

船用柴油机机体主轴承孔镗削加工 残余应力预测

韩济远¹ 张嘉豪² 展勇³ 张鸿羿³ 曲东越^{3*}

1. 哈尔滨大电机研究所有限公司, 哈尔滨, 150040

2. 西安航天动力测控技术研究所, 西安, 710025

3. 哈尔滨工程大学机电工程学院, 哈尔滨, 150001

摘要:船用柴油机主轴承孔作为船用柴油机机体的关键结构之一,其加工质量直接影响着船用柴油机的整体性能及长期的运行可靠性。为实现对残余应力的预测,采用有限元仿真、响应面模型与加工实验相结合的方法研究了加工参数对表面残余应力的影响规律,确定了以残余应力最小化为目标的切削参数。结果表明:所建的主轴承孔三维镗削加工表面残余应力仿真模型的计算结果和响应面模型预测结果与实际表面残余应力相一致;响应面模型预测精度高于有限元模型,平均预测误差从15.6%减小至2.5%;通过确定切削参数可以有效减小零件的加工残余应力,表面残余应力减小50.6%,切削残余应力减小53.6%,进给残余应力减小46.2%。

关键词:船用柴油机机体;镗削加工;残余应力;有限元仿真

中图分类号:TH142;TG53

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.08.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Prediction of Residual Stress in Boring Main Bearing Holes of Marine Diesel Engine Bodies

HAN Jiyuan¹ ZHANG Jiahao² ZHAN Yong³ ZHANG Hongyi³ QU Dongyue^{3*}

1. Harbin Electric Motor Research Institute Co., Ltd., Harbin, 150040

2. Xi'an Aerospace Propulsion Control Technology Research Institute, Xi'an, 710025

3. School of Mechanical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, 150001

Abstract: As a critical structural element of the engine body, the main bearing hole directly affected the engine's overall performances and long-term reliability. For predicting residual stress, methods combining finite element simulation, response surface modelling, and machining experiments were utilized to explore how machining parameters affected surface residual stress, culminating in the determination of cutting parameters focused on minimizing these stresses. The results show that the established three-dimensional simulation model for machining surface residual stress in the main bearing hole correlates well with actual surface residual stress and the predictions of the response surface model. The response surface model achieves higher prediction accuracy than the finite element model, improving the average prediction error from 15.6% to 2.5%. Optimal cutting parameters may reduce machining-induced residual stress significantly, decreasing surface residual stress by 50.6%, cutting residual stress by 53.6%, and feed-induced residual stress by 46.2%.

Key words: marine diesel engine body; boring; residual stress; finite element simulation

0 引言

船舶及其配套设备产业在全球经济体系中占据着不可或缺的地位。船用中、低速柴油机的结构尺寸通常较大,而结构的壁厚相对较薄,加工质

量直接影响船用柴油机的工作性能和可靠性。主轴承孔作为船用柴油机机体上的关键结构,其大尺寸、薄壁特性导致加工时易产生残余应力累积,加剧机体变形,影响主轴承孔同轴度、位置度和圆柱度等关键质量特征。在表面残余应力的作用下,材料往往会产生变形、裂纹甚至断裂^[1]。表面残余应力对材料的疲劳寿命、变形程度及腐蚀性具有显著影响。船用柴油机的关键结构件的疲劳

收稿日期:2024-06-11

基金项目:工业与信息化部船用发动机高可靠性设计和验证关键技术重大专项(CBG5N21-2-1)

寿命直接关系到船用柴油机的整体性能、可靠性及安全性,因此,迫切需要研究加工工艺参数与表面残余应力的内在关系。

近年来,国内外学者在表面残余应力有限元预测方面取得了一些成果,许多商业软件可用于模拟切削残余应力,例如ABAQUS、DEFORM、ANSYS和AdvantEdge^[2]。经典的残余应力数值模拟算法有欧拉法和拉格朗日法。然而,拉格朗日方法精度低^[3],欧拉法忽略了材料的弹性特性^[4],两种方法都存在不足之处。因此,VALIORGUE等^[5]研究自适应重网格拉格朗日模型(arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)、耦合欧拉和拉格朗日模型以及任意拉格朗日-欧拉模型。ÖZEL等^[6]基于自适应网格技术对AISI 1045钢等材料的机械加工表面残余应力进行了研究,发现ALE技术在预测切削加工残余应力方面具有优势。AKRAM等^[7]分析了切削速度和进给量对6061铝合金表面残余应力形成的重要作用。LUO等^[8]分析了车削参数变化对纯铁表面残余应力的影响,并研究了一个预测残余应力的模型。现有的残余应力研究主要集中在小尺寸的航空薄壁件平面加工的残余应力方面,对尺寸更大、结构更复杂的零件曲面的加工残余应力研究明显不足。

残余应力的形成机理极为复杂,而有限元仿真的结果受到塑性理论的固有局限和材料性能数据不精确性^[9]的影响。同时,有限元模型的计算需求高,仿真耗时显著,制约了该方法的应用。机器学习(machine learning, ML)具有较高的残余应力预测精度,然而模型训练过程中对计算资源有高需求,依赖大规模训练数据集,且模型内部变量关系的解释性不足,尤其是当训练数据不足时,ML模型更易出现过拟合现象,进而影响模型在新数据集上的表现^[10]。响应面法(response surface methodology, RSM)通过合理设计实验可以有效减少实验次数,从而节省时间和成本^[11],因此,在金属切削工艺中使用RSM法对残余应力进行建模能够有效克服传统数值建模技术的缺点。RSM法已经成功地应用于各种工程和制造过程,证明其在复杂系统建模中的有效性和实用性^[12-13]。

