网络首发时间：2025-04-07 14:00:53　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.3449.TG.20250403.1747.010

第 32 卷 第 3 期
2025 年 3 月

塑性工程学报
JOURNAL OF PLASTICITY ENGINEERING

Vol. 32　No. 3
Mar.　2025

引文格式：王少华，宋红兵，张万鹏，等. 矿物绝缘电缆连续管保护套拉拔成形工艺研究［J］. 塑性工程学报，2025，32（3）：71-77.
WANG Shaohua，SONG Hongbing，ZHANG Wanpeng，et al. Research on drawing process of continuous tube protective sheath for mineral insulated cables［J］. Journal of Plasticity Engineering，2025，32（3）：71-77.

矿物绝缘电缆连续管保护套拉拔成形工艺研究

王少华[1,2]，宋红兵[1,2]，张万鹏[1,2]，周　超[1,2]，谢　航[1,2]，肖群星[1,2]，
邢煜林[3]，王效岗[3]

（1. 中油国家石油天然气管材工程技术研究中心有限公司，陕西 西安 710018；
2. 中国石油宝鸡石油钢管有限责任公司，陕西 宝鸡 721008；
3. 太原科技大学 高端重型机械装备研究院，山西 太原 030024）

摘　要：采用实验以及建立 BP 神经网络的方式，对拉拔理论公式进行验证，研究拉拔成形工艺的制定以及拉拔后焊缝对管材质量的影响。实验结果表明，对于 304 不锈钢焊管来说，单道次最大减径率为 30.4%，伸长率最大为 40%；拉拔力与减径率、工作带长度等影响因素成正相关，拉拔速度对拉拔力的影响不大；通过拉拔成形工艺能有效改善焊缝处的晶粒取向，使得管材沿拉拔方向有较好的成形性；建立 BP 神经网络训练模型，得到回归值 R，表明该模型有较好的预测性，从而验证了模型的可行性。

关键词：神经网络；拉拔力；管材拉拔；焊缝质量
中图分类号：TG356.53　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1007-2012（2025）03-0071-07
doi：10.3969/j.issn.1007-2012.2025.03.007

Research on drawing process of continuous tube protective sheath for mineral insulated cables

WANG Shao-hua[1,2]，SONG Hong-bing[1,2]，ZHANG Wan-peng[1,2]，ZHOU Chao[1,2]，XIE Hang[1,2]，XIAO Qun-xing[1,2]，
XING Yu-lin[3]，WANG Xiao-gang[3]

（1. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods Co.，Ltd.，Xi′an 710018，China；
2. CNPC Baoji Petroleum Steel Pipe Co.，Ltd.，Baoji 721008，China；
3. High-end Heavy Machinery Equipment Research Institute，Taiyuan University of Science and Technology，Taiyuan 030024，China）

Abstract：The drawing theoretical formula was verified by experiments and the establishment of BP neural networks，the development of the drawing process and the effect of the weld on the quality of the tube after drawing were studied. The experiment results show that for 304 stainless steel welded tube，the maximum diameter reduction rate in a single pass is 30.4%，and the maximum elongation is 40%；the drawing force is positively correlated with influencing factors such as the diameter reduction rate and the length of the working belt，and the drawing speed has little effect on the drawing force. The grain orientation at the weld can be effectively improved through the drawing process，so that the tubes have better formability along the drawing direction. BP neural network training model was established to obtain the regression value R，which shows that the model has good predictability，thus verifying the feasibility of the model.

Key words：neural network；drawing force；tube drawing；weld quality

---

基金项目：中国石油天然气集团有限公司前瞻性基础性技术攻关项目（2022DJ1409）
通信作者：宋红兵，男，1986 年生，本科，工程师，主要从事新能源管材研究和开发研究，E-mail：bsgshb01@cnpc.com.cn
王效岗，男，1976 年生，博士，教授，主要从事轧钢机械研究，E-mail：wxg@tyust.edu.cn
第一作者：王少华，男，1974 年生，本科，高级工程师，主要从事油气及新能源装备开发研究，E-mail：bsgwsh@cnpc.com.cn
收稿日期：2024-05-20；**修订日期**：2025-01-24

