

钼合金钻削工艺参数正交试验研究

刘东,周开祥

北方工业大学

摘要: 采用钻削加工方式,选择硬质合金刀具,应用正交试验方法分析了钼合金钻削过程中各个钻削参数对钻削力的影响程度,研究了钻削过程中钻削参数与钻削力、钻削力矩之间的变化关系。对钻削试验所得数据进行线性回归分析,通过回归计算得到钻削力与其因素参数之间的数学公式,并对校正 R^2 拟合判定系数、累积概率图和残差图进行分析检验回归模型。结果表明:回归分析所得的钻削力、钻削力矩回归方程较好地拟合了钻削试验获得的数据,钻削力与钻削参数的变化规律近似符合与各影响参数的指数关系。

关键词: 正交试验;硬质合金刀具;钼合金;钻削力

中图分类号: TG506.7;TH161

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2021.03.007

Orthogonal Experimental Study on Process Parameter while Drilling Mo Alloy

Liu Dong, Zhou Kaixiang

Abstract: By drilling molybdenum alloys with cemented carbide tools and the orthogonal test method, the influence of each drilling parameter on the drilling force is analyzed, and the relationship between drilling parameters and the drilling force and torque is also investigated. By regression analysis on the data obtained from the drilling experiment, and the empirical mathematical formula of drilling force and its influencing parameters is obtained, and the regression model is tested by correcting the R^2 fitting determination coefficient, cumulative probability graph and residual error graph. The results show that the drilling force and torque regression equations obtained from the analysis fit the data obtained in the experiment well, and the drilling force during the processing of the molybdenum alloy is approximately in line with the exponential relationship of each influencing parameter.

Keywords: orthogonal test; cemented carbide tool; Mo alloy; drilling force

1 引言

钼合金是一种具有优良物理、高温力学性能和化学稳定性的难熔金属材料,熔点、沸点高,具有良好的导热导电性和较低的热膨胀系数,同时钼合金材料还具有较高的硬度以及优良的高温强度^[1,2],广泛应用于航空航天、能源、核能和通用机械等领域^[3,4]。但是由于钼合金材料具有严重的低温(室温)脆性和高温易被氧化等特性,限制了其作为工业材料的应用发展,在材料加工处理中属于典型的难加工材料^[5,6]。钼合金材料的弹性模量高,在加工制造过程中极易产生材料的脆性崩裂、挤伤和脱落等问题^[7],且伴随着严重的刀具损坏,尤其是当加工参数和加工条件选择不佳时,极易产生刀具磨损,甚至导致刀刃崩坏等问题,严重影响加工效率和加工质量^[8,9]。

对钼合金钻孔加工而言,由于钼合金材料本身的低温脆性和高硬度特性的影响,钻削工艺参数选择不当时会使加工过程产生的钻孔力、钻削力矩超

过刀具或材料的承受限度,导致加工材料毁坏、钻头破损以及刀具过度磨损等情况发生,所以钻削过程中钻削参数的选择是否合适极大地影响着钻削过程中产生的钻削力和钻削力矩^[10]。

为了研究并克服钼合金加工过程中因钻削参数选择不当遇到的问题,本文选用硬度高、耐磨性好、摩擦因数低和红硬性好的整体硬质合金钻头,选取刀具直径、钻削速度和进给速度作为切削变量,采用正交试验法研究整体硬质合金刀具钻削钼合金时的最佳钻削参数,同时对硬质合金刀具钻削钼合金时的钻削特性进行研究;通过回归分析计算得到硬质合金刀具钻削钼合金钻削力的经验公式,为钼合金的加工制造提供一定的工艺参考。

2 试验方案

2.1 工件及刀具材料

试验使用 Mo1 纯钼,厚度为 5mm,钼含量大于 99.95%。室温下钼合金的机械性能见表 1^[6]。试验采用 Kennametal 整体硬质合金钻头,刀具直径分别为 $\phi 3, \phi 5, \phi 7$ (见图 1)。

表 1 室温下铝合金机械性能

强度极限 (MPa)	屈服极限 (MPa)	延伸率 (%)	密度 (g/cm ³)	杨氏模量	维氏硬度 (HV)
760 ~ 800	660	13	10.2	320	260 ~ 360



图 1 试验用硬质合金刀具

2.2 钻削参数

在宝鸡机床股份有限公司生产的 MCV1000 数控铣床上进行钻削试验, 钻削测力仪传感器采用 Kistler 生产的 9027C 三向石英压力传感器, 测量系统的主体由计算机、电荷放大器、测力仪本体及相关附件组成, 使用时需保证测力仪和安装平台的整洁。用螺钉将测力仪固定于工作台, 连接计算机和信号采集接口, 计算机采集钻削力和钻削力矩信号, 最后由软件计算处理获得试验结果。试验系统见图 2。试验采用三水平三因素正交钻削方案, 钻削参数见表 2。

