

连续挤压过程中模具寿命的优化研究

张萍¹, 王晶²

(1. 安徽水利水电职业技术学院机电系, 安徽 合肥 236100; 2. 合肥工业大学电气与自动化学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:结合某不同规格铜材连续挤压生产线,对连续挤压过程中影响模具寿命的因素如工作温度和挤压轮的转速及生产数据进行了分析,得出了模具寿命的回归方程及最佳工作条件,其中挤压轮的转速对模具寿命的影响最大。

关键词:模具寿命; 连续挤压; 试验优化

中图分类号: TG376

文献标识码: A

在铜材挤压生产中,挤压成型模具的寿命是保证挤压稳定生产、高效率生产的重要前提。提高模具的使用寿命是实现挤压生产高产、优质、低耗的根本途径,对降低企业生产成本、提高经济效益有着十分重要的意义。

在我国, CONFORM (Continuous Extrusion Forming) 连续挤压的研究源于 20 世纪 80 年代初,采用 CONFORM 连续挤压技术可以实现工业生产中的连续化、高速化、低能耗和高精度^[1]。为了提高铜材挤压模具的质量和使用寿命,本文对影响挤压模具寿命的许多因素,如温度和轮转速等进行了研究,根据试验分析得到提高模具寿命的工作条件。

1 铜材连续挤压的优点

相对于传统工艺, CONFORM 连续挤压技术具有如下优点^[2]: (1) 在高温、高压条件下成形,所生产的铜扁线可获得优良的机械性能、塑性指标和细的晶粒度; (2) 成形过程为热挤压塑性成型,可消除原材料表面缺陷及机械损伤对产品质量的影响,产品表面不会产生翘皮、毛刺等现象,使铜扁线具有良好的表面质量; (3) 产品组织致密,导电率提高; (4) 省去了退火工序,不仅节省电能,还可保证产品的性能均匀一致,容易满足变压器、电机阻抗匹配的要求;

(5) 由于取消了退火工序,极大地缩短了生产周期; (6) 易于生产长宽比大于 10 (薄而宽) 和特殊规格的大断面非标扁线; (7) 整条生产线采用先进的计算机控制系统,生产过程可自动监测和运行,实现了自动化生产,降低了工人的劳动强度。

2 试验说明

2.1 试验参数

在铜线挤出工艺过程中,影响连续挤压模具寿命的因素包括^[3]: 挤压模孔形状尺寸、材料的流动性、铜线尺寸、挤压力、牵引力、挤压速度和挤压温度等。生产实践表明,铜线连续挤压模具的使用寿命与铜线挤压速度和挤压温度有较大的关系^[4]。本次研究中的轮转速即为挤压轮的转速,单位为 r/min。为了使不同规格的铜丝在相对同等条件下进行分析,试验设计中采用中间变量归一转速 n 。以合肥 ABB 变压器公司连续挤压生产设备所提供的生产数据为依据,挤压前的铜杆直径为 12.5 mm,已知挤压轮的轮转速 $n_{\text{轮}}$,挤压出来的铜丝截面积 $S_{\text{铜}}$,则

$$\pi \left(\frac{12.5}{2} \right)^2 \times n_{\text{轮}} = S_{\text{铜}} \times n, \text{ 即 } n = \frac{\pi \left(\frac{12.5}{2} \right)^2}{S_{\text{铜}}} \quad (1)$$

温度参数为连续挤压过程中的工作温度(℃);

收稿日期:2008-12-10

作者简介:张萍(1982-),女,安徽界首人,硕士。

连续挤压优化过程中,以铜杆的质量即坯料铜杆的质量为评价其使用寿命和生产效率的指标,试验中用目标函数 Y 表示(寻求合适的轮转速和温度使 Y 值最大,为最优),单位为 kg ;模瓦号为生产过程中自定义的代号,无单位^[5].

2.2 试验设计

设有 p 个因素 Z_1, Z_2, \dots, Z_p ,其指标 y (回归统计中的因变量)在一定范围内可近似地用二次函数描述.安排试验时把正交表中的“1”和“2”分别改为“+1”和“-1”,以使正交表中的任意两列对应元素之积的和等于零,使系数矩阵和相关矩阵为对角矩阵,从而使所求得的回归系数互不相关,这样可使回归分析计算和显著性检验过程大大简化.

一般地, p 个变量的组合设计由下列三类试验点组成^[6]:

第一类点(m_c):二水平(-1和1)全因素试验的试验点,这类试验点共有 2^p 个.如果采用1/2或1/4实施法,则为 2^{p-1} 或 2^{p-2} 个试验点.

