

DOI:10.11918/202112060

镁合金低温切削性能及工艺参数优化

范雷, 颜培, 陈仕齐, 陈豪, 焦黎, 仇天阳, 王西彬

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 为改善镁合金的切削加工性能及加工表面完整性, 优化切削加工工艺参数, 基于拟水平法设计了四因素四水平正交车削试验, 研究切削三要素以及切削介质(常温干切、液态二氧化碳和液氮)对 ZK61M 镁合金车削加工表面完整性的影响规律。实验结果表明: 切削深度对切削力的影响最显著, 进给量次之, 切削速度的影响较小, 低温切削能降低切削力, 但对切削力的影响不显著; 进给量对表面粗糙度和残余应力具有显著影响, 随着进给量增大, 表面粗糙度增大, 并引入表面残余拉应力; 冷却介质对表面粗糙度和表面残余应力具有次显著影响, 相比于常温切削, 采用低温切削能有效降低加工表面粗糙度, 细化表层晶粒, 增大表面残余压应力, 同时, 采用液态二氧化碳作为冷却介质的效果优于液氮。基于灰色关联分析得到 ZK61M 镁合金低温切削的最优工艺参数: $v_c = 100 \text{ m/min}$, $f = 0.05 \text{ mm/r}$, $a_p = 0.4 \text{ mm}$, 采用液态二氧化碳作为冷却介质。用关联分析结果建立了工艺参数与加工质量间的响应预测模型, 平均误差为 7.93%。

关键词: ZK61M 镁合金; 低温切削; 表面完整性; 残余应力; 灰色关联分析; 参数优化

中图分类号: TH162 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2022)07-0053-11

Optimization of process parameters and performances of cryogenic cutting of magnesium alloy

FAN Lei, YAN Pei, CHEN Shiqi, CHEN Hao, JIAO Li, QIU Tianyang, WANG Xibin

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To improve the machinability and surface integrity of magnesium alloys, and optimize the machining parameters, a set of orthogonal experiment with four factors and four levels were carried out based on the method of pseudo-level. Comparative study involved in the influence of three different cooling strategies, namely, dry cutting, liquid carbon and liquid nitrogen coolants, as well as the cutting parameters on the surface integrity of ZK61M magnesium alloy during turning were conducted. The experimental results show that the effect of cutting depth on cutting force is the most significant factor, the feed quantity is the second significant factor, the effect of cutting speed on cutting force is ignorable. Although the effect of cryogenic cutting on cutting force is not significant, it can reduce the cutting force in some extents. The feed rate has a significant effect on the surface roughness and surface residual stress. As the feed rate increasing, the surface roughness increases and the residual stress is introduced on the machined surface. The cooling medium has a sub-significant effect on the surface roughness and surface residual stress. Compared with dry turning, The cryogenic coolants can effectively reduce the surface roughness, refine the surface grain and increase the surface compressive residual stress during cutting. As a cooling medium, the liquid carbon dioxide is more effective than liquid nitrogen in improving the machining-induced surface integrity. Grey relational analysis is used to obtain the optimal process parameters for cryogenic cutting of ZK61M magnesium alloy: $v_c = 100 \text{ m/min}$, $f = 0.05 \text{ mm/r}$, $a_p = 0.4 \text{ mm}$, liquid carbon dioxide is used as the cooling medium. The response prediction model between the process parameters and the machined surface quality was established through the results of the relational analysis, the average error was 7.93%.

Keywords: ZK61M magnesium alloy; cryogenic cutting; surface integrity; residual stress; grey relational analysis; parameter optimization

镁合金作为轻量化绿色工程材料, 具有比重小, 比强度和比刚度高, 阻尼性、导热性好, 电磁屏蔽能

力强等优良特性, 在航空航天、军事工业、海洋船舶、电子通信、医疗器械、交通运输等各个领域具有广泛的应用前景^[1-3]。由于镁合金活性较高, 易与水发生反应生成镁离子, 使切削液中的极性添加剂和阴离子型乳化剂等成分反应失效, 从而导致切削液失效, 而且反应析出物粘结在工件表面会使零件加工性能下降的同时, 还会使加工表面发生腐蚀, 极大地降低加

收稿日期: 2021-12-14

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2002200); 国家自然科学基金
金项目(52075040; 52175376)

作者简介: 范雷(1997—), 女, 硕士研究生

通信作者: 颜培, pyan@bit.edu.cn

工表面质量。因此,镁合金的切削加工过程中不宜采用切削液进行润滑和冷却,通常只能采用干式切削。但是,在镁合金的精加工中,加工产生的切屑容易断裂形成面积-体积比较大的细屑,由于镁合金的热容低,热膨胀系数高达 $26\times 10^{-6}\text{ nm}/(\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C})$,而镁合金燃点较低仅为 520°C ,所以切削热容易积聚达到其燃点,引发火灾等事故^[4]。镁合金常规干式切削的切削参数无法满足其安全高效、高质量加工要求,同时也制约了镁合金的广泛应用。

低温切削是一种绿色加工技术,是在切削区域喷入低温冷却介质形成低温加工条件,利用材料的低温脆性,促进切屑和工件的分离,提高切削效率并改善加工表面质量^[5]。因此,低温切削成为解决镁合金切削过程中冷却和润滑问题的一个有效途径,并且还能通过降低切削区温度,减缓镁合金的氧化。

自 20 世纪 50 年代以来,国内外学者就对低温切削开展了一系列的研究工作。低温介质是影响低温切削加工表面质量的一个重要因素,液态二氧化碳(liquid carbon dioxide, LCO_2)和液氮(liquid nitrogen, LN_2)被认为是低温切削中有效的冷却剂和润滑剂。Pu 等^[6-7]在 AZ31B 镁合金切削过程中喷射液氮,发现与干切削相比,使用液氮的低温加工以及采用具有较大刀口半径的刀具可以使加工表层的晶粒尺寸细化至 31 nm,得到更厚的晶粒细化层、更大强度的基面织构,并增大 10 倍以上的表面残余压应力,从而获得更强的抗腐蚀特性。Chaabani 等^[8]对比了常规润滑剂和液态二氧化碳冷却加工 718 镍基合金的表面完整性,发现 CO_2 冷却不仅比常规润滑能诱导更高的应变硬化,还在试样轴向方向引入残余压应力,这种影响在刀具处于半磨损状态时依然存在。Vignesh 等^[9]对比了液态二氧化碳和液氮 2 种冷却介质对哈氏合金 C276 车削表面粗糙度的影响,发现使用液氮比液态二氧化碳得到的切削表面光洁度更好。

在低温切削过程中,除了低温介质,切削工艺参

数对加工表面完整也具有至关重要的影响^[10]。冯鑫^[11]采用试验与仿真结合的方式发现,切削用量中对残余应力影响最大的因素是进给量。刘龙飞等^[12]采用霍普金森压杆试验模拟了 AZ31 镁合金的高速切削,研究了切削速度对切屑形貌的影响,发现切削速度增加导致镁合金切屑齿面出现微裂纹,晶粒内部孪晶减少,并出现晶粒细化。Wojtowica 等^[13]研究发现进给量、刀尖半径及其之间的交互作用对表面粗糙度有显著影响,进给量或切削深度增大都可能在加工表层以下更深位置产生孪晶变形。

目前针对镁合金低温切削的研究大多采用液氮作为冷却介质,将低温二氧化碳作为冷却介质还未在镁合金的切削加工中得到大量关注。此外,低温切削加工工件的表面完整性是由冷却介质和工艺参数共同决定的,但现有研究中还鲜有涉及关于切削用量和冷却介质对加工表面质量的综合分析。

本研究采用液态二氧化碳和液氮 2 种冷却介质,通过四因素四水平正交试验研究了切削速度、进给量、切削深度、冷却介质 4 个因素对 ZK61M 镁合金切削性能及加工表面完整性的影响规律及显著性。对比分析了车削过程中 2 种冷却介质的不同作用机理,采用灰色关联分析得到镁合金低温切削的最优车削工艺参数,并建立工艺参数与加工质量间的响应模型,对完善镁合金的低温切削加工工艺和改进镁合金零件的抗疲劳制造工艺具有重要的意义。