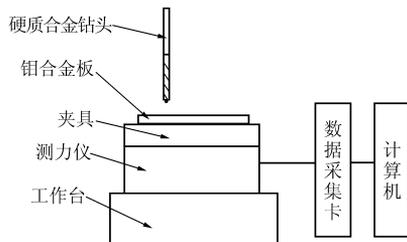


图 2 试验系统

表 2 钻削参数各水平因素

因素	刀具直径 D (mm)	钻削速度 v (m/min)	进给速度 f (mm/min)
-1 水平	3	15	10
0 水平	5	30	20
1 水平	7	45	30

3 试验结果分析

3.1 钻削力回归分析

钻削力试验结果见表 3。

钻削力的常用经验公式多设为指数形式, 即

$$F = C_F D^{x_F} V^{y_F} f^{z_F}$$

对上式求对数可得

$$\lg F = \lg C_F + x_F \lg D + y_F \lg V + z_F \lg f$$

设

$$y = \lg F; b_0 = \lg C_F$$

$$b_1 = x_F; x_1 = \lg D$$

$$b_2 = y_F; x_2 = \lg V$$

$$b_3 = z_F; x_3 = \lg f$$

则有

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3$$

采用三元线性回归处理数据, 即用普通最小二乘法估计参数, 求得回归方程为

$$F_z = 38.9 D^{45.4} V^{-0.023} f^{3.667}$$

$$M_z = 0.472 D^{0.036} V^{-0.01} f^{0.04}$$

表 3 钻削力试验结果

序号	直径 D (mm)	钻削速度 v (m/min)	进给速度 f (mm/min)	钻削力 F_z (N)	钻削扭矩 M_z (N·m)	
1	3	15	30	280.3	0.68	
2	3	30	20	220.5	0.60	
3	3	45	10	195.3	0.55	
4	5	15	20	350.6	0.72	
5	5	30	10	320.2	0.70	
6	5	45	30	385.3	0.74	
7	7	15	10	380.3	0.73	
8	7	30	30	450.2	0.78	
9	7	45	20	410.5	0.75	
	刀具直径		钻削速度		进给速度	
均值	F_z	M_z	F_z	M_z	F_z	M_z
1	232.0	0.61	337.0	0.68	298.6	0.66
2	352.0	0.72	330.3	0.69	327.2	0.69
3	413.6	0.75	330.3	0.68	371.9	0.73
极差	181.6	0.14	7	0.01	73.3	0.07

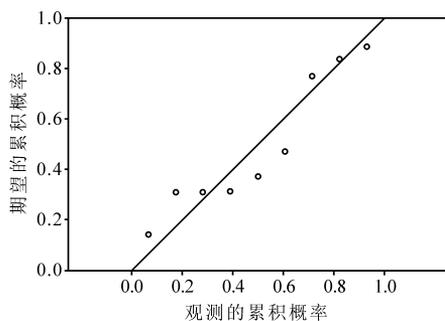
3.2 回归结果的检验

为了对回归分析得到的经验公式进行优劣检验, 一般通过校正 R^2 判定系数、 P - P 图和残差点图等方法来进行回归公式优劣判断。在判定回归方程图像的拟合程度时, 一般会用到校正 R^2 判定系数, R^2 判定系数越趋近于 1, 回归方程的拟合程度越高, 回归公式的效果也越理想; 检验正态分布的统计图形一般采用 P - P 正态概率图, 如果所得到的数据服从正态分布, 则被检验的试验数据近似分布成一条直线, 在数据的经验分布值基础上, 对理论分布值描点, 若两者分布一致, 则描出的点即为 $i/n = F(X(i))$ 所表示的直线经过原点, 斜率为 1, 其中, n 代表数据个数, i 表示 X 的秩; P - P 残差图中如果各点分布在 $(-2, +2)$ 之间, 则说明回归公式拟合效果较好。通过累积残差图和 P - P 图可以有效地检验回归模型是否很好地拟合了原始试验数据。本次试验回归模型校正 R^2 判定系数数值见表 4。图 3 为累

