

基于田口方法的钛合金熔炼稳弧磁场工艺参数优化研究

郑亚波 毛玲玲
(宝鸡钛业股份有限公司)

摘 要 针对 TC4 合金铸锭中 Fe 元素头、底差异性较大的问题,采用田口试验方法,对钛合金熔炼稳弧磁场工艺参数进行优化设计,研究稳弧磁场的电流大小和交变时间对 TC4 合金中杂质元素 Fe 成分均匀性的影响。根据试验结果,通过信噪比和方差分析,发现稳弧交变时间对 TC4 铸锭单锭 Fe 含量极差值的影响程度较为显著。选用试验设计确定的最优工艺参数组合进行试验验证,所生产的 TC4 铸锭单锭中,Fe 含量极差值由原来平均 0.04% 降至 0.01%。通过对钛合金熔炼稳弧磁场工艺参数进行优化,提高了 TC4 铸锭的成分均匀性。

关键词 VAR; TC4; 稳弧磁场; 田口方法; 均匀性

中图分类号 TF132; TG146.23; TM15 **文献标志码** A

DOI: 10.15980/j.tzzz.2023.010.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Process Parameter Optimization of Arc Stabilizing Magnetic Field for Titanium Alloy Smelting Based on Taguchi Method

Zheng Yabo, Mao Lingling
(Baoji Titanium Industry Co., Ltd.)

Abstract: In view of the large difference between head and bottom of Fe in TC4 alloy single ingot, the process parameters of arc stabilizing magnetic field in titanium alloy melting were optimized by Taguchi method, and the influence of current and alternating time of arc stabilizing magnetic field on homogeneity of impurity element Fe in TC4 alloy was investigated. The results reveal that the effects of arc stability alternating time on the Fe content range of TC4 ingot is significant through the signal-to-noise ratio and variance analysis. The optimal process parameter combination determined by the test design was selected and verified, and the average range of Fe content in TC4 ingot is reduced from the 0.04% to 0.01%, indicating the improvement of homogeneity of TC4 ingot by optimizing the process parameters of arc stabilizing magnetic field in titanium alloy melting.

Key Words: VAR, TC4, Arc Stabilizing Magnetic Field, Taguchi Method, Homogeneity

收稿日期: 2023-03-31; 修改稿收到日期: 2023-08-14

基金项目: JPPT 项目(JPPT-135-GH-2-016)

第一作者简介: 郑亚波, 男, 1986 年出生, 高级工程师, 陕西宝鸡(721014), E-mail: yabozheng@163.com

引用格式: 郑亚波, 毛玲玲. 基于田口方法的钛合金熔炼稳弧磁场工艺参数优化研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(10): 1430-1434.

ZHENG Y B, MAO L L. Process parameter optimization of arc stabilizing magnetic field for titanium alloy smelting based on taguchi method [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(10): 1430-1434.

[7] 王祎, 贾文雅, 尹雪婷, 等. 人工神经网络的发展及展望[J]. 智慧城市, 2021, 7(8): 12-13.

[8] 王昱琛, 杨仕教, 郭钦鹏, 等. 基于 MPA-SVM 的煤矿抛掷爆破爆堆形态预测[J]. 爆破器材, 2023, 52(1): 58-64.

[9] 闫浩思, 赵文杰. 基于 MIC 和 MPA-KELM 的脱硫出口 SO₂ 浓度预测[J]. 计量学报, 2023, 44(2): 271-278.

[10] 郭宏晨, 许四祥, 孙杰, 等. 基于 BP 神经网络的镁熔液第一气泡图像检测[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(10): 973-975.

[11] 岑红蕾, 鲁敏, 聂晶. 基于 BP 神经网络的非线性函数逼近仿真研究[J]. 农业网络信息, 2015, 1(1): 52-55.

[12] 何亚银, 高卫丽, 李志峰, 等. 螺杆转子型线的逆向设计研究[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2019, 35(5): 1-4, 9.

[13] 项宇, 刘春光, 苏建强, 等. 基于 BP 神经网络的动力电池 SOC 预测模型与优化[J]. 电源技术, 2013, 37(6): 963-965.