1 研究条件及方案

1.1 工件材料

本研究中所用的镁合金工件材料为退火态 Mg-Zn-Zr 系的 ZK61M 变形镁合金,其主要化学成分的质量分数如表 1 所示。常温下,ZK61M 镁合金的弹性模量为 45 GPa,泊松比为 0.35,密度为 $1.8\text{ g}/\text{cm}^3$,热导率为 $72\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,熔点为 $635\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[14-15]。切削加工试验所用试件为 $\phi 45\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 的挤压棒料。

表 1 ZK61M 镁合金的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of ZK61M magnesium alloy (mass fraction, %)

元素	Zn	Zr	Mn	Fe	Si	Cu	Al	Ni	Mg
质量分数 $w/\%$	5.390 0	0.530 0	0.016 0	0.002 7	0.002 6	0.001 3	0.001 3	0.001 3	Bal

1.2 试验设备及加工参数

车削试验在 HAWK TC150 数控车床上进行,切削过程中使用 Kistler 9527B 测力仪实时采集三向切削力。分别在干切削(Dry)、液态二氧化碳(LCO_2)和液氮(LN_2)3 种条件下对工件进行切削,低温设备采用 ARMORINE 公司的低温二氧化碳和液氮低温

设备,低温切削系统原理示意图如图 1 所示。2 台低温设备均通过压力控制喷出冷却介质的温度,经标定,工作时喷嘴处温度分别可达 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (低温二氧化碳)和 $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (液氮)。车削试验采用无涂层的菱形双刃硬质合金刀片,刀片顶角为 55° ,刀片型号为 DCGT11T304AHKW10,刀杆型号为 SDJCL2020K11,

刀具几何参数如表 2 所示。

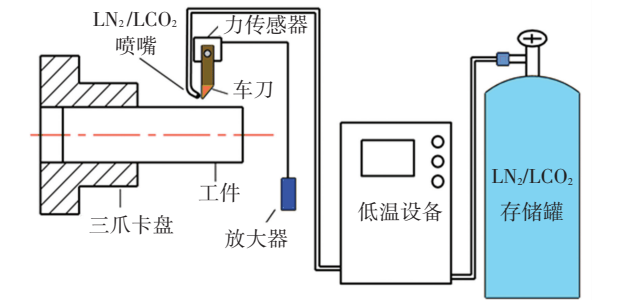


图 1 低温切削系统示意图

Fig.1 Cryogenic cutting system

表 2 刀具几何参数

Tab.2 Ggeometric parameters of the cutting tool

前角/ (°)	后角/ (°)	刃倾角/ (°)	主偏角/ (°)	副偏角/ (°)	刀尖圆弧 半径/mm
10	7	0	93	32	0.4

以切削速度 v_c (因素 A)、进给量 f (因素 B)、切削深度 a_p (因素 C)和低温冷却介质 (因素 D)为设计变量。基于拟水平法,选取液氮为因素 D 的一个虚拟水平,即因素 D 的第三和第四个水平均为液氮,进行四因素四水平正交试验($L_{16}(4^4)$),因素水平表和试验方案分别如表 3 和表 4 所示。表中“ LN_2 ”与“ LN_2^* ”为相同冷却条件,符号“ $*$ ”用于区分两个水平。为减少误差,不同冷却介质的切削在不同的工件上进行,每组切削参数的切削长度均为 20 mm。

表 3 车削工艺正交试验因素水平表

Tab.3 Orthogonal experimental factor levels for the turning process

水平	$v_c / (m \cdot min^{-1})$	$f / (mm \cdot r^{-1})$	a_p / mm	冷却介质
1	50	0.20	0.8	Dry
2	100	0.15	0.6	LCO ₂
3	150	0.10	0.4	LN ₂
4	200	0.05	0.2	LN ₂ [*]

表 5 镁合金残余应力测量的 X 射线衍射参数

Tab.5 X-ray diffraction parameters for residual stress measurement of magnesium alloy

靶材	衍射晶面	电压/kV	电流/mA	准直管直径/mm	应力常数/MPa	布拉格角/(°)
Cr-Kα 靶	104	35	40	2.0	-78	152

2 结果与讨论

主切削力 F_z 、面粗糙度 Sa 、线粗糙度 Ra 、表面残余应力 σ_x 和 σ_y 的测试结果如表 6 所示。

表 4 车削试验方案

Tab.4 Design for turning experiments

编号	$v_c / (m \cdot min^{-1})$	$f / (mm \cdot r^{-1})$	a_p / mm	冷却介质
1	50	0.20	0.8	Dry
2	50	0.15	0.6	LCO ₂
3	50	0.10	0.4	LN ₂
4	50	0.05	0.2	LN ₂ [*]
5	100	0.20	0.6	LN ₂
6	100	0.15	0.8	LN ₂ [*]
7	100	0.10	0.2	Dry
8	100	0.05	0.4	LCO ₂
9	150	0.20	0.4	LN ₂ [*]
10	150	0.15	0.2	LN ₂
11	150	0.10	0.8	LCO ₂
12	150	0.05	0.6	Dry
13	200	0.20	0.2	LCO ₂
14	200	0.15	0.4	Dry
15	200	0.10	0.6	LN ₂ [*]
16	200	0.05	0.8	LN ₂

1.3 表面完整性的表征与测量

表面完整性是加工表面几何特征、力学、物理、化学以及材料晶体组织等方面的总称,通常由表面粗糙度、微观组织、残余应力等指标进行表征^[16]。利用基恩士 3D 共聚焦扫描显微镜 VK-X100 的非接触式方法测量不同加工条件下切削表面的面粗糙度 Sa ,并拍摄其二维和三维表面形貌。利用手持式粗糙度仪 ISR-C100 测量已加工表面的线粗糙度 Ra ,取样长度为 0.8 mm,测量时沿工件进给方向上(即工件轴向)平均选取 5 个区域进行接触式测量,取其平均值作为表面粗糙度最终结果。

在已加工试样上沿试件横截面切下试样,经镶块、研磨、抛光后,用草酸溶液(硝酸 1 mL,乙酸 1 mL,草酸 1 g,水 100 mL)腐蚀后,用光学显微镜观察和分析加工表层的金相和微观组织结构。使用 Proto LXR D 微区应力仪,采用 x 射线衍射的 $\sin^2\alpha$ 法测量加工表面残余应力,测量参数如表 5 所示。

2.1 切削力

由于镁合金硬度及强度较低,在车削过程中轴向力 F_x 及径向力 F_y 较小,且切削要素对其影响不显著^[17],故本文仅对主切削力即切向力 F_z 进行分析

讨论。对表6中主切削力 F_z 的正交测试结果进行极差分析,结果如表7所示。可以看出4个因素的极差大小顺序为 $C>B>A>D$,极差的大小反映出各因素对指标影响的显著程度。因此,4个因素对主切削力 F_z 的影响顺序为:切削深度>进给量>切削速度>冷却介质。

表 6 ZK61M 镁合金车削试验结果

Tab.6 Results of the turning experiments of ZK61M magnesium alloy

编号	F_z / N	$Sa / \mu\text{m}$	$Ra / \mu\text{m}$	σ_x / MPa	σ_y / MPa
1	56.06	3.57	3.44	-40	-26
2	32.88	2.19	1.53	-8	-31
3	15.35	1.14	0.91	-10	-10
4	4.67	0.62	0.25	-15	-21
5	41.47	3.34	2.84	-21	-15
6	47.09	2.15	1.77	-10	-15
7	8.82	1.09	1.03	-4	-5
8	12.57	0.79	0.31	-51	-40
9	29.43	3.40	3.07	-8	-8
10	11.28	2.17	1.44	-7	-8
11	37.94	1.14	0.70	-29	-19
12	15.44	0.76	0.44	-23	-21
13	15.60	3.80	2.59	-3	-4
14	25.29	2.10	1.98	-12	-7
15	27.82	1.08	0.81	-6	-11
16	20.41	0.66	0.31	-18	-18

表 7 主切削力 $F_z(\text{N})$ 的极差分析结果

Tab.7 Results of range analysis of cutting force $F_z(\text{N})$

水平	因素			
	v_c	f	a_p	冷却介质
1	27.24	13.27	10.09	26.40
2	27.49	22.48	20.66	24.75
3	23.52	29.13	29.40	24.69
4	22.28	35.64	40.38	-
极差	5.21	22.37	30.28	1.71
排序	3	2	1	4

