

不同切削参数下激光熔覆层加工性能有限元仿真研究

姜志勇^{1a,1b}, 姜芙林^{1a,1b,2,*}, 宋涛^{1a,1b}, 肖东振^{1a,1b}, 杨发展^{1a,1b}, 梁鹏^{1a,1b}

(1. 青岛理工大学 a. 机械与汽车工程学院; b. 工业流体节能与污染控制教育部重点实验室, 青岛 266525;
2. 山东省主要农作物机械化生产装备协同创新中心, 青岛 266109)

摘要:为探究激光熔覆层与匀质基体切削加工的不同之处和影响熔覆层加工性能的因素,采用 ABAQUS 仿真软件建立了以 42CrMo 钢为基体的镍基熔覆层的二维切削仿真模型。通过改变切削用量和刀具前角,观察匀质基体和熔覆层在切削仿真中的切向分力、径向分力、应力演变和等效塑性应变演变的结果。在相同切削用量下,切削加工熔覆层产生的切削力远远大于匀质基体中的切削力,相比于切削速度,切削深度对切削力的影响作用更为显著,熔覆层的加工具有分层切削的特点;熔覆层切削仿真中的应力大于匀质基体的应力,应力在熔覆层和匀质基体中均沿工件厚度连续传递并衰减;匀质基体和熔覆层的近加工表面塑性应变层随切削深度的增加不断加深,在大的切削深度下,熔覆层中发生塑性应变不连续的现象;熔覆层加工临界切削深度的选择与径向分力有关。由于熔覆层材料与匀质基体材料力学性能差异大,较大切削深度下的加工可能出现塑性应变不连续的现象并影响熔覆层的加工质量,所以熔覆层的加工应在较小切削深度下进行。

关键词:激光熔覆; 切削仿真; 激光熔覆层加工; 塑性应变; 切削用量

中图分类号: TG174.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)03-0112-11

Finite element simulation study on the processing performance of laser cladding layer under different cutting parameters

JIANG Zhiyong^{1a,1b}, JIANG Fulin^{1a,1b,2,*}, SONG Tao^{1a,1b}, XIAO Dongzhen^{1a,1b},
YANG Fazhan^{1a,1b}, LIANG Peng^{1a,1b}

(1. a. School of Mechanical and Automotive Engineering; b. Key Lab of Industrial Fluid Energy Conservation and Pollution Control of Ministry of Education, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China; 2. Collaborative Innovation Center for Shandong's Main Crop Production Equipment and Mechanization, Qingdao 266109, China)

Abstract: To explore the differences between laser cladding layer and homogeneous substrate in their cutting processing and to investigate the factors affecting cladding layer processing performance, a two-dimensional cutting simulation model for nickel-based cladding layer on 42CrMo steel substrate was established using the simulation software ABAQUS. By changing the cutting amount and tool rake angle, the results of tangential component, radial component, stress evolution and equivalent plastic strain evolution of both the homogeneous substratematerial and the cladding layer in cutting simulation were observed. Under the

收稿日期: 2023-05-10

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2022ME081); 山东省主要农作物机械化生产装备协同创新中心开放课题(SDXTZX-21); 山东省高等学校“青创科技支持计划”(2021KJ077)

作者简介: 姜志勇(1997—), 男, 山东青岛人。硕士, 研究方向为激光加工及再制造。E-mail: 1473816180@qq.com。

* 通信作者: 姜芙林(1985—), 男, 山东莱西人。博士, 副教授, 主要从事高速加工、机械产品绿色设计与制造、激光加工及再制造方面的研究。E-mail: Jiangfl@qut.edu.cn。

same cutting amount, the cutting force generated by cutting the cladding layer is much greater than the cutting force in the homogeneous substrate. Compared to the cutting speed, the cutting depth plays a major role in the magnitude of the cutting force, and the processing of the cladding layer has the characteristic of layered cutting. The stress in the cutting simulation of the cladding layer is greater than that of the homogeneous substrate, and the stress continuously propagates and decays along the thickness of the workpiece in both cases. The near machined surface plastic strain layer of homogeneous substrate material and cladding layer continuously deepens with the increase of cutting depth. At a large cutting depth, discontinuous plastic strain occurs in the cladding layer. The selection of critical cutting depth for cladding layer processing is related to the radial component force. Due to the significant difference in the mechanical properties between the cladding layer and the homogeneous substrate, plastic strain discontinuity may occur during processing at larger cutting depths and affect the processing quality of the cladding layer. Therefore, the processing of the cladding layer should be carried out at smaller cutting depths.

Key words: laser cladding; cutting simulation; laser cladding layer processing; plastic strain; cutting amount

激光熔覆技术是近些年来发展成熟起来的一种降低能耗和环境友好型的增材制造技术,与其他增材制造技术相比,具有制造周期短且耗材少、冷却速率快、稀释率低、易与基体实现冶金结合等优势^[1]。这些特点使得激光熔覆技术不仅被用于复杂零部件的快速制造,还广泛应用于航空航天等重大领域中的高价值零件的保护与修复^[2]。

激光熔覆技术可以实现工件性能的提升,但熔覆后的工件具有较大的表面粗糙度和较宽的尺寸精度。UKAR 等^[3]指出较差表面质量是增材制造技术最主要的缺点。TABERNERO 等^[4]模拟了同轴激光熔覆中粉末流量的分布,结果表明,除了移动激光束传递的热量分布不均匀之外,粉末的不均匀分布是激光熔覆产生不规则表面的另一个原因。因此通过激光熔覆技术制造或修复的零件难以达到直接使用的要求,较差的表面质量是限制激光熔覆广泛应用的关键技术障碍。激光熔覆后的工件需要进行后处理加工才能满足工件的尺寸精度和表面粗糙度的要求。

