

节能技术

环形锻件加热过程生产调度优化

李 先¹, 周永松², 张 振¹, 周玉龙¹, 陈 杰¹

(1. 中国机械总院集团江苏分院有限公司, 江苏 常州 213100; 2. 北京机科国创轻量化科学研究院有限公司, 北京 100083)

摘要: 环形锻件的生产工艺周期长、成形质量要求高, 存在生产过程能耗高的突出问题, 结合目前企业广泛应用的生产调度模型, 在 K 均值聚类 means 算法和贪心算法的基础上, 建立以加热炉空置状态下的提升温度为目标函数、以各工序入炉温度和出炉温度为主要调节参数的节能调度模型。使用该模型, 通过锻件编号、工序号、锻件入炉温度、锻件出炉温度、锻件加热时长等参数对环形锻件的生产过程进行优化, 得到优化前后的不同生产结果。优化前, 随机模拟人工操作加热炉的生产数据显示, 加热过程中浪费加热温度为 1030 ℃; 调度模型优化后的加热炉工序经实验后显示, 加热过程中的温度浪费降低至 440 ℃。实验结果表明: 与传统人工操作加热炉工序的排序相比, 经调度算法优化后的加热炉工序所生产的环形锻件在加热炉空转时的能耗减少了 57.28%。

关键词: 环形锻件; 加热炉; 动态调度; 智能管控; 能耗管理

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.030

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 04-0229-07

Optimization on production scheduling in heating process of ring forgings

Li Xian¹, Zhou Yongsong², Zhang Zhen¹, Zhou Yulong¹, Chen Jie¹

(1. Jiangsu Institute, China Academy of Machinery Science & Technology Co., Ltd., Changzhou 213100, China;

2. Beijing National Innovation Institute of Lightweight Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: For ring forgings, the production process cycle is long, the forming quality requirements are high, and there is a prominent problem of high energy consumption in the production process. Therefore, combined with the production scheduling model widely used by enterprises at present, on the basis of Kmeans algorithm and greedy algorithm, taking the raising temperature of heating furnace before the forgings were put into the furnace as the objective function, and the entering and exiting temperatures of each process as the main regulating parameters, an energy-saving scheduling model was established. Then, by using this model, the production process of ring forgings was optimized by forging number, process number, entering furnace temperature of forgings, exiting furnace temperature of forgings, heating time of forgings and other parameters, and the different production results before and after optimization were obtained. Furthermore, before optimization, the production data of heating furnace for randomly simulated artificial operation shows that the heating temperature of 1030 ℃ is wasted in the heating process, while after the experiment of the heating furnace operation optimized by the scheduling model, the temperature waste in the heating process reduces to 440 ℃. The results show that compared with the traditional artificial operation of the heating furnace process, the energy consumption of the ring forgings produced by the heating furnace process after the optimization of scheduling algorithm is reduced by 57.28% when the heating furnace is idling.

Key words: ring forgings; heating furnace; dynamic scheduling; intelligent control; energy consumption management

目前, 环形锻件生产领域迫切需要发展以高品质、高效率、低消耗为目标, 以网络协同制造和智能工厂为核心的智能制造新模式, 推进传统锻件热

成形产业转型升级, 做到数值模拟分析结果与实际生产相匹配^[1]。在整体生产流程中, 锻件加热环节的能量损耗是生产能耗的主要来源之一。

而在生产管理的工作中, 调度是核心内容和关键技术, 调度的任务是在考虑到企业车间已有的条件和基础上, 重新排列锻件在不同生产设备上的加工顺序, 以保证所有生产目标在符合订单截止日期的前提下, 提高产品质量、产量以及降低生产成本。制定合理的生产调度方案十分重要, 它能够控制车

收稿日期: 2022-07-20; 修订日期: 2022-11-01

基金项目: 国家科技重大专项 (2019YFB1704504)

作者简介: 李 先 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1282929693@qq.com

通信作者: 周永松 (1971-), 男, 学士, 研究员

E-mail: zysxcl@sina.com

间库存、缩短产品供货周期并且提高企业生产效率^[2]。调度又可以分为动态调度和静态调度,动态调度^[3]是指在调度环境中存在不可预测的扰动因素时所进行的调度行为。相对于静态调度^[4],动态调度能够更高效地对生产车间内突发的各类情况制定出更适合的决策方案。