各因素对 ZK61M 镁合金主切削力 F_z 的影响规律如图2所示。

综合表7与图2分析知,在镁合金车削过程中,对主切削力影响最大的因素为切削深度。随着切削深度的增加,单位时间内材料去除厚度增加,加剧刀具对已加工表面的挤压作用,提高第一变形区的剪切力和第二变形区的摩擦力,从而导致切削力增大。此外,由于切削深度的增大,不会导致切削变形出现,因此单位面积的切削力基本保持不变,所以切削力随着切削深度的增大成比例增大,图2中切削力和切削深度呈线性关系。

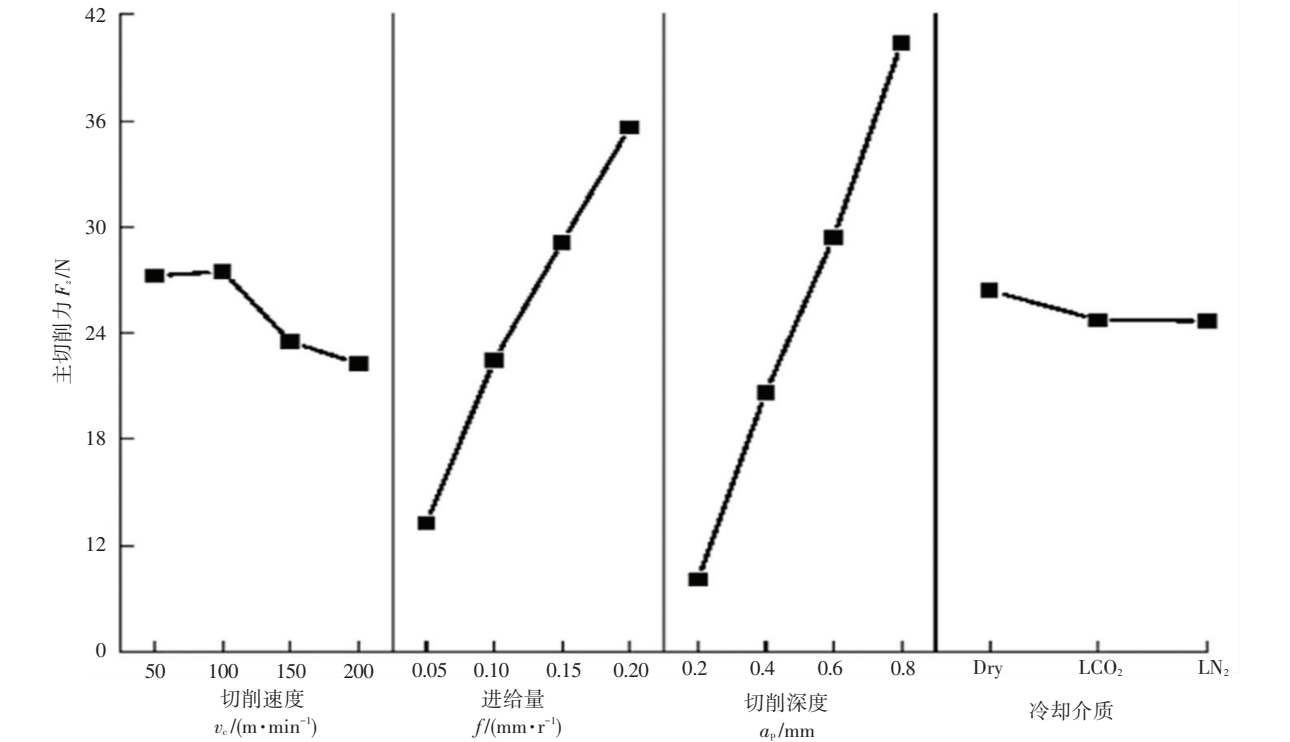


图 2 各因素对 ZK61M 镁合金主切削力 F_z 的影响规律

Fig.2 Effect of factors on cutting force F_z of ZK61M magnesium alloy

其次是进给量,进给量的增大会提高单位时间内的材料去除体积,第一变形区的剪切面积增大导致剪切力增大,因此主切削力随进给量的增大而增大。但是,进给量增大导致切削变形降低,使单位体

积的切削力下降,故随进给量的增大,切削力不成比例的增大。

对主切削力影响具有第三显著性的是切削速度,主切削力随着切削速度的增大呈先增大后减小

的趋势。当切削速度较小($v_c < 100\text{ m/min}$)时,切削速度提高会使单位时间内的材料去除体积增多,增大刀具切削的摩擦阻力,导致主切削力增大;当切削速度较大($v_c \geq 100\text{ m/min}$)时,随着切削速度的进一步增大,切削的摩擦阻力增大,同时切削中产生的热量增多,使得加工材料表面产生热软化效应,使得材料去除过程中的阻力变小,进而降低切削力。

需要指出的是,在本试验设计的 4 个因素中,冷却介质对主切削力的影响最小,但是由图 2 可以发现,在切削过程中,使用冷却介质能够降低切削力。采用喷射液氮进行冷却对降低切削力的效果稍微优于液态二氧化碳。一般来讲,在切削区域喷射冷却介质,温度降低使得材料硬度有所提高,但同时冷却介质被喷射进入切削区后,吸附在刀具和切屑的接触表面,形成单分子层或多分子层吸附膜。吸附层对切削过程的影响可根据式(1)所表示的刀屑接触区的摩擦力公式进行解释:

$$F_f = \tau_s A_s + \tau_m A_m \tag{1}$$

式中: F_f 为刀屑接触区的摩擦力, τ_s 为工件材料的剪切强度, A_s 为刀屑接触区的粘结面积, τ_m 为边界润滑层的剪切强度, A_m 为毛细管作用面积^[18]。由于吸附膜的剪切强度低于材料的剪切强度,因此冷却介质对切削区域起到润滑作用,减小了刀具与材料之间的摩擦阻力,进而使得切削力减小。2 种冷却介质对切削力影响的不同主要在于液态二氧化碳通过小喷嘴孔喷射出后在大气中迅速膨胀,在加工区域产生二氧化碳气体,由于焦耳-汤姆逊效应,部分气体转换成微米级干冰颗粒,快速散热^[19];而液氮喷射出后可以在切削区域形成流体动力润滑膜^[20],通过吸收切削产生的热量和快速蒸发促进润滑效果,对减小切削力的效果更明显。

因此,在镁合金低温切削中,当以减小切削力为主要目标时,最优车削工艺参数为 A4B1C1D3,即 $v_c = 200\text{ m/min}$ 、 $f = 0.05\text{ mm/r}$ 、 $a_p = 0.2\text{ mm}$,并采用液氮作为冷却介质。

2.2 表面粗糙度

加工表面的表面粗糙度可以通过轮廓算数平均偏差 Ra 和三维轮廓算数平均偏差 Sa 进行度量。轮廓算数平均偏差 Ra ,表征加工表面一维轮廓的粗糙程度,即加工表面的线粗糙度;三维轮廓算数平均偏差 Sa ,表征加工表面二维形貌的粗糙程度,即加工表面的面粗糙度。

对表 6 中加工表面的面粗糙度 Sa 和线粗糙度 Ra 的测试结果进行极差分析,分别如表 8 和表 9 所示。可以得到,4 个因素对镁合金车削加工表面的面粗糙度 Sa 和线粗糙 Ra 的极差大小顺序均为 $B >$

$D > C > A$ 。因此,4 个因素对面粗糙度和线粗糙度的影响顺序均为:进给量>冷却介质>切削深度>切削速度。

表 8 面粗糙度 $Sa(\mu\text{m})$ 的极差分析结果

Tab.8 Results of range analysis of surface roughness $Sa(\mu\text{m})$

水平	因素			
	v_c	f	a_p	冷却介质
1	1.879 2	0.705 5	1.917 7	1.879 5
2	1.841 5	1.112 2	1.855 2	1.978 3
3	1.867 5	2.152 7	1.844 7	1.820 1
4	1.909 8	3.527 5	1.880 2	—
极差	0.068 3	2.822 0	0.073 0	0.158 1
排序	4	1	3	2

