

自动化集装箱码头装卸系统的协同调度优化^{*}

□ 栾晨 □ 韩笑乐

同济大学 机械与能源工程学院 上海 201804

摘要:为提高自动化集装箱码头装卸系统多阶段混合作业的效率,将双循环模式下的岸边吊桥-自动引导车-场地吊桥协同调度问题抽象为混合整数规划模型,利用基于启发式的自适应遗传算法进行求解,以达到优化集装箱任务集合完成时间的目的。通过数值试验验证了所提出模型与算法的有效性。

关键词:码头 装卸 调度 自适应遗传算法

中图分类号:TH24

文献标志码:A

文章编号:1000-4998(2018)04-0084-05

Abstract: In order to improve the efficiency of multi-stage mixing operation of loading and unloading system in automated container terminal, the coordinated scheduling of QC-AGV-YC in dual-cycle mode was abstracted as mixed integer programming model. The heuristic adaptive GA was used for solving, so as to achieve the goal i.e. optimization of the collection completion time of container tasks. The validity of the proposed model and algorithm was verified by numerical experiments.

Key Words: Wharf Loading and Unloading Scheduling Adaptive GA

1 研究背景

自动化集装箱码头因安全性、可靠性、作业效率和场地利用效率高,环境友好,以及人力成本低等显著优点,已在世界很多港口实现应用。自动导引车(AGV)、岸边吊桥(QC)、场地吊桥(YC)作为核心装卸运输设备,三者间的协同作业效率对自动化集装箱码头的整体效率有至关重要的影响,因此关于码头装卸系统调度的研究和应用,也一直受到业界关注。在现有的文献^[1-6]中,大部分研究仅针对单类或两类设备进行调度,并假设其它设备不构成瓶颈,这一假设与实际情况存在差异。另有部分研究^[7-14]考虑了三类设备的集成调度,但仅设定单装单卸作业模式,不能有效提升双循环操作下的设备利用率。针对这一现状,笔者研究了三类设备的装卸混合作业模式,考虑装卸任务的并行操作、任务间顺序约束和双循环作业,通过建立数学规划模型和设计启发式算法,对三类设备的集成调度进行优化,以提高自动化集装箱码头装卸系统整体的协同作业效率。

2 问题描述

在自动化集装箱码头装卸作业过程中,将集装箱任务经过QC、AGV和YC,并运送至堆场的过程称为一个卸载过程。反之,将集装箱任务经过YC、AGV和

QC,并运送至船舶的过程称为一个装载过程。由于在装卸系统中没有设置缓冲区,设备间在任务交接时可能存在互相等待。考虑到在装卸系统调度问题中QC和YC的对称性,将此两类设备统一称为Crane,以简化模型表述。对其它问题设置进行描述。

(1) 作业任务。已知信息包括装卸箱的运输起始点、装载量,集装箱任务之间存在预定义顺序约束。

(2) 时间参数。所有固定时间设定为常量,可变时间设置为起始点与目的点之间距离的正比,不考虑不同转运设备之间的运行速率差异。

(3) 资源配置。AGV的数量和位置已知,假定QC装卸任务时间恒定,任意车道及任意QC之间通行时间已知,同一堆场或岸桥既有卸载任务的集装箱,也有装载任务的集装箱。

3 建模

$N=\{0,1,\dots,i,j,\dots,n,n+1\}$,为任务集合,包括了虚拟的初始和终止变量; $0,n+1$ 。

$V=\{1,\dots,k,|V|\}$,为AGV集合。

$C=\{1,\dots,l,\dots,|C|\}$,为Crane集合,包括QC、YC。

T_j 为AGV从任务 j 接货点行驶至送货点所需的时间。

S_{ij} 为AGV从任务 i 送货点行驶至任务 j 接货点所需的时间。

H^p 为接货的任务交接时间。

H^d 为送货的任务交接时间。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(编号:71502129)

