

基于红外热波无损检测技术的汽车零部件制造工艺稳健性能

康帆^a, 蔚亚^a, 张强^b

(西安航空职业技术学院 a. 汽车工程学院; b. 航空制造工程中心, 陕西 西安 710089)

摘 要:针对常规的红外热波无损检测技术缺失检测灵敏度、得失稳指标不够精准的问题,开展基于红外热波无损检测技术的汽车零部件制造工艺稳健性能研究。以光谱传输特性为依据,根据散射光强度和传输路径建立红外热波无损检测模型;利用可靠性分析法分析随机变量空间。在此基础上通过获取约束条件得到零件拓扑结构;并分析红外热波无损检测损伤特征原因分布,以此明确检测灵敏度补偿要求,根据增益函数得到灵敏度补偿值;利用小波多尺度分析零件稳健程度,根据判断函数得出零件失稳指标。实验研究结果表明,与常规技术相比,所提出红外热波无损检测技术得到的应力值与标准值相近,得到的稳健性数据与实际相符。

关键词:汽车零部件;制造工艺;稳健性能;红外热波无损检测

中图分类号:TB302.5 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)04-0061-05

Robust Performance of Automobile Parts Manufacturing Process Based on Infrared Thermal Wave Nondestructive Testing Technology

KANG Fan^a, YU Ya^a, ZHANG Qiang^b

(a. School of Automotive Engineering; b. Aviation Manufacturing Engineering Center, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: In view of the lack of detection sensitivity and inaccuracy of the instability index of the conventional infrared thermal wave nondestructive testing technology, this paper makes a study of the robust performance of automobile parts manufacturing process based on the infrared thermal wave nondestructive testing technology. Based on the spectral transmission characteristics, the infrared thermal wave nondestructive testing model is established according to the scattered light intensity and transmission path, and then the random variable space is analyzed by the reliability analysis method. On this basis, the topological structure of the part is obtained by obtaining the constraint conditions; the damage characteristic distribution of infrared thermal wave nondestructive testing is analyzed, so as to define the requirements of the detection sensitivity compensation, and the sensitivity compensation value is obtained according to the gain function; then, the stability degree of the part is analyzed by wavelet multi-scale, and the instability index of the part is obtained according to the judgment function. The experimental results show that compared with the conventional technology, the stress value of the proposed infrared thermal wave nondestructive testing technology is similar to the standard value, and the robustness data is consistent with the actual situation.

Keywords: auto parts; manufacturing process; robust performance; infrared thermal wave nondestructive testing

0 引言

对汽车零部件制造行业而言,从某种发展趋势上看,零部件开发成功或失败的关键因素不在于企业自身的产业结构,而在于项目开发过程中行之有效、符合实际的技术创新能力。在汽车零部件制造加工过程中,采用计算机辅助的设计方法,进行汽车零部件制造工艺设计,可以降低汽车零部件的设计和加工误差。汽车零部件设计因受到小扰动和非线性力学特征的影响,导致汽车零部件设计的定位误差较大,加工的非线性小扰动作用特征明显。汽车零部件制造工艺技术创新是同领域中其他企业难以复

制和模仿的,也不是简单地依靠加大投入资金、购买更多先进设备就能够做到的。由此可见,通过稳定性能更强的制造工艺制造性能生产出更好的零件,才是汽车零部件行业发展的方向^[1]。

红外热波无损检测技术在检测的过程中不会损坏被检测对象,对产成品安全可靠保证、特殊设备的使用等方面均有保障,在提高劳动生产效率的同时,节约了制造成本、降低企业制造费用^[2]。随着汽车性能的不断提升,零部件结构日趋复杂,功能要求越来越高,常规的红外热波无损检测技术已经不能满足现阶段的检测要求,因此提出全新的红外热波无损检测技术,实现对汽车新型零部件制造工艺稳健性能的精准检测。所提出的红外热波无损