第二类点(2_p):这类试验点共有 $2p$ 个,是以原点为中心对称分布在 p 个坐标轴上的星号点,它们与中心点距离 γ 称为星号臂. γ 是待定参数,可以根据不同的要求,如正交性、旋转性来确定 γ 值,从而得到各种具有优良性的试验设计,如正交试验设计、旋转试验设计.

第三类试验点(m_0):各变量都取零水平时中心点的重复试验次数.在中心点上的试验可以只做一次,也可以重复做若干次.

因此,用组合设计法的试验总次数为:

$$N = m_c + 2p + m_0 \tag{2}$$

式(2)中: m_c 为二水平全因素试验点的个数,即 2^p ; $2p$ 为分布在 p 个坐标轴上的星号点; m_0 为中心

点上的试验次数.

用组合设计安排的试验计划有一系列优点:首先,它的试验点比三水平的全因素试验少,但仍保持足够的剩余度.其次,因为它是在一次回归的基础上获得的,故试验方便.如果一次回归不显著,那么只要在一次回归的基础上,再在星号点和中心点上补做一些试验,就可求得二次回归方程.则其二次回归正交组合设计可按下述方法进行:

(1)确定各因素的变化范围.以 Z_{1j} 和 Z_{2j} 分别表示因素 Z_j ($j=1, 2, \dots, p$)变化的上限和下限,并用下式计算各因素的零水平(Z_{0j})和变化区间(Δ_j):

$$\begin{cases} Z_{0j} = \frac{Z_{1j} + Z_{2j}}{2} \\ \Delta_j = \frac{Z_{2j} - Z_{0j}}{\gamma} \end{cases} \tag{3}$$

(2)对每个因素的水平进行编码,编码时线性变换按(4)式进行.

$$x_j = \frac{Z_j - Z_{0j}}{\Delta_j} \tag{4}$$

需要指出的是,因素 Z_j 的上下水平对应的不是+1和-1,而是 γ 和 $-\gamma$,每个因素不是3个水平,而是以下5个水平:

$$\begin{aligned} x_j &= \gamma \longrightarrow Z_{2j} \\ x_j &= 1 \longrightarrow Z_{0j} + \Delta_j \\ x_j &= 0 \longrightarrow Z_{0j} \\ x_j &= -1 \longrightarrow Z_{0j} - \Delta_j \\ x_j &= -\gamma \longrightarrow Z_{1j} \end{aligned} \tag{5}$$

(3)选择相应的组合设计.按给定的 p 和选定的 m_0 查表或计算,使该设计具有正交性的 γ 值.常用 γ 值列于表1. γ 值的计算可按(6)式进行.

$$\gamma^2 = \frac{\sqrt{NN_0} - N_0}{2} \tag{6}$$

表1 常用 γ^2 值^[7]
Table 1 Common values of γ^2

因素表 P	正交表 $L_n(2^{n-1})$	因素所放的列号	γ^2 值				
			$m_0=1$	$m_0=2$	$m_0=3$	$m_0=4$	$m_0=5$
2	$L_4(2^3)$	1,2	1.00	1.162	1.317	1.464	1.606
3	$L_8(2^7)$	1,2,4	1.477	1.657	1.831	2.00	2.164
4	$L_{16}(2^{15})$	1,2,4,8	2.00	2.198	2.392	2.583	2.770
5	$L_{16}(2^{15})$	1,2,4,8,15	2.547	2.762	2.974	3.183	3.391

变换后,若 Z_j 在区间 $[Z_{1j}, Z_{2j}]$ 内变化时,它的编码值 X_j 就在区间 $[-1, +1]$ 内变化. 在对因素 Z_j 的水平进行编码以后, y 对 Z_1, Z_2, \dots, Z_p 的回归问题就转化为 y 对 x_1, x_2, \dots, x_p 的回归问题.

3 试验优化结果分析

3.1 主要挤压工艺参数的优化

对所记录的数据进行初步整理,选择一组数据较为完整的模瓦号 376 为例.
因素水平的编码列于表 2,其中 $m=2, m_0=2$, 取 $r=1.078$. 试验方案列于表 3,二元二次回归正交组合试验设计列于表 4. 设二次回归方程中的二次

项为 z_{μ}^2 , 则其对应的中心化编码为 z_{μ}' :
$$z_{\mu}' = z_{\mu}^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{\mu}^2, (j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n)$$
(7)

表 2 因素水平的编码

Table 2 Coding table of factor levels

编码	工作温度/℃	归一速度/(r · min ⁻¹)
R	456	69.1
1	444.7	67.41
0	438.5	45.75
-1	422.3	24.09
r	421	22.4
Δj	16.234	21.66