表面残余应力容易测量,但沿深度方向分布的残余应力测量困难且精度较低。本文构建了船用柴油机机体主轴承孔三维镗削表面残余应力的仿真模型和响应面预测模型,并通过实验来

验证模型预测的准确性。仿真方法和响应面预测方法也能应用到沿深度方向残余应力分布的预测,因此,研究表面残余应力也有助于分析残余应力沿深度方向上的分布,从而提高船用柴油机运行可靠性和整体性能。通过分析切削参数对表面残余应力的影响规律,本文以最小化表面残余应力和表面粗糙度为目标,确定了主轴承孔的切削参数。

1 船用柴油机主轴承孔镗削加工残余应力有限元预测模型

1.1 船用柴油机主轴承孔三维镗削有限元模型的建立

主轴承孔是船用柴油机机体的关键部位,如图1所示,船用柴油机机体的主轴承孔直径较大,加工精度要求较高,并且主轴承孔是缸套孔、凸轮轴孔等其他结构的加工基准。

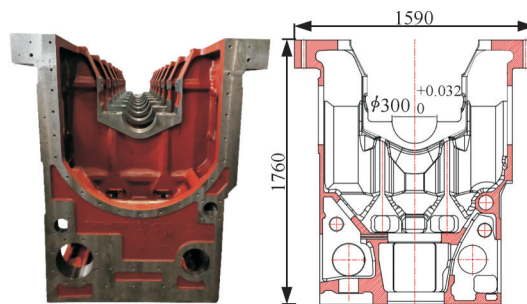


图1 某船用柴油机机体主轴承孔

Fig.1 Main bearing holes of marine diesel engine bodies

本文预测主轴承孔在经历镗削加工和应力释放后的表面残余应力,采用AdvantEdge软件中的圆角车削模块来模拟主轴孔的镗削加工过程。AdvantEdge软件在仿真结束后自动执行刀具卸载和工件冷却过程,从而模拟了切削加工后应力释放的残余应力,同时支持用户获取特定方向上的残余应力数据。具体工作过程如下:

首先建立材料的本构模型,准确的材料本构关系对揭示应变、应变率和温度对流动应力的影响至关重要。本文采用Johnson-Cook(J-C)材料本构模型,描述了材料在大应变、高应变率及高温条件下的行为。Q235钢的J-C材料本构模型参数见表1。等效流动应力为

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\epsilon}^n][1 + C \ln(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0})][1 - (\frac{T - T_r}{T_m - T_r})^m] \quad (1)$$

式中, $\bar{\epsilon}$ 为等效塑性应变; $\dot{\bar{\epsilon}}$ 为等效应变率; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; T_m 为材料的熔点温度, $^{\circ}\text{C}$; T_r 为室温, $^{\circ}\text{C}$; A 为材料的屈服强度,MPa; B 为硬化模量,MPa; C 为应变率敏感性; m 为热软化因子; n 为硬化因子。

表 1 Q235 钢的 J-C 本构模型参数^[14]

Tab.1 Parameters of J-C constitutive model for Q235

A/ MPa	B/ MPa	n	C	m	T _m /°C	T _c /°C	$\dot{\epsilon}_0$
293.8	230.2	0.578	0.0652	0.706	1522	20	0.0021

本文采用物理分离准则评估切削过程中切屑与工件的分离及材料的损伤情况。损伤参数 D 量化表示材料损伤程度。当 D 达到 1 时,材料完全失效,切屑与工件分离。 D 的计算公式如下:

$$D = \sum_i \frac{\Delta \epsilon_i^p}{\epsilon_f^p} \quad (2)$$

式中, ϵ_f^p 为材料的失效应变; $\Delta \epsilon_i^p$ 为材料的应变增量; D 为材料的累积损伤。

为了解决仿真中旋转效应引起的计算复杂性及收敛性问题,本文基于离散数学思想,选取工件切削层的一个微小矩形单元作为研究对象,并将其简化为直角切削的有限元模型。该方法有效地将实际的旋转主运动转化为直线运动的直角切削仿真。ARRAZOLA 等^[15]通过实验验证了简化的直角切削模型在残余应力仿真方面的准确性。如图 2 所示, X 轴表示工件的切削运动方向, Y 轴表示切削深度的方向, Z 轴表示刀具的进给方向。

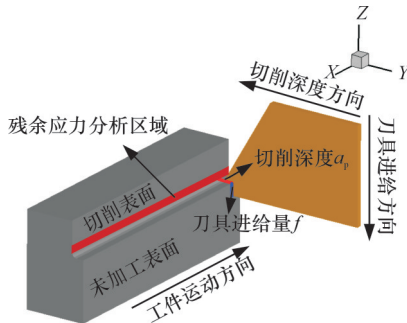


图 2 仿真模型中各镗削参数示意图

Fig.2 Diagram of boring parameters in the simulation model

利用库仑摩擦模型对刀具与工件之间的摩擦进行建模。定义刀具与工件材料之间的摩擦系数 $\mu=0.59$ 、剪切系数 $\tau=1$,则剪切应力为

$$\tau_f = \begin{cases} \mu \sigma_n & \mu \sigma_n < \sigma_f \\ \tau \sigma_f & \mu \sigma_n > \sigma_f \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ_n 为法向应力, MPa; σ_f 为剪切屈服强度, MPa。

刀片型号为 TPGH110304L,有限元模型中材料定义为 Carbide-Grade-K。刀具建模及导入流程如图 3 所示。本研究设置工件在 X 、 Y 、 Z 方向为固定约束,加工结束冷却完成后去除约束。模拟环境设定为室温 $20\text{ }^\circ\text{C}$,空气的热导率设为 $0.02\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。工件和刀具采用四面体自适应

网格,设定工件网格的最小及最大网格边长分别为 0.01 mm 和 0.15 mm ,刀具网格的最小及最大网格边长分别为 0.01 mm 和 0.5 mm ,并在加工过程中不断进行网格的自适应重划分。