WANG 等^[5]研究了铁基涂层在加工过程中,切削参数对熔覆层加工切削力的影响,研究表明切削深度是影响切削力的主要参数,切削速度对切削力分量的影响不大,这与硬车削的过程相似。王胜等^[6]对不同激光工艺参数的熔覆层进行了车削加工,优选出最佳工艺参数,证明了激光熔覆技术耦合车削加工能够实现部件的高质量修复。SHEN 等^[7]提出一种超声波滚压耦合连续热处理的方法,可以降低熔覆层的缺陷,实现优异表面光洁度和较强的耐腐蚀性。

以上的研究表明熔覆层工件加工具有必要性与可行性,但是与传统成形技术(如锻造、铸造等)形成的金属材料相比,熔覆层工件在后处理加工中存在明显的难加工特性^[8]:①与常规工件相比,由于基体与熔覆层材料不同,熔覆层与基体的化学成分和力学性能不同,使得熔覆层材料加工具有非匀质材料的加工特性;②虽然激光熔覆技术可以实现熔覆材料与基体的冶金结合,但熔覆层与基体的结合强度相对于匀质基体材料的内聚力而言,依然有很大差距,在加工熔覆工件时,加工所引起的应力可能会导致熔覆层与基体之间的结合界面不稳定,改变结合界面的特性,甚至使熔覆层脱落;③熔覆层具有较小的尺寸、低热导率、高硬度和高耐磨性以及熔覆过程会产生的孔隙、夹杂等微观缺陷。这些都会给熔覆工件的后处理加工带来极大的挑战。

激光熔覆技术研究关注的焦点大都集中在激光参数的优化、粉末材料的选择、熔覆层性能的探究和激光熔覆路径的摸索等方面,对于激光熔覆工件所需的后处理加工技术和加工理论研究较少。本文通过 ABAQUS 软件建立镍基熔覆层工件的二维切削仿真模型,开展熔覆层工件的切削仿真,揭示熔覆层在切削加工中的状态响应和熔覆层与匀质基体加工特性,为熔覆层工件的加工提供有益指导。

1 镍基熔覆层的力学性能

激光熔覆的基体为 42CrMo 钢,熔覆材料为镍 60 粉末,激光熔覆参数如表 1 所示。

表 1 激光熔覆参数

激光功率 P/W	扫描速度 $V/(mm \cdot s^{-1})$	光斑直径 d/mm	送粉转速 $n/(g \cdot min^{-1})$	搭接率 $R_0/\%$
1050	5.2	3	20	50

硬度不仅仅是描述材料抵抗变形或破裂趋向的简单概念,也是材料韧性、弹性、塑性和强度等力学性能的综合指标。有研究表明材料的硬度和可加工性之间存在明显的关系^[9]。硬度高并且不均匀分布是熔覆层的显著特征,这也必然会给熔覆层的加工带来影响。

对熔覆层截面进行打磨和抛光,采用维氏硬度计进行显微硬度的测试,加载载荷为 9.8 N,加载时间为 10 s。按固定的间隔沿熔覆层厚度进行测量,在同一深度水平上测量 3 次,取平均值,以降低测量误差。

42CrMo 钢表面激光熔覆镍基熔覆层工件的原始显微硬度变化曲线如图 1 所示。

图 1 中熔覆层的显微硬度呈现梯度分布,从熔覆层顶部开始硬度沿熔覆层的厚度方向逐渐降低。熔覆层按硬度大致可以分为 3 层,即熔覆层的顶部、中部、底部,其硬度均远高于基体的硬度。这是因为激光熔覆具有快速冷却凝固的特点, Ni_2Si 和 $Cr_{23}C_6$ 等颗粒均匀分布在过饱和固溶体 $\gamma(Ni-Fe)$ 中,阻止了晶粒的生长,起到了细晶强化的作用;另一方面熔覆层中分布的 Ni_2Si 和 $Cr_{23}C_6$ 等硬质相,起弥散强化作用^[10]。由于激光功率小,熔覆层工件的热影响区和稀释率小,因此在熔覆层和基体的结合界面到基体出现硬度骤降的现象。

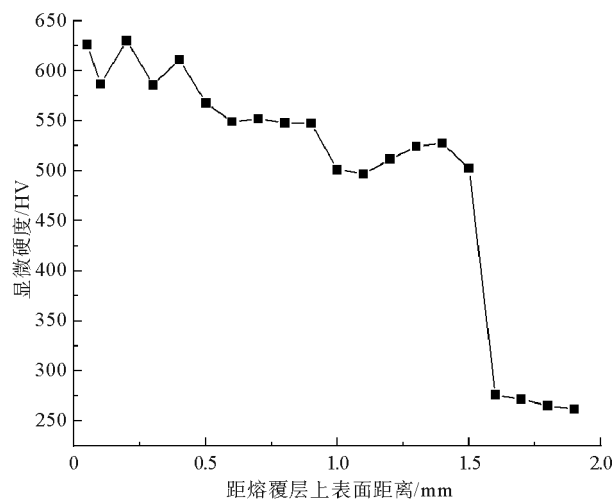


图 1 镍基激光熔覆层工件原始显微硬度

2 镍基熔覆层 ABAQUS 切削加工仿真模型

2.1 材料模型和材料性能参数

加载条件下的材料流动行为通常由本构模型表征。通俗来讲,本构模型是描述加工去除切屑的流动应力与应力强化、应变率强化和温度软化之间的关系。一个合适的本构模型是有限元仿真的先决条件。在金属材料的切削仿真中,Johnson-Cook(J-C)^[11]模型由于其简洁的形式已成为应用最广泛的本构模型。J-C 本构模型同时考虑了应变、应变率和温度引起的硬化和软化效应,其表达式为

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0}\right)^m \right] \quad (1)$$

式中: σ 为等效塑性应力; ϵ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率; T 、 T_{melt} 和 T_0 分别为当前温度、熔化温度和室温; A 、 B 、 C 、 n 和 m 为 J-C 材料模型的 5 个本构参数。

42CrMo 钢的 J-C 本构模型参数和材料性能参数^[12]分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 42CrMo 钢的 J-C 本构模型参数