引言

矿物绝缘电缆，又称铜芯铜护套氧化镁绝缘电缆，习惯上称为矿物电缆或防火电缆，是电加热技术的核心装备，主要由单根或多根电阻电热合金丝作为发热源，氧化镁作为导热绝缘体，不锈钢或铜作为护套，采用特殊生产工艺制造。当发热芯线通过电流，电能转化为热能加热油藏。利用电阻发热产生的热量，可以持续加热井筒传热介质（蒸汽、水）或油层。该技术可对稠油等非常规油气资源进行持久、稳定加热，提取液态、气态清洁能源，并将焦炭和 CO_2 等污染物留在地下，从而实现能源的清洁高效开发[1-2]。

井下用电加热器应用于稠油井下加热辅助、地下原位煤气化等新领域[3-5]，在井下长期服役中需要承受井下高温、高压，氯离子和硫化氢等介质腐蚀，因此外护套主要起到防腐、耐压以及承载重量的作用。目前，现有的金属护套材料常用铜、铜镍和不锈钢等材料，由板带材弯曲，然后经过焊接机组焊接而成，然后进行多次拉拔工艺卷曲成盘。张伟玮等[6]针对无芯棒拉拔过程进行了应力应变分析，结果表明壁厚对管材拉拔成形有较大的影响，DJAVANROODI F 等[7]研究了润滑技术在拉拔过程中的作用，提出了一种新的工艺可有效提高管材质量。综上，对于电缆外护套成形过程中的变形，以及对焊接处材料成形影响的研究相对较少。因此本文进行了拉拔实验，通过分析拉拔力以及焊缝附近金相组织、硬度等力学性能，探究了管材拉拔成形工艺，对管材拉拔成形过程中金属管材力能参数进行了预测，为生产加工提供一定的理论指导。

1 实验过程

根据拉拔实验的相关影响参数，实验对象选用外径为 Φ25.4 mm，壁厚 S 分别为 1.5、1.4、1.2 和 1.1 mm，屈服强度为 205 MPa 的 304 奥氏体不锈钢焊管。

以拉拔过程中工作带长度、拉拔直径、拉拔角以及拉拔速度等影响因素作为研究对象，分别设定 5 种拉拔直径 D（Φ23.4、Φ21.5、Φ20.0、Φ18.8 和 Φ17.5 mm）、3 种拉拔角度 α（11°、13°和 15°）、3 种拉拔速度 v（50、100 和 200 mm · min^{-1}）、2 种工作带长度（1.60 和 1.80 mm），对不同厚径比 S/D 的管材进行拉拔实验。

采用万能试验机进行拉拔实验，选用 400#、800#、1000#的砂纸对拉拔后的管材截面进行打磨及抛光处理，截面经过研磨抛光后进行腐蚀，利用基恩士超景深显微镜观察金相组织，并使用维氏硬度计对管材硬度进行测量，结果取平均值。

2 模具设计

根据拉拔原理，完成模具的结构设计（图 1），实现金属的良好变形，对模芯进行表面淬火处理，减少模具磨损，达到一定的尺寸精度。

(a)

(b)

图 1 拉拔模具（a）与模芯（b）

Fig. 1 Drawing molds (a) and mold cores (b)

3 实验结果分析与 BP 神经网络建立

3.1 实验结果分析

表 1 为不同减径率下材料的拉拔力实验值和计

算值的对比，从表中可以看出，对 304 焊管这种材料来说，单道次最大减径率和伸长率分别为 30.4% 和 40%，拉拔结束后，将材料静置一定时间，管材沿焊缝处裂开，如图 2 所示。

表 1　不同减径率下的拉拔力

Tab. 1　Drawing force with different diameter reduction rates

Initial length/mm	Length after experiment/mm	Diameter reduction rate/%	Elongation/%	Experimental drawing force/N	Calculated drawing force/N
100	106.5	7.6	6.5	11760	10584
100	110.8	14.6	10.8	21070	16170
100	121.5	20.3	21.5	31360	26754
100	131	24.8	31	35280	33222
100	140	30.4	40	45080	37534

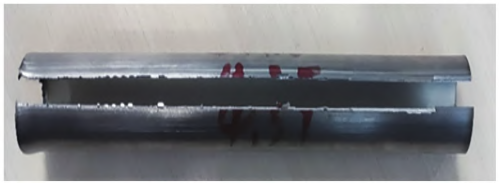


图 2　当减径率为 30.4%时管材静置后断裂

Fig. 2　Fraction of tube with diameter reduction rate of 30.4% after standing still