[14] MAHAJAN S, MITTAL N, PANDIT A K. Image segmentation using multilevel thresholding based on type II fuzzy entropy and marine predators algorithm [J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(13): 19 335-19 359.

[15] 张潇. 海洋捕食者算法的改进及应用[D]. 成都: 四川师范大学, 2022.

[16] 侯轶轩, 路敬祎, 张昆, 等. 基于 MPA-VMD 的去噪方法在管道泄漏检测中的应用[J]. 压力容器, 2022, 39(7): 64-72.

[17] 程忙忙, 杨靖. 基于改进海洋捕食者算法的 WSNs 定位[J]. 智能计算机与应用, 2022, 12(11): 180-185, 191.

[18] 彭晓旭. 基于改进海洋捕食者算法优化 PSPNet 的医学影像语义分割研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.

[19] 侯轶轩, 路敬祎, 张昆, 等. 基于 MPA-VMD 的去噪方法在管道泄漏检测中的应用[J]. 压力容器, 2022, 39(7): 64-72.

[20] 渊岚. 基于 AdaBoost 算法的 BP 神经网络在软件老化测试中的应用[J]. 软件导刊, 2016, 15(10): 136-138.

[21] 朱阳辉, 游东东, 朱权利. 基于 Krging 的压射机构铸造工艺参数多目标优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(5): 592-596.

(编辑: 彭瑾)

当前,真空自耗电弧熔炼(VAR)仍是生产优质钛合金的主要冶炼技术。在 VAR 熔炼过程中,由于受各种因素影响,电弧中带电粒子的运动呈无序状态,一旦电弧的长度大于自耗电极与坩埚间的距离,就容易产生边弧,严重时会导致严重的安全事故。为了纠正弧驻区电子运动方向对电弧轴线的严重偏离,最常用的方法就是对电弧施加纵向的稳弧磁场。稳弧磁场除了稳定电弧,防止熔炼过程中产生边弧外,还能使电弧集中,并产生旋转,对钛合金熔池进行搅拌,进而改善合金化条件,有利于提高钛合金铸锭的化学成分均匀性。适当的搅拌也有助于改善铸锭表面质量、细化晶粒尺寸^[1-3]。

田口方法是一种通过较少的试验次数,较短的试验周期,较低的试验成本而快速找到最佳工艺参数组合的试验方法^[4]。该方法主要利用正交表进行试验设计,以噪声因子模拟产品质量波动的各种干扰,使用信噪比分析产品质量特性的稳健性,通过对正交试验结果进行统计分析,找出最佳的试验方案^[5-7]。该方法已经在解决各种工程实际问题中得到较为广泛的应用^[8-15],但在钛合金研究领域应用较少。

TC4 钛合金中,Fe 属于杂质元素,标准要求其含量不高于0.30%,但在实际生产应用中,为提高 TC4 钛合金的综合性能,对 Fe 和 O 往往有针对性地少量添加,控制其含量在合理的范围,而不是完全降低^[16]。本试验 TC4 合金的 Fe 含量目标值为 0.18%。因此,要控制铸锭头部、底部的成分均匀性。

本研究以某公司 VAR 炉生产的 TC4 钛合金铸锭为研究对象,针对 TC4 合金铸锭中 Fe 含量纵向成分分布不均匀现象,以田口方法设计试验方案,采用 Minitab 软件对正交试验结果进行统计分析,通过开展稳弧磁场工艺参数对 Fe 元素成分均匀性影响研究,找出合理的工艺控制参数,旨在为生产高品质钛合金提供参考。

1 试验方案设计

1.1 问题描述

对某公司 VAR 炉生产的 80 批次 TC4 铸锭化学成分进行统计分析,发现 TC4 合金中 Al、V 含量分布均匀性良好,铸锭头部、尾部分析结果偏差较小,满足标准和后续使用要求。80 批次 TC4 铸锭头部和尾部 Fe 含量差值分布见图 1。可发现,TC4 铸锭中,Fe 含量头部与尾部分析结果最大极差为0.06%,最小为 0.02%,其均值约为 0.04%,占比高达42.5%,且均为尾部 Fe 含量

