

# 人工神经网络在材料加工中的应用及展望

杨西荣<sup>1,2</sup>, 权强强<sup>1</sup>, 田倩炆<sup>1</sup>, 刘晓燕<sup>1</sup>, 罗 雷<sup>1,2</sup>, 王敬忠<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055)

(2. 陕西省纳米材料与技术重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 随着计算机技术的发展, “材料基因组计划”的推行促进了数据驱动技术在材料加工中的应用发展。人工神经网络因具有自学习、信息存储、联想记忆及高速寻求最优解等能力而广泛应用于材料设计、材料性能预测、工艺条件最优参数确定等材料科学技术研究方面, 改变了传统上采用“试错法”进行的实验研究。综述了人工神经网络的基本理论及发展历程, 对其在国内外在材料性能预测、材料设计优化和相变规律预测 3 个方面的应用发展进行了概括性总结, 探究了人工神经网络在材料加工方面存在的不足, 并对其未来的发展进行了展望。

**关键词:** 人工神经网络; 材料加工; 性能预测; 材料设计; 相变规律

**中图分类号:** TP183 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2023)11-0896-06

**引用格式:** 杨西荣, 权强强, 田倩炆, 等. 人工神经网络在材料加工中的应用及展望[J]. 中国材料进展, 2023, 42(11): 896-901.

YANG X R, QUAN Q Q, TIAN Q W, *et al.* Application and Prospect of Artificial Neural Network in Material Processing[J]. Materials China, 2023, 42(11): 896-901.

## Application and Prospect of Artificial Neural Network in Material Processing

YANG Xirong<sup>1,2</sup>, QUAN Qiangqiang<sup>1</sup>, TIAN Qianwen<sup>1</sup>, LIU Xiaoyan<sup>1</sup>,  
LUO Lei<sup>1,2</sup>, WANG Jingzhong<sup>1</sup>

(1. College of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

(2. Shaanxi Key Laboratory of Nanomaterial and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In recent years, with the development of computer technology, the implementation of “Material Genome Initiative(MGI)” has promoted the application and development of data-driven technology in material processing. Artificial neural networks are widely used in material science and technology research such as material design, material performance prediction, and optimal parameter determination of process conditions because of their capabilities of self-learning, information storage, associative memory, and high-speed search for optimal solutions. It is difficult to use the “trial and error method” to carry out experimental research. In this paper, the basic theory and development history of artificial neural network at home and abroad are reviewed. The application development of material performance prediction, material design optimization and phase change rule prediction are summarized. The shortcomings of artificial neural network in material processing are explored and the future development is prospected.

**Key words:** artificial neural network; material processing; performance prediction; material design; phase transition rule

## 1 前 言

长期以来, 材料的发展作为国防安全建设和国民经济建设的重要推动力, 与人民生活密不可分。目前, 新材料的发展水平成为衡量一个国家科技竞争力的重要标准<sup>[1]</sup>。传统意义上的新材料研发需要经过大量的实验, 采用“试错法”尝试不同的可能性因素, 直至实验结果不断接近目标。该过程需要研究者利用大量的原材料,

收稿日期: 2021-04-01 修回日期: 2022-03-09

基金项目: 陕西省医用金属材料重点实验室开放基金项目(SX-BMM-201903); 西安建筑科技大学自然科学基金专项基金项目(ZR19043)

第一作者: 杨西荣, 男, 1971 年生, 教授, 博士生导师,

Email: lazy\_yxr@qq.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202104002