A/MPa	B/MPa	C	n	m
595	580	0.023	0.133	1.030

表 3 42CrMo 钢材料性能参数

温度/°C	密度/ (kg · m ⁻³)	弹性模量/ GPa	泊松比	导热系数/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	线膨胀系数/ 10 ⁻⁶ K ⁻¹	比热容/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)
0	7850	210	0.290	44.0	11.1	461
100	7850	210	0.300	44.0	12.1	482
200	7850	210	0.310	44.0	12.9	498
300	7850	185	0.313	29.3	13.5	511
400	7850	175	0.316	28.0	13.9	526
500	7850	165	0.325	26.7	14.1	540
600	7850	155	0.341	25.5	14.5	540
700	7850	145	0.345	18.6	15.1	540
800	7850	135	0.350	12.7	15.5	540
900	7850	125	0.355	9.5	16.1	540

镍基熔覆层的 J-C 本构模型参数和材料性能参数分别如表 4、表 5 所示。

表 4 镍基熔覆层的 J-C 本构模型参数

A/MPa	B/MPa	C	n	m
1057	1420	0.3625	0.0110	0.8600

2.2 熔覆层切削仿真几何模型

本文主要研究熔覆工件在加工中的响

表 5 镍基熔覆层材料性能参数

温度/°C	密度/ (kg · m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	导热系数/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	线膨胀系数/ 10 ⁻⁶ K ⁻¹	比热容/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)
20	8550	216	0.289	18.8	12.6	470
100	8550	213	0.290	19.9	12.9	510
200	8550	208	0.293	20.8	13.3	550
300	8550	202	0.295	21.9	13.7	600
400	8550	197	0.298	22.9	14.1	620
500	8550	192	0.300	24.0	14.4	620
600	8550	185	0.302	24.8	14.8	620
700	8550	179	0.305	25.5	15.8	730
800	8550	172	0.308	26.3	16.8	770
900	8550	168	0.324	27.6	17.2	800

应,由于刀具的变形非常小,所以可将刀具设置成刚体,刀具尺寸为 2 mm×3.5 mm,前角为 5°,后角为 10°。熔覆层工件尺寸为 12 mm×5 mm,其中熔覆层的厚度为 1.5 mm,基体为 3.5 mm,如图 2 所示。熔覆层工件采用 CPE4RT 单元类型,使用四边形结构的网格属性。仿真通过限制左侧和底部的自由度来固定工件,刀具沿 X 轴负方向运动进行切削,其中, F_c 为切

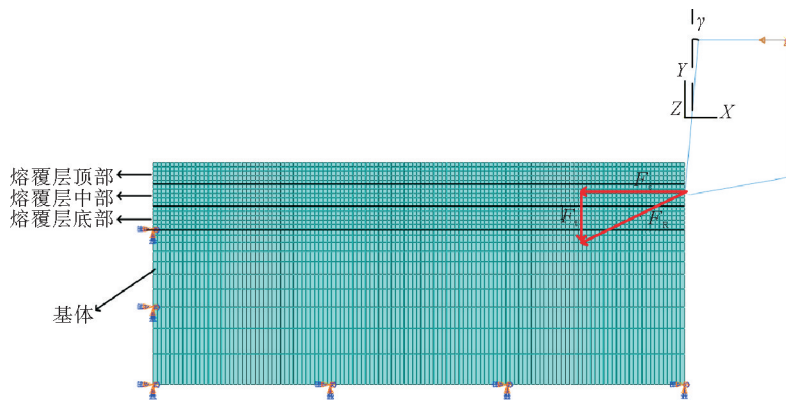


图 2 熔覆层工件车削加工的二维切削仿真模型

向分力, F_t 为径向分力, F_R 为切削合力。

在金属切削仿真中, J-C 模型各个不确定的参数综合考虑了材料在加工过程中的应变硬化、应变率硬化和热软化的作用。其中 A 的物理意义代表了材料的屈服强度, 对流动应力曲线具有显著的影响程度, 屈服强度越大, 反映材料越不易切削。硬度和强度存在着一定的关系, 金属材料的硬度越高, 其强度就越高, 塑性变形抗力也就越强, 反之也是如此^[13]。TAN 等^[14]给出了镍基材料的屈服强度与维氏硬度的关系, 如式(2)所示:

$$Y_s = 2.737H_v - 183 \quad (2)$$

式中: Y_s 为屈服强度; H_v 为显微硬度。

如图 1 所示, 熔覆层顶部和中部的平均显微硬度分别为 612、550 HV。将仿真中熔覆层均分为 3 层, 由式(2)可得, 顶部和中部的屈服强度 A 分别为 1492.0、1322.4 MPa。

3 匀质基体与熔覆层工件的切削仿真结果

为探究熔覆层工件与匀质基体工件加工响应的区别, 对熔覆层工件的切削仿真做如下假设:

- 1) 熔覆层的厚度为 1.5 mm, 忽略激光熔覆层的不平度, 熔覆层表面光滑平整;
- 2) 熔覆层按硬度均分为 3 层, 每层的力学性能均匀, 与性能不分层的单层熔覆层进行对比, 单层熔覆层的屈服强度为 1057 MPa;
- 3) 熔覆层与基体结合处稀释率为 0, 即熔覆层与基体界面分明。

金属在加工过程中切削力不仅使切削层产生变形和切削热, 使刀具变钝, 导致表面质量变差, 也会影响生产效率。因此在加工中关注切削力的变化具有重要意义, 切削参数在加工中对切削力产生直接影响, 表 6、表 7 为切削仿真参数。

表 6 切削深度 a_p 仿真参数

序号	$v/(m \cdot \min^{-1})$	a_p/mm
1	60	0.1
2	60	0.3
3	60	0.5
4	60	0.7
5	60	0.9

表 7 切削速度 v 仿真参数

序号	a_p/mm	$v/(m \cdot \min^{-1})$
1	0.7	60
2	0.7	80
3	0.7	100
4	0.7	120

3.1 切削深度对切削力的影响规律

图 3 显示了切削速度 $v=60 \text{ m/min}$ 时, 仿真过程中切削深度 a_p 对切削熔覆层工件和匀质基体工件的切向分力 F_c 和径向分力 F_t 的影响规律。一般来说 $F_c > F_t$ 。