表 9 线粗糙度 $Ra(\mu\text{m})$ 的极差分析结果

Tab.9 Results of range analysis of line roughness $Ra(\mu\text{m})$

水平	因素			
	v_c	f	a_p	冷却介质
1	1.531 7	0.326 2	1.326 5	1.722 0
2	1.487 0	0.862 5	1.570 0	1.279 7
3	1.411 5	1.678 5	1.404 0	1.425 1
4	1.421 7	2.984 8	1.551 5	—
极差	0.120 2	2.658 5	0.243 5	0.442 3
排序	4	1	3	2

各因素对 ZK61M 镁合金加工表面的面粗糙度和线粗糙度的影响规律如图 3 所示,可以看到面粗糙度 Sa 的数值整体上大于线粗糙度 Ra 的数值。综合表 8、表 9 以及图 3 的结果进行分析可知,在镁合金车削加工中,对表面粗糙度影响最大的因素为进给量。车削加工表面粗糙度可由式(2) 所表示的车削加工残留高度进行近似表征。残留面积高度与进给量的平方成正比,进给量减小可以降低残留面积的高度^[21]。

$$H = \frac{f^2}{8r_s} \tag{2}$$

其中, H 为切削残留面积高度, f 为进给量, r_s 为刀具圆弧半径。此外,根据 3.1 中的结论,进给量的增大使切削力增大,加剧切削过程中的振动,从而导致加工表面粗糙度变大。

在镁合金低温车削过程中,对表面粗糙度影响第二显著的因素是冷却介质,图 4 为进给量均为 0.2 mm/r 时,分别采用干切、 LCO_2 冷却、 LN_2 冷却的 ZK61M 镁合金车削表面形貌图。在图 4(a) 中可以看到明显的微屑、材料堆积等现象,图 4(b) 中微屑相比图 4(a) 减少,但仍存在材料堆积现象,图 4(c) 的表面具有最佳的表面光洁度,仅有较少的进给刀痕。因此,在采用相同进给量的情况下,低温切削比干切削获得更高的表面质量,并且采用液态二氧化碳作为冷却介质能够得到更光洁的表面。

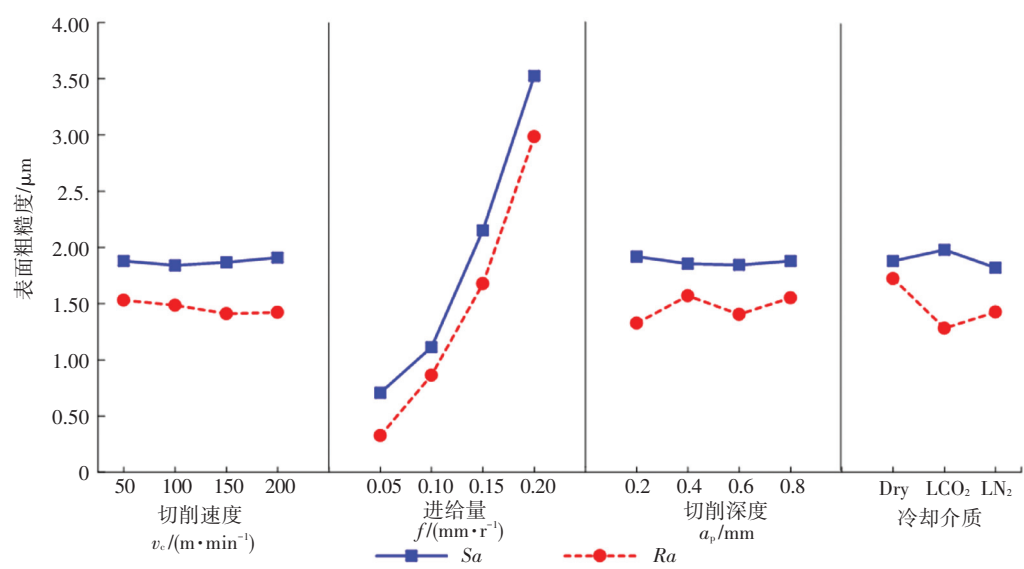


图 3 各因素对 ZK61M 镁合金粗糙度 Sa 和 Ra 的影响规律

Fig.3 Effect of factors on roughness Sa and Ra of ZK61M magnesium alloy

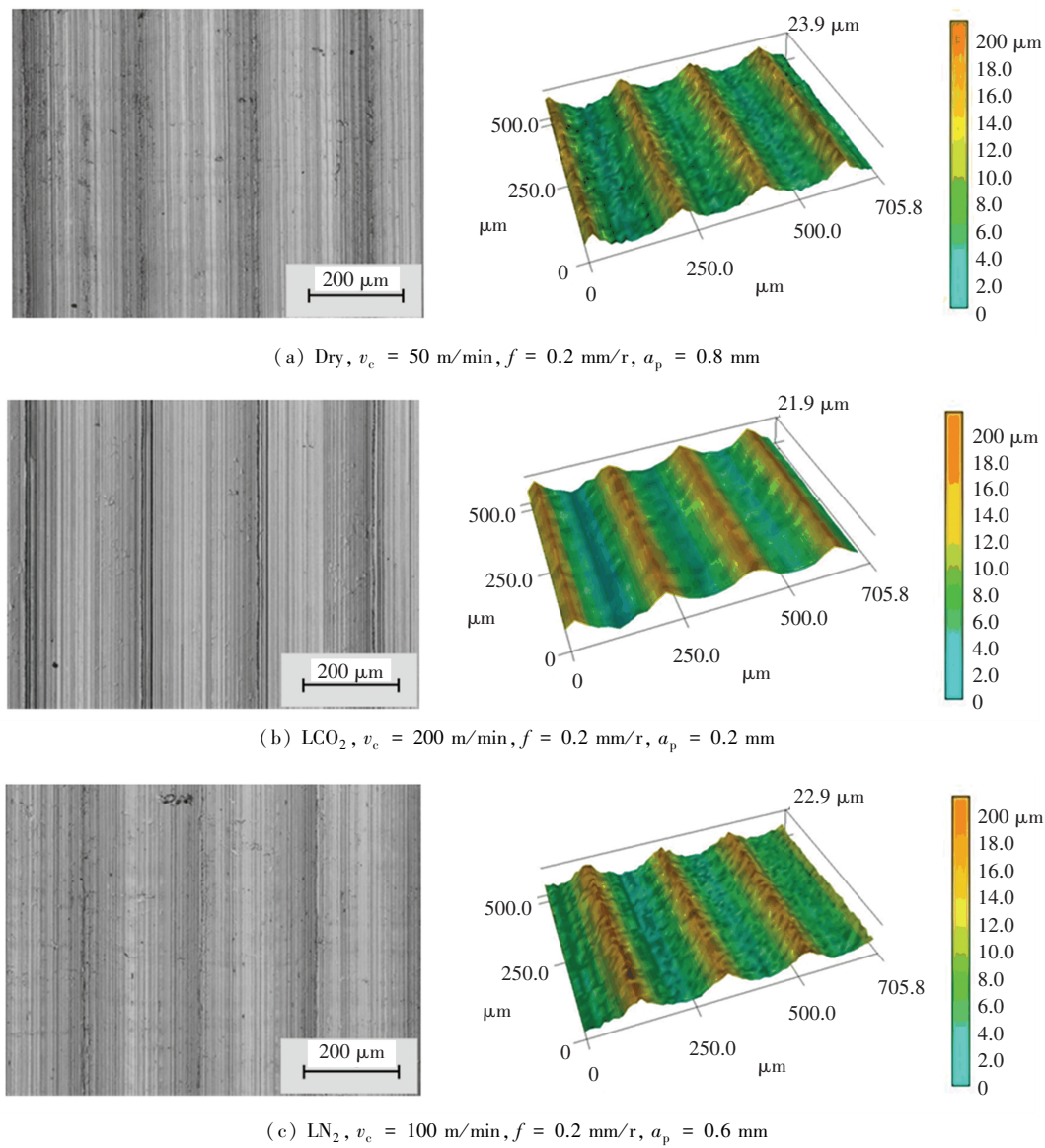


图 4 ZK61M 镁合金车削加工表面形貌

Fig.4 Surface topography of ZK61M magnesium alloy after turning

图 4(a)、(b)、(c) 右侧图片为对应的三维形貌图,干切削条件下,峰谷差最大为 23.9 μm 。当切削过程中喷射 LN_2 时,气体射流有效增大换热面积,增强对流交换能力,使切屑易于排出,降低切削区的温度,在接触面之间形成低温流体膜抑制颤振和振动,使得加工表面粗糙度减小,因此三维形貌图中峰谷差减小。与 LN_2 冷却相比,采用 LCO_2 冷却时切削表面三维形貌的波峰和波谷更小,造成该现象的原因一方面是由于 LCO_2 本身粘度小,喷射出来后流动阻力小,另一方面是二氧化碳将切削区的空气隔绝,使工件的氧化减缓,因此连续的喷射使 LCO_2 持续渗透减缓了刀具的磨损、减小了滑动摩擦,形成均匀分布的较短的波峰和波谷,从而获得了更光洁的表面。由表 8 的数据可得,喷射液氮能使 ZK61M 镁合金车削表面粗糙度降低 17 % 左右,喷射液态二氧化碳使其表面粗糙度降低 25 % 左右。