花费大量的时间投入到科学研究中,而且所得结果可能存在一定偶然性,使其可靠性降低<sup>[2-4]</sup>。计算机技术的持续性更新以及“材料基因组计划”的科学性提出,改变了传统意义上采用“试错法”的研究模式,将材料的理性设计、实验与大数据技术全面深度融合,促使新材料的研发取得了快速发展<sup>[5]</sup>。2019 年《材料研究前沿—十年调查》<sup>[6]</sup>的发布中指出:“数据驱动方法有望大幅提高材料研究的效率”。数据驱动技术成为了继实验、理论和计算之后的第四代科学范畴<sup>[7]</sup>,大数据集的构成主要来源于高通量计算结果<sup>[8]</sup>、高通量实验结果<sup>[9]</sup>和大量科学性文献研究成果,将目标数据通过筛选导入计算机软件中进行材料研究,缩短了实验数据收集的时间,提高了工作效率<sup>[10]</sup>。在 2011 年 6 月,时任美国总统 Barack Obama 启动先进制造业伙伴关系(Advanced Manufacturing Partnership)计划,材料基因组计划(Materials Genome Initiative, MGI)工程作为其重要组成部分,促进了大数据技术在材料应用领域的快速发展,加快了新材料从理论研究到投产使用的速度<sup>[11]</sup>。大数据时代下的数据驱动技术,机器学习促使材料科学研究得到了关键性发展<sup>[12]</sup>。

人工神经网络(artificial neural network, ANN)因具有自组织、自学习、联想记忆及高速寻求最优解的能力,能够处理非线性自适应信息问题,是目前科学研究中应用最广泛、最成熟的机器学习算法<sup>[13]</sup>。目前,人工神经网络已在建筑学<sup>[14, 15]</sup>、管理学<sup>[16]</sup>和医学<sup>[17, 18]</sup>等方面取得了广泛的应用,在材料科学方面也成功应用于材料设计<sup>[19]</sup>、材料性能预测<sup>[20]</sup>、模式识别<sup>[21]</sup>等多个方面,加快了材料研究领域的发展速度。

多年来,人工神经网络技术日益成熟完善,已在材料加工方面得到了广泛的应用。本文首先对人工神经网络的基本理论和发展历史过程作简要综述,重点介绍人工神经网络在材料加工中的应用,最后对人工神经网络在材料加工应用中的不足和未来发展趋势进行展望。

## 2 人工神经网络的简介和发展简史

### 2.1 人工神经网络的简介

人工神经网络是模拟生物神经系统的特征,采用不同种类的连接方式组成一个完整的网络模型,该模型与生物大脑的工作模式相似,能够通过输入信息进行归类式处理得到期望的输出结果。同时它具有生物神经建立非线性模型、自我学习、自适应、容错性和高速寻找最优解等特点,广泛应用于各个学科的研究中<sup>[22]</sup>。最简单的生物神经元模型和相对应的人工神经元模型分别如图 1 和图 2 所示。人工神经网络的结构主要由输入层、隐含层和输出层 3 部分构成(图 3)。输入层主要负责接