比头部 Fe 含量高(值为负)。由此说明,TC4 铸锭中 Fe 元素在铸锭的纵向分布不均匀,虽然极差在 0.06% 以内,但由于 Fe 元素对钛合金加工材的性能指标有较大的影响,因此,需要对铸锭的成分均匀性进行改善。

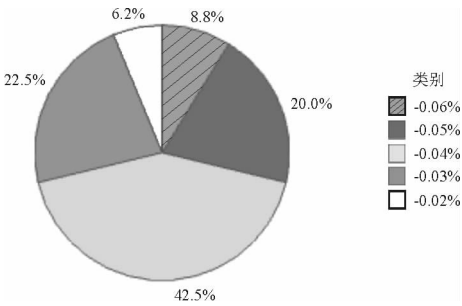


图 1 TC4 铸锭单锭 Fe 含量头部和尾部极差值分布
Fig.1 Range of Fe content at the head and end of TC4 single ingot

1.2 选定质量特性及信噪比形式

应用田口试验设计,常用质量损失函数来描述产品的特性,质量特性值作为评价产品质量的指标,一般用与其目标值的接近程度来评价产品质量^[17],本试验针对 TC4 合金铸锭成分均匀性进行改善,目的是减少铸锭 Fe 含量单锭之间的极差,因此,将单锭 Fe 含量极差值选定为质量特性值,作为本试验的响应变量 y ,用来评价铸锭的成分均匀性。

一般采用信噪比(S/N)对质量特性值的稳健性进行分析评价与衡量,即输入信号强度与噪声强度之比。信噪比一般有 3 种表述形式^[18],分别为①望目特性:质量特性越接近平均值越好;②望大特性:质量特性值越小越好;③望小特性:质量特性值越大越好。

本试验希望单锭间 Fe 元素化学成分极差值越小越好,所以信噪比选定为望小特性,即 S/N 越大越好。望小特性的信噪比计算式如下:

$$S/N = -10\lg\left[\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right)\right]$$

式中, y 为观测的数据值; n 为观测值数。

1.3 确定因子和水平

在钛合金 VAR 熔炼过程中,影响铸锭化学成分均匀性的因素较多,但本次研究的 TC4 铸锭中主元素和其他杂质元素成分均匀性良好,仅有 Fe 元素单锭间偏差相对较大,且具有一定的规律性。综合考虑 Fe 元素的铁磁性特点,以及在钛合金中的偏析规律,将稳弧磁场的磁感应强度确定为主要的可控因子,而稳弧磁场的磁感应强度主要由电流大小和交变时间所决定。因此将稳弧电流(a)和稳弧交变时间(b)作为试验可控因子,其取值见表 1。其中,稳弧交变时间为 0 时为直流

稳弧磁场,而交变时间 5 s 和 10 s 是交流稳弧磁场。

表 1 可控因子种类和水平的取值

Tab.1 Values of types and levels of controllable factors		
水平	稳弧电流/A	稳弧交变时间/s
1	5	0
2	10	5
3	15	10

在实际生产过程中,某公司的 TC4 铸锭熔炼所用的自耗电电极由 A、B 两条线进行生产,而熔炼工序也是采用甲、乙两种型号的 VAR 炉进行生产。由于生产任务饱满,且两条自耗电电极生产线和两种 VAR 炉型均经过长时间的生产验证,能够满足使用要求,且性能指标相当,而生产组织过程中很难规避和控制。因此,将以上两个因子作为本次试验的噪声因子,见表 2。

表 2 噪声因子种类和水平的取值

Tab.2 Values of types and levels of noise factors		
因子种类/水平	自耗电电极生产线	VAR 炉型
1	A	甲
2	B	乙