切削深度和切削速度对镁合金车削表面粗糙度的影响较小,整体而言,表面粗糙度随切削深度的增大呈波动增大的趋势。因此,镁合金低温切削加工中,当以降低表面粗糙度为目标时,对应的最优车削工艺参数为 A3B1C1D2, 即 $v_c = 150 \text{ m/min}$ 、 $f = 0.05 \text{ mm/r}$ 、 $a_p = 0.2 \text{ mm}$,采用液态二氧化碳作为冷却介质。

2.3 微观组织

图 5 为不同加工条件下 ZK61M 镁合金车削加工表层的微观组织。从图 5(a) 和图 5(b) 中可以看出,在常温干切条件下,加工表层材料组织与基体基本相似。由于轧制工艺的不连续,基体晶粒细化不完全,使得基体组织中仍然存在粗大晶粒。在切削过程中喷射液态二氧化碳,冷却介质使得金属表面温度降低,材料硬度和强度随之提高,使得车削过程中产生更大的应变,从而使工件表层晶粒发生大角度偏转,如图 5(d) 所示。在车削过程中喷射液氮,表层晶粒出现明显细化,细化层深度为 15 μm 左右。可能的原因是,喷射液氮的温度低于液态二氧化碳,低温状态时,在车削过程中的大塑性应变引导下,新晶粒簇产生,此时其晶界所处状态为非平衡态,晶粒内部的大量弹性扭曲使晶粒内部形成极大的内应力场^[22],当该应力超过非基面滑移所需的临界分切应力时,镁合金的非基面滑移开启,同时晶体内部产生大量位错堆积,使得整个晶粒中的位错密度增加,随后,浸渍的位错密度的重新排列和分组,进而导致更多的亚晶取向与原始晶粒的取向存在差异^[23-25]。此时,随着变形的继续进行,使得晶粒发生低温动态再结晶^[26],亚晶充当细化晶粒的晶核,形成细晶,如图 5(f) 所示。

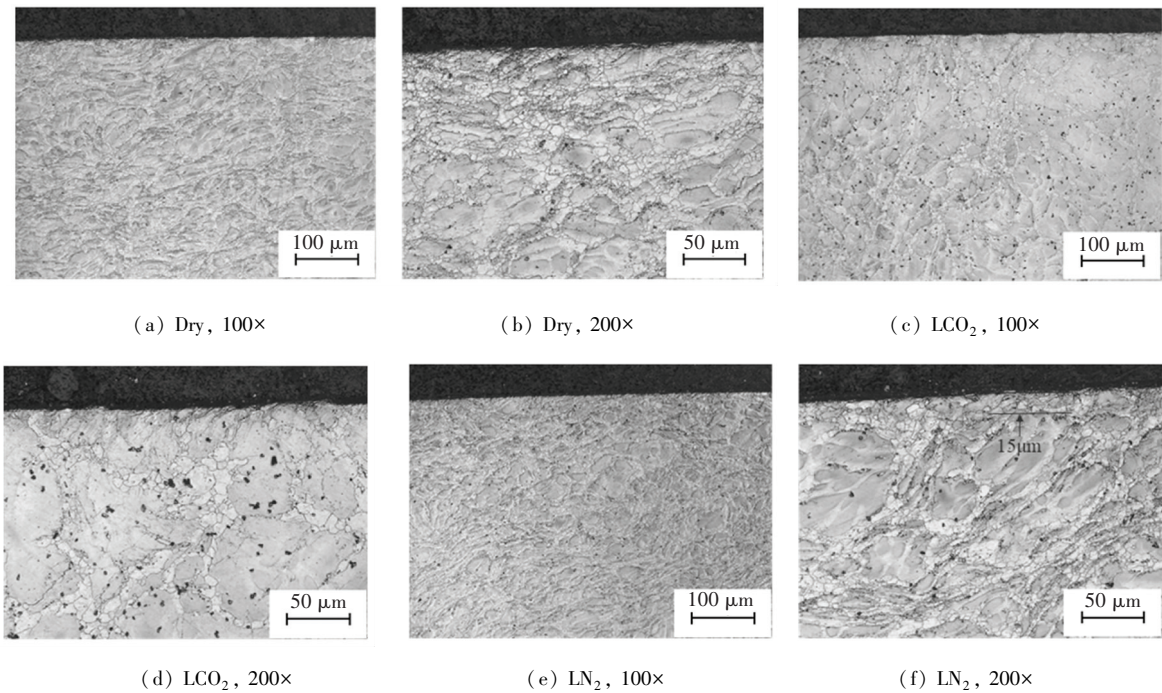


图 5 ZK61M 镁合金车削表层微观组织

Fig.5 Microstructure of ZK61M magnesium alloy after turning

2.4 残余应力

表 10 和表 11 分别为各因素对 ZK61M 镁合金车削表面轴向和周向残余应力的极差分析结果,其中 4 个因素对加工表面轴向残余应力的影响顺序

为:进给量>切削深度>切削速度>冷却介质,各因素对加工表面周向残余应力的影响顺序为:进给量>冷却介质>切削速度>切削深度。

各因素对 ZK61M 镁合金表面残余应力的影响

规律如图 6 所示。由表 10 和表 11 可知,在镁合金低温车削加工中,对镁合金加工表面轴向和周向残余应力影响最大的因素均为进给量。由图 6 可知,随着进给量从 0.05 mm/r 增大到 0.15 mm/r,表面轴向残余压应力减小,但是当进给量进一步增大时,表面轴向残余压应力变大。这主要是因为进给量增加使材料去除率增大,切削产生热增加,使表面残余拉应力增大;随进给量进一步增大,刀具与工件之间的挤压作用增大,使材料的晶格发生扭曲、产生大塑性变形、增大位错密度,已加工表面受到强烈的冷塑性变形使表面产生残余压应力。

表 10 轴向表面残余应力 σ_x (MPa) 的极差分析结果
Tab.10 Results of range analysis of axial residual stress σ_x (MPa)

水平	因素			
	v_c	f	a_p	冷却介质
1	-17.875	-26.000	-6.975	-19.250
2	-21.375	-12.125	-20.125	-22.625
3	-16.500	-8.875	-14.125	-11.500
4	-9.125	-17.875	-23.625	
极差	12.250	17.125	16.750	11.125
排序	3	1	2	4

表 11 周向表面残余应力 σ_y (MPa) 的极差分析结果
Tab. 11 Results of range analysis of circumferential residual stress σ_y (MPa)

水平	因素			
	v_c	f	a_p	冷却介质
1	-20.125	-23.125	-12.250	-9.000
2	-16.125	-13.000	-11.875	-21.125
3	-13.375	-15.500	-18.125	-14.938
4	-10.375	-8.375	-17.750	
极差	9.750	14.750	6.250	12.125
排序	3	1	4	2

由图 6 发现,冷却介质是表面周向残余应力的一个重要影响因素,但对表面轴向残余应力的影响较小。在切削过程中喷射液态二氧化碳,可以有效降低切削区温度,降低切削热的作用,有利于引入较大的表面残余压应力。液氮对切削表面残余应力的影响在轴向和周向 2 个方向上存在差异。与干切削相比,使用液氮作为冷却介质时,轴向表面残余压应力减小而周向残余压应力增大,这与超低温状态下材料的各向异性相关。切削深度对表面轴向残余应力的影响较大,对表面周向残余应力的影响较小。随着切削深度的增加,切削力增大,表面残余压应力增大。