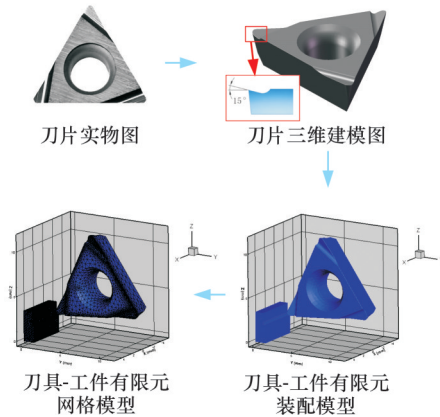


图 3 有限元模型的建立示意图

Fig.3 Schematic diagram of finite element model establishment

如图 4 所示,为了获得镗削切削方向(X 方向)和刀具进给方向(Z 方向)加工表面残余应力沿深度的分布,本文提取三层 YX 平面的截面,每层截面上分别提取三个位置(1、2、3)、50 个数据点沿深度分布的数据,最后将每层的数据取平均值,获得了镗削加工残余应力沿深度方向的分布。采样点的 Z 向坐标是直接决定 YX 采样平面的位置参数,其坐标值可以通过计算获得,理论表达式可表示为

$$Z = h + \sqrt{r^2 - (r - a_p)^2} - f \quad (4)$$

式中, h 为工件模型的高度, mm; r 为刀具圆弧半径, mm; f 为进给量, mm/r; a_p 为切削深度, mm。

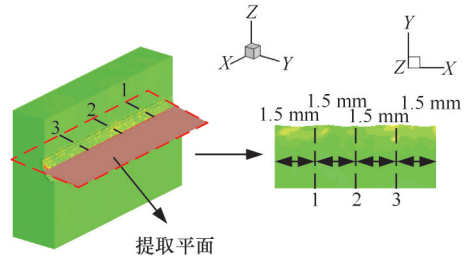


图 4 加工残余应力沿深度方向提取流程图

Fig.4 Flowchart for extracting machining residual stresses along the depth direction

1.2 船用柴油机主轴承孔三维镗削有限元模型仿真结果

本文采用正交设计法设计了三因素、三水平的镗削加工仿真试验组。正交镗削试验的设计方案和仿真得到的表面残余应力结果见表 2。

表2 正交试验组表面残余应力仿真值

Tab.2 Simulated values of residual stress in orthogonal experimental groups

实验编号	切削速度/(m·min ⁻¹)	切削深度/mm	进给量/(mm·r ⁻¹)	仿真表面残余应力/MPa
1	75.398	0.1	0.05	191.640
2	94.248	0.2	0.05	238.855
3	117.809	0.3	0.05	306.562
4	94.248	0.1	0.10	256.518
5	117.809	0.2	0.10	310.733
6	75.398	0.3	0.10	202.779
7	117.809	0.1	0.15	330.839
8	75.398	0.2	0.15	207.642
9	94.248	0.3	0.15	326.356

2 船用柴油机主轴承孔镗削加工残余应力实验验证

船用柴油机机体主轴承孔尺寸大、质量大、结构复杂,本文将主轴承孔简化成半圆形孔板样件。利用慢走丝线切割技术将Q235(E235B)钢毛坯件(长500 mm、宽250 mm、厚60 mm)加工成半圆形孔板样件。镗削加工实验在Q235钢半圆形孔板样件(直径300 mm、厚度60 mm)上进行。所有样件分别在750 °C和350 °C下退火和时效硬化。Q235钢的元素组成见表3,Q235钢在室温下的热物理和机械性能见表4^[16]。

表3 Q235钢的材料成分(质量分数)^[16]

Tab.3 The chemical composition of Q235 steel (mass fraction) %

w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)
0.13	0.32	1.43	0.028	0.022
w(Fe)	w(Nb)	w(Alt)	w(V)	w(Cev)
97.687	0.003	0.004	0.006	0.37

表4 Q235钢的物理参数^[16]

Tab.4 The physical properties of Q235 steel

密度/(g·cm ⁻³)	硬度HRC/MPa	屈服极限/MPa	弹性模量/GPa
7.85	17	295	198.7
泊松比	热膨胀系数/K ⁻¹	热导率/(W·(m·K) ⁻¹)	
0.25	10.6×10 ⁻⁶	49	

如图5所示,实验设备使用T68卧式镗床,使用安装在DBJ20L20-100镗刀刀柄上的刀片TP-GH110304L进行单次镗削加工。刀具的具体几何参数详见表5。

2.1 盲孔法测量残余应力原理

实验采用盲孔法对表面残余应力进行测量,盲孔法对工件的破坏性较小,操作简单方便,可携

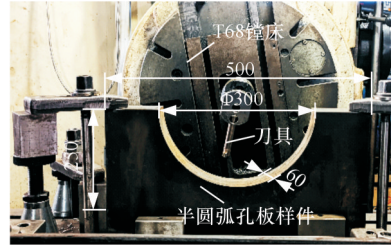


图5 镗削加工样件

Fig.5 Boring machining sample

表5 刀具几何参数

Tab.5 The geometric parameters of the cutting tool

前角γ ₀ / (°)	后角α ₀ / (°)	主偏角κ _r / (°)	刀尖圆弧半径r _ε /mm	切削刃钝圆半径r _ε /μm
15	11	95	0.4	20

带到现场使用,由此得到了广泛的应用。盲孔法的原理是在应变片中心钻孔,通过测量释放应变,利用下式计算测试点的残余应力^[17]:

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{4A}(\epsilon_1 + \epsilon_3) \mp \frac{E}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3)^2}$$

(5)

式中:σ₁、σ₂分别为最大主应力和最小主应力,MPa;E为弹性模量,GPa;A、B为应变释放系数;ε₁、ε₂、ε₃为测量的应变释放值。

则有

$$\tan 2\theta = \frac{2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3}{\epsilon_3 - \epsilon_1}$$

(6)

式中:θ为主应力角,(°)。

x、y方向的应力值分别为

$$\sigma_x = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\theta$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\theta$$

(7)

应变片的粘贴位置是获取准确残余应力测量数据的基础。为了方便测量并避免边缘效应的影响,本文将三向应变片粘贴在半圆孔板样件的中心位置,1号应变片沿着平行于加工样件的长度方向进行布置,以确保测量结果的准确性。