1.4 正交试验

本试验可控因子选用 2 因子 3 水平,根据田口方法设计原则,选定 $L_9(3^2)$ 正交试验表进行试验。另外噪声因子是 2 因子 2 水平,因此,每种试验方案分别测试 2^2 即 4 次试验结果。运用 Minitab 创建正交表,并实施正交试验,收集试验数据并计算其信噪比和质量特性(响应变量)均值,结果见表 3。

表 3 正交试验表

Tab.3 Orthogonal test table								
编号	稳弧电流 a/A	稳弧交变时间 b/s	响应变量/%				信噪比 (S/N)	质量特性均值/%
			y_1	y_2	y_3	y_4		
1	1	1	0.048	0.053	0.054	0.049	25.848 6	0.051 00
2	1	2	0.031	0.027	0.028	0.033	30.530 3	0.029 75
3	1	3	0.045	0.041	0.052	0.043	26.887 6	0.045 25
4	2	1	0.063	0.058	0.061	0.056	24.509 7	0.059 50
5	2	2	0.003	0.004	0.002	0.006	48.519 4	0.003 75
6	2	3	0.028	0.024	0.029	0.030	31.134 7	0.027 75
7	3	1	0.072	0.065	0.068	0.071	23.223 0	0.069 00
8	3	2	0.012	0.021	0.018	0.015	35.650 3	0.016 50
9	3	3	0.045	0.043	0.051	0.049	26.558 0	0.047 00

2 试验分析与讨论

2.1 主效应及信噪比分析

运用 Minitab 软件对田口正交试验表进行分析,各可控因子对信噪比、质量特性均值的响应表分别见表 4 和表 5。可以看出,可控因子稳弧电流和稳弧交变时间的取值对响应变量单锭中 Fe 含量的极差值均有不同

程度的影响,且对信噪比和质量特性均值的影响程度排序均为:稳弧交变时间>稳弧电流。两个可控因子的最佳信噪比 $S/N = 48.519\ 4$,质量特性均值为 0.003 75%。

表 4 信噪比响应表

Tab.4 Response table of signal to noise ratio		
水平	稳弧电流 $(a)/A$	稳弧交变时间 $(b)/s$
1	27.76	24.53
2	34.72	38.23
3	28.48	28.19
极差	6.97	13.71
排位	2	1

表 5 质量特性均值响应表

Tab.5 Response table of mean quality characteristic		
水平	稳弧电流 (a)	稳弧交变时间 (b)
1	0.042 00	0.059 83
2	0.030 33	0.016 67
3	0.044 17	0.040 00
极差	0.013 83	0.043 17
排位	2	1

2.2 方差分析

可控因子的最佳水平组合并不能反映出可控因子对质量特性的影响大小。为了进一步了解稳弧电流和稳弧交变时间对单锭 Fe 含量极差的影响,有必要进行方差分析,信噪比和质量特性均值的方差分析结果见表 6 和表 7。由表 7 可知,可控因子稳弧交变时间的 $P < 0.05$,说明该因子对质量特性的均值影响显著。而表 6 和表 7 中,可控因子稳弧电流的 $P > 0.05$,说明该因子对信噪比和质量特性的均值影响不显著。

表 6 信噪比的方差分析

Tab.6 Variance analysis of signal to noise ratio						
来源	自由度	序列平方和	调整平方和	调整均方	F	概率(P)
稳弧电流	2	88.03	88.03	44.02	1.76	0.284
稳弧交变时间	2	302.10	302.10	151.05	6.03	0.062
残差误差	4	100.26	100.26	25.06		
合计	8	490.39				

表 7 质量特性均值的方差分析

Tab.7 Variance analysis of mean quality characteristics						
来源	自由度	序列平方和	调整平方和	调整均方	F	概率(P)
稳弧电流	2	0.000 332	0.000 332	0.000 166	1.68	0.295
稳弧交变时间	2	0.002 801	0.002 801	0.001 401	14.20	0.015
残差误差	4	0.000 395	0.000 395	0.000 099		
合计	8	0.003 528				

2.3 残差分析

信噪比和质量特性均值的残差图分别见图 2 和图 3。可以看出,信噪比和质量特性均值的残差均符合正态分布,且残差的拟合图符合等方差特性,残差顺序图数据分布随机、无异常点,说明残差正常。