收稿日期:2017年11月

$$L_{jl}^P = \begin{cases} 1 & \text{任务 } j \text{ 在 Crane } l \text{ 上进行接货操作} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$L_{jl}^D = \begin{cases} 1 & \text{任务 } j \text{ 在 Crane } l \text{ 上进行送货操作} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$P_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{任务 } i \text{ 和 } j \text{ 同属于 Crane } l, \text{ 且存在先后关系} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

D_{jl} 为 Crane l 上连续任务 i 和 j 的时间差, 存在以下四种情况:

(1) i 为接货, j 为接货, 为一次取箱的往返时间;

(2) i 为接货, j 为送货, 为取箱完成后继续送箱时间, 可视为 0;

(3) i 为送货, j 为接货, 为送箱并取箱往返的时间, 属双循环;

(4) i 为送货, j 为送货, 为一次送箱的往返时间。

建模时, 设 M 为足够大的数。

模型中的决策变量如下:

$$x_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{任务 } j \text{ 由 AGV } k \text{ 执行} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{任务 } i \text{ 和 } j \text{ 均由 AGV } k \text{ 执行} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$z_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{AGV } k \text{ 先完成任务 } i, \text{ 再完成任务 } j \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$u_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{AGV } k \text{ 先完成任务 } i, \text{ 紧接着完成 } j \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$q_{ijl} = \begin{cases} 1 & \text{Crane } l \text{ 先完成任务 } i, \text{ 紧接着完成任务 } j \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

s_j 为任务 j 的接货时间。

c_j 为任务 j 的送货时间。

模型中的目标函数为:

$$\min Z = c_{n+1} \quad (1)$$

笔者所研究问题的目标是总运输时间最少化。由于任务具有连续性, 因此最后一个虚拟终止任务的结束时间即为总运输时间。

模型中的约束如下:

$$\forall j \in N, j \neq 0, n+1$$

$$\sum_{k \in V} x_{jk} = 1 \quad (2)$$

$$\forall i, j \in N, i \neq j, \forall k \in V$$

$$0.5(x_{ik} + x_{jk} - 1) \leq y_{ijk} \leq 0.5(x_{ik} + y_{jk}) \quad (3)$$

$$\forall i, j \in N, i \neq j, \forall k \in V$$

$$z_{ijk} + z_{jik} = y_{ijk} \quad (4)$$

$$\forall i, j \in N, i \neq j, \forall k \in V$$

$$z_{jik} \geq u_{ijk} \quad (5)$$

$$\forall j \in N, j \neq 0, \forall k \in V$$

$$u_{j0k} = 0 \quad (6)$$

$$\forall k \in V$$

$$\sum_{j \neq 0, j \in N} u_{0jk} = 1 \quad (7)$$

$$\forall j \in N, j \neq n+1, \forall k \in V$$

$$u_{n+1, j, k} = 0 \quad (8)$$

$$\forall k \in V$$

$$\sum_{j \neq n+1, j \in V} u_{j, n+1, k} = 1 \quad (9)$$

$$\forall j \in N, j \neq 0, \forall k \in V$$

$$\sum_{i \neq j, i \in N} u_{ijk} - (x_{jk} - 1)M \geq 1 \quad (10)$$

$$\forall j \in N, j \neq n+1, \forall k \in V$$

$$\sum_{i \neq j, i \in N} u_{ijk} - (x_{jk} - 1)M \geq 1 \quad (11)$$

$$\forall j \in N, \forall k \in V$$

$$0.5 \left(\sum_{i \neq j, i \in N} u_{ijk} + \sum_{i \neq j, i \in N} u_{jik} \right) \leq x_{jk} \\ \leq 0.5 \left(\sum_{i \neq j, i \in N} u_{ijk} + \sum_{i \neq j, i \in N} u_{jik+1} \right) \quad (12)$$