2.2 实验装备

实验所用设备:CM-1A-12型数字静态应变电阻仪,测量范围为0~±19 999 με,分辨率为1 με,温度漂移小于±1 με/°C,零点漂移小于±4 με/4 h;BF120-1.5CA型应变片,电阻为120 Ω±0.3 Ω,灵敏系数为2.11%±1%,基底尺寸为12.5 mm×12.5 mm;盲孔法专用钻孔夹具装置。实际测试中忽略形状差异对应变释放系数A、B的影响^[18]。本文A、B取线性阶段应力释放系数平均值: $\bar{A} = -0.07737$, $\bar{B} = -0.1547$ ^[16]。

2.3 实验方案和结果

实验中,本文将切削速度、切削深度和进给量

这三个切削参数设置为不同的三个水平,研究不同参数对加工过程的影响。实际企业的加工参数见表6。

表6 切削参数具体水平及数值
Tab.6 Cutting parameters at specific levels and values

切削参数	试验水平		
	1	2	3
切削速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	75.398	94.248	117.809
切削深度 a_p/mm	0.1	0.2	0.3
切削进给量 $f/(mm \cdot r^{-1})$	0.05	0.10	0.15

实验采用中心组合试验(central composite design, CCD)法,试验点划分为三类:中心点、角点和轴线点,包含三因素三水平的23组试验方

表7 表面残余应力响应面试验组测量结果

Tab.7 Measurement results of the response surface experiment for surface residual stress

编号	切削速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	切削深度 a_p/mm	进给量 $f/(mm \cdot r^{-1})$	X向残余应力/MPa	Y向残余应力/MPa	表层残余应力/MPa
1	75.398	0.3	0.05	171.114	99.8287	198.106
2	94.248	0.2	0.05	160.871	124.017	203.125
3	117.809	0.3	0.05	221.097	122.587	267.881
4	94.248	0.2	0.15	238.106	143.869	263.785
5	75.398	0.1	0.15	177.757	122.787	216.042
6	117.809	0.3	0.15	270.404	204.146	338.813
7	75.398	0.2	0.10	168.366	130.232	212.855
...
...
20	94.248	0.1	0.10	195.016	101.220	219.719
21	94.248	0.3	0.05	204.505	94.688	225.362
22	94.248	0.1	0.15	229.226	104.637	251.979
23	94.248	0.3	0.15	206.740	191.327	281.687

2.4 船用柴油机主轴承孔三维镗削有限元模型实验验证

为了验证仿真结果的准确性,本文将仿真得到的残余应力与镗削实验中测量的残余应力进行比较,并得到其相对误差。以往残余应力的仿真计算结果通常与实验结果差别较大,文献[19]纯铁壳体车削加工残余应力仿真结果与实验数据的相对误差为29.2%,DING等[20]发现 AISI 52100 钢车削加工残余应力仿真值与实验值的相对误差在20%以上。表面残余应力预测值与实验值对比如图7所示,可以看出残余应力预测差值均在60 MPa以内,且相对误差均小于20%,本文仿真结果的误差与文献[19-20]中的仿真误差处于相似水平,故可以认为本文的三维镗削有限元预测模型准确性良好。

2.5 镗削加工参数对残余应力的影响

极差分析法是一种用于评估不同因素对实验结果影响程度的有效方法,能直观地确定参数的

案。前20组试验(6组中心点试验和14组轴向点试验)用于构建表面残余应力响应面模型,后3组试验用于验证响应面预测模型的准确性。图6所示为23组半圆弧孔板样件盲孔法残余应力测量实验,表面残余应力实验测量结果见表7。

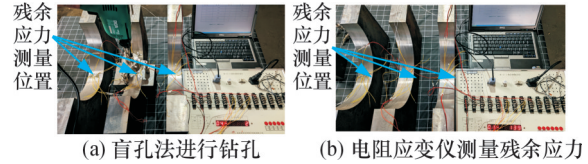


Fig.6 Experiment of residual stress measurement based on the blind hole method

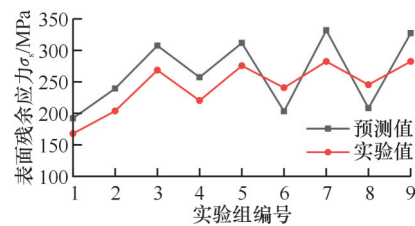


图7 表面残余应力预测值与实验值对比
Fig.7 Comparison of predicted and experimental values of surface residual stress

最佳组合和优选搭配。表面残余应力与切削、进给方向残余应力可表示为

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (8)$$

式中, σ_s 为表面残余应力, MPa; σ_x 为切削方向残余应力, MPa; σ_y 为进给方向残余应力, MPa。

加工残余应力极差分析结果见表8。切削参数主效应图和切削参数极差分析图分别见图8和图9,可以看出,切削参数对切削方向残余应力的影响程度从大到小依次为:切削速度,进给量,切

削深度。而切削参数对进给方向残余应力的影响程度从大到小依次为：进给量，切削深度，切削速度。切削参数对表面残余应力的影响程度从大到小依次为：切削速度，进给量，切削深度。

表8 加工残余应力极差分析

Tab.8 Range analysis of residual stress in machining

切削参数	切削速度 $v/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	切削深度 a_p/mm	进给量 $f/(\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$
$\sigma_x/$ MPa	$K_{\text{avg}1}$	167.458	178.781
	$K_{\text{avg}2}$	187.542	200.046
	$K_{\text{avg}3}$	225.721	201.895
	R_1	58.263	23.114
$\sigma_y/$ MPa	$K_{\text{avg}4}$	137.822	130.628
	$K_{\text{avg}5}$	138.855	133.291
	$K_{\text{avg}6}$	145.598	158.355
	R_2	7.776	27.727
$\sigma_s/$ MPa	$K_{\text{avg}7}$	217.431	222.938
	$K_{\text{avg}8}$	234.844	240.893
	$K_{\text{avg}9}$	274.745	263.189
	R_3	57.314	40.251