但是,调度过程可能存在各种各样的问题,如调度架构不理想、反馈差、数据利用不完全等,针对上述问题,在已有的生产调度基础上,结合环形锻件加热环节的生产现状,对其调度算法进行优化,建立新的调度模型,结合实验数据,比对优化前后的生产结果,得出新的调度模型是否能够降低环形锻件加热环节的损耗的结论。

1 锻件生产及调度研究现状

1.1 锻件生产研究现状

锻件生产^[5]作为国家传统制造领域的重要组成部分之一,随着我国科技的飞速发展也在快速迭代演变,从最开始的车间人工锻造逐步发展为智能化管控平台、智能锻造程序所控制的精细化锻造。

李春辉等^[6]针对厚壁长套锻件在生产中频发的端面偏心现象提出了一种偏心控制及矫正方法,该方法结合了工艺性分析,建立了有限元分析模型,最终确定了最佳工艺参数。经过批量生产试制后,验证了该方法的合理性。而李世山等^[7]在新模具的检测方面,将三维扫描与锻件生产检测相结合,为锻件智能化生产后的检测以及反馈找到了新的应用方法。王宸等^[8]同样在锻件生产后的检测工作上做出了创新,其将锻件检测与机器视觉相结合,省去了繁琐的人工检测,同时提升了检测准确率,满足了大多数企业的生产要求,且节约了生产成本。此外,王梦寒等^[9]还提出一种零件预成形设计及实现的具体方法,采用了先总结、后研究、最后进行分段设计的思路,实验证明,该方法设计的锻件在性能检测以及质量审查中均能符合设计要求。

1.2 动态调度研究现状

动态调度的概念出现较早,1957 年即已被 Jackson J R^[3]提出。最初的动态调度研究与现实生产之间的差距较大,整体研究以仿真为主。但是随着信息时代的到来,计算机技术迅速发展,一些新的方法和技术也逐渐出现,如人工智能、神经网络以及遗传算法等,开辟了动态调度研究的新思路,

为动态调度在现实世界的生产、生活中的具体应用奠定了基础。动态调度已经成为当今科研领域中的热点之一^[2]。

近年来,关于调度方面的研究成果频出,Karo Fathollahzadeh 等^[10]提出了一个新模型,该模型适用于具有品位工程框架的露天采矿作业。将理想的(高品位)和不理想的(低品位或不经济的)材料分开,并确保只将选定数量的高品位材料运送到能源、水和成本密集型的加工厂。该模型在一系列的操作和加工约束条件下实现了净现值的最大化。同年,Joost Berkhout 等^[11]发明了一个可以解决复杂的多级机器环境中的实际调度问题的模型,其主要目标是尽量减少客户订单的延迟,这些订单可能由多个生产订单组成,每个订单又由几个批次组成;次要目标是最大限度地提高生产能力的利用率,使生产线的平均空闲时间缩减了 35.6%,与现实生活中的应用计划相比,优化后平均制造周期减少了 6.5%。

此外,Dimitris Mourtzis 等^[12]提出了一种自适应的调度方法,用来应对制造商在不同时间段内用电收费标准不同的问题。设计并开发了一个工业产品服务系统(Industrial Product Service System, IPSS)的商业模式,实现并加强了能源销售公司(Energy Sales Company, ESC)和制造公司之间的合作,通过一个能源需求管理工具,在连接到云的数据采集设备的支持下,计算并向制造商发出能源价格预测的信号。结果表明,制造公司降低了用电成本,能源销售公司提高了闲时售电量,从而使双方都能受益。Elisa Negri 等^[13]构思了一个用于稳健调度的模拟启发式框架的概念,适用于流动车间的调度问题。该框架由用于计划优化和离散事件模拟的遗传算法组成,并通过采用设备预知和健康管理(Device Prognosis and Health Management, DPHM)模块的数字双胞胎(Digital Twins, DT)与现场同步。基于 DT 的框架内的 DPHM 模块的贡献是实时计算设备的故障概率,采用数据驱动的统计模型,将现场的传感器数据作为输入,该框架的可行性在实验室环境中的流程车间应用中得到了证明。Sajad Karimi 等^[14]则发明了一种系统化的方法,该方法是为了降低增材制造过程中的能源消耗而设计,同时,它以一种综合的方式解决了工艺层面和调度层面的控制,最终节省电力成本。对于工艺层面的控制,首先分析和提取与各种工艺参数设置相匹配的电力需求模式;对于调度层面的控制,制定了一个生产调度问