第一作者简介:康帆(1986—),女,陕西西安人,助教,硕士,研究方向为汽车制造与装配技术、汽车发动机及关键零部件制造和生产中的质量管理等。

检测方法以常规方法为基础,将高频电磁波作为媒介信息交换的基本工具,根据零件结构的特殊性、材料的自身属性设置检测节点,检测零件表面粗糙度、裂纹深度、划痕宽度等数据,以此实现其稳定性能的检测^[3]。所提出红外热波无损检测方法,对于常规汽车零件和复杂汽车零件同样适用,为促进零件制造行业的发展,提供了更加精准的检测技术支持。

1 汽车零部件制造工艺稳健性能红外热波无损检测

汽车是由大型框架梁结构、发动机、底盘以及其他电器设备构成,通过制动系统驱动而行驶的车辆。

1.1 建立红外热波无损检测模型

红外热波无损检测以热传导效应机制为核心,存在一维传导效应模型,在红外热波传导脉冲热源表面施加一定传感压力,同时通过红外热波方式向实验试件内部依次连续传播,且随着时间的变化而改变。当与不同介质相遇时,透过所接触介质边缘继续传播。红外热波无损检测具有如下特点:

- 1) 研究了多种方便、精确的热激励方式;
- 2) 现已由定性研究向定量研究发展;
- 3) 缺陷可自动识别等;
- 4) 红外线情报处理的智能化发展;
- 5) 对材料内部热红外无损检测技术进行深入研究;
- 6) 研究自动检测系统及便携式检测系统。

光谱分析技术可以实现对汽车零件的性能检测,因此以光谱传输特性为依据,建立红外热波无损检测模型。已知零件构成材料有散射的特性,满足辐射方程的散射近似条件,因此可根据洛伦兹函数基本原理,计算零件的散射光强度,函数公式为:

$$P = k + \frac{s}{1 + (d/c)^2} \quad (1)$$

式中: P 表示所求的散射光强度值; k 表示洛伦兹曲线分布的渐进值; s 表示检测光入射点处洛伦兹曲线的最大峰值; d 表示距离入射点即曲线中心点的水平距离; c 表示散射曲线的半波带宽。已知汽车零件的光传输路径如图1所示,计算洛伦兹拟合系数,获取零部件在三维空间内的散射规律^[4]。

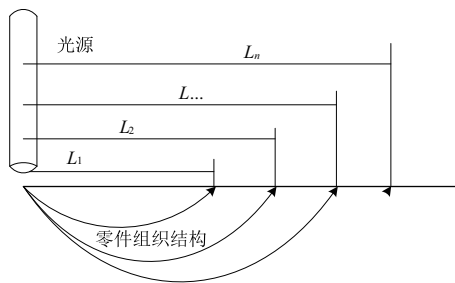


图1 零件光传输路径示意图

图1中, $L_1, L_2, \dots, L_n$ 表示零件上任意一个检测节点

与光谱检测仪之间的距离。通过变换光源和仪器距离得到深度不同的汽车零部件组织信息。根据高斯函数计算拟合系数:

$$H = a \times e^{-\left(\frac{d-c}{s}\right)^2} \quad (2)$$

式中: H 表示拟合系数; a 表示拟合可靠程度; e 表示指数; s 表示固定常数指标。结合式(1)和式(2),同时根据图2中的传输路径,可得拟合相关系数。当系数 $H > 0.99$ 时说明拟合结果可靠,经计算 $H = 0.9994$,可利用分布函数描述光在零部件组织内的空间散射规律^[5],空间分辨曲线如图2所示。