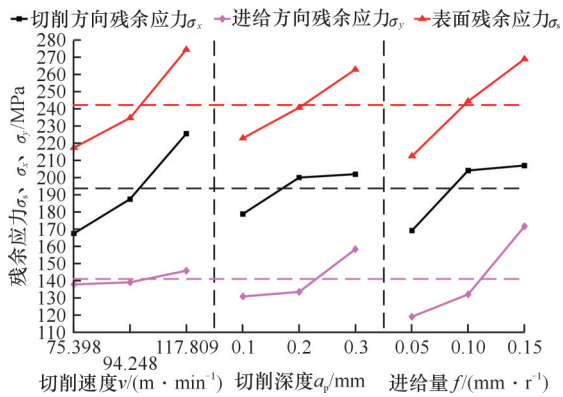


图8 切削参数主效应图

Fig.8 Main effect chart of cutting parameters

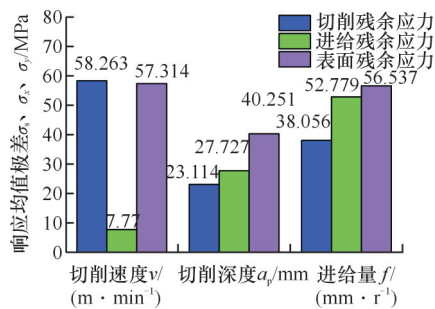


图9 切削参数极差分析图

Fig.9 Range analysis plot of cutting parameters

3 船用柴油机主轴承孔表面残余应力响应面预测模型

3.1 响应面法基本原理

本文采用响应曲面法构建了船用柴油机主轴承孔镗削过程中的表面残余应力的预测模型,利用二

阶模型精确地拟合响应面。二阶模型可以表示为

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (9)$$

式中: y 为目标响应; β_0 为常数项; β_j 为第 j 个一次项系数; β_{jj} 为第 j 个二次项系数; β_{ij} 为第 i 个相互项系数; k 为变量数量; ϵ 为随机误差,通常假设其服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$,且同方差相互独立。

3.2 船用柴油机主轴承孔表面残余应力预测模型的建立

为了详细分析切削速度(A)、切削深度(B)和进给量(C)对表面残余应力的具体影响规律,利用Design-Expert软件,基于表7中前20组试验的表面残余应力数据建立镗削加工的表面残余应力响应面预测模型。利用二阶多项式所构建的响应曲面法预测模型,多重决定系数(R^2)为0.9984,显示模型与实验数据高度一致。修正决定系数(R^2 adjusted)和预测决定系数(R^2 predicted)分别为0.9970和0.9903,表明该模型具有优秀的预测能力和适应性。

对表面残余应力响应面预测模型进行了显著性检验和方差分析,见表9。模型的 F 值为692.59,显示其合理性极高; P 值小于0.0001,表明模型参数具有极高的统计显著性。失拟项 P 值为0.1384,表明不具显著性,证实模型对数据拟合良好。模型的变异系数(coefficient of variation, CV)为0.8403%,显示出极低的误差。Adequate precision值为118.5289,表明模型具有良好的信噪比和可靠性。表面残余应力受各切削参数的影响强度不同, F 值越大,影响越强。切削参数对表面残余应力的影响程度从大到小依次为:切削速

表9 响应面模型显著性检验

Tab.9 Significance test of response surface model

	平方和	均方差	F 值	P 值	显著性
模型	25 409.55	2823.28	692.59	<0.0001	显著
A	11 022.27	11 022.27	2703.90	<0.0001	显著
B	4567.87	4567.87	1120.56	<0.0001	显著
C	9013.77	9013.77	2211.19	<0.0001	显著
AB	21.72	21.72	5.33	0.0436	显著
AC	2.10	2.10	0.5155	0.4892	—
BC	205.82	205.82	50.49	<0.0001	显著
A^2	80.28	80.28	19.69	0.0013	显著
B^2	36.07	36.07	8.85	0.0139	显著
C^2	4.26	4.26	1.05	0.3306	—
残差	40.76	4.08	—	—	—
失拟项	30.15	6.03	2.84	0.1384	不显著
纯误差	10.62	2.12	—	—	—
总离差	25450.31	—	—	—	—

度,进给量,切削深度。所得结论与2.5节中的结论一致,进一步验证了响应面模型的准确性。

综上所述,本文构建了船用柴油机主轴承孔镗削加工表面残余应力二次多项式回归预测方程,具体表达式为

$$\sigma = 147.27622 - 0.992305v - 107.51137a_p + 450.70604f + 0.776164va_p + 0.48292vf + 1014.475a_p f + 0.012186v^2 + 362.19091a_p^2 - 498.03636f^2 \quad (10)$$

3.3 船用柴油机主轴承孔表面残余应力预测模型的验证

基于式(10)获得的不同加工参数下的表面残余应力响应面预测值见表10和图10。对比分析实验测量值与模型预测值,两者之间的相对误差均在10%以内,验证了本文所提模型的准确性。

表10 表面残余应力预测模型实验值和预测值

Tab.10 Experimental and predicted values of the surface residual stress prediction model

实验编号	切削速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	切削深度 a_p/mm	进给量 $f/(mm \cdot r^{-1})$	实验表面残余应力/MPa	预测表面残余应力/MPa
1	94.248	0.3	0.05	225.362	223.071
2	94.248	0.1	0.15	251.979	240.628
3	94.248	0.3	0.15	281.687	293.166
4	75.398	0.1	0.05	167.487	168.640
5	75.398	0.2	0.15	244.808	238.719

由图10可知,主轴承孔三维镗削加工表面残余应力的仿真模型与实际值之间的平均相对误差为15.6%。而表10显示,响应面模型预测的残余应力与实测值的平均相对误差降至2.5%。结果表明,响应面模型在预测精度上优于传统有限元方法,并且该模型对不同加工条件下的残余应力