题,以应对在不同时间段内变化的基础电价和随着用电量提高而升高的阶梯电价,使能源成本最小化。提出的模型能够实现性能的提高,两种不同的定价结构下的能源成本均节省了13%,并且总的能源成本也分别节省了30%和17%。Hamed Kazemi等^[15]提出了一个混合整数线性规划模型,它可以在合理的时间内解决小规模实例。这项研究调查了在生产线上使用不同平行机器的车间的综合生产-分配调度,其目的是将工作安排在机器上,并将他们组成批次,以使迟到和交付成本的总和最小。为了处理大尺寸的实例,开发了一个遗传算法(Genetic Algorithm, GA)和改进的遗传算法(Improved Genetic Algorithm, IGA),并配备了最优属性机制。还提出了卧室家具制造的全寿命实例,实例表明,该算法可以达到该问题的最优解。为了评估算法的性能,产生了150个小尺寸的实例和800余个尺寸的实例,且对实例的相对偏差百分比进行比对。结果表明,在相对偏差百分比方面,IGA优于GA。

2 产品分析

2.1 问题描述

环形锻件生产中的加热环节是一个比较复杂的过程,对其进行调度处理的目的是得到一个稳定、高效率、低能耗的生产方式。环形锻件生产加热过程中的各种数据种类繁多、体量庞大,在正式处理数据前需要对数据进行预处理,预处理方式选择为提取特征值。且各工序之间均存在入炉温度和出炉温度,如果前一工序的出炉温度与后一工序的入炉温度差值过大,则会产生热量浪费,使整个生产过程的能耗上升,不符合生产要求。

本文的研究问题是在保证产品质量的前提下,综合考虑生产过程中加热炉工序的排列顺序,对生产数据进行聚类分组之后,再对特定类别的数据进行调度优化处理,避免随机人工排列的加热炉工序造成的能耗,保证生产过程维持在一个较低的能耗水平。

2.2 算法选择

环形锻件锻造过程中的数据一般是离散的数据,并完成实时数据采集^[16]。聚类算法是一种将变量进行划分整理的算法,能够将前期繁杂的各类生产数据进行分类处理,对不连续的数据进行前期归类,便于后期的算法对数据进行处理优化,提高算法整

体的效率。在聚类算法中,K均值聚类算法的性质比较符合环形锻件生产的数据前期处理。K均值聚类算法的应用广泛、分类高效,虽然得出的结果一般是局部最优解,但已经能够满足后期算法对数据的分类要求。

在后期处理阶段可供选择的算法有很多,可用全局最优解和局部最优解对其进行分类,两类中的代表分别为深度优先搜索算法(Deep Firstly Search Algonthen, DFSA)和贪心算法。算法的选择则需要考虑精确度以及效率之间的平衡问题。对于环形锻件的生产,如果追求全局最优解,所需要的时间以及算力的投入十分巨大,尤其是在工序繁杂的情况下。相比于优化程度做到全局最优解所需的最长时间,各步骤均得到局部最优解所需的时间较短,在得到较好优化效果的同时,使生产效率得到了保证。所以,在DFS与贪心算法中,选择贪心算法作为后期的主要优化算法,为每一步工序寻找对应的下一步工序,下一步工序的选择条件是拥有与本工序的出炉温度差距最小的入炉温度,算法流程图如图1所示。

3 模型建立

3.1 参数选择

加热炉是环形锻件加热环节中的主要设备,是整体生产中的主要能源消耗设备^[17]。在加热过程中,锻件进入加热炉后,从入口到出口的过程中,锻件持续缓慢移动同时被加热。此外,锻件进入加热炉直至加热结束的过程中,无法改变锻件的前后顺序^[18]。从锻件进入加热炉至锻件离开加热炉所用的时间称作锻件驻炉时间,锻件开始进入加热炉时加热炉的温度为锻件的入炉温度,锻件离开加热炉时加热炉的温度为锻件的出炉温度。