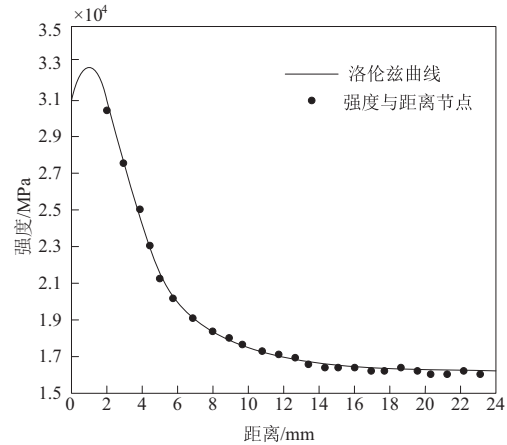


图2 拟合的空间分辨曲线

假设规律约束条件为 λ ,则建立的红外热波无损检测模型可用下列函数描述:

$$E_v = \frac{H}{\omega \times n} \times \sum_{i=1}^n Pf(\lambda, i) \quad (3)$$

式中: E_v 表示体积为 v 的零部件红外热波无损检测结果; ω 表示光谱分析强度; n 表示检测次数; i 表示检测节点数量; $f(*)$ 表示被约束的分布函数^[6]。至此红外热波无损检测模型建立完毕,可进行下一步检测工作。

1.2 可靠性分析法获取零件拓扑结构

基于上述建立的检测模型,利用可靠性分析算法获取零部件的拓扑结构,该算法可描述为:

$$\begin{cases} \text{find: } \tau \\ \min: C(\tau) \\ \text{s.t.: } P_r[W_i(\tau, x) \leq 0] \leq P_{gi}^T, i=1, 2, \dots, n \\ u_j(\tau) \leq 0, j=1, 2, \dots, m \\ \tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: τ 表示零部件向量; x 表示随机变量向量; C 表示一致目标函数; $W_i(\tau, x)$ 表示第 i 个极限状态函数; P_r 表示检测零件的失稳概率; P_{gi}^T 表示条件允许下的失稳概率; $u_j(\tau)$ 表示可靠性约束函数; n, m 表示非零的自然数^[7]。已知随机变量空间如图3所示。

由于汽车零部件拓扑结构是多层嵌套式结构,因此根据可靠度指标的几何定义,结合图3中的区域划分,获取拓扑结构约束条件:

$$\begin{cases} \min \|u\| \\ \text{s.t. } W_i(u) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

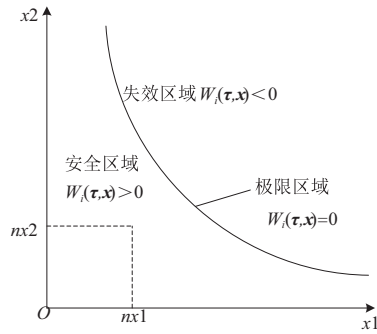


图3 随机变量空间

式中: u 表示零部件最可能失稳的位置节点; γ 表示可靠度指标^[8-9]。基于红外热波无损检测的汽车零部件超临界损伤特征原因分布如图4所示。

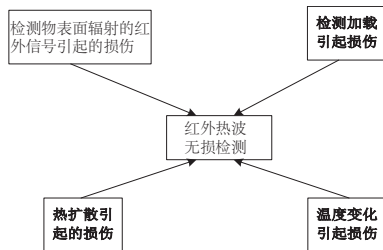


图4 红外热波无损检测损伤特征原因分布

综合上述特征原因分布,通过功能函数得到零部件的拓扑结构,该结构中的关键数据如表1所示。

表1 零部件拓扑结构参数信息表

零件类型	体积/ mm ³	体积比/ %	检测时间/ s	可靠度	响应系数
A1	606.124 8	40.65	142.68	3.000	0.051 4
A2	604.259 9	40.43	159.73	2.998	0.049 3
A3	605.765 1	40.28	82.44	2.998	0.049 7
A4	606.332 6	40.39	37.95	2.999	0.050 1
A5	604.568 2	40.55	48.50	3.000	0.051 2