预测具有良好适应性。此外,响应面模型预测的准确性得到了实验验证,并在多种实验条件下展现了良好的一致性。

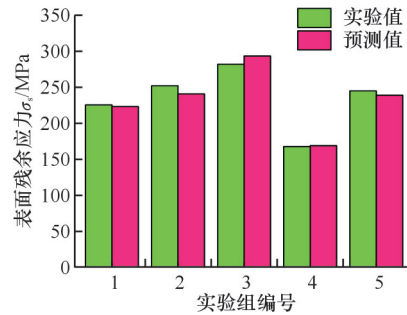


图10 表面残余应力的预测数据与实验结果对比

Fig.10 Comparison of predicted and experimental result for surface residual stress

3.4 镗削加工切削参数对表面残余应力的影响分析

为了深入研究不同切削参数组合对船用柴油机机体主轴承孔镗削加工表面残余应力的影响,本文构建了不同切削参数的表面残余应力响应曲面和等高线图。

1)切削深度和切削速度对表面残余应力的影响。图11所示为不同进给量条件下表面残余应力随切削速度和切削深度变化的情况,结果表明,进给量增加导致表面残余应力增大。当切削深度在0.1~0.3 mm、切削速度在75.398~145 m/min时,表面残余应力随着切削速度和切削深度的增加而增大。这是由于切削力的增大导致金属材料塑性变形增大,表面硬化程度提高,从而增大残余应力。进给量、切削速度和切削深度均对表面残余应力有重要影响,其中,切削速度的影响更为显著,而切削深度的影响相对较小。

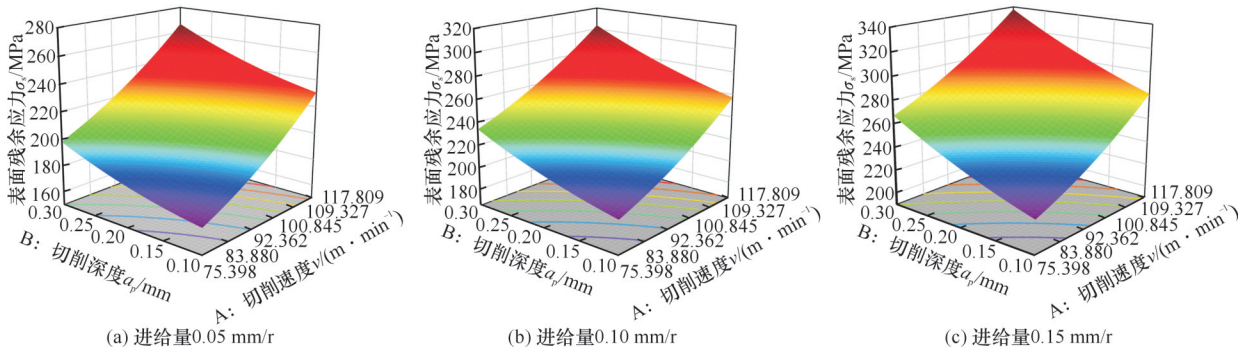


图11 切削速度和切削深度对镗削表面残余应力的响应曲面和等高线图

Fig.11 Response surface and contour map of cutting speed and cutting depth on boring surface residual stresses

2)切削速度和进给量对表面残余应力的影响。图12所示为不同切削深度条件下表面残余应力受进给量和切削速度的影响规律,结果表明,随着切削深度的增加,表面残余应力呈增大趋

势。然而,切削深度对残余应力的影响相对有限。在进给量从0.1 mm/r增加到0.3 mm/r、切削速度从75.398 m/min增加到117.809 m/min的范围内,表面残余应力随着进给量和切削速度的增

大而增大。这是因为,进给量和切削速度的增大导致切削力和切削热的增大,从而引起金属表面的更大塑性变形和残余应力。切削速度对残余应力的影响更为显著,而进给量的影响相对较小。

3)切削深度和进给量对表面残余应力的影响。切削速度为75.309、94.248、117.809 m/min时,表面残余应力随切削深度和进给量变化的

情况如图13所示。结果表明,切削速度的提高显著增大了表面残余应力。这主要是由于切削深度和进给量的增大导致更大的塑性变形,同时加剧了刀具与工件之间的摩擦,从而增大了机械应力和热应力。进给量的增大对表面残余应力的影响更为显著,而切削深度的影响相对较小。

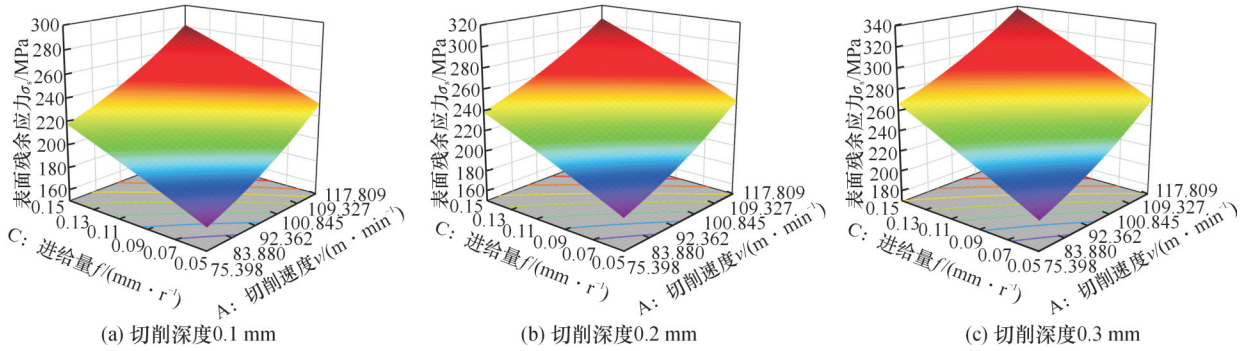


图12 切削速度和进给量对镗削表面残余应力的响应曲面和等高线图

Fig.12 Response surface and contour map of cutting speed and feed rate on boring surface residual stresses