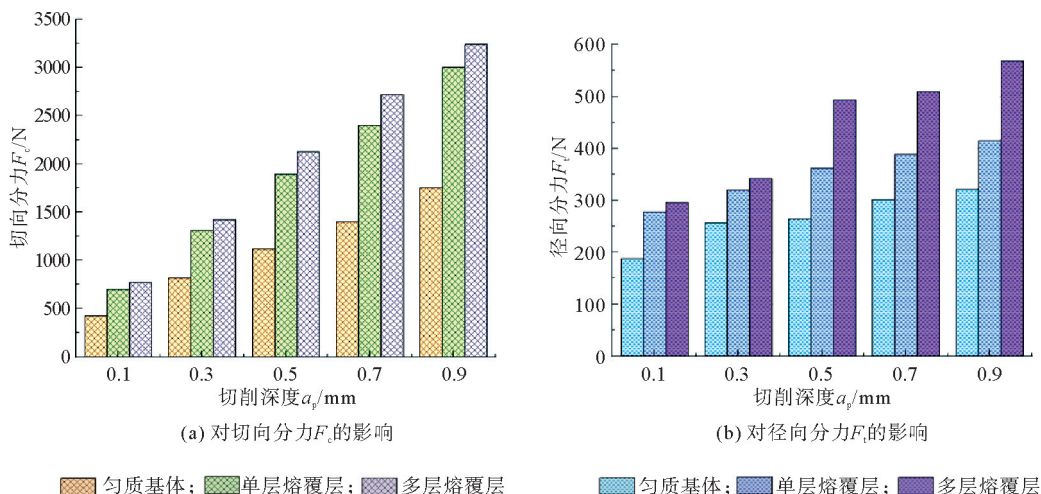


图 3 切削深度 a_p 对切削力的影响

随着切削深度 a_p 的增加,无论是切削匀质基体工件还是熔覆层工件,切向分力 F_c 和径向分力 F_r 均随着增长,且切向分力 F_c 的变化更加明显,这表明 a_p 对 F_c 的影响更为显著,其趋势与硬车削过程相似。从图3中不难看出,在相同的 a_p 下,加工熔覆层工件所产生的切削力远远大于加工匀质基体工件的切削力,较大的切削力容易加速刀具磨损,从而降低刀具使用寿命,同时也会影响到已加工表面的质量,这表明熔覆层材料的加工难度大于匀质基体材料。图3(a)显示,切削匀质基体工件和单层熔覆层工件时, F_c 的大小随 a_p 的增加,变化幅度基本不变;而对于多层熔覆层工件来说,相比于 $a_p=0.5\sim 0.9$ mm 时 F_c 的变化,在 $a_p=0.1\sim 0.5$ mm 时, F_c 变化幅度更大。以 $\Delta F_c/\Delta a_p$ 表示 F_c 梯度,在 $a_p=0.1\sim 0.5$ mm 时, $\Delta F_c/\Delta a_p=3217.425$; $a_p=0.5\sim 0.9$ mm 时, $\Delta F_c/\Delta a_p=2398.5$ 。这是因为与匀质基体工件不同,对于熔覆层工件来讲,其力学性能沿着工件厚度方向发生变化。相比之下,采用小的 a_p 时,切到的材料比采用大的 a_p 时更硬。图3(b)表明,基体和单层熔覆层工件的 F_r 随着 a_p 的增加而缓慢增长。在 $a_p=0.5\sim 0.9$ mm 时 F_r 的变化相比 $a_p=0.1\sim 0.5$ mm 时更为缓慢,这与 F_c 的变化规律相同。说明相比于切削深度,材料本身性能对切削力的影响更大,进而说明熔覆层工件的加工具有分层切削的特点。