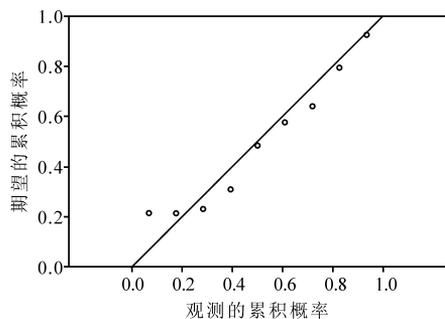
积概率图。

表4 回归模型校正 F^2 判定系数

	钻削力 F_z	扭矩 M_z
校正 R^2 判定系数	0.967	0.952



(a) 因变量: 钻削力



(b) 因变量: 钻削扭矩

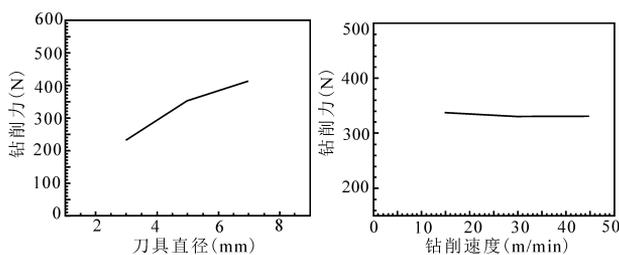
图3 累积概率(回归标准化残差的标准 P-P 图)

表4中所得的校正 R^2 拟合判定系数均大于0.89,在 $P-P$ 概率残差图中,试验所得9组数据描点均在斜率为1的直线附近。在残差散点图中,可以看到所有的点都随机落在垂直围绕 ± 1.5 的范围内,预测值与标准残差之间没有明显的关系。通过3个回归模型的 R^2 拟合判定系数检验结果可以看出,本次试验分析所建立的回归模型和刀具直径、钻削力、钻削力矩以及其三个变量因素之间的数学经验公式基本符合试验所得数据,拟合程度较高。铝合金钻削过程中钻削力、钻削力矩和钻削参数的关系近似满足指数关系。

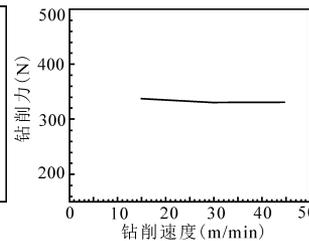
3.3 钻削力、钻削扭矩极差分析

图4和图5分别比较了钻削刀具直径、钻削速度以及进给速度变化对钻削力和钻削力矩的影响效应。从获得的试验数据分析可知,铝合金钻削过程中,钻削力、钻削力矩随刀具直径和进给速度的变化最明显,说明其对钻削过程的影响最为显著。钻削力、钻削力矩随钻削速度变化曲线比较平稳,说明其不是影响钻削力和钻削力矩的主要因素;在钻削速度增大过程中,钻削力、钻削力矩的斜率近似保持水平,其数值基本不变。但由图4和图5可知,当刀具

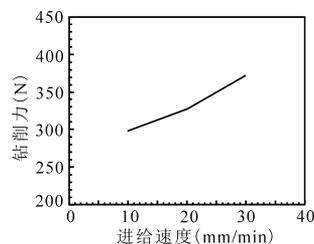
直径从3mm、5mm变化到7mm,进给速度从10mm、20mm变化到30mm时,钻削力和钻削力矩迅速增大,说明在铝合金的钻削加工中,要获得较小的钻削力和钻削力矩,通过减小进给速度和刀具直径是最有效的方法。



(a) 刀具直径与钻削力

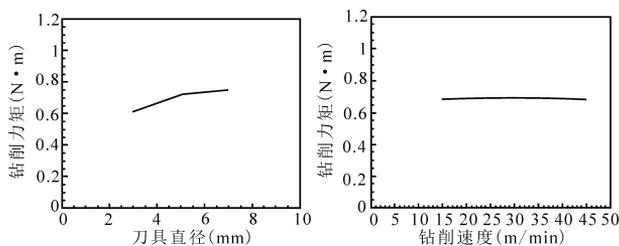


(b) 钻削速度与钻削力

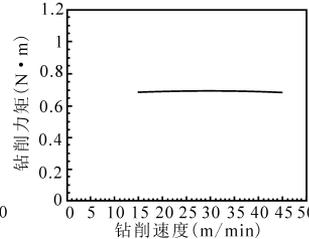


(c) 进给速度与钻削力

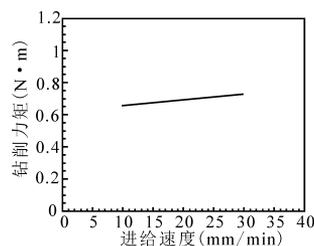
图4 钻削力随刀具直径、钻削速度、进给速度的变化效应



(a) 刀具直径与钻削力矩



(b) 钻削速度与钻削力矩



(c) 进给速度与钻削力矩

图5 钻削力矩随刀具直径、钻削速度、进给速度的变化效应

4 结语

通过试验分析计算可知,铝合金钻削加工中钻削力、钻削力矩和其影响因素的数学关系近似于指数函数。处理数据时,通过回归分析的方法对试验数据建立数学模型,检验回归模型的可信度,由分析结果可知:建立的模型和数学关系式较好地拟合了试验获得的数据,在铝合金钻削过程中,刀具直径、钻削速度及进给速度与钻削力、钻削力矩近似满足指数关系。在铝合金钻削加工过程中,钻削力、钻削

