 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i1.5818

Development of high-temperature and high-pressure torsion equipment and its application in material processing

Chengtao Duan

Shanghai Songjia Automation Technology Co., Ltd., Shanghai, 200949, China

Abstract

This paper introduces the development of a new type of high-temperature and high-pressure torsion equipment and its application in material processing. The equipment integrates a high-temperature heating system, a cooling system, a high-pressure loading system, a precision torsion control system and a measurement and control system, which can realize the grain refinement of materials under high temperature and high pressure conditions. By elaborating on the design principles, structural characteristics and key technological innovations of the equipment, its unique advantages in the field of materials science are demonstrated. The experimental results show that the equipment can effectively simulate the deformation behavior of materials in extreme environments, which provides an important means for the research and development and performance optimization of new materials. This study lays a foundation for the further development of high-temperature and high-pressure torsion technology, and is of great significance for promoting innovation in the field of material processing.

Keywords

high temperature and high pressure; torsion equipment; material processing; extreme conditions; Measurement control

高温高压扭转设备的研制及其在材料加工中的应用

段成涛

上海颂珈自动化科技有限公司，中国·上海 200949

摘　要

本文介绍了一种新型高温高压扭转设备的研制及其在材料加工中的应用。该设备集成了高温加热系统、冷却系统、高压加载系统、精密扭转控制系统和测量控制系统，能够在高温高压条件下实现材料的晶粒细化。通过详细阐述设备的设计原理、结构特点和关键技术创新，展示了其在材料科学领域的独特优势。实验结果表明，该设备能够有效模拟材料在极端环境下的变形行为，为新型材料的研发和性能优化提供了重要手段。本研究为高温高压扭转技术的进一步发展奠定了基础，对推动材料加工领域的创新具有重要意义。

关键词

高温高压；扭转设备；材料加工；极端条件；测量控制

1 引言

随着材料科学的快速发展，对材料在极端条件下的性能和行为研究日益重要。高温高压环境能够显著改变材料的微观结构和力学性能，为开发新型高性能材料提供了独特的机会。然而，传统的材料加工设备往往难以同时实现高温、高压和复杂变形的精确控制，限制了相关研究的深入开展。

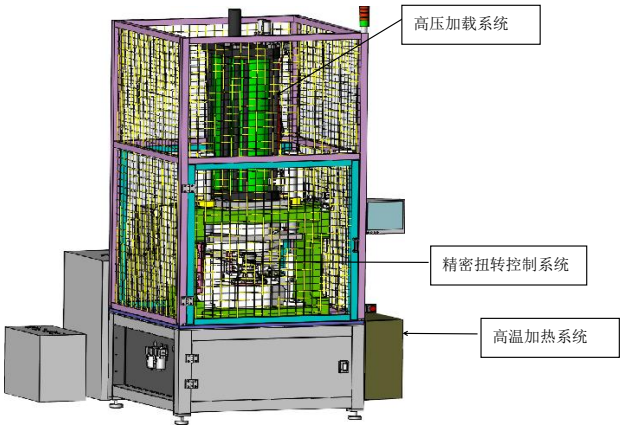
高温高压扭转技术作为一种先进的材料加工方法，能够模拟材料在地球深部或极端工业环境下的变形过程，为研究材料的微观结构演变和性能优化提供了有力工具。近年来，国内外学者在该领域进行了大量探索，但仍面临设备精度不足、控制困难等技术瓶颈。因此，研制一种能够精确控制高温、高压和扭转变形的新型设备具有重要的科学意义和工程价值。

本研究旨在开发一种集成度高、控制精度好的高温高压扭转设备，并探索其在材料加工中的应用潜力。通过创新设计和技术突破，该设备有望为材料科学领域的基础研究和应用开发提供新的实验平台，推动极端条件下材料加工技术的发展 [1]。

2 高温高压扭转设备的设计与研制

本单位所开发的高温高压扭转设备主要由四个核心系统组成：高温加热系统、高压加载系统、精密扭转控制系统和测量控制系统。

【作者简介】段成涛（1986–），男，中国山东德州人，硕士，从事智能装备、电气自动化研究。



图一、高温高压扭转设备整体结构

第一，高温加热系统采用感应加热方式，最高温度可达 500℃，并配备精确的温度控制系统，确保实验过程中温度的稳定性和均匀性。

感应加热是利用电磁感应原理将电能转化为热能的技术。其核心机制如下：当交变电流通过感应线圈时，线圈周围会产生交变磁场。若将金属导体置于该磁场中，导体内部会产生感应电动势，进而形成涡流（漩涡状的感应电流）。由于金属导体本身存在电阻，涡流通过电阻时会产生焦耳热，使导体温度升高，从而实现加热。