图 3 为 $S/D=0.04$ 的管材在不同减径率下的拉拔力情况。从图中可看出，随着管材减径率的增加，材料的拉拔力逐渐增大，且速度相同的情况下，由于模具减径率增大，导致成形过程中金属在模具口处金属发生堆积，受到的变形抗力增大，因此在管材长度相同的情况下，材料变形时间延长。

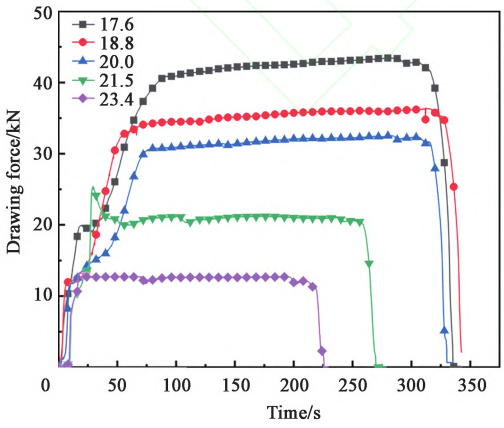


图 3　不同减径率下管材拉拔力

Fig. 3　Tube drawing force with different diameter reduction rates

图 4 为不同管材厚径比的拉拔力实验曲线，结果表明，材料拉拔力的大小与管材厚径比呈现正相关，随着厚径比的增大，管材的拉拔力逐渐增加。

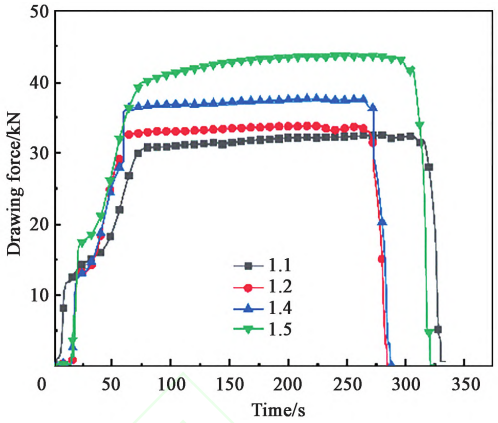


图 4　减径率一定时不同壁厚下拉拔力实验曲线

Fig. 4　Experimental curves of drawing force with different wall thickness and constant diameter reduction rate

针对不同拉拔角 α，对于 $S/D<0.05$ 的管材，管材的拉拔力相近，从表 2 中可以看出，对于 $S/D>0.05$ 的管材，当拉拔角为 15°时，能相对减小该规格管材成形时的拉拔力。

表 2　拉拔角对拉拔力的影响

Tab. 2　Effect of drawing angles on drawing force

Outer diameter/mm	Wall thickness/mm	Drawing force/N	Diameter reduction rate/%	Elongation/%	Drawing angle/(°)
Φ25.4	1.1	22600	16.24	13.44	11
Φ25.4	1.1	25800	16.80	16.30	13
Φ25.4	1.1	22100	16.48	17.48	15
Φ25.4	1.2	22700	16.40	15.70	11
Φ25.4	1.2	25500	16.88	15.50	13
Φ25.4	1.2	22400	16.80	16.10	15
Φ25.4	1.4	32200	16.48	17.42	11
Φ25.4	1.4	23500	16.80	14.64	13
Φ25.4	1.4	29700	16.88	28.40	15

对不同工作带长度进行拉拔实验，实验结果见表 3，从表中可以发现，随着工作带长度的增加，管材的拉拔力逐渐增大，这是由于随着模具的工作带长度增加，定径区与材料接触面积增加，摩擦力增加，导致拉拔力增大。

拉拔力取稳态时的平均读数，文献［8］研究表明，稳定拉拔时的拉拔速度对拉拔力的影响较小，这点从实验数据中可以验证得到。但是拉拔开始时的瞬间拉拔力与拉拔速度的关系密切，速度高，动

载荷就大，因此拉拔力大，过高的拉拔速度会使得在拉拔过程中发生管材断裂的现象。为了避免这种现象的产生，在拉拔开始时采用较低的拉拔速度，当达到稳态时，再提高拉拔速度，减少拉拔时间，节约时间成本。