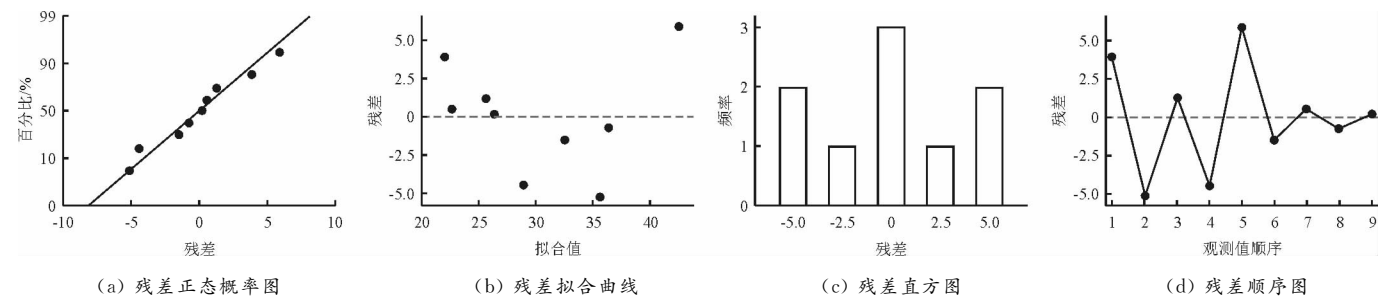


图2 信噪比残差图

Fig.2 Residual diagram of signal to noise ratio

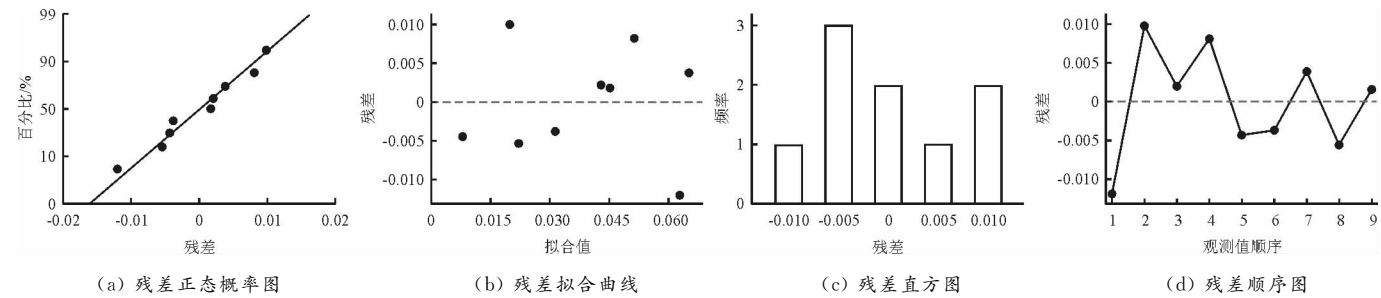


图3 质量特性均值残差图

Fig.3 Residual diagram of mean quality characteristic

2.4 稳弧磁场对 Fe 分布均匀性影响

根据经典结晶偏析理论,在 VAR 熔炼钛合金过程中,Fe 元素的溶质组元分布系数较小,具有典型的结晶正偏析倾向,熔池的形状及深度等条件对 Fe 元素均匀性的影响较大。VAR 熔炼过程中,外加的稳弧磁场有助于电弧在磁场力的作用下进行螺旋状运动,从而改变熔池的形状及深度,最终对 Fe 元素的均匀分布造成影响。