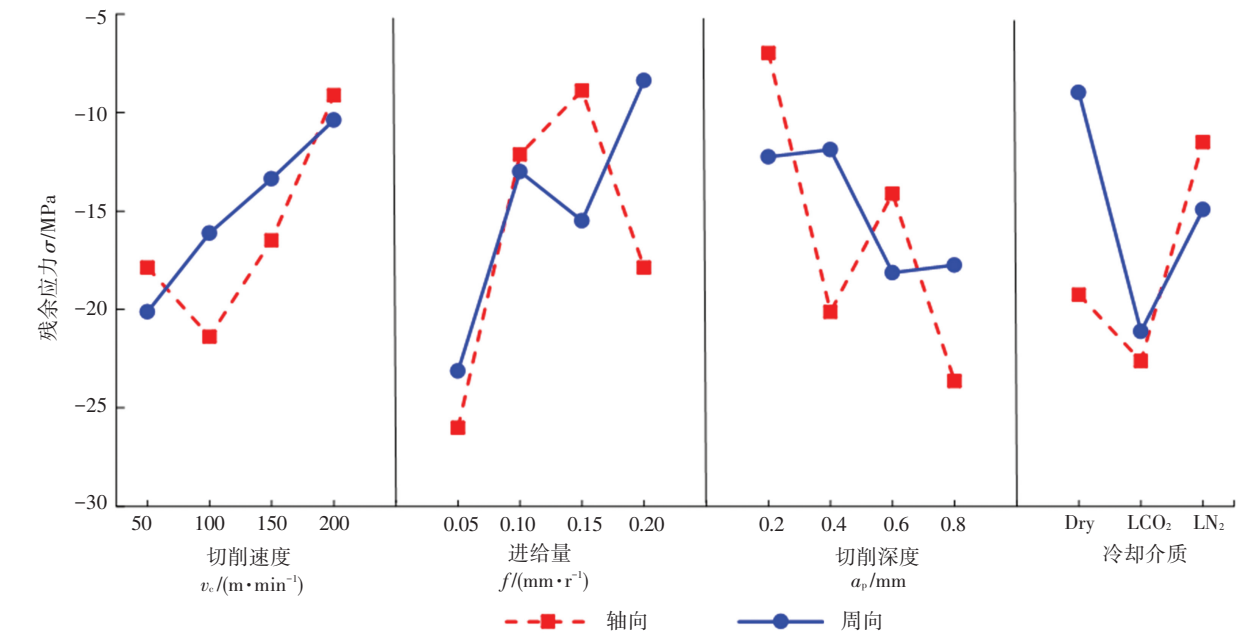


图 6 各因素对 ZK61M 镁合金表面残余应力的影响规律
Fig.6 Effect of factors on surface residual stress of ZK61M magnesium alloy

如图 6 所示,切削速度对材料表面残余应力影响较大。切削速度增大,表面轴向和周向残余应力均随之向拉应力方向变化。这是由于切削速度增加,切削温度升高,此时切削热效应的作用占主导地位,热应力使得残余拉应力增大;同时切削速度增大,切削力减小,后刀面对已加工表面的挤压和摩擦

减小,机械应力引起的残余压应力减小。因此,整体上表现为:随着切削速度的增加,表面残余应力向拉应力方向变化。

因此,在镁合金的低温切削中,当以增大表面残余压应力为目标时,最优车削工艺参数为 A2B1C4D2,即 $v_c = 100 m/min$ 、 $f = 0.05 mm/r$ 、 $a_p =$

0.8 mm,采用液态二氧化碳作为冷却介质。

2.5 灰色关联分析

本文以切削力、表面粗糙度、轴向残余应力及周向残余应力为优化目标,基于灰色关联分析,通过建立灰色关联分析模型,得到衡量各指标间关联度大小的量化方法,将多目标转化为单目标评价,从而对加工参数进行优化^[27]。分析与计算步骤如下:

1)数据标准化处理。为使数据具有可比性,将原始数据归一化,消除其量纲,使其转换成标准化数值。各指标均为“望小特征”,即数值越小,结果越优,因此采用式(3)对原始数据进行变换:

$$x_i^*(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \tag{3}$$

式中: $x_i^*(k)$ 为变换处理后数列, $x_i^0(k)$ 为原始数据, i 为试验次数, k 为优化指标。

2)灰色关联系数计算。灰色关联系数表示参考数列与比较数列在某时刻的关联程度^[28],参考数列 $x_0^*(k) = 1.0$, 灰色关联系数由以下公式计算:

$$\gamma(x_0^*(k), x_i^*(k)) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \rho \Delta_{\max}} \tag{4}$$

式中: $\Delta_i(k) = |x_0^*(k) - x_i^*(k)|$ 为比较数列与参考数列的绝对差; $\Delta_{\min} = \min \Delta_i(k)$ 为绝对差的最小值; $\Delta_{\max} = \max \Delta_i(k)$ 为绝对差的最大值; $\rho \in [0, 1]$, 为分辨系数,取值为 0.5。灰色关联系数计算结果如表 12 所示。

表 12 灰色关联系数与灰色关联度计算结果
Tab.12 Grey relational coefficient and grey relational degree

编号	灰色关联系数 γ				灰色关联度 r	排序
	F_z	Sa	σ_x	σ_y		
1	0.333	0.350	0.686	0.563	0.530	9
2	0.477	0.503	0.358	0.667	0.528	10
3	0.706	0.754	0.369	0.375	0.555	7
4	1.000	1.000	0.400	0.486	0.715	2
5	0.411	0.369	0.444	0.419	0.431	14
6	0.377	0.510	0.369	0.419	0.446	13
7	0.861	0.772	0.338	0.340	0.563	6
8	0.765	0.903	1.000	1.000	0.985	1
9	0.509	0.364	0.358	0.360	0.400	16
10	0.795	0.506	0.353	0.360	0.483	11
11	0.436	0.754	0.522	0.462	0.588	5
12	0.705	0.919	0.462	0.486	0.666	3
13	0.702	0.333	0.333	0.333	0.403	15
14	0.555	0.518	0.381	0.353	0.458	12
15	0.526	0.776	0.348	0.383	0.532	8
16	0.620	0.975	0.421	0.450	0.648	4

3)灰色关联度计算。灰色关联度是灰色关联系数的加权和^[28],是作为单目标进行综合评价的结果。灰色关联度的大小,表示当前结果与最优目标的接近程度,计算公式为

$$r_i(x_0^*, x_i^*) = \sum_{k=1}^n \beta_k \gamma(x_0^*(k), x_i^*(k)) \tag{5}$$

式中, β_k 为优化指标的权重, $\sum_{k=1}^n \beta_k = 1$ 。

响应权重使用 SPSS 进行主成分分析计算。根据灰色关联系数构建各指标的相关系数矩阵,其方差分解主成分提取分析结果如表 13 所示。由分析结果可知,前 2 个成分特征值较大,且累积方差贡献率达到 85.833% > 80%,因此选用前 2 个成分代替 4 个指标进行分析。2 个主成分的成分矩阵如表 14 所示,根据式(6)对 2 个成分进行综合分析,得到各成分响应权重如表 15 所示。

$$\beta_k = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{\xi_j(k)}{\sqrt{\lambda_j}} \times p_j}{\sum_{j=1}^j p_j} \tag{6}$$

式中, m 为主成分的个数; $\xi_j(k)$ 代表第 k 个成分与第 j 个主成分对应的因子载荷系数; λ_j 代表主成分的初始特征值; p_j 代表主成分初始特征值的方差百分比。

由式(5)计算各组试验的灰色关联度结果如表 12 所示。图 7 为 4 个单指标灰色关联度及综合指标灰色关联度的计算结果。从图中可以看出,第 8 组试验灰色关联度最大,达到最佳响应特征,即在第 8 组的工艺参数下,镁合金低温切削可获得最佳表面质量。因此,镁合金低温切削的最佳工艺参数为: $v_c = 100 \text{ m/min}$ 、 $f = 0.05 \text{ mm/r}$ 、 $a_p = 0.4 \text{ mm}$,选取液态二氧化碳作为冷却介质。