$$\forall i, j \in N, i \neq j, \forall k \in V$$

$$s_j + (1 - u_{ijk})M \geq c_i + s_{ij} + H^P \quad (13)$$

$$\forall i, j \in N, i \neq j, \forall l \in C$$

$$s_j + (1 - q_{ijl})M \geq c_i L_{il}^D + s_i L_{il}^P + D_{ijl} + H^P \quad (14)$$

$$\forall j \in N$$

$$c_j \geq s_j + T_j + H^D \quad (15)$$

$$\forall i, j \in N, i \neq j, \forall l \in C$$

$$c_j + (1 - q_{ijl})M \geq c_i L_{il}^D + s_i L_{il}^P + D_{ijl} + H^D \quad (16)$$

$$\forall j \in N, j \neq 0, \forall l \in C$$

$$q_{i0l} = 0 \quad (17)$$

$$\forall l \in C$$

$$\sum_{j \neq 0, j \in N} q_{0jl} = 1 \quad (18)$$

$$\forall j \in N, j \neq n+1, \forall l \in C$$

$$q_{n+1, j, l} = 0 \quad (19)$$

$$\forall l \in C$$

$$\sum_{j \neq n+1, j \in N} q_{j, n+1, l} = 1 \quad (20)$$

$$\forall j \in N, j \neq 0, \forall l \in C$$

$$\sum_{i \neq j, i \in N} q_{ijl} - (L_{il}^D + L_{il}^P - 1)M \geq 1 \quad (21)$$

$$\forall j \in N, j \neq n+1, \forall l \in C$$

$$\sum_{i \neq j, i \in N} q_{ijl} - (L_{il}^D + L_{il}^P - 1)M \geq 1 \quad (22)$$

$$\forall j \in N, \forall l \in C$$

$$0.5 \left(\sum_{i \neq j, i \in N} q_{ijl} + \sum_{i \neq j, i \in N} q_{jil} \right) \leq L_{il}^D + L_{il}^P \leq 0.5 \left(\sum_{i \neq j, i \in N} q_{ijl} + \right.$$

$$\sum_{i \neq j, i \in N} q_{ji} + 1) \quad (23)$$

式(2)表示每个任务只能由一台 AGV 完成。式(3)~式(5)表示 x, y, z, u 的关系。式(6)~式(9)保证每台 AGV 先完成任务 0, 最后完成任务 $n+1$ 。式(10)、式(11)限制每个任务前后有且只有一个任务。式(12)表示每台 AGV 依次连续完成各个任务。式(13)和式(14)表示任务的接货时间选取接货点处 Crane 和 AGV 可用时间中的大值。式(15)和式(16)表示任务的送货时间选取送货点处 Crane 和 AGV 可用时间中的大值。式(17)~式(23)表示 Crane 的调度约束, 类似于 AGV 的调度约束。

4 算法设计

基于遗传算法搜索框架进行定制化算法设计。染色体编码为任务的初始执行顺序, 遗传操作、适应度函数及自适应算法采用文献[15]中的方法。解码采用基于任务顺序约束与染色体编码任务序列的启发式算法: 结合任务顺序约束和染色体编码任务序列运用启发式算法确定任务执行顺序, 顺序确定后对 QC、YC 和 AGV 进行协同调度, 逐步安排所有任务。算法整体框架如图 1 所示。

4.1 自适应遗传算法流程

给定初始参数, 包括最大迭代步数 λ_{\max} 、当前迭代步数 λ 、群体规模 n 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 、当前全局最优解未发生变化的代数 ϕ 、判断是否发生早熟的阈值 δ 。遗传迭代中第 λ 代群体中第 k 个染色体用 x_k^λ 表示, 第 λ 代群体中的最优解称为当代最优解 x_{best}^λ , 算法截至第 λ 代得到的最优解为当前全局最优解 x_{best} 。

(1) 初始化染色体种群 $\{x_1^\lambda, x_2^\lambda, \dots, x_n^\lambda\}$, 令 $\lambda=0$, 当前 $x_{\text{best}}=x$, $\delta=0$ 。