表 3 工作带长度对拉拔力的影响

Tab. 3 Effect of working belt lengths on drawing force

Outer diameter/mm	Drawing force/N	Diameter reduction rate/%	Elongation/%	Work belt length/mm
Φ25.4	25872	16.80	17.02	1.60
Φ25.4	25284	16.80	16.30	1.80
Φ25.4	24598	16.80	16.94	1.60
Φ25.4	24500	16.64	16.48	1.80
Φ25.4	24794	16.72	15.60	1.60
Φ25.4	23814	16.40	16.78	1.80

3.2 焊缝附近显微组织形貌

对拉拔前后的管材进行力学性能分析，如图 5 所示，图 5b 中红色虚线为焊缝，虚线下方为基体组织，对管材拉拔前后焊缝附近材料进行维氏硬度测试，可以发现，管材在拉拔后，材料内部发生加工硬化，硬度均有一定程度的提高，其中焊缝处硬度从 200 HV 上升至 262 HV。

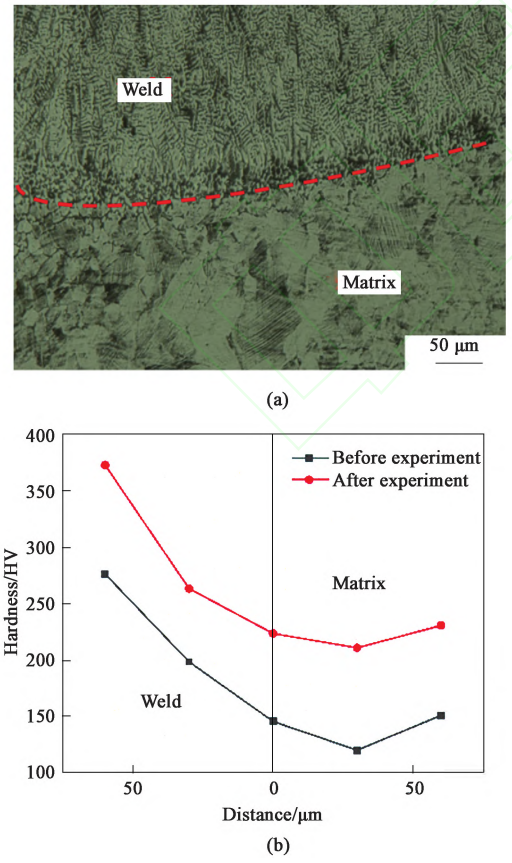


图 5 焊缝附近金相（a）以及硬度（b）

Fig. 5 Metallography (a) and hardness (b) near weld

图 6 为拉拔前后管材焊缝附近显微组织，从图中可以看出，拉拔对焊缝处晶粒尺寸大小影响较小，但是能改善焊缝处晶粒取向，使得显微组织更加均匀化，测量结果显示，焊缝处晶粒大小约为 2 μm，当晶粒变形方向大部分相同或接近时，说明管材沿拉拔方向的成形性能较好。

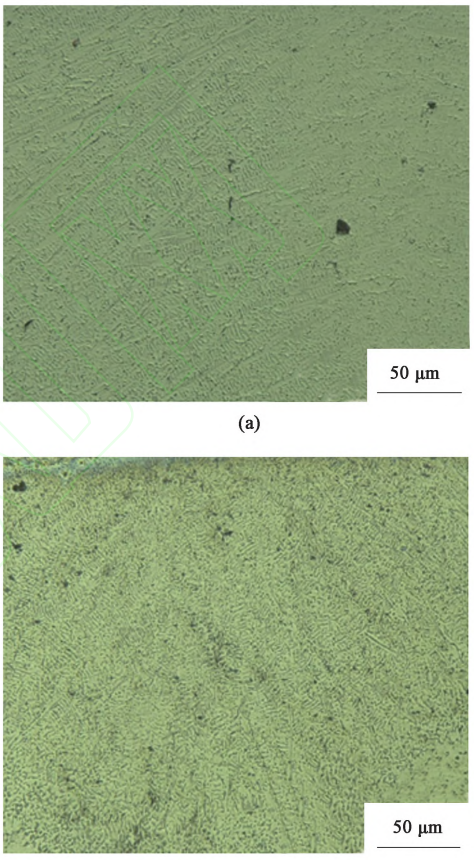
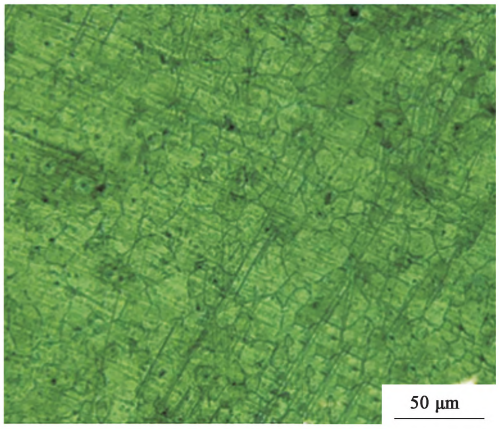