收外部输入的数据和信息,隐含层连接输入层接受并处理输入层的信号,输出层连接隐含层将计算结果输出。

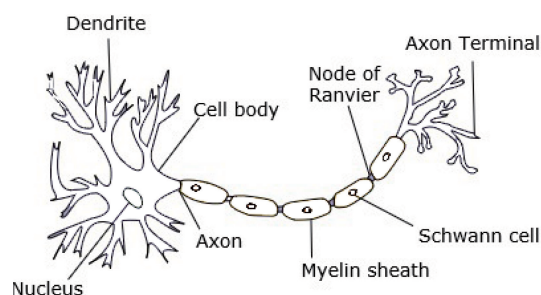


图 1 生物神经元模型

Fig. 1 Model of nerve cell

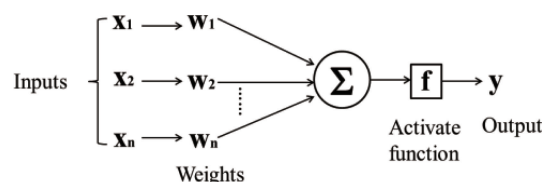


图 2 人工神经元模型<sup>[2]</sup>

Fig. 2 Model of artificial nerve cell<sup>[2]</sup>

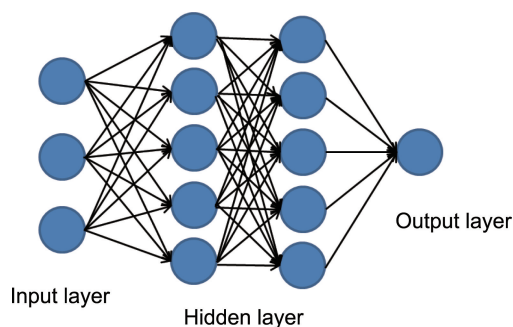


图 3 人工神经网络的结构<sup>[13]</sup>

Fig. 3 The structure of artificial neural network<sup>[13]</sup>

### 2.2 人工神经网络的发展简史

人工神经网络的研究最早开始于 19 世纪末期,其发展过程经历了多个不同的阶段,如表 1 所示。

## 3 人工神经网络在材料加工方面的应用

材料科学是研究材料成分、工艺、组织和使用性能四要素之间相互关系的学科,为材料的使用生产和研究发展提供理论基础<sup>[31]</sup>。材料加工技术是多学科相互交融的综合性学科,目前的材料研究依然依赖大量实验和实践经验<sup>[32]</sup>。这种试错的研究方式周期长、成本高,大量的数据得不到很好的利用。人工神经网络可以充分利用已有的实验数据,甚至是实际工况数据,在材料加工技术方面具有独特的优势。

表 1 人工神经网络的发展阶段<sup>[23-30]</sup>  
Table 1 The development stage of artificial neural network<sup>[23-30]</sup>

| 时间     | 代表性人物  | 代表性事件   | 事件内容   | 意义   |
|--------|--|---|--|--|
| 1890 年 | 美国著名心理学家 William James   | 第一部关于人脑结构与功能的详细研究《心理学原理》( Principle of Psychology ) 著作的发表       | 研究了人脑学习的结构方式,联想记忆功能,并在其基本原理进行了开创性的实验研究   | 标志着人工神经网络研究的开始                                     |
| 1969 年 | 美国数学家和人工智能学者 Marvin Minsky 和 Seymour Papert                                | 发表了《感知机》( Perceptrons ) 一书,主要对神经网络进行了高度评价                       | 从数学的角度分析了网络系统的功能和局限,指出了网络存在的问题,即只局限于求解简单的线性问题,并且指出非线性问题的网络应具有隐含层               | 引起当时美国及前苏联的一些研究机构纷纷停止对这一项目的资助,标志着神经网络启蒙期的结束,低潮期的到来 |
| 1982 年 | 美国物理学家 J J Hopfield  | 在美国国家科学院刊物上发表了“神经网络和物理系统”( Neural Network and Physical System ) | 提出了 Hopfield 模型理论  | 标志着神经网络长达 13 年的低潮期的结束                              |
| 1986 年 | 美国认知心理学家 D E Rumelhart 和 J L McClelland                                    | 发表了《并行分布式处理》( Parallel Distributed Processing ) 一书              | 提出了神经网络应具备的主要特征,即构成神经元的激活函数和网络学习方法。同时详细介绍了 BP 算法的学习方式,解决了长期以来神经网络缺少通过权值调整算法的难题 | 标志着神经网络的研究开始进入复苏状态。                                |
| 1987 年 | 国际电气工程师和电子工程学会 ( Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE ) | 首届国际神经网络会议召开  | 宣告正式成立了国际神经网络协会 ( International Neural Network Society, INNS )                 | 标志着全世界范围内掀起了神经网络研究的热潮                              |
| 1995 年 | 人工智能学者 Mitra   | 模糊神经网络的提出   | 将人工神经网络与模糊逻辑理论、生物细胞学说及概率论相结合   | 神经网络的研究取得了突破性进展                                    |
| 2006 年 | 加拿大多伦多大学教授、神经网络之父 Geoffrey Hinton  | 深度学习  | 深度学习应用于模式 ( 音频、图像、文本 ) 识别  | 标志着人工神经网络新领域研究的开始                                  |
| 2016 年 | 谷歌 Alpha Go  | Alpha Go 的研发  | Alpha Go Master 以 3:0 战胜了世界排名第一围棋选手柯洁九段  | 标志着人工神经网络的进一步的研究发展                                 |