(2) 判断 λ 是否 $\leq \lambda_{\max}$, 若是, 转第(3)步; 否则, 转第(9)步。

(3) 执行启发式算法, 若 $x_{\text{best}}^\lambda < x_{\text{best}}$, 即当前最优解优于当前全局最优解, 令 $x_{\text{best}}=x_{\text{best}}^\lambda$; 否则, 令 $\phi+1$ 。

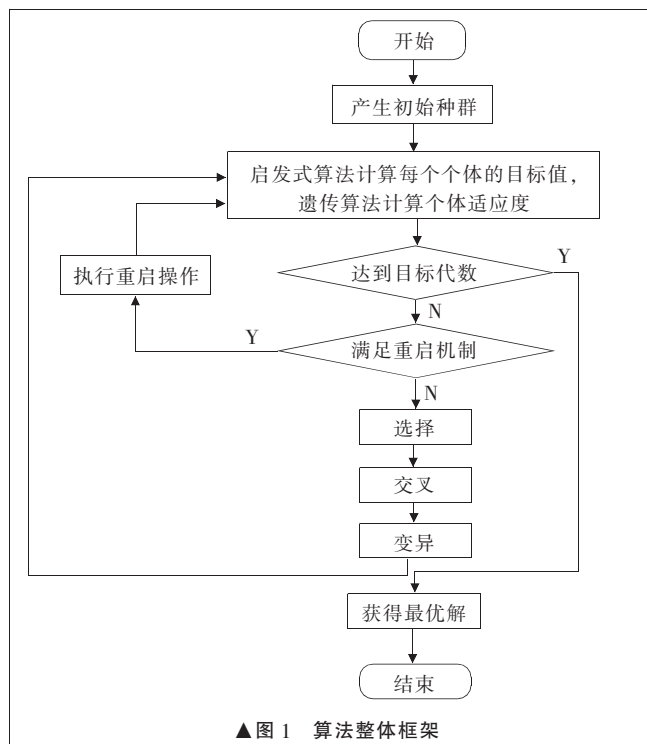
(4) 若 $\phi > \delta$, 表明当前全局最优解未改进, 调用重启机制。

(5) 计算每个个体的适应度值, 轮盘赌方式选择新的个体。

(6) 计算 P_c 和 P_m , 对种群中的个体进行交叉和变异。

(7) 计算每个个体新的目标值。

(8) 得到新一代种群, 令 $\lambda+1$, 转第(2)步。



(9) 满足终止条件, 输出 x_{best} 。

4.2 启发式算法流程

(1) 执行任务生成子算法, 得到当前需要执行的任务 j 。

(2) 计算 s_{ij} 。由 AGV 前序任务矩阵 M_V 确定该 AGV 前序任务的 Crane l_2 , 计算与本任务的 Crane l_1 的距离, 由距离计算出时间。

(3) 计算 s_j 。根据 M_V 、Crane 前序任务矩阵 M_C 得出 c_j , 若 Crane l_1 前序任务为接货, 则 $s_j = \max(s_{i_1} + D_{i_1 l_1}, c_i + S_{ij}) + H^p$ 。若 Crane l_1 前序任务为送货, 则 $s_j = \max(c_{i_1} + D_{i_1 l_1}, c_i + S_{ij}) + H^p$ 。

(4) 计算 c_j 。若 Crane l_2 的前序任务为接货, 则 $c_j = \max(s_{i_2} + D_{i_2 l_2}, s_i + T_j) + H^p$ 。若 Crane l_2 的前序任务为送货, 则 $c_j = \max(c_{i_2} + D_{i_2 l_2}, s_i + T_j) + H^p$ 。