图 6 拉拔前（a）、后（b）管材焊缝附近金相显微组织

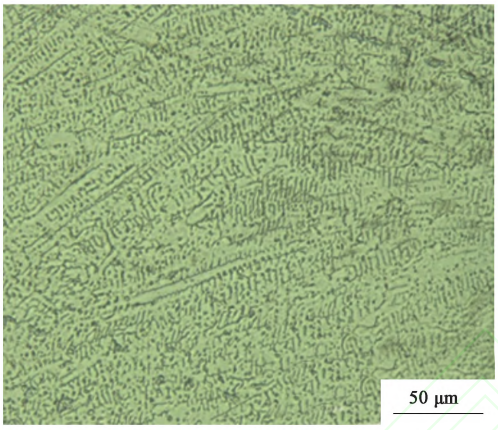
Fig. 6 Metallographic microstructure near weld before (a) and after (b) drawing

图 7 为焊缝部位与基体金相组织。由图 7 明显看出基体部位晶粒较为粗大，焊缝部位晶粒较小，这是由于焊接可以看作是对材料进行淬火的过程，焊接过程中产生的热量会导致母材和焊缝区域的晶粒尺寸变大，焊接过程中，由于高温作用，晶粒会发生再结晶，在空气环境中过冷度较大，导致大尺寸晶粒细化。

对于图 2 中出现拉拔后静置开裂的情况，从显微组织分析可知，这是由于管材在焊接后，其内部有较大的应力，经过拉拔后，部分晶粒的细化增加



(a)



(b)

图 7　基体（a）与焊缝（b）金相组织

Fig. 7　Metallographic structure of matrix (a) and weld (b)

了内部的残余应力，导致在焊缝处存在应力集中现象，从而导致管材的开裂现象。

3.3　神经网络模型建立

人工神经网络是一种模拟人脑神经系统对复杂信息处理机制的数学模型。BP 神经网络是最常用的一种人工神经网络，属于监督学习网络，是一个前馈型多层感知器网络[10]。人工神经网络由输入层、隐含层和输出层共 3 层结构组成。每层之间依靠神经元的权重实现层与层的链接，同一层之间的神经元不连接。输入层的神经元个数由数据集的特征个数决定，输出层的神经元个数由数据集的目标个数决定。输人层和输出层的层数有且只有一个，隐含层的层数可以有多个[11]。对于隐含层的节点数一般通过经验公式来确定，即：

$$m = \sqrt{n + l} + a \tag{1}$$

式中：m 为隐含层的节点数；n 为输入层的节点数；l 为输出层的节点数；a 为 1~10 的常数。

在本次管材拉拔力预测中，针对工作带长度、拉拔角和减径率等不同影响因素，进行神经网络训练，以提高计算及响应速度，在生产过程中提供一定的模型，完善工程应用需求。考虑到工程实际应用，为了能在较短的时间得到不同参数对拉拔力的影响，根据实验得到的参数，采用 MATLAB 软件构建 BP 神经网络预测模型，对拉拔力等参数进行神经网络训练。

对于神经网络训练算法选择 traingda，在实验中样本选取少部分用于神经网络模型的训练学习，其余作为训练集样本，测试集样本用于最终神经网络的精度测试。

回归值 R 代表预测输出与目标输出之间的相关性，R 值越接近 1，表示预测和数据之间的关系越密切，R 值越接近 0 则表示预测与输出数据之间的关系随机性越大。图 8 所示为本次 BP 神经网络训练后的 R 值，包括训练过后训练集、验证集、测试集和总体结果的数据相关性。横坐标代表目标输出，纵坐标表示预测输出与目标输出之间的拟合函数。