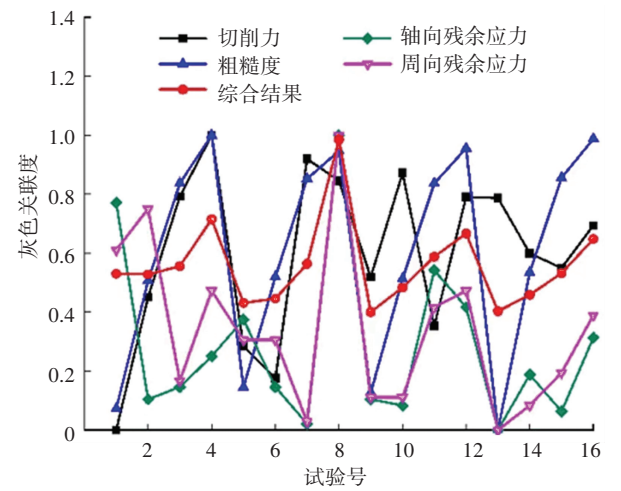


图 7 灰色关联分析结果

Fig.7 Results of grey relational analysis

4) 建立优化预测模型。对灰色关联度的计算结果进行多项式拟合回归分析,建立镁合金低温切削工艺参数与以切削力、粗糙度、表面残余应力为综合评价指标的灰色关联度间的映射关系。冷却介质的数值用其喷嘴处作用温度表征,3 种介质分别对应 25 ℃, -50 ℃, -150 ℃ 这 3 个温度,构建纯二阶灰色关联度回归预测模型如下:

GRD = 1.004 + 6.371 2 × 10⁻⁴ × v_c - 5.946 9 × f +

2.673 1 × 10⁻¹ × a_p - 1.2347 × 10⁻³ × T -

4.843 8 × 10⁻⁶ × v_c² + 15.634 × f² -

2.800 2 × 10⁻¹ × a_p² - 1.1166 ×

10⁻⁵ × T²

图 8 为灰色关联度的实际计算值和预测值的结果,从图中可以看出,预测值的变化趋势与实际值趋于一致,其平均误差为 7.93%,预测模型较为合理。

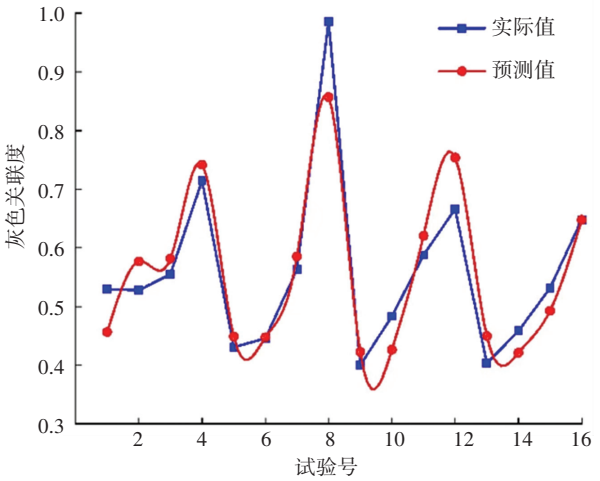


图 8 GRD 的实际值与预测值

Fig.8 Actual value and predicted value of GRD

表 13 方差分解主成分提取分析表

Tab.13 Results of variance decomposition principal component extraction analysis

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差百分比/ %	累积/ %	总计	方差百分比/ %	累积/ %
1	1.895	47.369	47.369	1.895	47.369	47.369
2	1.539	38.464	85.833	1.539	38.464	85.833
3	0.356	8.892	94.725			
4	0.211	5.275	100.000			

表 14 成分矩阵

Tab.14 Component matrix

$\xi_j(k)$	1	2
1	-0.283	0.868
2	0.256	0.880
3	0.932	-0.057
4	0.939	0.079

表 15 响应权重表

Tab.15 Response weight

成分	切削力	粗糙度	轴向残余应力	周向残余应力
权重/ %	0.145	0.305	0.256	0.294

5) 试验验证。为验证预测模型的准确性,选用最优的切削参数在另外 2 种冷却条件下的工艺参数组合作为验证试验的前 2 组,分别标记为 L-1 和 L-2,随机选取一组其他工艺参数作为验证试验的第 3 组,标记为 L-3,参数安排及试验结果如表 16 所示。

表 16 验证试验结果

Tab.16 Results of verification experiment

组别	$v_c /$ (m · min ⁻¹)	$f /$ (mm · r ⁻¹)	$a_p /$ mm	冷却 介质	$F_z /$ N	$Sa /$ μm	$\sigma_x /$ MPa	$\sigma_y /$ MPa	灰色关联度		误差/ %
									实际值	预测值	
L-1	100	0.05	0.4	Dry	9.604	0.79	-24	-30	0.729 7	0.785 3	7.62
L-2	100	0.05	0.4	LN ₂	9.726	0.67	-25	-22	0.739 1	0.757 1	2.44
L-3	100	0.10	0.2	LCO ₂	8.253	0.95	-17	-14	0.626 3	0.657 0	4.90

验证试验的灰色关联度的实际值与模型预测值间的平均误差为 4.99%,均方误差为 0.001 45,结果表明预测模型具有很好的准确度。

3 结 论

1)在镁合金的低温车削中,影响切削力最显著的因素是切削深度,其次是进给量和切削速度,低温介质的影响不显著,但低温切削可使切削力降低。

2)表面粗糙度和残余应力的最显著影响因素为进给量,低温介质为影响粗糙度和周向残余应力的第二显著因素,切削深度对轴向残余应力的影响较显著,切削速度的影响不显著。

3)低温切削能有效降低镁合金表面粗糙度、细化加工表层晶粒,增大表面残余压应力,且液态二氧化碳效果优于液氮。

4)在镁合金的低温切削中,以切削力、粗糙度、残余应力为优化目标,最优工艺参数为: $v_c = 100 \text{ m/min}$ 、 $f = 0.05 \text{ mm/r}$ 、 $a_p = 0.4 \text{ mm}$,并采用液态二氧化碳作为冷却介质。

参考文献

- [1] 曾小勤,王渠东,吕宜振,等. 镁合金应用新进展[J]. 铸造, 1998(11): 40
ZENG Xiaoqin, WANG Qudong, LÜ Yizhen, et al. New development of magnesium alloy application[J]. Casting, 1998(11): 40. DOI: CNKI:SUN:ZZZZ.0.1998-11-014
- [2] 李姗,王伯健. 变形镁合金的研究与开发应用[J]. 热加工工艺, 2007, 36(6): 65
LI Shan, WANG Bojian. Research, development and application of wrought magnesium alloys[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(006): 65. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3814.2007.06.023
- [3] DIEM W. Magnesium in different applications[J]. Auto Technology, 2001, 1(1): 40. DOI: 10.1007/ BF03246578
- [4] 王家弟,程毓,卢晨,等. 镁合金的切削加工浅谈[J]. 机械设计与制造工程, 2002, 31(3): 3
WANG Jiadi, CHENG Yu, LU Chen, et al. Discussion about cutting of the magnesium alloys[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2002, 31(3): 3. DOI: 10.3969/j. issn.1672-1616. 2002.03.030
- [5] 齐金. 低温冷却切削镁合金 AZ31B 表面完整性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019
QI Jin. Research on surface integrity of low temperature cooling turning magnesium alloy AZ31B[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019
- [6] PU Z, OUTEIRO J C, BATISTA A C, et al. Surface integrity in dry and cryogenic machining of AZ31B Mg alloy with varying cutting edge radius tools[J]. Procedia Engineering, 2011, 19: 282. DOI: 10.1016/j.proeng.2011. 11.113
- [7] PU Z, OUTEIRO J C, BATISTA A C, et al. Enhanced surface integrity of AZ31B Mg alloy by cryogenic machining towards improved functional performance of machined components[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 56: 17. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2011. 12.006
- [8] CHAABANI S, ARRAZOLA P J, AYED Y, et al. Surface integrity when machining inconel 718 using conventional lubrication and carbon dioxide coolant[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 47: 530. DOI: 10.1016/j.promfg.2020. 04.150
- [9] VIGNESH S, IQBAL U M. Experimental investigation on machining parameters of Hastelloy C276 under different cryogenic environment [C]//Advances in Forming, Machining and Automation. [S.l.]: Springer, 2019: 253. DOI: 10.1007/978-981-32-9417-2_20
- [10] 侯朋. 镁合金加工的切削参数选择[J]. 科技资讯, 2010(24): 38
HOU Peng. Selection of cutting parameters for magnesium alloy machining[J]. Science & Technology Information, 2010(24): 38. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3791.2010.24.029
- [11] 冯鑫. AM60 镁合金精密车削性能研究及残余应力分析[D]. 西宁: 青海大学, 2019
FENG Xin. Research on precision turning performance and residual stress analysis of AM60 magnesium alloy[D]. Xining: Qinghai University, 2019
- [12] 刘龙飞,胡少华,卢立伟. 切削速度对 AZ31 镁合金高速切削切屑形成的影响[J]. 稀有金属, 2016, 40(7): 654
LIU Longfei, HU Shaohua, LU Liwei. Sawtooth chip of AZ31 magnesium alloy under high-speed cutting and different cutting velocities [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2016, 40(7): 654. DOI: 10.13373/j.cnki.cjrm.2016.07.004
- [13] WOJTOWICZ N, DANIS I, MONIES F, et al. The influence of cutting conditions on surface integrity of a wrought magnesium alloy[J]. Procedia Engineering, 2013, 63: 20. DOI: 10.1016/j.proeng. 2013.08.212
- [14] 刘胤,赵利民,刘美云,等. ZK61M 镁合金的电火花加工[J]. 金属加工(冷加工), 2014(24): 36
LIU Yin, ZHAO Limin, LIU Meiyun, et al. Electric discharge machining of ZK61M magnesium alloy[J]. Metal Working, 2014(24): 36. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1641.2014.24.014
- [15] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 24
CHEN Zhenhua. Wrought magnesium alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 24
- [16] 高玉魁. 表面完整性理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 19
GAO Yukui. Surface theory and application of surface integrity [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014: 19
- [17] 刘泽康. AZ91D 镁合金切削性能的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012
LIU Zekang. Analysis of cutting performance for AZ91D magnesium alloy[D]. Changchun: Jilin University, 2012
- [18] 韩荣第,张悦. 采用气体射流冷却润滑绿色切削技术的研究进展[J]. 工具技术, 2006(11): 7
HAN Rongdi, ZHANG Yue. Present status of study on green cutting technology of cooling and lubrication with gas jet[J]. Tool Engineering, 2006(11): 7. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2006.11.002