(5) 计算所有可用 AGV 对应的 s_j 和 c_j , 找出 c_j 最小且编号靠前的 AGV, 作为该任务的运输车辆。

(6) 执行任务并行子算法, 得到修正的 s_j 和 c_j , 以及更新的 AGV 信息。

(7) 更新 M_V 、 M_C 、任务开始时间矩阵 M_s 、任务结束时间矩阵 M_e 。

(8) 判断是否完成全部任务, 是则停止, 返回最后任务的结束时间; 否则, 转第(1)步。

4.3 任务生成子算法

任务执行顺序编码为 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 已经安排任务数为 a , 预定义任务间顺序约束为 P_{ij} , 记录已经安排任

任务的数组为 P 。

(1) 在 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中从 x_s 任务开始, 若 $\sum_{i \in N} P_{x_i, x_s} = 0$, 令 $\sum_{i \in N} P_{x_i, x_s} = 0$, 则执行任务 x_s , 在 P 中记录 x_s , 令 $a+1$, 转第(4)步; 否则, 令 $s+1$, 转第(2)步。

(2) 检测 x_s 是否在 P 中, 如果不在, 转第(1)步, 否则, 转第(3)步。

(3) 令 $s+1$, 转第(2)步。

(4) 若 $a=n$, 则任务顺序确定, 任务选择结束; 否则, 令 $s=1$, 转第(2)步。

4.4 任务并行子算法

在启发式算法第(1)~第(5)步中, 安排相应的 AGV 完成分配的任务, 但是依据 Crane 前序任务完成后, 再安排后续任务, 不符合实际运作过程出现的并行操作, 为此需要修正对应 Crane 上的任务执行顺序。当前任务 j 接货点处 Crane 上已有任务数为 b , 接货点处 Crane 上已安排任务序列为 $\{w_1, w_i, \dots, w_s\}$ 。

(1) 若 $b>0$, 转第(2)步; 否则, 转第(6)步。

(2) 从虚拟任务 w_i 开始作为任务 $j=w_s$ 的前序任务, 修正 s_j , 判断任务在当前 Crane l_1 上操作, 若是接货且当前 $s_j < s_{w_i+1}$, 转第(3)步; 若是送货且当前 $s_j < s_{w_i+1}$, 转第(3)步; 否则, 令 $i+1$, 重复第(2)步。

(3) 若 $\sum_{i=i+1}^{b-1} P_{w_{j l_1}, w_i} = 0$, 则将当前任务 j 的序列调整为 w_{i+1} , 原 $\{w_{i+1}, \dots, w_{s-1}\}$ 调整为 $\{w_{i+2}, \dots, w_s\}$, 根据更新的 s_j 修正对应的 c_j , 转第(4)步; 否则, 令 $i+1$, 转第(4)步。

(4) 若 $i \leq b-2$, 转第(2)步; 否则, 结束。

(5) 消除当前任务已经选定的 AGV 信息, 依据更新的 s_j 和 c_j 重新选择 AGV。

5 试验与结果分析

基于典型码头配置, 笔者设计了 9 组算例, 每组算例计算 10 个实例, 考虑不同的 QC、YC、AGV 和任务数量, 具体规模分别对应为“1-2-2-10”“1-2-4-10”“1-2-3-6-10”“1-2-2-15”“1-2-4-15”“1-2-6-15”“2-4-6-20”“2-4-8-20”“2-4-10-20”。参数设置时, QC 的新任务取送时间为 180 s, YC 任务的取送时间满足 $[180, 540]$ 均匀分布, AGV 满载和空载的速度都设为 10 m/s, 在接货和送货时都有任务交接时间 30 s, 装卸箱任务比例各为 50% 概率。对于预定义任务顺序约束, 主要采用约束密度控制的方法^[16]来生成, 令优先级密度参数 $\rho=0.4$, 任务 i 、

j 间存在顺序约束的概率 φ_{ij} 为:

$$\varphi_{ij} = \frac{\rho(1-\rho)^{j-i-1}}{1-\rho[1-(1-\rho)^{j-i-1}]} \quad (24)$$