图 9 为本次 BP 神经网络训练后的误差直方图，从图中能直观地看出预测输出和目标输出之间的误差，其中横坐标表示预测输出和目标输出之间的误差大小，纵坐标表示具有对应误差大小例子的个数。

经验证，该 BP 神经网络模型训练集拟合度 R 为 0.99995，测试集拟合度 R 为 0.99987，平均拟合度 R 为 0.99992。说明该神经网络模型具有较好的模型精度、训练速度与稳定性。

4　结论

（1）通过对管材拉拔变形中不同的影响因素进行研究，获得管材成形过程中的力学规律，拉拔力随着减径率的增加而增加，拉拔速度和工作带长度对拉拔力影响不大，但对管材表面成形质量有一定的影响。

（2）对空管拉拔的不同影响因素进行实验，利用实验数据，建立了基于 BP 神经网络的空管拉拔工艺计算模型，以相关影响参数的实验数据对其进行训练，得到回归值 R，表明该模型具有较好的预测性，从而验证了模型的可行性。该方法避免了多个实验参数，多种计算公式的繁琐性，在管材拉拔的理论值计算方面，具有一定的科学性、客观性和准确性。

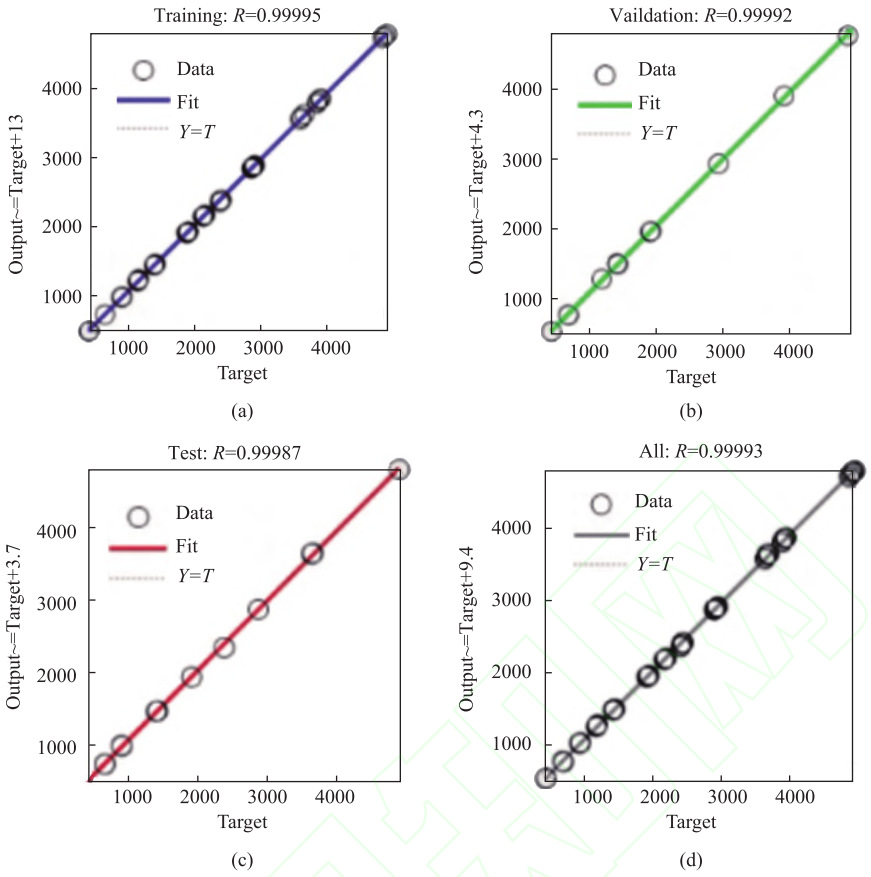


图 8 神经网络训练集（a）、验证集（b）、测试集（c）和总体结果（d）的数据相关性关系

Fig. 8 Data correlation relationship between neural network training set (a), validation set (b), test set (c) and overall results (d)