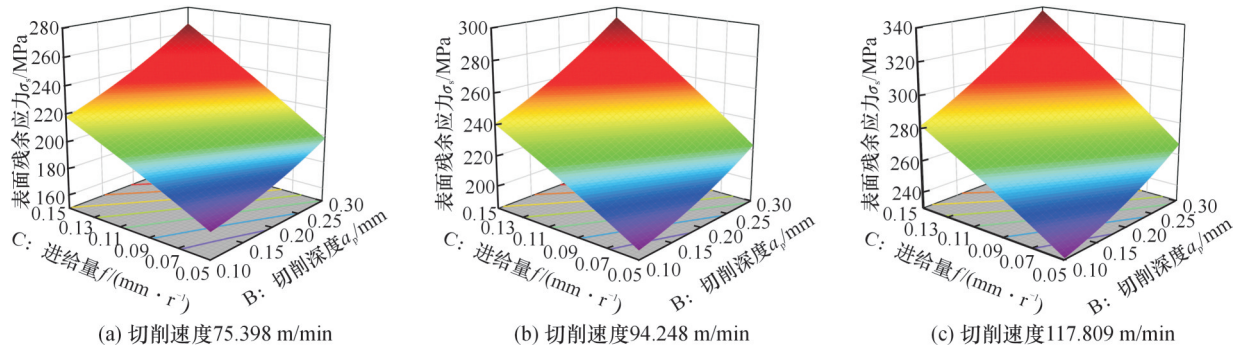


图13 切削深度和进给量对镗削表面残余应力的响应曲面和等高线图

Fig.13 Response surface and contour map of cutting depth and feed rate on boring surface residual stresses

3.5 考虑残余应力和表面粗糙度最小化的切削参数确定

为了提高船用柴油机机体主轴承孔的镗削加工质量,以表面残余应力和表面粗糙度最小化为目标来确定切削参数。表面粗糙度是衡量机加工表面微观几何形状尺寸特性的一个重要参数,它由表面微小间距和峰谷不平度构成。表面粗糙度Ra的理论和精确计算公式如下:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (11)$$

式中,Ra为轮廓的算术平均偏差,μm;l为取样长度,mm;z(x)为表面轮廓的高度函数。

$$Ra \approx 770 \left(1 - \frac{f}{2r_c} \right) r_c \arcsin \left(\frac{f}{2r_c} \right) \quad (12)$$

$$s.t. f \leq 2\sqrt{a_p(2r_c - a_p)} \leq 2r_c$$

式中,r_c为刀尖圆角,mm。

本文通过对企业进行实地调研并结合船用柴

油机机体的加工参数与加工机床的精度,确定了切削参数的范围,即切削速度v设为75.398、94.248、117.809 m/min,切削深度a_p为0.1~0.5 mm,进给量f为0.05~0.25 mm/r。不同的切削参数对表面残余应力和表面粗糙度具有显著影响。本文基于式(10),利用Python的minimize函数,并采用L-BFGS-B方法进行边界约束优化,以最小化表面残余应力为目标,确定了切削参数。此外,基于式(12),通过生成进给量f与切削深度a_p的二维网格,利用minimize函数对f和a_p的全部组合进行了计算,以表面粗糙度最小化为目标,进一步确定切削参数。以残余应力和表面粗糙度最小化为目标确定的切削参数如下:v=75.398 m/min、a_p=0.1 mm、f=0.05 mm/r。

不同切削参数的残余应力数值对比如图14所示。第1组数据为企业未考虑残余应力和表面粗糙度的实际切削参数,第2组数据为考虑残余应力和表面粗糙度的确定参数。

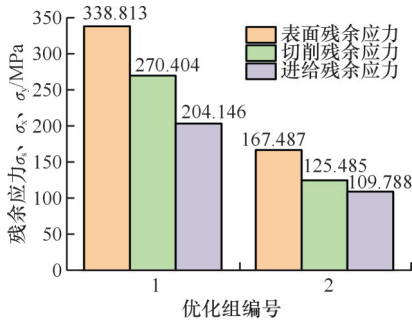


图 14 不同切削组的残余应力结果对比

Fig.14 Comparison of residual stress results from different cutting groups

不同切削参数的加工表面质量见表 11, 采用第 2 组切削参数进行加工, 表面粗糙度减小 88.9%, 表面残余应力减小 50.6%, 切削残余应力减小 53.6%, 进给残余应力减小 46.2%。由此可知, 通过确定切削参数可以有效地提高表面加工质量。

表 11 不同切削参数的加工表面质量

Tab.11 Processing surface quality under different cutting parameters

	粗糙度 Ra /mm	表面残余应力 σ_s /MPa	切削残余应力 σ_c /MPa	进给残余应力 σ_f /MPa
第 1 组	1.823	338.813	270.404	204.146
第 2 组	0.201	167.487	125.485	109.788
变化量	-1.622	-171.326	-144.919	-94.358
降幅/%	88.9	50.6	53.6	46.2

4 结论

1) 本文建立的主轴承孔三维镗削加工表面残余应力的仿真模型计算结果与实际表面残余应力的平均相对误差为 15.6%; 响应面模型预测结果与实际表面残余应力的平均相对误差为 2.5%, 相较于传统的有限元方法, 响应面预测方法在精确性、适应性、验证性和可靠性等方面表现出显著优势。

2) 利用极差分析法研究切削参数对残余应力的影响规律, 结果表明: 切削参数对切削方向残余应力的重要性从大到小依次为: 切削速度, 进给量, 切削深度; 对于进给方向, 残余应力的显著性排序从大到小依次为: 进给量, 切削深度, 切削速度; 对于表面残余应力, 其影响显著性排序从大到小依次为: 切削速度, 进给量, 切削深度。

3) 切削深度、进给量和切削速度与表面残余应力之间成正相关。切削参数对表面残余应力的双因素交互影响程度的关系从大到小依次为: 进给量-切削深度 ($f-a_p$), 切削速度-切削深度 ($v-a_p$), 进给量-切削速度 ($f-v$)。

4) 通过确定船用柴油机机体主轴承镗削加工切削参数, 表面残余应力最大减小了 50.6%, 切削残余应力最大减小了 53.6%, 进给残余应力最大减小了 46.2%。结果表明: 合理地选择切削参数可以有效地减小表面残余应力。

参考文献:

[1] WITHERS P J. Residual Stress and Its Role in Failure[J]. Reports on Progress in Physics, 2007, 70(12): 2211.