3.1 材料性能预测

材料的成分、工艺和所处环境等是影响其加工性能的主要因素<sup>[33]</sup>,而使用性能是衡量材料价值的重要指标,是应用于工程实际的衡量标准。基于人工神经网络对材料性能的准确预测是降低材料成本、节约时间的重要途径。目前,国内外有大量的学者对人工神经网络预测材料性能方面进行了研究。Onder 等<sup>[34]</sup>运用反向传播 ( back propagation, BP ) 网络模型对同种材料的 2 种不同形状齿牙的齿轮疲劳寿命进行了预测。运用试错法实验获得实验数据,80% 的数据用于样本数据,确定了理想的传递函数和隐含层数目,采用 20% 的数据进行验证。最终的预测结果与实验结果相吻合。王鑫等<sup>[35]</sup>以应变速率、变形温度和晶粒尺寸为输入参数,峰值流变应力和稳定流变应力为输出结果,构建了三层前馈式 BP 神经网络模型,用于 Ti-6Al-4V 超塑性变形行为的预测。该模型采用的数据集因输出值和输入值存在较大差异,易产生溢出现象,故需对训练数据进行归一化处理,从而提

高预测精度。因此,通过大量的可靠性数据,如实际生产数据或者实验精度严谨的数据进行网络模型的训练,可以提高模型的准确性。Ramachandra 等<sup>[36]</sup>通过大量的模拟数据训练网络,并利用美国汽车工程协会 ( SAE ) 随机疲劳加载试验的实际生产数据验证模型,建立了能准确预测多种材料的疲劳性能、载荷谱形式以及疲劳寿命的人工神经网络模型。Patowari 等<sup>[37]</sup>等建立了电火花加工表面改性的人工神经网络模型,得到了压力、温度、峰值电流和时间对表面层平均厚度的影响规律。人工神经网络模型在预测材料性能方面的应用已有很多研究,但是进行网络训练需要大量的数据,而这些数据的可靠性是提高预测结果准确性的关键,建立标准归类化的数据库是现今材料领域的需求。

3.2 材料工艺设计的优化

材料工艺设计主要分为成型工艺设计、加工工艺设计、表面处理工艺设计和连接工艺设计<sup>[27]</sup>,合理的工艺设计是保证产品质量的关键。工艺学基础理论、应用技

术基础、工程控制技术以及相应的设计经验是材料工艺设计者必须具备的理论知识, 难度较大。但是, 近几年来, 国内外研究者利用人工神经网络模型, 很大程度地便捷了工艺设计优化的过程。魏艳红等<sup>[38]</sup>总结了国内诸多高校和企业利用人工神经网络预测和优化焊接工艺设计的实例, 发现国内目前已在焊接工艺方面建立了相对完整的数据库及专家系统。将人工神经网络和专家系统相结合, 通过以大量数据不断调整模型隐含层函数的类型和个数, 可有效减小输出误差, 提高设计精度。张吉会<sup>[39]</sup>以熔池焊道宽度和高度作为输出的期望值, 构建了电弧增材制造焊接工艺成型尺寸的 BP 神经网络模型, 参照模型选用传统的回归模型, 将人工神经网络的预测值与二次回归值进行对比。结果表明, 人工神经网络模型预测值的平均相对误差为 0.003%, 二次回归平均相对误差为 1.326%。Chaki 等<sup>[40]</sup>将粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 计算算法应用于人工神经网络模型, 建立了 ANN-PSO 模型。该模型在预测钇铝石榴石晶体 (YAG) 激光切割脉冲钹含量的绝对误差为 1.74%, 最优输出值与实验值的偏差小于 2%。刘晓燕等<sup>[41]</sup>使用 BP 人工神经网络对超细晶纯钛热变形行为进行建模, 结果表明经过训练后的人工神经网络模型预测热压缩过程流变应力的平均相对误差为 2.1%, 比 Arrhenius 本构方程的预测更加准确。人工神经网络模型训练函数采用可靠的数据库和经过多模型拟合的网络模型, 对提高实验精度至关重要。

尽管国内外许多研究者已将人工神经网络应用于材料工艺设计方面, 达到了工艺优化的目的。但针对某一确定问题, 模型的训练及隐含层类型和个数的确定仍然缺乏高质量的实验数据用以训练, 导致预测值与实验值存在严重偏差。同时, 在大数据时代背景下, 海量数据的挖掘中, 不仅可能带来大量的错误信息, 而且这些数据之间还可能具有复杂的关联性。分布式数据库的建立, 可以将海量数据有效进行归类, 一定程度上可以针对某一确定问题进行数据的筛选, 提高工作效率和结果的准确性。