3.2 切削速度对切削力的影响规律

图4显示了切削深度 $a_p=0.7$ mm 时,切削仿真中不同切削速度 v 对切削熔覆层工件和匀质基体工件的切向分力 F_c 和径向分力 F_r 的影响规律。

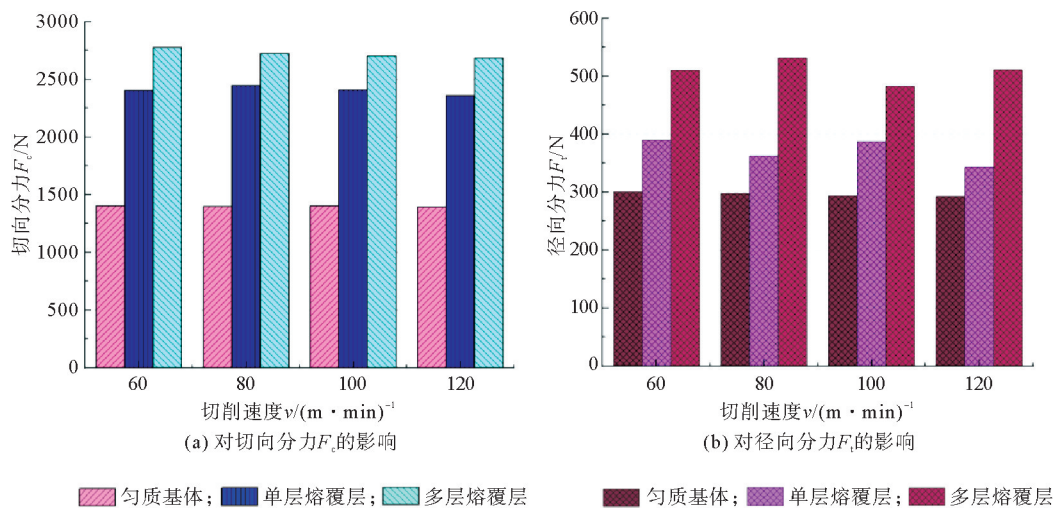
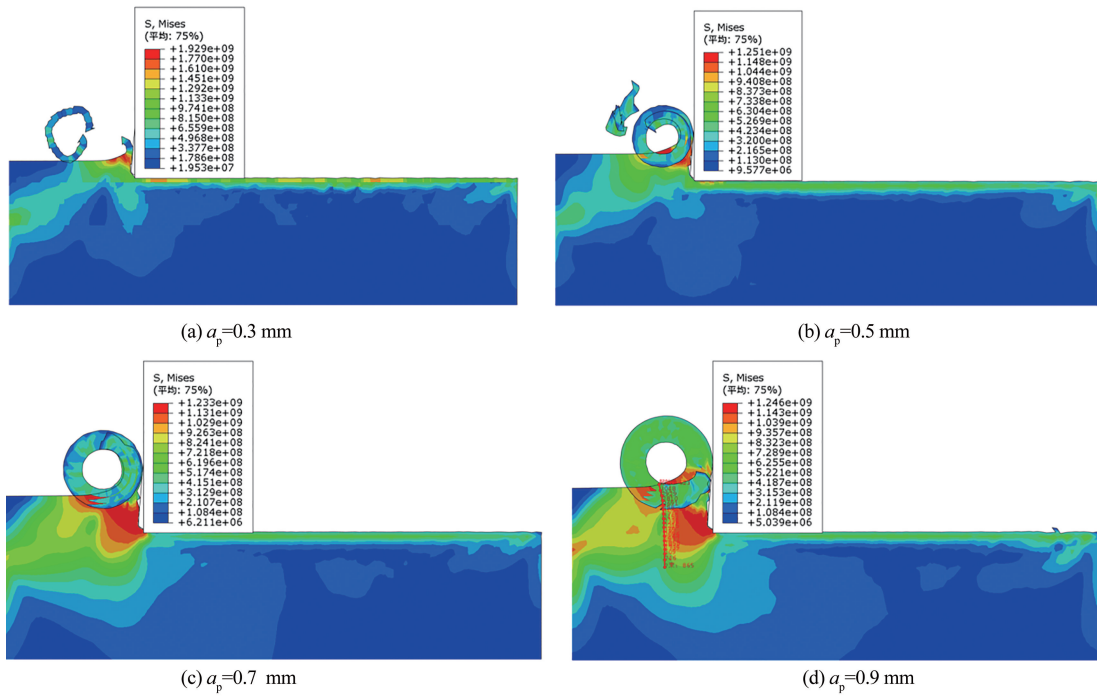
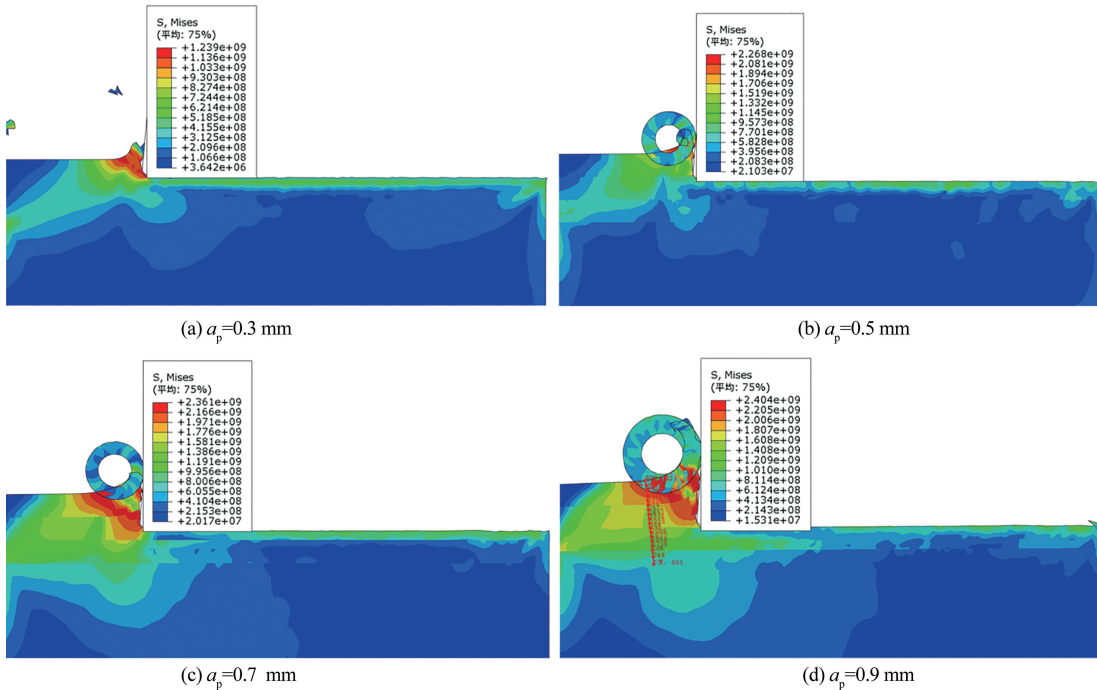


图4 切削速度 v 对切削力的影响

从图4中可以看出,切削匀质基体工件的 F_c 、 F_r 和熔覆层工件的 F_c 随着 v 的增加略有减少,这是由于随着 v 的增加,切削温度升高,切削热的增长使材料软化的结果,但是 v 对其影响并不显著。在熔覆层切削仿真中,无论是对单层熔覆层还是多层熔覆层工件的加工,图4(b)所示的 F_r 的大小随着 v 的增加并不是一味降低,且加工多层熔覆层工件产生的 F_r 的变化更为明显,这可能是熔覆层的高硬度造成的高速切削中 F_r 波动较大的原因。