感应加热的关键要素包括：

（1）交变电流频率。频率高低直接影响加热深度和效率：高频（10kHz~10MHz）：涡流集中于导体表面（集肤效应显著），适合表面淬火、小件快速加热。中频（1kHz~10kHz）：加热深度适中，常用于金属熔炼、较大零件的透热。工频（50/60Hz）：涡流渗透深度大，适用于大尺寸工件的整体加热（如钢板退火）。由于本设备加热零件属于比较小的零件，适合高频加热，因此本设备选用 25KW 分体式高频加热机。

（2）感应线圈设计：线圈形状需匹配工件轮廓（如圆柱形、平面形），以优化磁场分布和能量耦合效率。本设备采用圆柱形线圈设计。

（3）金属材料特性：电导率越高（如铜、铝），涡流损耗越大，加热效率越高；磁导率高的材料（如铁磁体）还会因磁滞效应额外产热。

感应加热凭借其高效、精准的特性，已成为现代工业不可或缺的关键技术，尤其在需要快速加热、局部加热或高洁净度的场景中优势显著。随着电力电子技术的发展，其应用范围还在持续扩展。

第二，高压加载系统采用气液增压缸驱动，最大压力可达 5GPa，能够满足大多数材料在极端条件下的实验需求。

气液增压缸是将气压缸与增压油缸作一体式结合，并以纯气压为动力，利用增压器的大小活塞面积的比例差，将气压的低压提高数十倍，供油压缸使用，使液压缸达到高出力动作。气液增压缸是利用气源压力（P1）推动气缸里的大面积活塞（A1），推力 (F) 从大面积活塞传递到小面积的增压杆，推力 (F) 大小保持不变。再由小面积的增压杆 (A2) 推动另一端的液压油，液压油受力后推动油缸里的小面积活塞（A3）带到前轴冲压工件，从而达到输入低气压力产生高压出力的增压目的。气缸压力 F= 气缸活塞的截面积 X 单位截面积的压力，跟压缩没有关系，只和和压缩空气的压力有关（单位截面积的压力）一般应用以下公式计算：理论出力：（1）A=3.14*D A: 气压缸截面积 D：气缸内径（2）F=A*P F: 理论力 kg P：操作压力 kg/cm（3）N=F*9.81N/kg N: 牛顿

第三，精密扭转控制系统是设备的核心创新部分，采用伺服电机驱动，配合高精度编码器，可实现 0.01° 的扭转角度控制精度。同时，系统还集成了扭矩传感器，能够实时监测和记录实验过程中的扭矩变化。设备整体采用模块化设计，便于维护和升级，并配备了多重安全保护装置，确保实验过程的安全可靠。

本方案拟选用法兰为 130mm 的伺服电机，保持扭矩为 40N.M。输出转速为 600R/Min，减速机选用减速比为 80，有效输出功率因数为 0.8。则额定扭矩为：T=40X80X0.8=2560N.M 额定转速为：600/80=7.5R/MIN，可以有效控制转速在 0-7.5R/Min 内转动。

第四，测量控制系统可实现设备温度、压力、扭矩等的精准控制。通过集成的高精度温度传感器及 PID 温度控制，可实现 1° C 的精准温度控制。

PID（比例 - 积分 - 微分）控制是自动控制领域最经典的算法之一，尤其适用于温度控制场景。其核心通过实时计算偏差值（设定温度与实际温度的差值），输出复合控制量（电压、电流等）调节加热 / 冷却设备，使系统达到动态平衡。

数学表达式为：

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

u(t)：控制输出量（如加热功率）

e(t)：温度偏差（设定值 - 实际值）

Kp：比例系数，快速响应偏差

Ki：积分系数，消除静态误差

Kd：微分系数，抑制超调，提高稳定性

温度控制的特殊性 :(1) 滞后性：热传导需要时间（如加热升温慢）, 易导致控制延迟。（2）非线性：不同温度区间热损耗不同（如高温时辐射散热加剧）。(3) 惯性大：大质量物体（如金属工件）温度变化缓慢，需避免超调。