为了降低铸锭中 Fe 元素的偏析倾向,熔炼过程中一般采用降低熔速和熔池深度等措施。而稳弧电流的大小决定了磁感应强度的大小,稳弧电流越大,磁感应强度越大,熔池的深度越深,理论上不利于 Fe 均匀性分布。本试验结果显示稳弧电流对信噪比和质量特性的均值有一定影响,但 P 值 >0.05 ,影响不显著。主要是因为试验为了确定最佳工艺参数,其稳弧电流在 5~15 A 范围内调整,且 Fe 元素在 TC4 合金中作为杂质元素控制,含量较低,因此,该参数的变化对其 Fe 元素宏观的成分均匀性影响不显著。而稳弧交变时间主要影响熔池搅拌的方向及频次,直流稳弧与交流稳弧相比,在磁场强度相同的情况下,熔池深度会更深,不利于 Fe 的均匀性控制。因此,本试验结果显示,稳弧交变时间对质量特性的均值影响较为显著。

2.5 确定最优组合

经过上述分析,影响 TC4 钛合金铸锭单锭 Fe 含量极差的显著因子为稳弧交变时间,稳弧电流虽然对该响

应变量的影响不显著,但稳弧电流会影响熔池搅拌的深度以及强度,对其他钛合金主元素及杂质元素有一定影响,所以可控因子 b 取中水平 b_2 ,可控因子 a 根据信噪比和质量特性均值主效应图取中水平 a_2 ,最后确定因子和水平的最优组合为 a_2b_2 ,即稳弧电流为 10 A,稳弧交变时间为 5 s。

3 试验验证

按照最终确定的最优工艺组合 a_2b_2 再生产 50 批次 TC4 铸锭,进行试验验证,并对其单锭 Fe 含量极差值进行跟踪,具体见图4。可以看出,采用田口方法确

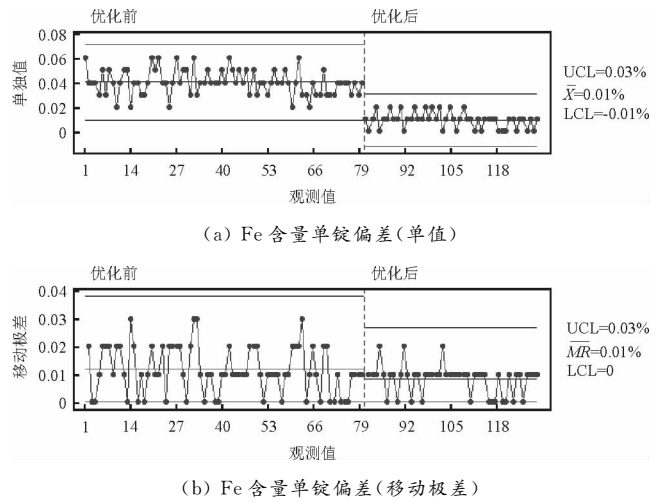


图4 TC4 铸锭 Fe 含量单锭极差工艺优化前后对比
Fig.4 Comparison of Fe content in TC4 single ingot before and after range process optimization

定的最优工艺组合,进行批量化工艺验证,TC4 铸锭单锭 Fe 含量极差平均值由优化前的 0.04% 降至了优化后的 0.01%,降低了 75%。单锭间的成分均匀性改善效果明显,极差的波动性降低,此外,也没出现超出 3σ 水平的数据。控制上下限范围由之前的 0.06% 降低至 0.02%,降低了 66.67%,标准差降幅较大,说明过程控制能力水平得到了明显提升,TC4 铸锭杂质元素 Fe 成分均匀性改善效果良好。

4 结 论

(1)应用田口方法对钛合金熔炼稳弧磁场工艺参数进行正交试验设计,通过信噪比和方差分析,发现稳弧交变时间对 TC4 铸锭单锭 Fe 含量极差值的影响程度较为显著。

(2)选用试验设计确定的最优工艺参数组合进行试验验证,所生产的 TC4 铸锭单锭 Fe 含量极差值由原来平均 0.04% 降至 0.01%。

(3)通过对钛合金熔炼稳弧磁场工艺参数进行优化,提高了 TC4 铸锭的成分均匀性,提升了 VAR 熔炼过程合金成分的精准控制能力。

参 考 文 献

[1] 李莹莹. 大规格钛合金真空自耗铸锭热封顶技术探讨[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(3): 324-326.