表 3 试验方案

Table 3 Testing program

试验号	Z_1	Z_2	工作温度/℃	归一速度/(r · min ⁻¹)
1	1	1	444.7	67.41
2	1	-1	444.7	24.09
3	-1	1	422.3	67.41
4	-1	-1	422.3	24.09
5	1.078	0	456	45.75
6	-1.078	0	421	45.75
7	0	1.078	438.5	69.1
8	0	-1.078	438.5	22.4
9	0	0	438.5	45.75
10	0	0	438.5	45.75

表 4 二元二次回归正交组合试验设计表

Table 4 Binary quadric orthogonal regression combination design

试验号	Z_1	Z_2	$Z_1 Z_2$	Z_1^2	Z_2^2	Z_1'	Z_2'	y
1	1	1	1	1	1	0.368	0.368	1465
2	1	-1	-1	1	1	0.368	0.368	1450
3	-1	1	-1	1	1	0.368	0.368	1451
4	-1	-1	1	1	1	0.368	0.368	1481
5	1.078	0	0	1.162	0	0.530	-0.632	1451
6	-1.078	0	0	1.162	0	0.530	-0.632	1444
7	0	1.078	0	0	1.162	-0.632	0.530	1368
8	0	-1.078	0	0	1.162	-0.632	0.530	1462
9	0	0	0	0	0	-0.632	-0.632	1392
10	0	0	0	0	0	-0.632	-0.632	1368

3.2 模瓦号 376 的回归方程

回归统计列于表 5, 方差分析列于表 6. 由表 5 可知, $R=0.906474$, 90.6% 的值遵循回归曲线, 说明回归性能较好. 由表 6 可知, $F_{0.01}(7,4)=14.98$, $F_{0.05}(7,4)=6.09$. 由于 $F < F_{0.05}(7,4)$, 则回归因素对试验结果的影响不显著^[7].

表 5 回归统计

Table 5 Regression analysis

相关系数 R	R ²	修正 R ²	标准误差/%	观测值
0.906474	0.821696	0.098815	26.16452	10

表 6 方差分析
Table 6 ANOVA(c)

	df	SS	MS	F	Significance F
回归分析	7	12619.27	1802.753	3.686709	0.229909608
残差	4	2738.328	684.5819		
总计	11	15357.6			

表 7 回归系数
Table 7 Regression coefficients

	系数	标准误差/%	统计量 t	p 值	上限 95%	下限 95%	上限 95.0%	下限 95.0%
	1416.35	13.03	108.69	0	1380.17	1452.53	1452.53	1380.17
x_1	-1.49	10.40	-0.14	0.89	-30.38	27.39	27.39	-30.38
x_2	-18.39	10.40	-1.77	0.15	-47.28	10.49	10.49	-47.28
x_3	11.25	13.08	0.86	0.44	-25.07	47.57	47.57	-25.07
x_4	0	0	65535.	0	0	0	0	0
x_5	26.60	15.92	1.67	0.17	-17.60	70.81	70.81	-17.60
x_6	54.57	15.92	3.43	0.03	10.37	98.77	98.77	10.37
x_7	0	0	65535	0	0	0	0	0

由表 7 可知回归函数表达式为:

$y=1416.35-1.49Z_1-18.39Z_2+11.25Z_1Z_2$
 $+26.60Z_2^2+54.57z_1'$ (8)

由式(7)知: $z_1'=Z_1^2-0.6234$, $Z_1=\frac{t-438.5}{16.234}$,

$Z_2=\frac{n-45.75}{21.66}$, 将 z_1', Z_1, Z_2 代入式(8)并整理得:

$y=0.057n^2+0.207t^2-183.152t+0.032nt-17.47n+42033.91$ (9)

根据极值的必要条件: $\frac{\partial y}{\partial n}=0, \frac{\partial y}{\partial t}=0$, 得到 $n=29.78$ r/min, $t=439.83$ °C. 在此条件下, 试验因变量 y (生产的铜杆质量 Y) 可以达到最大值^[7].

3.3 类比同材其他模瓦号的回归方程

采用上述相同的方法, 可得出其他模瓦号的回归方程系数, 如表 8 所示. 由表 8 可知, 二次项系数偏小; 一次项系数除零以外, 一般其绝对值都比较大; 常数项变化非常大. 本次二次回归选取的模瓦号

有特殊含义,即 310~330 之间为同种材料制成; R^2 变量之间的相关性越高. 为回归统计的相关系数,数值越大,说明自变量与因

表 8 同材其他模瓦号的回归方程系数
Table 8 Regression equation coefficients of other numbers of die shoes with same material

模瓦号	常数	t^2 系数	n^2 系数	nt 系数	t 系数	n 系数	R^2
310	-9534	-0.06	-0.49	0.17	45.5	0	0.58
314	50977.23	0.06	3.8	0.918	-104.43	-847.82	0.58
315	-7619.2	-0.05	2.32	-0.23	63.16	-181.55	0.63
317	47135.42	0.25	-0.83	0.21	-205.18	0	0.71
320	-28482.1	-0.09	1.5	-0.894	123.4	178.1	0.92
324	46991.88	0.043	1.53	1.2	-106.1	-744.9	0.9
329	-17888.6	-0.08	0.51	-0.12	80.32	-0.48	0.74