在整个锻件生产过程中,占用能源消耗比率最大的环节是锻坯的装炉加热过程,在其他环节如捶打以及机加工所产生的能耗占比远远小于其生产的能耗。因此,合理安排锻坯的出入炉顺序,尽可能缩小不同工序间出入炉温度的差值,减少加热炉未装载锻件情况下的加热升温次数,能够有效地降低加热炉的热量损失,从而实现环形锻件生产过程低能耗的目标。

假设有 n 道工序,分别为第1、2、……、 n 道工序,设每道工序的入炉温度为 T 、出炉温度为 t ,则第1道工序的入炉温度为 T_1 、出炉温度为 t_1 ;第

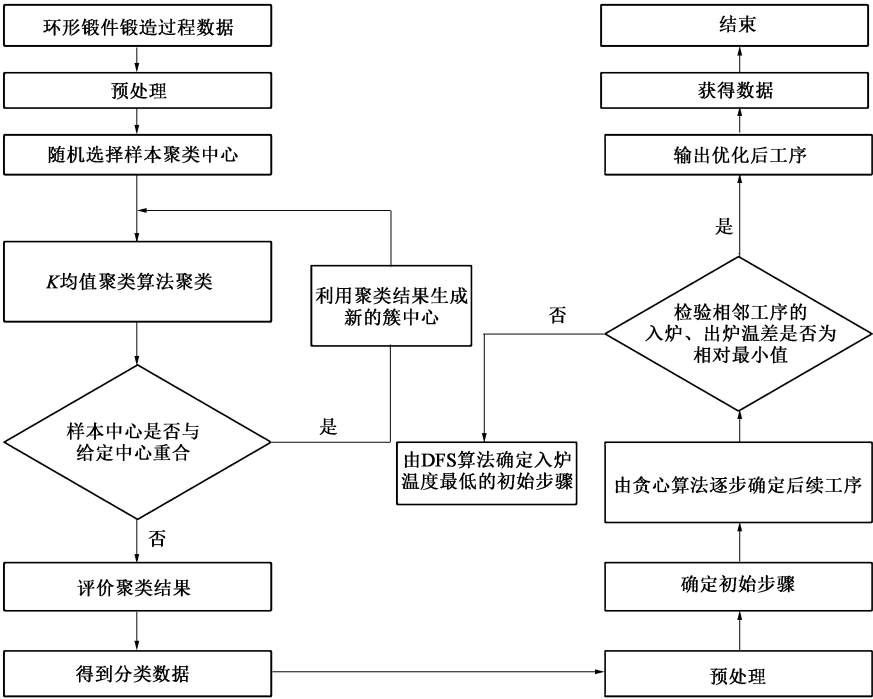


图 1 贪心算法流程图

Fig. 1 Flow chart of greedy algorithm

2 道工序的入炉温度为 T_2 、出炉温度为 t_2 ；第 n 道工序的入炉温度为 T_n 、出炉温度为 t_n 。上述数据均包含在整体环形锻件数据中，整体数据分类有：锻件编号、工序号、锻件入炉温度、锻件出炉温度、锻件加热时长。

故出现以下变量：加热炉工序编号 i ， $i = 1, 2, \dots, n$ ；第 i 道工序入炉温度 T_i ；第 i 道工序出炉温度 t_i 。

3.2 建立模型

为实现环形锻件锻造生产过程中加热环节的节能目标，建立以加热炉在空置状态下提升的温度为目标函数的节能调度模型，首先进行单加热炉排产调度的研究，设置单一加热炉，单次仅加热单一品类产品；对于各产品，将其加热过程抽象为入炉温度和保温温度；对于加热过程，将放入、拿出产品的时间和温度损耗忽略不计；对模型进行分析，因每个部件的加热过程无法变更，无法优化加热过程，故模型的优化目标设定为减少相邻加热部件之间所需的加热炉工作温度的差值，即减少前一锻件保温温度与后一部件入炉温度之间的温差，通过减少加热炉浪费的加热时间以降低能耗。

