface of SPC capability analysis

[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., 2019.

[5] 张莹莹. A 航空工业企业数字化提升质量管理的方案研究 [D]. 北京: 商务部国际贸易经济合作研究院, 2024.

Zhang Y Y. Research on Digital Improvement of Quality Management in a Aviation Industry Enterprise [D]. Beijing: Chinese Academy of International Trade and Economic Cooperation, 2024.

[6] 朱江凯. 航空装备质量问题知识分析系统设计与实现 [D]. 大连: 大连理工大学, 2023.

Zhu J K. Design and Implementation of Knowledge Analysis System for Aviation Equipment Quality Problems [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023.



- [7] 王永鹏, 徐伟, 石晓飞, 等. 基于数字化环境的航空机载壳体快速工艺设计方法研究 [J]. 新技术新工艺, 2020 (11): 16-21.  
Wang Y P, Xu W, Shi X F, et al. Research on rapid process design method of aerospace shell based on digital environment [J]. New Technology & New Process, 2020 (11): 16-21.
- [8] 杨兴旺. 某飞机 7055 铝合金轮毂锻造成形工艺模拟优化及性能验证 [D]. 镇江: 江苏大学, 2023.  
Yang X W. Simulation Optimization and Performance Verification of Forging Process of Aircraft Hub of 7055 Aluminum Alloy [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023.
- [9] 樊璐璐, 范鑫, 李安迪, 等. 基于专利大数据分析方法的锻压领域热点技术挖掘 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (7): 7-12.  
Fan L L, Fan X, Li A D, et al. Hotspot technology mining in forging field based on patent big data analysis method [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (7): 7-12.
- [10] 黄文恺, 梁智洪, 王明华, 等. 数字孪生在航空航天结构设计、制造和运维中的应用与展望 [J]. 图学学报, 2024, 45 (2): 241-249.  
Huang W K, Liang Z H, Wang M H, et al. Application and prospect of digital twin in the design, manufacturing, and operation of aerospace structures [J]. Journal of Graphics, 2024, 45 (2): 241-249.
- [11] 孟利军, 杨娇妮, 苟曼曼. 热处理工艺对 TC4 钛合金组织及性能的影响 [J]. 中国金属通报, 2021 (2): 101-102.  
Meng L J, Yang J N, Gou M M. Influence of heat treatment process on the organization and properties of TC4 titanium alloy [J]. China Metal Bulletin, 2021 (2): 101-102.
- [12] 刘洪秀, 于兴福, 魏英华, 等. 航空轴承钢的发展及热处理技术 [J]. 航空制造技术, 2020, 63 (Z1): 94-101.  
Liu H X, Yu X F, Wei Y H, et al. Development of aviation bearing steel and heat treatment technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63 (Z1): 94-101.
- [13] 孙振亚. 热处理与锻造工艺对 H13 热作模具钢组织与性能的影响 [D]. 济南: 山东大学, 2019.  
Sun Z Y. Influence of Heat Treatment and Forging Process on Microstructure and Properties of H13 Hot-working Die Steel [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [14] 李江. 齿轮渗碳淬火热处理的多物理场耦合及性能预测 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.  
Li J. Multi-physical Field Coupling and Performance Prediction of Gear Carburizing and Quenching Heat Treatment China [D]. Xuzhou: University of Mining and Technology, 2024.
- [15] 李孝晨. 基于机器学习的 RAFM 钢与低活化高熵合金优化设计及其力学性能评价 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.  
Li X C. Optimization Design and Mechanical Properties Evaluation of RAFM Steels and Low-activation High Entropy Alloys Based on Machine Learning [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [16] 樊大为. 热处理数字化管控系统数据分析平台的设计与实现 [D]. 沈阳: 中国科学院大学 (中国科学院沈阳计算技术研究所), 2023.  
Fan D W. Design and Implementation of Data Analysis Platform for Digital Control System of Heat Treatment [D]. Shenyang: University of Chinese Academy of Sciences (Shenyang Institute Computing Technology Chinese Academy of Sciences), 2023.

## 《锻压技术》杂志 2024 年广告征订

2024 年广告征集工作火热进行中。本刊主要承接锻造、冲压、旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧设备及锻压辅助设备, 仪器、仪表、模具工业、工业加热设备、热处理设备、加热技术、摩擦与润滑、工艺材料和锻件、冲压件、管件及其特种成形件 (旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧) 等广告; 各科研院所科技成果转让、企业介绍等与本行业相关的广告。您选择《锻压技术》进行广告宣传的理由:

### (1) 平台大, 宣传效果好:

- 全国中文核心期刊, 全国锻压行业会刊, 是锻压领域知名、精品期刊;
- 与中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、中国机械工程学会塑性工程分会、全国锻压标准化技术委员会密切合作;
- 报道内容全, 发行量大。

### (2) 服务全, 广告费用低:

立体式全方位宣传, 杂志、网站和微信等纸媒和数字媒体宣传渠道。

请登录本刊网站, 点击“广告合作”查询具体广告价目。

为了使您的产品能够保持畅销的势头, 不断占领国内外市场, 请您抓紧时间安排贵公司在本刊刊登的广告计划。欢迎广大新老客户踊跃咨询、积极预定。需刊登广告者, 敬请与本刊联系。愿我们真诚的服务能为您创造良好的效益。

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部 广告部 邮编: 100083

联系人: 林玉彤 手机: 18811346037 E-mail: fst\_linyutong@163.com

电话: 010-62920652-804 Http: //www.fstjournal.net



锻压技术微信公众号



锻压技术网站