根据表1中的参数与标准值进行对比,若满足制造工艺标准,则证明得到的结构与零件实际情况吻合。

1.3 补偿检测灵敏度

根据拓扑结构可知零部件的详细几何结构,可知关联的零部件集成之间的厚度不一,利用红外热波无损检测模型检测稳定性能时会出现检测误差,因此需要对检测灵敏度进行补偿,以保证光谱检测过程中发射器可以自动调整入射声压,控制检测结果精度^[10]。灵敏度补偿示意图如图5所示。

已知被检测汽车零部件对超声信号的衰减量,主要与零件集成的厚度变化有关。图5中黑点代表采样位置,为了实现零件集成中接收各个部位检测信号的幅值保持一致,对每个采样点对应的不同厚度值,补偿不同的灵敏度,因此得到灵敏度与零件厚度之间关系的增益函数为:

$$f(i, j) = g(r, \varphi) \quad (6)$$

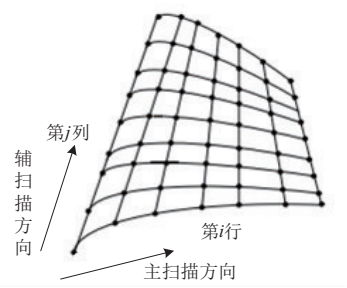


图5 灵敏度补偿要求

式中: $f(i, j)$ 表示第*i*行*j*列内所有节点之间关系的增益函数; r 表示零部件厚度值; φ 表示零部件的曲率; $g(*)$ 表示比较函数。由于零部件集成相较于单独的零部件而言,集成内部超声信号的传播途径和传播方式更为复杂,对于红外热波无损检测来说难度极大^[11],因此设置一个底波位置替换厚度参数 r ,存在 $r' = s(x, y, z)$, x, y, z 为采样点曲面的三维坐标值。已知曲率的表达式为 $\varphi = c(x, y, z)$,联立上述公式可得新的增益函数:

$$f(i, j) = g'[s(x, y, z), c(x, y, z)] \quad (7)$$

改写上述公式,得到:

$$f(i, j) = g'(x, y, z) \quad (8)$$

可见只要获取检测采样点位置的具体坐标信息 x, y, z 与增益值的函数 g' ,就可以实现对红外热波无损检测灵敏度的补偿^[12]。

1.4 小波多尺度分析零件稳健性能

假设 $\phi(z)$ 表示任意正交小波, $\{\phi_{a,m}(z)\}$ 是根据该小波生成的 $M^2(S)$ 空间正交基,任意 $f(z) \in M^2(S)$ 可被表示为小波级数:

$$f(z) = \sum_{a \rightarrow \infty} (f, \phi_{a,m}) \phi_{a,m}(z) \quad (9)$$

则根据上式可推导出:

$$f(z) = \sum_{a \rightarrow \infty} \left[\sum_{n \rightarrow \infty} d_{a,m} \phi_{a,m}(z) \right] \quad (10)$$

式中: a 表示固定正交线性参数; n 表示小波正交次数。由于零部件边缘与表面的成像性质不一致,因此设置平滑函数,通过控制零部件成像的边缘连续程度,满足小波基的容许性条件^[13]。该平滑函数为:

$$\begin{cases} \iint_S \beta(x, y) dx dy = 1 \\ \lim_{\substack{x \rightarrow \infty \\ y \rightarrow \infty}} \beta(x, y) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

方程组中 $\beta(x, y)$ 表示平滑函数。根据所获结果调整光谱仪器,运行红外热波无损检测模型,通过判别函数得到稳定性能判别结果^[14]。已知判别函数结构如图6所示。