部分核心优化算法如下（不包括 K 均值聚类算法的分类过程）：

```
#include <bits/stdc++.h>
using namespace std;
int main ()
{
    int n;
    int Frist;
    cin>>n;
    int gongxu [n];
    for (int i=1, i<=n, i++)
    {
        int Ti;
        cin>>Ti;
        int ti;
        cin>>ti;
    }
    for (i=1, i<=n, i++)
    {
        if (Ti<=Ti+1)
            Frist=i;
    }
    gongxu [0] = Frist;
    int cha1;
    int cha2;
    int j;
    for (j=1, j<n, j++)
```



```
{
for (i=1, i<=n, i++)
{
    if (i==gongxu [j-1] )
        continue;
    cha1=abs (tgongxu[j-1]-Ti);
    cha2= abs (tgongxu[j-1]-Ti+1);
    if (cha1<=cha2)
        gongxu [j] =i;
}
}
for (i=1, i<=n, i++)
{
    cout<<gongxu [i] <<endl;
}
return 0;
}
```

该程序输出的不同数字的顺序，代表了此数字对应工序在生产过程中的先后顺序。

将优化结果抽象为加热炉在空置状态下提升的温度，选取多组待生产锻件作为样例，输入数据的格式编码依次为锻件编号、工序号、锻件入炉温度、锻件出炉温度、锻件加热时长。

4 实验结果与分析

4.1 优化前结果分析

由表 1 和图 2 可以看出，模拟人工操作加热炉的结果并不理想，显然加热升温在生产中是一个极其耗费能源的行为，而维持某一温度比升温过程更节能，所以，优化前工序的排列使得加热炉内温度反复升高，造成能源的浪费，导致不必要的加热温度高达 1030 ℃。

4.2 优化后结果分析

由表 2 和图 3 可以看出，经过调度算法优化后的生产结果相比于优化前而言，节能效果十分明显，无效加热温度仅 440 ℃，加热炉内温度整体先升后降，避免了不必要的加热造成的能源浪费。

图 4 为优化前后生产过程中的炉温变化。显而易见，优化前的炉温多次反复升降，造成不必要的损耗，尤其在两次波谷位置造成的能耗非常严重；而优化后的炉温整体呈稳步上升趋势，随生产结束后温度骤降，整个生产过程中基本未出现大幅的能耗现象。优化前后的加热炉在空转时造成的能耗差距达到 57.28%。

表 1 模拟人工操作加热炉的排产结果
Table 1 Scheduling results of simulated artificial operated heating furnace

锻件编号	工序号	炉温/℃	保温时间/	加热后炉温/
			min	℃
028	31	0 → 50 → 380	470	380
001	31	380 → 750 → 1150	50	1150
019	41	1150 → 890 → 1020	130	1020
019	51	1020 → 750 → 1150	40	1150
022	41	1150 → 750 → 1100	150	1100
028	41	1100 → 50 → 300	290	300
025	41	300 → 750 → 1030	250	1030
004	31	1030 → 460 → 510	160	510
022	51	510 → 750 → 1150	50	1150
025	51	1150 → 750 → 1150	90	1150
016	41	1150 → 1070 → 1070	140	1070
001	41	1070 → 750 → 1150	30	1150
013	41	1150 → 1050 → 1050	120	1050
007	31	1050 → 440 → 460	320	460
004	51	460 → 460 → 510	110	510
007	51	510 → 440 → 460	270	460
010	31	460 → 420 → 440	700	440
010	51	440 → 420 → 440	490	440
010	61	440 → 420 → 440	490	440

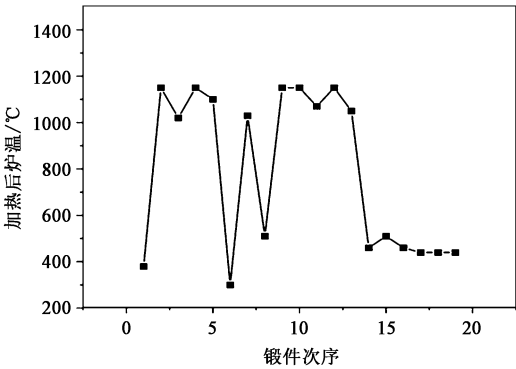


图 2 优化前生产过程中的炉温变化
Fig. 2 Changes of furnace temperature during production process before optimization