3.3 应力及应变仿真结果及分析

切削过程中,作用于被加工工件上的应力大小、作用方向随材料的性质、刀具的条件、切削参数的不同而变化。为了对比切削匀质基体工件和熔覆层工件的应力演变,选取切削速度 $v=60$ m/min ,切削深度 $0.3\sim 0.9$ mm 的应力演变云图进行分析,如图5、图6所示。从图中可以看出,在熔覆层工件与匀质基体工件后续加工过程中,切削应力的分布具有相似性,应力在刀屑接触部分最大,从加工表面沿着工件厚度方向迅速降低。

图5 不同 a_p 下匀质基体工件应力演变云图图6 不同 a_p 下熔覆层工件应力演变云图

为了更直观地表明匀质基体工件和熔覆层工件加工中的应力演变,沿图5、图6所示路径在不同切削深度下,提取匀质基体工件和熔覆层工件加工中的应力,如图7所示。图7表明,在相同的加工参数下,与匀质基体工件加工相比,熔覆层工件加工过程中会产生更大的应力。然而,无论是在匀质基体工件还是熔覆层工件的加工中,应力的演变规律基本相同,即应力的作用是连续变化的,但是由于滞后现象和材料的内摩擦阻尼作用,应力沿着工件的厚度迅速衰减。

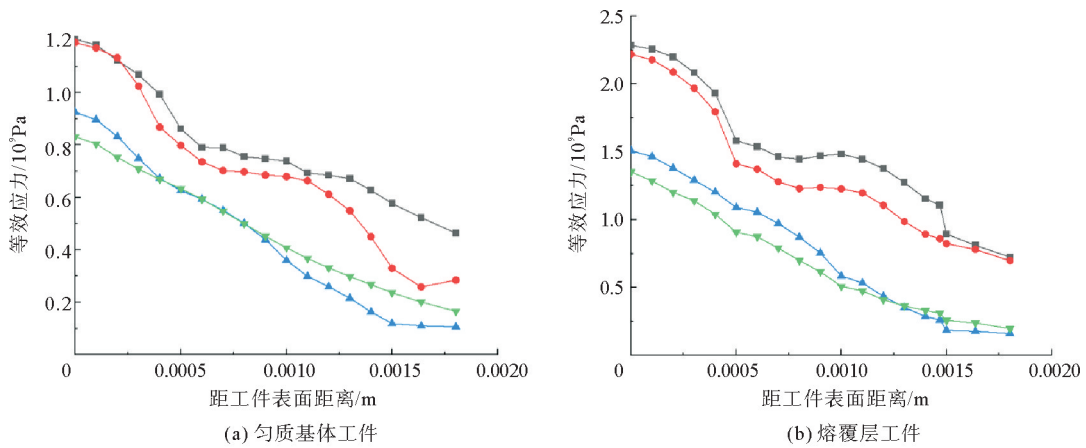


图 7 不同 a_p 下应力沿工件厚度的演变规律

—■— $a_p=0.9$ mm; —●— $a_p=0.7$ mm; —▲— $a_p=0.5$ mm; —▼— $a_p=0.3$ mm

姜静^[15]给出了在实际的切削过程中应力在工件内的传播规律:定义刀具与工件的接触点为原点,且产生的应力为 σ_0 ,切削应力在工件中传播时,应力值随离开接触点的距离增加而衰减,如式(3)所示:

$$\sigma_x = \sigma_0 e^{-ax} \quad (3)$$

式中: σ_x 为距原点 x 处的应力; σ_0 为刀具与工件接触点处产生的应力; a 为应力衰减系数。

如上所述,无论是匀质基体工件还是熔覆层工件,在加工应力大于材料屈服强度的位置,材料会发生塑性应变现象。随着切削深度的增加,加工过程中应力也不断增大,因此加工工件表面的塑性应变层深度也不断加深,如图 8、图 9 所示。

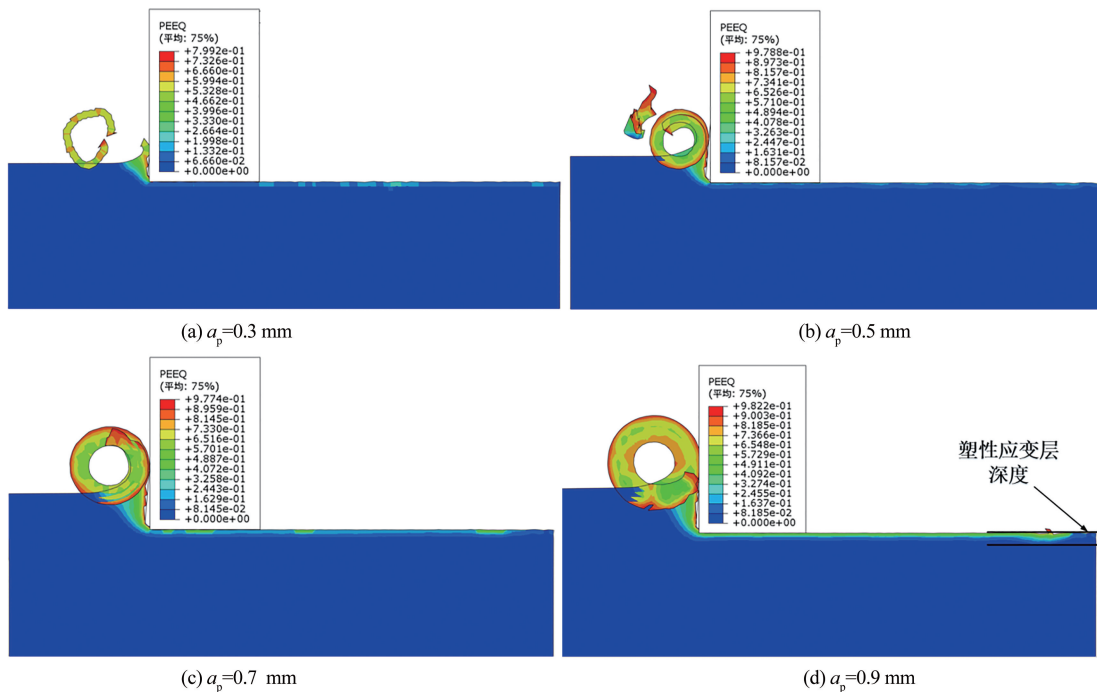


图 8 不同 a_p 下匀质基体工件等效塑性应变

对于匀质基体工件而言,其力学性能具有整体的一致性,在加工过程中,如图 8 所示,塑性变形只出现在加工表面及附近表层区域。但是激光熔覆工件是通过在基体材料表面添加熔覆材料,并利用高能密度的激光束与基体材料表面形成冶金结合的熔覆层,是一种特殊的两层结构。因此,其加工的特殊性体现在