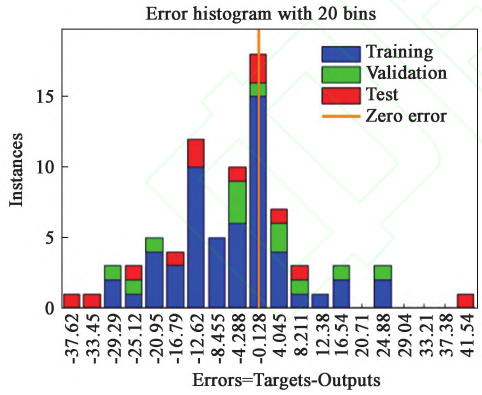


图 9 神经网络误差直方图

Fig. 9 Neural network error histogram

参考文献：

[1] 毕宗岳，张万鹏. 国内外油气管材技术现状与发展趋势[C]//第四届数控机床与自动化技术高层论坛. 西安，2013：1.
BI Zongyue, ZHANG Wanpeng. Current status and development trends of oil and gas pipe technology at home and abroad [C]// The 4th CNC Machine Tool and Automation Technology High-Level Forum. Xi'an, 2013: 1.

[2] 张万鹏，张锦刚，宋红兵，等. 井下大功率电加热器制造工艺与应用[J]. 焊管，2023，46（9）：33-40，48.
ZHANG Wanpeng, ZHANG Jingang, SONG Hongbing, et al. Manufacturing technology and application of underground high-power electric heaters [J]. Welded Pipe, 2023, 46 (9): 33-40, 48.

[3] 谢玉洪，蔡东升，孙晗森. 中国海油非常规气勘探开发一体化探索与成效[J]. 中国石油勘探，2020，25（2）：27-32.
XIE Yuhong, CAI Dongsheng, SUN Hansen. Exploration and achievements of integrated unconventional gas exploration and development by China national offshore oil corporation [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25 (2): 27-32.

[4] 吴奇，胥云，王晓泉，等. 非常规油气藏体积改造技术——内涵、优化设计与实现[J]. 石油勘探与开发，2012，39（3）：352-358.
WU Qi, XU Yun, WANG Xiaoquan, et al. Volume transformation technology for unconventional oil and gas reservoirs: Connotation, optimization design and implementation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39 (3): 352-358.

[5] 李国欣，朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J]. 中国石油勘探，2020，25（2）：1-13.
LI Guoxin, ZHU Rukai. Current status, challenges and concerns of unconventional oil and gas development in China [J]. Chi-

na Petroleum Exploration, 2020, 25 (2): 1-13.

[6] 张伟玮, 王仲仁, 陈景松, 等. 无芯棒拉拔过程应力应变分析及壁厚变化 [J]. 塑性工程学报, 2013, 20 (2): 29-32.
ZHANG Weiwei, WANG Zhongren, CHEN Jingsong, et al. Stress, strain analysis and wall thickness changes during mandrel-free drawing process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20 (2): 29-32.

[7] DJAVANROODI F, ZOLFAGHARI A A, EBRAHIMI M, et al. Equal channel angular pressing of tubular samples [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2013, 26 (5): 574-580.

[8] 赵海凤, 张远庆, 谭振宇, 等. 钢丝拉拔过程中拉拔力检测 [J]. 金属制品, 2020, 46 (6): 9-12.
ZHAO Haifeng, ZHANG Yuanqing, TAN Zhenyu, et al. Pull-out force detection during wire drawing process [J]. Metal Products, 2020, 46 (6): 9-12.

[9] 欧阳斌, 陈艳红, 邓传军. 基于 PSO 优化 BP 神经网络的露天矿边坡位移预测模型 [J]. 有色金属: 矿山部分, 2020, 72 (5): 37-41.
OUYANG Bin, CHEN Yanhong, DENG Chuanjun. Open-pit mine slope displacement prediction model based on PSO optimized BP neural network [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2020, 72 (5): 37-41.

[10] 胡凡, 彭亮, 仵峰峰, 等. 基于 BP 神经网络模型的充填体强度值预测 [J]. 有色金属: 矿山部分, 2021, 73 (6): 60-65.
HU Fan, PENG Liang, WU Fengfeng, et al. Prediction of filling body strength value based on BP neural network model [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2021, 73 (6): 60-65.

[11] 王敬龙, 朱晓宇, 王效岗. 基于 GA-BP 神经网络板材辊式矫直工艺预测模型 [J]. 现代制造工程, 2023, (8): 115-120.
WANG Jinglong, ZHU Xiaoyu, WANG Xiaogang. Prediction model of plate roller straightening process based on GA-BP neural network [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2023, (8): 115-120.