上界采用第一代染色体的最优值作为对比对象, 下界采用 Cplex 优化软件求出的调度问题精确解作为对比对象, 由此能反映算法的实际效果。运行数值试验的电脑配置为中央处理器频率 3.5 GHz, 内存 16 GB, 编程语言为 C#。表 1 中数据是 9 组算例的平均结果, 并以 T_{GA} 和 T_{Cplex} 分别表示遗传算法运算时间和 Cplex 软件运算时间。

由表 1 可知, 在不同任务规模下, 应用笔者所提出算法得到的结果相比上界有较大提升, 平均改善幅度为 8.4%。同时对比应用 Cplex 求解软件所得出的精确解, 最优差距在 4% 之内。由此可见, 笔者提出的算法能很好地安排调度任务。对于实际运作中的实时性要求, T_{GA} 相比 T_{Cplex} 有明显优势。

6 结论

针对自动化集装箱码头装卸系统三类设备在装卸混合模式下的协同调度问题, 建立了相应的数学优化模型, 并设计基于启发式的自适应遗传算法, 经试验验证, 笔者所提出的协同调度方法能为码头运作提供有效的调度决策支持。

参考文献

- [1] LEE D H, WANG H Q, MIAO L X. Quay Crane Scheduling with Non-interference Constraints in Port Container Terminals [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2008, 44(1): 124-135.
- [2] 赵海英, 姚振强, 陈斌. 自动化无人空箱堆场轨道式龙门吊装卸作业的策略规划 [J]. 机械制造, 2006, 44(5): 53-55.
- [3] HOMAYOUNI S M, TANG S H. Multi Objective Optimization of Coordinated Scheduling of Cranes and Vehicles at Container Terminals [J]. Mathematical Problems in Engin-

表 1 试验结果

任务规模	算法结果/s	上界/s	下界/s	T_{GA}/s	T_{Cplex}/s	改善幅度	最优差距
1-2-2-10	2 135	2 327	2 122	1.8	2.6	8.25%	0.61%
1-2-4-10	2 057	2 240	2 040	9.8	11.4	8.17%	0.83%
1-2-6-10	2 057	2 276	2 040	10.6	23.1	9.62%	0.83%
1-2-2-15	2 819	3 043	2 725	16.1	1 345	7.36%	3.45%
1-2-4-15	2 740	3 017	2 692	18.7	541	9.18%	1.78%
1-2-6-15	2 740	3 045	2 693	18	337	10.02%	1.75%
2-4-6-20	2 234	2 411	2 214	10.5	278	7.34%	0.90%
2-4-8-20	2 232	2 408	2 214	11.4	2 542	7.31%	0.81%
2-4-10-20	2 234	2 446	2 214	10	744	8.67%	0.90%

- ering, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/746781>.
- [4] 周贤德, 邱惠清. 基于位移同步的岸桥模型卷扬提升控制[J]. 机械制造, 2013, 51(6): 24-27.
- [5] CHEN L, LANGEVIN A, LU Z Q. Integrated Scheduling of Crane Handling and Truck Transportation in a Maritime Container Terminal[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 225(1): 142-152.
- [6] 王毓聪, 吴家麒, 袁政鹏, 等. 港口集装箱起吊的自动监控[J]. 机械制造, 2009, 47(6): 72-75.
- [7] CHEN L, BOSTEL N, DEJAX P, et al. A Tabu Search Algorithm for the Integrated Scheduling Problem of Container Handling Systems in a Maritime Terminal[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 181(1): 40-58.
- [8] LAU H Y K, ZHAO Y. Integrated Scheduling of Handling Equipment at Automated Container Terminals[J]. International Journal of Production Economics, 2008, 112(2): 665-682.
- [9] HOMAYOUNI S M, VASILI M R, KAZEMI S M, et al. Integrated Scheduling of SP-AS/RS and Handling Equipment in Automated Container Terminals[C]. 42nd Conference of Computers and Industrial Engineering (CIE42), Cape Town, 2012.
- [10] 梁亮, 陆志强. 集装箱码头装卸系统集成调度的建模与优化[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(3): 476-483.
- [11] 曾庆成, 杨忠振. 集装箱码头集成调度模型与混合优化算法[J]. 系统工程学报, 2010, 25(2): 264-270.
- [12] 王力, 陆志强. 单装单卸模式下集装箱装卸系统集成调度优化[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2013, 29(6): 699-703.
- [13] MEERSMANS P J M, WAGELMANS A P M. Effective Algorithms for Integrated Scheduling of Handling Equipment at Automated Container Terminals[R]. Rotterdam: Erasmus Research Institute of Management, 2001.
- [14] 王力. 集装箱码头装卸系统三阶段设备集成调度优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [15] 桂小娅, 陆志强, 韩笑乐. 集装箱码头连续型泊位与岸桥集成调度[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(2): 226-229.
- [16] HALL N G, POSNER M E. Generating Experimental Data for Computational Testing with Machine Scheduling Applications[J]. Operations Research, 2001, 49(6): 854-865.