从表 8 可知,模具寿命和工作效率与温度和轮转速具有明显的相关性,但隐含关系不明确.因为影响模具寿命的最关键因素之一为模具的磨损量^[8],此外模具材料也直接决定了模具的寿命,而且同种模具在连续挤压过程中所受到的挤压力和牵引力也不同.随着工作温度的升高,挤压材料的流动性增强,溢料的多少等也会影响模具的寿命.所以,若上述条件一定的情况下,可以得出工作温度和轮转速与模具寿命即铜杆质量更有效的目标方程.

4 结 论

此次试验中, $R=0.906474$,90.6%的值遵循回归曲线,说明回归性能较好. $n=29.78\text{ r/min}$, $t=439.83\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,模具所能加工的铜杆质量最大.类比同材料的其他组数据得到的 R^2 在 0.58~0.74 范围,说明回归分析得到的函数表达式基本(在 60% 范围内)有效,所选取的主要影响参数工作温度和轮转速与模具加工的铜杆质量相关性很高.轮转速对模具寿命和生产效率是第一影响因素,而温度比轮转速影响小,但轮转速的不同水平对模具寿命的影响程度是不等的,且相矛盾.即轮转速越大,越有利于生产效率提高;而轮转速增加,模具的温度上升,模具耐用度下降,模具寿命下降.

由于影响挤压模具使用寿命的因素很多,除了

常见的模具材料、模具的制造工艺、模具工作参数外,温度、溢料多少和生产产品的材料性能等也会影响其寿命,且本文所选取的试验数据均来自于工厂生产中的数据,该数据记录过程中有一定的人为因素.因此,这些因素可能会导致所建立的数学模型有一定误差.希望以后在这些方面有所改进,可得到更为精确的数学模型和试验优化结果.

参考文献:

[1] 胡建国. CONFORM 径向式连续挤压变形的研究[J]. 轻合金加工技术,1991,19(8):34-38.
[2] 钟毅. 连续挤压技术及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2004.
[3] 运新兵,宋宝韞,高飞. 连续挤压技术在铜管生产上的应用[J]. 金属成形工艺,2002,20(3):46-47.
[4] 赵茂强. 挤压模具使用寿命影响因素的分析[J]. 轻合金加工技术,1997,25(4):30.
[5] 何升立. 连续挤压模具及其工艺参数的优化[D]. 合肥:合肥工业大学,2002:41.
[6] 吴贵生. 试验设计与数据处理[M]. 北京:冶金工业出版社,1997:147-149.
[7] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
[8] 宋宝韞,樊志新,刘文元. 应用连续挤压技术生产铜扁线[J]. 电线电缆,2001(1):64.

Experimentation optimization of technological parameters of extrusion die in the continuous extrusion process

ZHANG Ping¹, WANG Jing²

(1. Mechanical & Electrical Engineering Department, Anhui Technical College of Water Resources and Hydroelectric Power, Hefei 236100, China; 2. Electric & Automation college, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Based on an extrusion production line for copper strips of different sizes, an analysis was conducted on production data and some factors affecting the die service life such as working temperature and the wheel rotating velocity during the continuous extrusion process. A regression equation of the die service life as well as the optimum working condition were obtained, for which the wheel rotating velocity affected the die service life the most.

Key words: extrusion die life; continuous extrusion; experimentation optimization

广州有色金属研究院分析测试中心

建于1971年广州有色金属研究院分析测试中心,是我国南方地区从事金属材料、矿物、化工材料等无机化学检验、物理性能测试的第三方实验室。拥有层次合理的人才队伍和60余台套进口的大中型检测设备如等离子发射光谱仪、徕卡大型透射反射两用显微镜、FEI工艺矿物自动检测仪、电子探针、扫描电镜、直读光谱仪、拉力实验机、盐雾实验机、X-衍射仪、金相显微镜等。是国内首批通过国家、省两级计量认证和获得国家认可和国际互认的实验室之一。被中国质量管理协会全国用户委员会授予“全国用户满意服务”的称号。

依托建立了“中国有色金属工业华南产品质量监督检验中心”、“广东省有色金属产品质量监督检验站”、“广东省金属材料综合利用检测与评价中心”、“中国方圆标志认证委员会确认为认证产品检验实验室”等检测平台。



地 址:广州市天河区长兴路363号 广州有色金属研究院内
联系电话:020-37239206/37239202 传 真:020-37238633
网 址:<http://www.gzfenxi.com>