添加抑制剂对 Al₂O₃ 复合涂层性能的影响

袁晓光, 薛峰, 余航, 吴春涛

成都工具研究所有限公司

摘要: 从添加反应抑制剂入手,借助划痕仪、压痕仪、扫描电子显微镜和 X 射线衍射仪等先进检测设备,探讨研究抑制剂与 CO₂ 比例对 Al₂O₃ 多层复合涂层性能的影响。结果表明,当抑制剂与 CO₂ 的比例 20% ~ 40% 时,经 5h 沉积后,对 Al₂O₃ 颗粒的晶粒度影响不明显,择优取向未能做出判断,但膜基结合力有提高,表面色泽更明亮,使用性能亦有较大幅度提升;当提升比例大于 30% 时,更高比例的抑制剂添加情况还有待进一步验证。

关键词: 抑制剂;晶粒度;使用性能

中图分类号: TG335.86;TH162.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2021.03.008

Effect of Inhibitor on Properties of Al₂O₃ Composite Coating

Yuan Xiaoguang, Xue Feng, Yu Hang, Wu Chuntao

Abstract: Starting with adding reaction inhibitors, with the help of scratch tester, indentation instrument, scanning electron microscope, X-ray diffraction instrument and other advanced detection equipment, the effect of the ratio of inhibitor to CO₂ on the properties of Al₂O₃ multilayer composite coating is discussed. The result shows that the ratio of inhibitor to CO₂ is in the range of 20% ~ 40%. After 5 hours of deposition, the effect on the grain size of Al₂O₃ particles is not obvious, and the preferred orientation can not be determined. However, the film substrate bonding strength is improved, the surface color is brighter, and the service performance is also greatly improved by more than 30%. The higher proportion of inhibitor addition needs to be further verified.

Keywords: inhibitor; grain size; performance

1 引言

化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 是一种化学气相反应生长法,通过控制反应温

度、反应源气体组成、浓度和压力等参数,能方便地控制薄膜的组成机构和成分,改变其力学性能和化学性能,且沉积产物从单质状态发展到化合物,再到复合多层化合物,可以满足不同工况下对工件使用性能的需求,在机械、电子、能源和航空航天领域中发挥着巨大作用^[1],广泛应用于重载、粗加工车铣领域。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0305904);2020 年四川省省级工业发展资金
收稿日期: 2020 年 9 月

力矩随刀具直径以及进给速度的变化最为明显;钻削力和钻削力矩随钻削速度的变化较为平缓。

参考文献

- [1] 石俊,刘宁,刘爱军,等. 钼及钼合金研究的进展[J]. 热处理,2014,29(5):19-23.
- [2] 陈闯,魏世忠,张国赏,等. 钼合金的研究现状与应用进展[J]. 稀有金属与硬质合金,2012,40(5):45-50.
- [3] 梁淑贤,吴凤照,张淳芳. 高精度薄壁钼管旋压工艺[J]. 稀有金属材料与工程,1995,24(4):63-64.
- [4] 廖书龙. 钼合金切削工艺[J]. 航天工艺,1991(1):4-9.
- [5] 施惠基,科恩,普吕维纳热. 钼合金在高温热机械应力循环下的疲劳性能[J]. 航空材料学报,1999(2):13-19.
- [6] 朱派龙,周锦进. 钨钼合金深小孔的电火花加工研究[J]. 电加工与模具,2000(5):12-15.
- [7] 谭望,陈畅,汪明朴,等. 不同因素对钼及钼合金塑脆性能影响的研究[J]. 材料导报,2007(8):80-83.
- [8] 王海云,李文平,彭红,等. 钼合金零件螺纹车削的两种工艺方法[J]. 国防制造技术,2016(1):7-10.
- [9] 张青来,李敏,韩寅奔,等. 交叉轧制钼带冷深冲性能及微观组织研究[J]. 稀有金属材料与工程,2012,41(12):2109-2112.
- [10] 刘东,王放,周鹏. 钼合金钻孔加工中钻削轴向力实验研究[J]. 稀有金属与硬质合金,2018,46(1):33-35.
第一作者:刘东,教授,北方工业大学机械与材料工程学院,100144 北京市
First Author: Liu Dong, Professor, School of Mechanical and Material Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China