PID 温度控制系统的结构组成 :(1) 本设备选用 PT1000 温度传感器，用于检测实际温度，输出电信号。（2）信号调理模块：放大、滤波传感器信号，转为控制器可识别的数字量 4-20mA 电流信号。（3）控制器：本设备选用 PLC 做为温度控制器，内置 PID 算法，根据偏差计算控制量。（4）人机界面（HMI）：设定温度目标值，实时显示温度曲线、

PID 参数。（5）执行机构：加热设备选用高频加热设备。冷却设备选用水冷机。

图二、测量控制系统

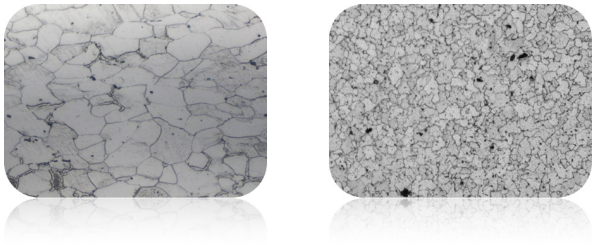
在设备研制过程中，团队攻克了多项技术难题。首先，通过优化加热线圈的设计和布局，解决了高温下温度分布不均匀的问题。其次，采用特种合金材料，确保在温度 350℃ 压力 5GPa 情况下，合金材料不发生变形、损伤等。最后，开发了先进的控制算法，实现了高温、高压和扭转变形的精确协同控制。这些技术创新显著提升了设备的整体性能，为后续的材料加工实验奠定了坚实基础 [2]。

图三、高温高压扭转设备局部

3 高温高压扭转设备在材料加工中的应用

为验证设备的性能并探索其在材料加工中的应用潜力，本研究选择了几种典型金属材料进行实验。实验方案包括不同温度（0℃ -300℃）、压力（1-5GPa）和扭转角度（90° -3600° ）的组合，以全面评估设备在极端条件下的工作能力和材料变形行为。

实验结果表明，该设备能够稳定实现预设的高温高压条件，并精确控制扭转变形过程。通过对实验数据的分析，发现材料在高温高压扭转过程中表现出独特的微观结构演变规律。例如，在 200℃和 3GPa 条件下，经过 270° 扭转的钛合金样品中观察到了显著的晶粒细化和织构转变，这与其力学性能的改善密切相关。



图四、试验前后材料晶粒变化

进一步的分析揭示了高温高压扭转对材料性能的显著影响。与常规加工方法相比，经过高温高压扭转处理的材料在强度、韧性和疲劳性能等方面均有明显提升。这种性能改善主要归因于极端条件下形成的特殊微观结构，如超细晶、纳米孪晶和位错网络等。这些发现为开发新型高性能材料提供了重要指导，也展示了高温高压扭转技术在材料加工中的巨大潜力。

4 结语

本研究成功研制了一种新型高温高压扭转设备，该设备集成了先进的高温加热、高压加载、精密扭转控制系统和测量控制系统，能够精确模拟材料在极端条件下的变形过程。通过一系列创新设计和技术突破，设备在温度、压力和扭转控制精度等方面均达到了国际先进水平。实验结果表明，该设备能够有效揭示材料在高温高压扭转过程中的微观结构演变规律，为开发新型高性能材料提供了重要手段 [3]。

高温高压扭转技术在材料科学领域具有广阔的应用前景。未来，该设备可用于研究更多种类材料在极端条件下的变形行为，探索新的材料加工工艺，并为相关理论模型的建立和验证提供实验支持。同时，设备的模块化设计也为进一步的功能扩展和性能提升留下了空间。随着研究的深入，高温高压扭转技术有望在航空航天、能源装备等高端制造领域发挥更大作用，推动材料加工技术的创新发展。

参考文献

[1] 陈琛,花安平,于俊杰,等.高压扭转过程中不混溶Al/Zn体系的机械合金化和相变[J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(12):3612-3624.

[2] Dong Y , Wu S , He Z ,et al.Nano-scale Reinforcements and Properties of Al-Si-Cu Alloy Processed by High-Pressure Torsion[J].Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 2024, 39(5):1253-1259.

[3] 钱陈豪,贺子阳,梁辰,等.高压扭转工艺制备的W-25Re合金的微观组织和硬度(英文)[J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, v.27(12):100-107.