### 3.3 相变规律的预测

相是指合金中具有同一聚集状态、同一晶体结构和性质并以界面相互隔开的均匀组成部分。生活中绝大多数材料都是多相结构, 相与相之间存在着界面分隔, 此界面称为相界。所谓相变是指一种相转变成另一种相的过程<sup>[42]</sup>。随着科学技术和材料研究的发展, 人们发现金属、合金以及无机非金属都能发生相变, 材料性能的提高常常得益于相变的发生。然而, 特定成分材料相变理论的实验研究费时费力, 人工神经网络的应用很大程度

上改善了这一困境。Chakraborty 等<sup>[43]</sup>在预测钢连续冷却转变图时, 运用梯度下降反向传播算法 (ANN-BP) 进行常规模型训练, 但模型准确度较低。为了提高预测结果准确性, 以预测误差最小化和多目标化为期望输出, 采用遗传算法 (genetic algorithm, GA) 修正该模型, 形成了至少在一个目标上预测结果准确度较高的模型。将单目标预测值与多目标预测值进行比较, 结果表明, 单一目标优化模型虽然降低了问题的复杂性, 但准确性较低, 而多目标优化模型虽然处理的问题比较复杂, 但预测效果更加准确。Reddy 等<sup>[44]</sup>以奥氏体钢中成分 C, Mn, Ni, Cr, Mo 含量的变化数据进行 BP 网络模型的训练学习, 成功实现了 TTT (time-temperature-transformation) 曲线的预测。他们将奥氏体化的转变温度作为期望输出结果, 建立了多层反向传播网络模型 (multi-layered back propagation network, MBPN), 得到成分不同而致使奥氏体化转变温度不同的 TTT 变化规律图。Vermeulen 等<sup>[45]</sup>利用 BP 神经网络预测了钢材中的硬度分布, 在 Jominy 试验固定的冷却速率范围内, 钢的淬透性可以通过表面淬火实验改善, 在 Jominy 实验固定的冷却速率范围内, 合金成分是影响显微组织的主要因素。该团队以 4000 种低合金钢的化学成分、奥氏体化温度及硬度分布为网络进行训练学习及验证, 结果表明神经网络模型的预测值与硬度测量值存在的误差相同。在此基础上成功预测了硼元素对钢淬透性的影响, 以 9 种合金元素作为输入数据, 800 组实际数据作为网络模型的训练, 预测结果比实验模型和最小二乘模型综合性的结果更加准确。孙宇等<sup>[46]</sup>等以 12 种化学元素含量作为输入参数, 相变点作为输出参数, 利用 BP 神经网络模型预测钛合金相变点, 揭示了化学元素种类与相变点之间的变化规律, 预测结果的精度高于传统经验公式。

## 4 结 语

人工神经网络作为材料加工技术应用性较广泛的研究方法, 虽然在材料的性能预测、工艺设计和相变规律预测等方面应用十分广泛, 但是依然存在一些问题:

(1) 在人工神经网络模型的学习训练过程中, 需要大量可靠性高且代表性强的数据建立较为准确的网络模型, 以实现高准确性的预测结果。因此, 建立标准的材料领域大数据库是该领域发展的必然趋势。

(2) 反向传播 (back propagation, BP) 神经网络作为目前材料加工方面应用最成熟且最广泛的网络模型之一, 仅局限于对常规数字进行信息化处理。因此, 需要更多的研究学者及专业团队开发新的模型、新的算法来契合大数据时代的发展。