[2] AKHTAR W, LAZOGLU I, LIANG S Y. Prediction and Control of Residual Stress-based Distortions in the Machining of Aerospace Parts: a Review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 76: 106-122.

[3] GRISSA R, ZEMZEMI F, FATHALLAH R. Three Approaches for Modeling Residual Stresses Induced by Orthogonal Cutting of AISI316L[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 135: 253-260.

[4] NASR M N A, NG E G, ELBESTAWI M A. A Modified Time-efficient FE Approach for Predicting Machining-induced Residual Stresses[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2008, 44(4): 149-161.

[5] VALIORGUE F, RECH J, HAMDI H, et al. 3D Modeling of Residual Stresses Induced in Finish Turning of an AISI304L Stainless Steel[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 53(1): 77-90.

[6] ÖZEL T, ZEREN E. Finite Element Modeling of Stresses Induced by High Speed Machining with Round Edge Cutting Tools[C]//Manufacturing Engineering and Materials Handling, Parts A and B. ASMEDC, 2005: 1279-1287.

[7] AKRAM S, JAFFERY S H I, KHAN M, et al. A Numerical Investigation of Effects of Cutting Velocity and Feed Rate on Residual Stresses in Aluminum Alloy Al-6061[J]. International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, 2015, 3(1): 26-30.

[8] LUO Jiexiang, SUN Yuwen. Optimization of Process Parameters for the Minimization of Surface Residual Stress in Turning Pure Iron Material Using Central Composite Design[J]. Measurement, 2020, 163: 108001.

[9] 韩蕾, 史振宇, 裘建人, 等. 陶瓷基复合材料超声振动辅助加工技术研究现状[J]. 工具技术, 2024, 58(3): 3-20.

HAN Lei, SHI Zhenyu, XI Jianren, et al. Research

- Status of Ultrasonic Vibration Assisted Machining Technology for Ceramic Matrix Composites [J]. Tool Engineering, 2024, 58(3): 3-20.
- [10] YIN Yueming, YANG Zhen, HU Haifeng, et al. Metric-learning-assisted Domain Adaptation [J]. Neurocomputing, 2021, 454: 268-279.
- [11] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(8): 41-45.
- LI Li, ZHANG Sai, HE Qiang, et al. Application of Response Surface Methodology in Experiment Design and Optimization[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(8): 41-45.
- [12] EBRAHIMZADEH P, MARTÍNEZ L B P, PARIENTE I F, et al. Optimization of Shot-peening Parameters for Steel AISI 316L via Response Surface Methodology (RSM): Introducing Two Novel Mechanical Aspects [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 132(1): 647-667.
- [13] MEHDI H, MISHRA R S. An Experimental Analysis and Optimization of Process Parameters of AA6061 and AA7075 Welded Joint by TIG+FSP Welding Using RSM [J]. Advances in Materials and Processing Technologies, 2022, 8(1): 598-620.
- [14] XU Fuyang, SUN Yuwen. A Circumscribed Corner Rounding Method Based on Double Cubic B-splines for a Five-axis Linear Tool Path [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(1): 451-462.
- [15] ARRAZOLA P J, KORTABARRIA A, MADARIAGA A, et al. On the Machining Induced Residual Stresses in IN718 Nickel-based Alloy: Experiments and Predictions with Finite Element Simulation [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2014, 41: 87-103.
- [16] 左善超, 王德成, 杜兵, 等. 塑性效应对盲孔法测量焊接残余应力影响的研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(16): 206-214.
- ZUO Shanchao, WANG Decheng, DU Bing, et al. Plasticity Effects in the Hole-drilling Residual Stress Measurements in Welded Structure [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(16): 206-214.
- [17] 李昊, 李华. 盲孔法测量非均匀残余应力时的释放系数 [J]. 焊接学报, 2013, 34(6): 85-88.
- LI Hao, LI Hua. Release Coefficients during Measuring Non-uniform Residual Stress with Blind-hole Method [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(6): 85-88.
- [18] 马小明, 欧清扬. 盲孔法测曲面残余应力时释放系数的数值模拟 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 25-31.
- MA Xiaoming, OU Qingyang. Numerical Simulation for Hole-drilling Strain Gage Method Applied on Curved Surface [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(12): 25-31.
- [19] FAN Zhiqiang, CAO Lixin, LIU Feng. FEM Analysis of the Distortion of Thin-walled Sealing Part Affected by the Machining-induced Residual Stress [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 768(4): 042028.
- [20] DING Hongtao, SHIN Y C. Multi-physics Modeling and Simulations of Surface Microstructure Alteration in Hard Turning [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(6): 877-886.

(编辑 陈勇)

作者简介: 韩济远, 男, 1998年生, 硕士。研究方向为机械制造工艺。曲东越*(通信作者), 男, 1973年生, 副教授。研究方向为结构优化设计。E-mail: qudongyue@hrbeu.edu.cn。

本文引用格式:

韩济远, 张嘉豪, 展勇, 等. 船用柴油机机体主轴承孔镗削加工残余应力预测 [J]. 中国机械工程, 2025, 36(8): 1883-1892.

HAN Jiyuan, ZHANG Jiahao, ZHAN Yong, et al. Prediction of Residual Stress in Boring Main Bearing Holes of Marine Diesel Engine Bodies [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(8): 1883-1892.