图6中 n 表示结构层数; $D_1, D_2, \dots, D_n$ 表示每一层内的判别子集。由此得到汽车零部件的失稳指标为:

$$S_T = \sum_{i=1}^n D(f_i(z)) \beta_i \quad (12)$$

式中 S_T 表示失稳判断指标。将该指标与标准许用应力指标对照,得出零部件制造工艺的稳健性能,实现对零部件的红外热波无损检测^[15]。

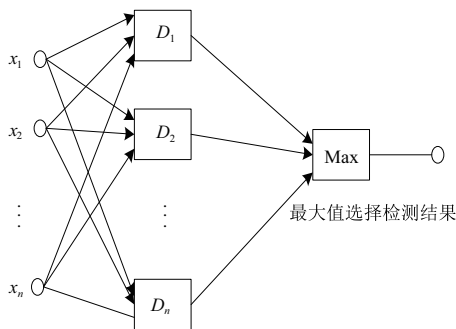


图6 判别函数分层结构

2 实验测试与数据分析

提出对比实验方案,测试基于红外热波无损检测以及常规红外热波无损检测的汽车零部件制造工艺稳健性能,分析两种检测技术影响下零部件的许用应力,得出有关制造工艺稳健性能的测试结果。

2.1 实验准备

搭建测试平台,导入红外热波无损检测系统,实验测试环境如图7所示。

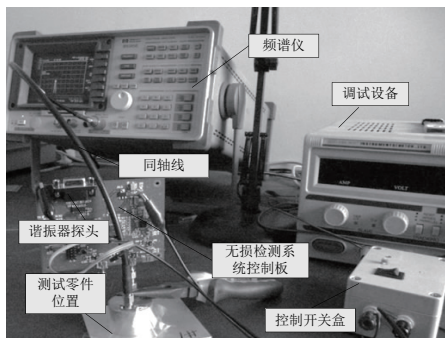
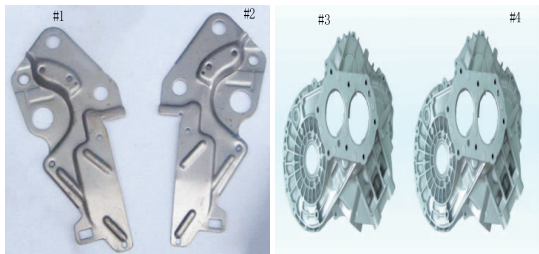


图7 实验测试环境

按照图7所示连接测试硬件,将谐振器探头紧贴待检测零件表面,将同轴线连接在频谱仪上接收回波信号;再将回波信号接入控制主板,与计算机串口相连,建立完整的汽车零部件制造工艺稳健性能红外热波无损检测系统。此次测试分两组进行,一组为所提出红外热波无损检测方法的实验测试组;另一组为常规红外热波无损检测方法的对照测试组,实验测试选取的汽车零部件如图8所示。



第1组待测零件 第2组待测零件

图8 实验测试对象

已知选取的第1组和第2组待测零件中,#1为稳健

性较差的零部件。实验对象选取结束后测试关键检测硬件的运行状态。经由30 min系统测试,探头与其他硬件均正常工作,频谱仪可以输出稳定的3.5 GHz频率信号,运作检测示意图如图9所示。

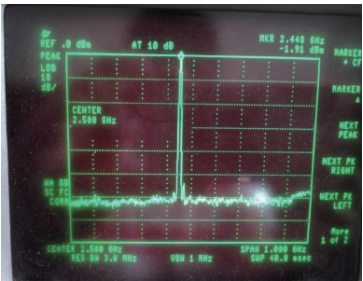


图9 信号源运作监测图像界面

图9界面中,频谱仪显示的中心频点在3.5 GHz上,说明测试系统处于正常工作状态,可以开始实验。

2.2 结果分析

记录两种检测技术下,汽车零部件的电平数据,分析零部件的许用应力,测试出实验对象的稳健性能。测试过程中,在测试对象上分别设置若干个检测节点,将谐振器探头与这些节点相连,得到不同零部件结构表面的介电特性,其中常规无损检测标准值如表2所示,所提出红外热波无损检测方法下的实验组测试结果与常规红外热波无损检测下的对照组测试结果,分别如表3、表4所示。