5 结语

调度问题是生产管理中十分重要的环节，本文在详细考虑环形锻件生产及动态调度研究现状的前提下，对环形锻件生产过程中加热环节的调度优化进行了深入研究。在产品分析、算法优化以及模型建立过程中，兼顾了环形锻件生产加热环节中的数

表 2 优化算法的优化排产结果

Table 2 Optimized scheduling results of optimization algorithm

锻件编号	工序号	炉温/℃	保温时间/ min	加热后炉温/ ℃
028	31	0 → 50 → 380	470	380
010	31	380 → 420 → 440	700	440
007	31	440 → 440 → 460	320	460
004	31	460 → 460 → 510	160	510
004	51	510 → 460 → 510	110	510
007	51	510 → 440 → 460	270	460
010	51	440 → 420 → 440	490	440
010	61	440 → 420 → 440	490	440
025	41	440 → 750 → 1030	250	1030
013	41	1030 → 1050 → 1050	120	1050
016	41	1050 → 1070 → 1070	140	1070
019	41	1070 → 890 → 1020	130	1020
025	51	1020 → 750 → 1150	90	1150
022	41	1150 → 750 → 1100	150	1100
022	51	1100 → 750 → 1150	50	1150
019	51	1150 → 750 → 1150	40	1150
001	31	1150 → 750 → 1150	50	1150
001	41	1150 → 750 → 1150	30	1150
028	41	1150 → 50 → 300	290	300

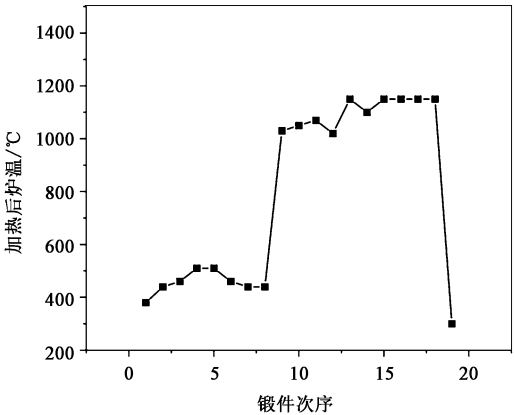


图 3 优化后生产过程中的炉温变化

Fig. 3 Changes of furnace temperature during production process after optimization

据种类繁多、数据量大等特点，最终建立以加热炉空置状态下提升的温度为目标函数、以锻件出入炉温度为主要参数的节能调度模型，得到实验数据，完成环形锻件生产加热环节的调度优化分析。

实验结果表明，调度模型的建立对环形锻件生产过程中加热环节的能耗降低具有显著作用，设计

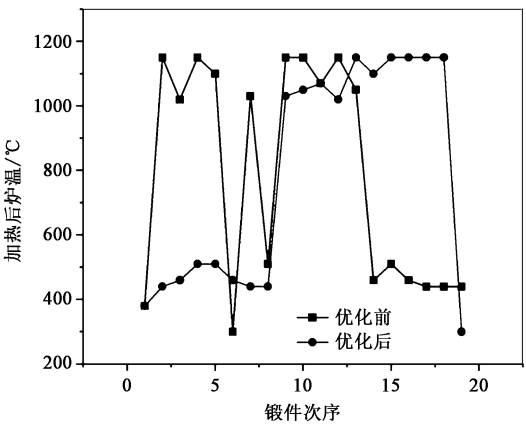


图 4 优化前后生产过程中的炉温变化对比

Fig. 4 Comparison of furnace temperature change during production process before and after optimization

了相应的生产过程节能优化方案，也为解决其他品种锻件成形过程中加热环节的能耗问题提供了新思路。

参考文献：

[1] 金宏, 殷银银, 刘乐. 航天用超大规格 GH4169 高温合金螺栓热锻工艺 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 55-60.
Jin H, Yin Y Y, Liu L. Hot upsetting process of super-sized superalloy GH4169 bolts for aerospace [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 55-60.

[2] 钱晓龙, 唐立新, 刘文新. 动态调度的研究方法综述 [J]. 控制与决策, 2001, (2): 141-145.
Qian X L, Tang L X, Liu W X. Dynamic scheduling: A survey of research methods [J]. Control and Decision, 2001, (2): 141-145.