(3)随着大数据时代的到来,海量数据的出现,分布式数据管理和数据的准确筛选变得十分重要。

## 参考文献 References

- [1] 贾豫婕,林希衡,邹小伟,等. 中国材料展[J], 2022, 41(5): 354-370.  
JIA Y J, LIN X H, ZOU X W, *et al.* Materials China[J], 2022, 41(5): 354-370.
- [2] 康靓,米晓希,王海莲,等. 材料导报[J], 2020, 34(21): 21172-21179.  
KANG L, MI X X, WANG H L, *et al.* Materials Review[J], 2020, 34(21): 21172-21179.
- [3] 钱旭,田子奇. 数据与计算发展前沿[J], 2020, 2(1): 128-141.  
QIAN X, TIAN Z Q. Frontiers of Data & Computing[J], 2020, 2(1): 128-141.
- [4] 崔岩,卢昀坤,曹雷刚,等. 热加工工艺[J], 2018, 47(12): 13-16.  
CUI Y, LU Y K, CAO L G, *et al.* Hot Working Technology[J], 2018, 47(12): 13-16.
- [5] 宿彦京,付华栋,白洋,等. 金属学报[J], 2020, 56(10): 1313-1323.  
SU Y J, FU H D, BAI Y, *et al.* Acta Metallurgica Sinica[J], 2020, 56(10): 1313-1323.
- [6] 贾豫冬,刘凡,朱宏康. 中国材料进展[J], 2019, 38(6): 626-630.  
JIA Y D, LIU F, ZHU H K. Materials China[J], 2019, 38(6): 626-630.
- [7] 阳杰,徐锐,黄群,等. 固体力学学报[J], 2020, 41(1): 1-14.  
YANG J, XU R, HUANG Q, *et al.* Chinese Journal of Solid Mechanics[J], 2020, 41(1): 1-14.
- [8] MÖLLER J J, KÖRNER W, KRUGEL G, *et al.* Acta Materialia[J], 2018, 153(153): 53-61.
- [9] REN F, WARD L, WILLIAMS T, *et al.* Science Advances[J], 2018, 4(4): 1566.
- [10] 宋晓艳,刘东,刘雪梅,等. 中国科学:技术科学[J], 2020, 50(6): 786-800.  
SONG X Y, LIU D, LIU X M, *et al.* Scientia Sinica Technologica[J], 2020, 50(6): 786-800.
- [11] ZHOU Y, GAN G Y, YI J H, *et al.* Journal of Micromechanics and Molecular Physics[J], 2020, 5(2): 2040002.
- [12] 米晓希,汤爱涛,朱雨晨,等. 材料导报[J], 2021(15): 1-18.  
MI X X, TANG A T, ZHU Y C, *et al.* Materials Review[J], 2021(15): 1-18.
- [13] 赵崇文. 山西电子技术[J], 2020(3): 94-96.  
ZHAO C W. Shanxi Electronic Technology[J], 2020(3): 94-96.
- [14] GOMES S C P, GARDEL K P R, GONCALVES L R, *et al.* Applied Soft Computing Journal[J], 2021, 104(7): 107254.
- [15] BADR C, MOHAMED T, EMMANUEL S, *et al.* Energy & Buildings[J], 2021, 239: 110839.
- [16] 田方斌,刘敏,李吉成. 国防科技大学学报[J], 2004(2): 51-55.  
TIAN F B, LIU M, LI J C. Journal of National University of Defense Technology[J], 2004(2): 51-55.
- [17] SUJATHA K, CHANDRASHAKER R B, PONMAGAL R S, *et al.* Procedia Computer Science[J], 2020, 171: 1517-1526.
- [18] HAGLIN J M, JIMENEZ G, ELTORAI A E M. Health and Technology[J], 2019, 9(1): 1-6.
- [19] YU C. E3S Web of Conferences[J], 2021, 233: 02003-02008.
- [20] ABABNEH A, ALHASSAN M, ABU-HAIFA M. Case Studies in Construction Materials[J], 2020, 13: 1-13.
- [21] 李维刚,湛竞成,范丽霞,等. 钢铁研究学报[J], 2020, 32(1): 33-43.  
LI W G, CHEN J C, FAN L X, *et al.* Journal of Iron and Steel Research[J], 2020, 32(1): 33-43.
- [22] 伊茹梦. 科技经济导刊[J], 2015(18): 59-60.  
YI R M. Technology and Economic Guide[J], 2015(18): 59-60.
- [23] JAMES W. Science[J], 1890, 16(401): 207-208.
- [24] NEWELL A. Science[J], 1969, 165(3895): 780-782.
- [25] HOPFIELD J J. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America[J], 1982, 79(8): 2554-2558.
- [26] STUART S. Nature[J], 1986, 323(6088): 486.
- [27] 姚国正,汪云九. 生物化学与生物物理进展[J], 1988, 2: 94.  
YAO G Z, WANG Y J. Progress in Biochemistry and Biophysics[J], 1988, 2: 94.
- [28] 张巧超,曾昭冰. 辽宁经济职业技术学院学报[J], 2010(4): 68-69.  
ZHANG Q C, ZENG Z B. Journal of Liaoning Economic Management Cadre Institute[J], 2010(4): 68-69.
- [29] 陈东焰,陆畅. 科技创新导报[J], 2020, 17(13): 146-148.  
CHEN D Y, LU C. Science and Technology Innovation Herald[J], 2020, 17(13): 146-148.
- [30] SILVER D, HUANG A, MADDISON C J. Nature[J], 2016, 529(7587): 484-489.
- [31] 朱英. 化工中间体[J], 2014, 10(11): 1-5.  
ZHU Y. Modern Chemical Research[J], 2014, 10(11): 1-5.
- [32] 陈锬,刘克家,施宇涛,等. 广州化工[J], 2019, 47(1): 125-126.  
CHEN K, LIU K J, SHI Y T, *et al.* Guangzhou Chemical Industry[J], 2019, 47(1): 125-126.
- [33] 宋维锡. 金属学[M]. 北京:冶金工业出版社,1989.  
SONG W X. Metallography[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989.
- [34] ONDER A, SEDAT B, TAHIR A, *et al.* Indian Journal of Engineering and Materials Sciences[J], 2016, 23(4): 239-246.
- [35] 王鑫,刘金亮,周舸,等. 沈阳工业大学学报[J], 2021, 3(24): 1-6.  
WANG X, LIU J L, ZHOU G, *et al.* Journal of Shenyang University of Technology[J], 2021, 3(24): 1-6.