- versity, 2013
- [8] KORUCUK F M, MAALI M, KILIC M, et al. Experimental analysis of the effect of dent variation on the buckling capacity of thin-walled cylindrical shells[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 143: 106259
- [9] 邓志军,陈冰冰,郑浣琪,等.外压模拟计算中圆筒初始几何偏差描述方法的研究[J].*机械工程学报*,2015,51(6):66
- DENG Zhijun, CHEN Bingbing, ZHENG Huanqi, et al. Research on the description method of cylinder initial geometric deviation in external pressure simulation calculation [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(6):66
- [10] 张建,周通,王纬波,等.模态缺陷条件下复合材料柱形壳屈曲特性[J].*复合材料学报*,2017, 34(3):588
- ZHANG Jian, ZHOU Tong, WANG Weibo, et al. Buckling property of a composite cylindrical shell considering mode imperfections[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(3):588
- [11] XIONG Zhixin, HUI Hanju, HUANG Zhiqian. The ultimate strength of ring stiffened cylindrical shell and its influence factors [J]. *Journal of Theoretical and Applied Sciences*,2020, 3
- [12] 蒲映超,初艳玲,洪英.大深度载人潜水器极限承载能力非线性有限元分析方法研究[J].*船舶工程*,2014, 36(3):119
- PU Yingchao, CHU Yanling, HONG Ying. Study on nonlinear finite element analysis method of ultimate carrying capacity of large depth manned submersible[J]. *Ship Engineering*, 2014, 36(3):119
- [13] 罗珊,王纬波.潜水器耐压壳结构研究现状及展望[J].*舰船科学技术*,2019, 41(19):7
- LUO Shan, WANG Weibo. The research status and prospect of submersible pressure hull structure[J]. *Ship Science and Technology* 2019, 41(19):7
- [14] 李文跃,王帅,刘涛,等.大深度载人潜水器耐压壳结构研究现状及最新进展[J].*中国造船*,2016, 57(1):210
- LI Wenyue, WANG Shuai, LIU Tao, et al. The research status and latest progress of pressure hull structure of deep manned submersible [J]. *China Shipbuilding*, 2016, 57(1):210
- [15] ABUBAKR E S, MUSA M A, HUSAIN J, et al. An equivalent imperfection-based FE simulation of the stability of dented cylindrical shells accounting for unintended imperfections [J]. *Thin-Walled Structures*,2021, 158: 107159
- [16] 潜艇结构设计计算方法:GJB/Z 21A—2011[S]. 北京:国防科学技术工业委员会,2001
- Calculation method of submarine structure design: GJB/Z 21A—2011[S]. Beijing: The Commission of Science, Technology and Industry for National Defense of the PRCL, 2001
- [17] SAULLO G P, ROLF Z, MARIANO A A, et al. Geometric imperfections and lower-bound methods used to calculate knock-down factors for axially compressed composite cylindrical shells [J]. *Thin-Walled Structures*,2014, 74:118
- [18] 杨帆,岳珠峰,李磊.基于弧长法的加筋板后屈曲特性分析及试验[J].*应用力学学报*,2015, 32(1):119
- YANG Fan, YUE Zhufeng, LI Lei. Analysis and experiment of post-buckling characteristics of stiffened plates based on arc-length method[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2015, 32(1):119

(编辑 王小唯)

(上接第63页)

- [19] JAMIL M, HE Ning, ZHAO Wei, et al. Heat transfer efficiency of cryogenic-LN₂ and CO₂-snow and their application in the turning of Ti-6Al-4V[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021 (166): 120716. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120716
- [20] KUMAR M. Cryogenic turning of the Ti-6Al-4V alloy with modified cutting tool inserts[J]. *Cryogenics*, 2011, 51(1): 34. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2010.10.011
- [21] 周泽华. 金属切削原理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984: 150
- ZHOU Zehua. Principles of metal cutting[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1984: 150
- [22] 陈先华,汪小龙,张志华. 镁合金动态再结晶的研究现状[J]. *兵器材料科学与工程*, 2013(1): 154
- CHEN Xianhua, WANG Xiaolong, ZHANG Zhihua. Research status of dynamic recrystallization of magnesium alloys[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2013(1): 154. DOI: 10.3969/j.issn.1004-244X.2013.01. 043
- [23] FATEMI S M, ZAREI-HANZAKI A, CABRERA J M. Microstructure, texture, and tensile properties of ultrafine/nano-grained magnesium alloy processed by accumulative back extrusion[J]. *Metalurgical and Materials Transactions, A. Physical Metallurgy and Materials Science*, 2017, 48(5): 2565. DOI: 10.1007/s11661-017-4029-6
- [24] TOTH L S, GU Chengfan. Ultrafine-grain metals by severe plastic deformation[J]. *Materials Characterization*, 2014, 92(6): 10. DOI: 10.1016/j.matchar.2014.02.003
- [25] DINESH S, SENTHILKUMAR V, ASOKAN P. Effect of cryogenic cooling on texture and microstructural evolution of ZK60 magnesium alloy during machining[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(9): 096587. DOI: 10.1088/2053-1591/ab3172
- [26] LIU Zhiyi, SONG Bai, KANG S B. Low-temperature dynamic recrystallization occurring at a high deformation temperature during hot compression of twin-roll-cast Mg-5.51Zn-0.49Zr alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2009, 60(6): 403. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.11.023
- [27] 程美,欧阳波仪,何延钢. AHP 和 GRA 的微细电火花加工工艺多目标优化研究[J]. *机械设计与制造*, 2020(12): 5
- CHENG Mei, OUYANG Boyi, HE Yangang. Study on multi-objective optimization of micro-EDM machining process based on AHP and GRA[J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2020(12): 5. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997. 2020.12.027
- [28] 李文琴,于占江,许金凯,等. 基于 GRA-RSM 的微铣削表面质量多目标参数优化[J]. *表面技术*, 2020, 49(9): 8
- LI Wenqin, YU Zhanjiang, XU Jinkai, et al. Multi-objective parameters optimization of micro-milling surface quality based on GRA-RSM[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(9): 8. DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.09.043

(编辑 王小唯)