[3] Jackson J R. Simulation research on job shop production [J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1957, 4 (4): 287-295.

[4] 周玉龙, 张振, 周永松. 热处理过程智能信息化生产调度技术 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (12): 242-247.
Zhou Y L, Zhang Z, Zhou Y S. Intelligent information production scheduling technology of heat treatment process [J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45 (12): 242-247.

[5] 曾凡昌. 航空锻压技术现状及其发展之思考 [J]. 材料工程, 1998, (6): 3-6.
Zeng F C. Present status and development trend of forging and pressing technique in aviation industry [J]. Journal of Materials Engineering, 1998, (6): 3-6.

[6] 李春辉, 胡振志, 杨戈辉. 厚壁长套锻件成形技术分析 with 生产试制 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (7): 34-41.
Li C H, Hu Z Z, Yang G H. Forming technology analysis and production trail for thick-walled and long sleeve forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (7): 34-41.

[7] 李世山, 周杰, 甘玉平. 高筋极薄壁铝合金锻件精密成形工艺及模具技术 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (9): 299-307.
Li S S, Zhou J, Gan Y P. Intelligent management and control

- technology for dynamic disturbance factors in production of complex ring forgings in aerospace [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (9): 299-307.
- [8] 王宸, 唐禹, 张秀峰, 等. 基于改进 EfficientNet 的锻件磁粉探伤智能检测方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42 (9): 89-96.
- Wang C, Tang Y, Zhang X F, et al. An intelligent magnetic particle testing method for forgings based on the improved EfficientNet [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42 (9): 89-96.
- [9] 王梦寒, 向相, 李松林. 基于航空盘类件成形规律的预成形设计方法及其自动化实现 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2021, 52 (10): 3429-3438.
- Wang M H, Xiang X, Li S L. Pre-forming design method and its automation realization based on forming law of aviation disc [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2021, 52 (10): 3429-3438.
- [10] Karo Fathollahzadeh, Elham Mardaneh, Mehmet Cigla, et al. A mathematical model for open pit mine production scheduling with Grade Engineering © and stockpiling [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2021, 31 (4): 717-728.
- [11] Joost Berkhout, Eric Pauwels, Rob van der Mei, et al. Short-term production scheduling with non triangular sequence-dependent setup times and shifting production bottlenecks [J]. International Journal of Production Research, 2021, 59 (3/4): 727-751.
- [12] Dimitris Mourtzis, Boli N, Xanthakis E, et al. Energy trade market effect on production scheduling: An Industrial Product-Service System (IPSS) approach [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2021, 34 (1/3): 76-94.
- [13] Elisa Negri, Vibhor Pandhare, Laura Cattaneo, et al. Field-synchronized digital twin framework for production scheduling with uncertainty [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2021, 32 (4): 1207-1228.
- [14] Sajad Karimi, Soongeol Kwon, Fuda Ning. Energy-aware production scheduling for additive manufacturing [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 123183.
- [15] Hamed Kazemi, Mohammad Mahdavi Mazdeh, Mohammad Rostami, et al. The integrated production-distribution scheduling in parallel machine environment by using improved genetic algorithms [J]. Journal of Industrial and Production Engineering, 2021, 38 (3): 157-170.
- [16] 贺小毛, 崔磊, 翟月雯. 自动化锻造生产线实时数据采集和分析系统 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (2): 14-18.
- He X M, Cui L, Zhai Y W. Real-time data acquisition and analysis system of automated forging production line [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (2): 14-18.
- [17] 谭园园, 宋健海, 刘士新. 加热炉优化调度模型及算法研究 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28 (11): 1549-1557.
- Tan Y Y, Song J H, Liu S X. Model and algorithm for scheduling reheating furnace [J]. Control Theory & Applications, 2011, 28 (11): 1549-1557.
- [18] 李靖南, 董瑞峰, 陈子帅. 梯度加热工艺对自由锻 GH4720Li 高温合金成形性能的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (2): 162-168.
- Li J N, Dong R F, Chen Z S. Formability of free forging GH4720Li superalloy with different gradient heating process [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (2): 162-168.