- [36] RAMACHANDRA S, DURODOLA J F, FELLOWS N A, *et al.* International Journal of Fatigue[J], 2019, 126: 112–121.
- [37] PATOWARI P K, SAHA P, MISHRA P K. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology[J], 2010, 51(5–8): 627–638.
- [38] 魏艳红, 张玉莲. 电焊机[J], 2020, 50(9): 213–220.  
EI Y H, ZHANG Y L. Electric Welding Machine[J], 2020, 50(9): 213–220.
- [39] 张吉会. 基于人工神经网络的电弧增材制造焊道成型尺寸预测[D]. 辽宁: 沈阳大学, 2016.  
ZHANG J H. Prediction of Weld Pass Forming Size in Arc Additive Manufacturing Based on Artificial Neural Network[D]. Liaoning: Shenyang University, 2016.
- [40] CHAKI S, BOSE D, BATHE R N. Lasers in Manufacturing and Materials Processing[J], 2020, 7(1): 88–110.
- [41] 刘晓燕, 杨成, 杨西荣, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2018, 47(10): 3038–3044.
- LIU X Y, YANG C, YANG X R, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2018, 47(10): 3038–3044.
- [42] 胡赓祥, 蔡珣, 戎咏华. 材料科学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2010.  
HU G X, CAI X, RONG Y H. Fundamentals of Material Science[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2010.
- [43] CHAKRABORTY S, DAS P, KAVETI N K. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures[J], 2019, 15(1): 170–186.
- [44] REDDY D C, REDDY C S. Transactions of the American Foundrymen's Society[J], 1996, 104: 191–196.
- [45] VERMEULEN W G, WOLK P J, WEIJER A P. Journal of Materials Engineering and Performance[J], 1996, 5(1): 57–63.
- [46] 孙宇, 曾卫东, 赵永庆, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2010, 39(6): 1031–1036.  
SUN Y, ZENG W D, ZHAO Y Q, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2010, 39(6): 1031–1036.

(编辑 张雨明)