沿工件厚度方向上的材料力学性能的骤变。一般来说,对于激光熔覆工件,基体材料的强度远低于熔覆层材料的强度。对熔覆层工件进行加工时,随着切削深度的增加,当刀具与熔覆层相互作用产生的应力传递到熔覆层与基体结合界面时,应力虽未达到熔覆材料的屈服强度,但是超过了基体材料的屈服强度,基体会发生塑性变形,即熔覆层底部仍处在弹性变形阶段而匀质基体顶部却发生了不可恢复的塑性变形,这也就是所谓的塑性应变的不连续现象^[16],如图9(d)所示。

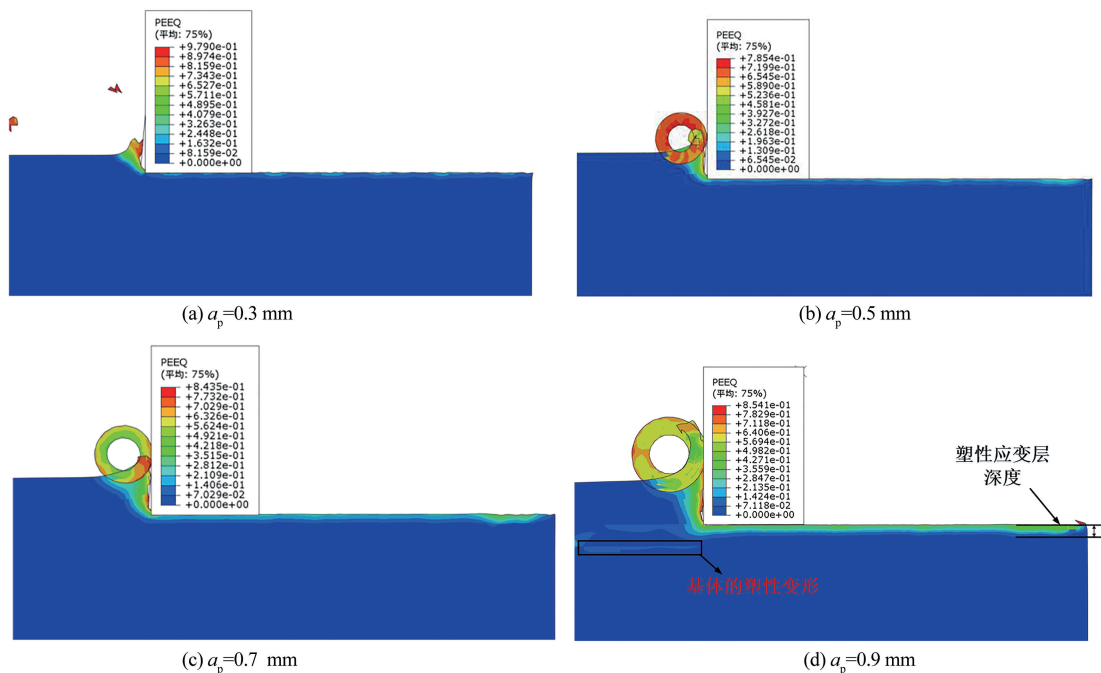


图9 不同 a_p 下熔覆层工件的等效塑性应变

在加工熔覆层工件时,要尽量避免出现熔覆层和基体之间发生这种塑性应变不连续的现象。这是因为基体发生塑性变形引起界面应力的产生,会直接影响熔覆层与基体结合界面的特性,导致熔覆层的不稳定,影响熔覆层工件的加工质量,甚至可能会使熔覆层脱落。

机械加工过程中的应力来源于机械载荷和热载荷。JACOBUS 等^[17]以加工载荷作用区域将工件分为3个部分:机械载荷和热载荷共同作用区域、机械载荷作用区域和无影响区域。熔覆层的导热系数小,切削热难以向工件深度方向传播,因此热载荷只作用于熔覆层工件的加工近表面,如图10所示。

基于此模型,ZHANG 等^[18]给出了加工熔覆层工件的临界切削深度条件,如式(4)所示:

$$t_{\min} - a_0 = t - a_{\max} = \frac{2F_t}{\pi\omega\sigma_{ys}} \sqrt{\nu_c^2 - \nu_c + 1} \quad (4)$$

式中: t_{\min} 为对应于未变形切削厚度 a_0 的最小熔覆层厚度; a_{\max} 为对应于激光熔覆层厚度 t 最大的未变形切削厚度; F_t 为切削径向分力; ω 为切削宽度; σ_{ys} 为基体的屈服强度; ν_c 为熔覆层的泊松比。

从式(4)可以看出,除材料本身的性质外,加工熔覆层工件的临界 a_p 与径向分力 F_t 的大小有关。在

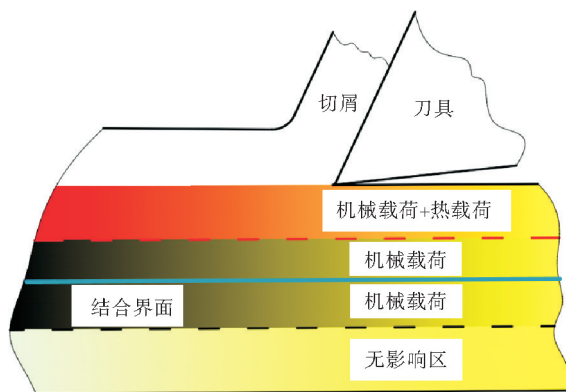


图10 熔覆层工件机械加工应力作用分布^[16]