电平值/ 检测节点	表2 标准值结果 单位:mV					
	测量频率/GHz					
	3.40	3.42	3.44	3.46	3.48	3.50
#1	34.0	36.0	37.0	44.5	41.5	35.0
#2	35.0	37.5	41.0	50.5	37.0	35.5
#3	33.0	36.5	39.5	44.0	42.0	34.0
#4	35.5	37.0	41.0	51.0	38.5	35.0

电平值/ 检测节点	表3 实验组测试结果 单位:mV					
	测量频率/GHz					
	3.40	3.42	3.44	3.46	3.48	3.50
#1	33.9	35.8	36.5	45.0	42.5	35.5
#2	34.9	36.5	42.0	50.0	37.5	36.0
#3	32.9	36.1	40.0	45.0	42.5	33.0
#4	35.2	36.7	40.0	50.0	38.0	35.5

电平值/ 检测节点	表4 对照组测试结果 单位:mV					
	测量频率/GHz					
	3.40	3.42	3.44	3.46	3.48	3.50
#1	30.5	33.0	35.5	38.0	34.5	31.0
#2	30.0	33.0	35.0	37.5	33.5	30.5
#3	31.5	32.5	36.0	39.5	34.0	31.0
#4	31.5	33.0	34.5	38.5	33.0	31.5

由表2、表3和表4的实验测试结果可知,所提出的

红外热波无损检测技术得到的应力值与标准值相近,而对照组测试结果和标准值相差较大。4个测试样本的反射波值均从小增大到最大值,然后再降低,可见两种检测技术下的测试结果可信。根据上述检测技术的测试数据,计算汽车零件许用应力的计算模型为:

$$\begin{cases} \sigma_a = \left(\frac{F}{v \times n} + 0.562 \, 5 \sigma_{\min} \right) \times s \omega_i \\ \sigma_b = \left(\frac{F}{v \times n} + 0.562 \, 5 \sigma_{\min} \right) \times s \omega_j \end{cases} \quad (13)$$

式中: a 表示稳定性较差的零件; σ_a 表示此类零件的最大许用应力; b 表示稳定性较好的汽车零件; σ_b 表示此类零件的最大需用应力; F 表示最大抗拉强度; v 表示信号冲回速度; n 表示一个固定常量; s 表示使用系数; $\sigma_{\max}$ 表示零件的最小许用应力; ω_i 、 ω_j 分别表示的第*i*个或第*j*个位置的测试结果。

已知最大许用应力为1 MPa。经计算,所提出红外热波无损检测技术得到稳定性好的零件最大应力结果为0.962 5 MPa;得到稳定性差的零件最大应力结果为1.412 2 MPa。传统红外热波无损检测技术得到稳定性好的零件的最大应力结果为0.944 7 MPa;得到稳定性差的零件的最大应力结果为1.126 5 MPa。综合上述实验结果,可知所提出的红外热波无损检测技术对汽车零部件制造工艺稳定性的检测更加贴合实际。

3 结语

目前,汽车零件生产企业,以新产品开发为载体,增强企业的自主开发能力和创新技术,通过红外热波无损检测技术,对汽车零部件进行可靠检测,对被检测对象的稳定性做出有效评价。基于红外热波无损检测提出的汽车零部件制造工艺稳定性检测方法,通过分析零件拓扑结构、汽车运行状态下的振动幅值等参数,得到零件的最大许用应力。根据零件的最大应力值,判断汽车零件在投入使用过程中的运转是否安全,以此得出制造工艺的稳定性。该技术弥补常规红外热波无损检测技术的缺陷,实现对零件性能的精准检测。但该检测在计算步骤上相对复杂,易产生误差,因此在计算过程中要注意数据的真实性和可靠性。

参考文献:

- [1] 郑国峰,上官文斌,韩鹏飞,等. 基于小波变换的汽车零部件加速耐久性载荷谱编辑方法研究[J]. 机械工程学报,2017,53(8):124-131.
- [2] 左治江,张宇辉,丁元才. 基于AutoForm的汽车顶盖拉延工艺分析及模具设计[J]. 锻压技术,2019,44(3):101-106.
- [3] 丁广鑫,夏慧,刘国强,等. 基于碳纳米管复合薄膜光声换能器的磁声电红外热波无损检测[J]. 电工技术学报,2019,34(13):2709-2715.
- [4] 贾利军. 汽车零部件包装用聚丙烯复合材料性能研究[J]. 包装工程,2017,38(23):96-101.
- [5] 敖波,钟建兰,古玉祺. EB-PVD热障涂层TGO三维结构分析[J]. 仪器仪表学报,2018,39(8):136-142.
- [6] 张勃洋,李硕,张清东,等. 不锈钢/碳钢热静压复合中表面形貌对界面变形及复合质量的影响[J]. 机械工程学报,2019,55(10):62-69.
- [7] 李明智,刘秀成,刘宗发,等. 基于有限元法的一维球链中非线性孤立波传播特性[J]. 北京工业大学学报,2018,44(5):764-769.
- [8] 李建超,何箐,吕玉芬,等. 热障涂层红外热波无损检测技术研究进展[J]. 中国表面工程,2019,32(2):16-26.
- [9] 徐滨士,董世运,门平,等. 激光增材制造成形合金钢件质量特征及其检测评价技术现状[J]. 红外与激光工程,2018,47(4):8-16.
- [10] 戴泉晨,朱建军. 基于典型样本集的汽车零部件供应商分类方法研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版),2019,43(4):527-534.
- [11] 黄将. 数据中心光纤通信网络传输非平稳数据红外热波无损检测技术研究[J]. 激光杂志,2019,40(4):131-135.
- [12] 叶明,代均,李思,等. 搭载EMCVT的电动汽车动力传动系统硬件在环仿真研究[J]. 机械传动,2018,42(4):16-22.
- [13] 韩利亚,陈天赋,甘万兵,等. 高温转向节锻件自动化三维测量与精度检测技术[J]. 塑性工程学报,2018,25(5):53-59.
- [14] 王丹,宁宁,杨鹏飞,等. 飞机结构强度试验中碳纤维增强树脂基复合材料红外热波无损检测技术[J]. 科学技术与工程,2018,18(18):313-322.
- [15] 何欣龙,王继芬,李青山,等. 基于多层感知器-Fisher判别分析的车用保险杠红外光谱鉴别[J]. 中国测试,2019,45(5):74-78,92.

收稿日期:2020-02-26

(上接第56页)

2)根据预防3Cr2W8V钢热挤压模具失效的对策,对某厂生产的EQ140杯形螺母的热挤压模具进行了生产试验。验证结果表明,采取上述对策,使模具的使用寿命从原来的3 000余件提高到了7 000~8 000余件,模具寿命得到大幅度提高,节省了昂贵的模具材料,获得了良好的经济效益。因此,在模具选材和设计合理的前提下,充分发挥工艺的潜力^[6],可以在很大程度上弥补模具材料本身的不足,从而有效地防止模具的早期失效。

参考文献:

- [1] 李秋平,谭兆湛. 挤压模具钢3Cr2W8V热处理工艺的正交试

验[J]. 机械工程师,2016(4):25-27.

- [2] 涂禄强,徐锋,田帅. 立方氮化硼涂层刀具制备及切削性能[J]. 机械制造与自动化,2020,49(1):16-19.
- [3] 安波,刘和成. 热处理工艺规范数据手册[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
- [4] 宋斌. RE-K/Na-Ti复合变质对3Cr2W8V热作模具钢组织的影响[J]. 热加工工艺,2017(6):15-18.
- [5] 吉国强,邓焜恒,于丽娟. 3Cr2W8V钢热作模具开裂原因分析[J]. 锻压技术,2019(6):17-21.
- [6] 杨光龙,黄晓琴. 提高3Cr2W8V钢热挤压模寿命的工艺措施[J]. 机械工艺师,2000(5):19-23.

收稿日期:2020-03-17