作者简介:

栾晨(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为工业工程及运作优化。
(编辑 小 前)

(上接第 63 页) 作为基体的回火屈氏体因形成时的位向不同, 出现了众多位向不同的回火屈氏体团, 试样 D1 经机加工后形成的表面粗糙度值较试样 A3 大。试样 C2 采用 760 ℃、70 min 加热, 690 ℃、60 min 等温, 随炉冷却热处理工艺, 其金相组织为粒状渗碳体加铁素体。相比于试样 A3, 试样 C2 粒状渗碳体尺寸较大, 颗粒不均匀。分布也不均匀, 试样 C2 经机加工后形成的表面粗糙度值较试样 A3 和 D1 大。

4 结论

T9 钢经正火、退火、球化退火、淬火+中温回火、正火+高温回火五种热处理工艺, 再经机加工后可获得不同的表面粗糙度。其中 760 ℃、50 min 正火, 600 ℃、40 min 回火热处理工艺测得的表面粗糙度值 R_a 与 R_z 最小; 740 ℃、50 min 加热, 随炉冷却热处理工艺测得的表面粗糙度值 R_a 与 R_z 次之; 760 ℃、70 min 加热, 690 ℃、60 min 等温, 随炉冷却热处理工艺测得的表面粗糙度值 R_a 与 R_z 最大; 其余处在中位。

参考文献

- [1] 赵霞, 郭建亮, 杨勋. 外圆磨削表面粗糙度的智能控制[J]. 机械制造, 2014, 52(9): 29-31.
- [2] 姚奉娣, 宋鹏云, 李伟, 等. 不同表面形貌模数 γ 的粗糙度

对气膜机械密封性能的影响研究[J]. 机械制造, 2008, 46(8): 26-28.

- [3] 蒋冬梅. 电火花加工中测量加工参数对表面粗糙度影响的实验研究[J]. 机械制造, 2010, 48(12): 79-81.
- [4] 郭峰, 程晓芳. 拉削键槽时侧面粗糙度的影响因素分析[J]. 机械制造, 2015, 53(7): 80-81.
- [5] 邓朝晖, 程文涛. 基于神经网络的成形磨削表面粗糙度的研究[J]. 机械制造, 2006, 44(7): 39-40.
- [6] 王持红. 热处理工艺参数对等温淬火球墨铸铁切削加工性能影响的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2010.
- [7] 崔占全, 王昆林, 吴润. 金属学与热处理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010.
- [8] 刘英, 袁绩乾. 机械制造技术基础[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [9] 寇元哲. 影响机械加工表面质量的因素分析[J]. 甘肃科技, 2007, 23(7): 98-100.
- [10] 刘宗昌, 于键, 郝少祥. P20 塑料模具钢的组织对抛光性能的影响[J]. 特殊钢, 2004, 25(5): 19-21.



作者简介:

郝少祥(1965—), 男, 副教授, 主要研究方向为合金钢热处理工艺。

(编辑 志 强)