[2] 高磊,卢佳佳,张思瑞,等. 电子束冷床熔炼钛合金的多场耦合模型[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(9): 1 110-1 114.

[3] 贾志伟,殷建锋,鞠忠强,等. 大型复杂钛合金进气道铸件成形工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(4): 570-574.

[4] 唐少雄,尹逊青,闻维维,等. 田口方法在缓速器扰流柱弹簧稳健设计

计中的应用[J]. 专用汽车, 2017(9): 88-92.

[5] 林秀雄.田口方法实战技术[M].深圳:海天出版社,2004.

[6] 田口玄一著,魏锡禄,王和福译.质量工程学绪论[M].北京:中国对外翻译出版公司,1985.

[7] 郭士正,卢震.供应链与物流管理[M].北京:机械工业出版社,2008.

[8] 蒋仁言,刘超.基于田口可靠性试验的截尾数据处理方法[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(2):1-9.

[9] 徐明钊,唐昭,王君,等.田口方法的适用性研究[J].科技管理研究,2021,41(11):216-223.

[10] 齐贺闯,叶筱,亢燕铭,等.基于田口方法与灰色关联分析的碰撞射流通风系统优化[J].东华大学学报(自然科学版),2022,48(6):127-133.

[11] 王卫洪.基于田口方法的冲压工艺参数稳健性设计[J].模具制造,2015,15(12):10-16.

[12] 肖宇,叶晓琰,周岭,等.基于叶轮子午面田口试验的潜水泵水力优化设计[J].水电能源科学,2020,38(11):164-168.

[13] 唐少雄,尹逊青,闻维维,等.田口方法在缓速器扰流柱弹簧稳健设计中的应用[J].专用汽车,2017(9):88-92.

[14] 梁迪,孟伟.田口方法在主轴系统参数设计优化组合方面的应用[J].沈阳大学学报(自然科学版),2016,28(5):405-409.

[15] 王斌,邓小川,史一飞,等.田口实验设计法优化碳酸锂反应结晶制备工艺[J].无机盐工业,2021,53(8):60-65.

[16] 王亮,颜卉,姜博涛,等. Fe 代替 V 制备低成本钛合金的组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(5): 535-539.

[17] NEJLAOUI M, HOUIDI A, AFFI Z, et al.Multiobjective robust design optimization of rail vehicle moving in short radius curved tracks based on the safety and comfort criteria[J].Simulation Modelling Practice and Theory, 2013, 30: 21-34.

[18] 王志敏,武美萍,张文超.基于稳健性设计的磨料水射流参数优化[J].机械设计与研究,2018,34(1):157-160,171.

(编辑:刘晨辉)

生产销售 6 万 kN 或以上压铸机将获减税优惠

近日,工信部、财政部及国家税务总局共同发布“关于 2023 年度享受增值税加计抵减政策的工业母机企业清单制定工作有关事项的通知”。该通知指出,自 2023 年 1 月 1 日至 2027 年 12 月 31 日,对生产销售先进工业母机主机、关键功能部件、数控系统(简称:先进工业母机产品)的增值税一般纳税人(简称:工业母机企业),允许按当期可抵扣进项税额加计 15% 抵减企业应纳增值税税额。上述先进工业母机产品是指符合本通知附件《先进工业母机产品基本标准》规定的产品。

- 先进工业母机产品基本标准的铸造装备包括:
- 1.高压压铸机:合模力 ≥ 6 万 kN。
 - 2.真空熔铸装备:坩埚容量 ≥ 50 kg。
 - 3.感应熔炼电炉:熔化量 ≥ 10 t。
 - 4.挤压铸造成套设备:锁模力 ≥ 1 万 kN。
 - 5.粘土砂造型线:静压造型生产线造型效率 ≥ 100 型/h,砂箱尺寸 1 200 mm $\times$ 1 000 mm 及以上;垂直造型线造型效率 ≥ 400 型/h。
 - 6.大型自硬砂成套设备:处理能力 ≥ 60 t/h 的连续式混砂机,60 t 级及以上振实台、起模机。

(摘自压铸周刊)