切削参数中,如上所述,随 a_p 的增加, F_t 明显变大,因此 a_p 在熔覆层工件的加工中起重要作用。当采用较小的 a_p 对熔覆层工件进行加工时,加工表面到结合界面的距离变大,相应的应力传播距离变远,应力衰减幅度变大,应力只在近表层区域引起材料的塑性变形,在到达基体时,应力小于基体的屈服强度,不足以引起基体的塑性应变,此时加工熔覆层工件与匀质基体工件的情况无异,如图11(a)所示。而当采用大的 a_p 时,相应的加工表面与结合界面的距离减少, F_t 却增大,当应力到达基体时,依然大于基体材料的屈服强度,因此沿着熔覆层厚度方向会出现熔覆层表面塑性变形—熔覆层底部弹性变形—基体顶部塑性变形—基体底部弹性变形的塑性应变不连续的现象,如图11(b)所示。

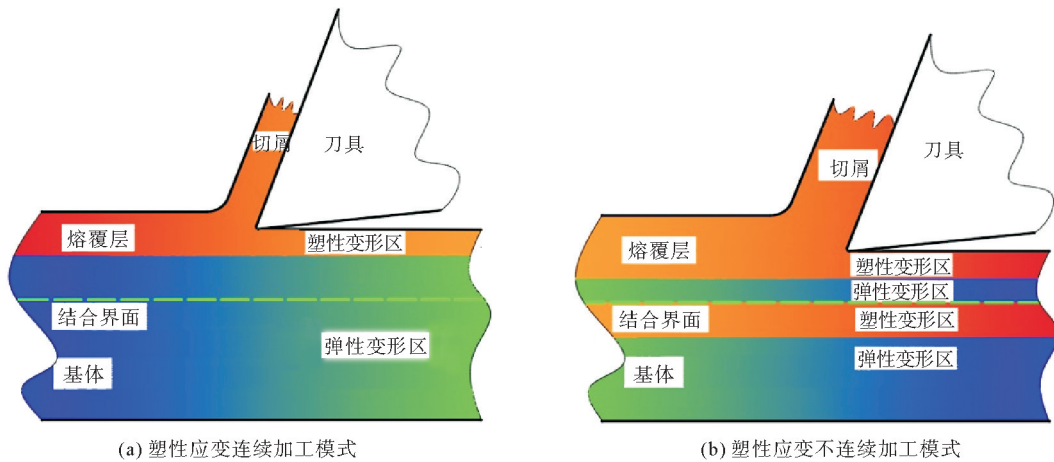


图11 熔覆层工件的加工模式^[16]

总的来说,对于匀质基体工件,切削深度的选择主要取决于加工余量和加工要求。而对于熔覆层工件进行加工,切削深度的选择一方面受到熔覆层厚度的限制,另一方面在大的切削深度下,加工所引起的应力可能影响熔覆层与基体结合界面的性能,因此不适宜选择较大的切削深度,以免对熔覆层工件的加工质量造成影响。

4 结论

本文采用ABAQUS软件建立了以42CrMo钢为基体的镍基熔覆层的二维切削仿真模型,探究不同切削用量对匀质基体工件和熔覆层工件加工过程中切削力的影响规律,通过应力场和应变场的仿真,观察到熔覆层工件与匀质基体工件应力、应变的变化以及两者在较大切削深度下加工的区别,得到熔覆层工件的临界加工条件,通过仿真结果对熔覆层的加工进行分析,主要结论如下:

1) 随着切削深度的增加,加工匀质基体和熔覆层产生的切向分力和径向分力随之增大,但在同一切削深度下,加工熔覆层所产生的切削力远大于加工匀质基体的切削力。在不同切削深度下,加工熔覆层产生的切向分力的应力梯度不同,径向分力在切削深度为0.5~0.9 mm时变化不大,这是不同位置熔覆层力学性能不同所造成的结果,说明熔覆层具有分层切削特性。切削速度对切削力的影响不大,但熔覆层高速切削时会造成径向分力的波动。

2) 熔覆层材料和匀质基体材料在切削过程中所产生的应力随切削深度的增大而增大,且均是沿着材料的厚度方向衰减,应力的分布是连续的。匀质基体材料加工近表层的塑性应变层深度也随切削深度的增大而加深,应变也是连续的。由于熔覆层材料与匀质基体材料的力学性能差异大,采用较大的切削深度进行加工时,熔覆层材料应变场仿真发生了塑性应变不连续的现象,即出现熔覆层表面塑性变形—熔覆层底部弹性变形—基体顶部塑性变形—基体底部弹性变形的结果。熔覆层加工存在临界切削深度,临界值的选择主要受径向分力的影响。

参考文献(References):

- [1] 王东生,田宗军,沈理达,等. 激光熔覆技术研究现状及其发展[J]. 应用激光,2012,32(6):538-544.
WANG Dongsheng, TIAN Zongjun, SHEN Lida, et al. Research status and development of laser cladding technology[J]. Applied Laser, 2012, 32(6): 538-544.
- [2] 薛蕾,黄卫东,陈静,等. 激光成形修复技术在航空铸件修复中的应用[J]. 铸造技术,2008(3):391-394.
XUE Lei, HUANG Weidong, CHEN Jing, et al. Application of laser forming repair technology on the aerial castings[J]. Foundry Technology, 2008(3): 391-394.
- [3] UKAR E, LAMIKIZ A, LACALLE L N, et al. Laser polishing parameter optimisation on selective laser sintered parts[J]. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2010, 8(3/4): 417-432.
- [4] TABERNEIRO I, LAMIKIZ A, UKAR E, et al. Numerical simulation and experimental validation of powder flux distribution in coaxial laser cladding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(15): 2125-2134.
- [5] WANG M, XU B S, DONG S Y, et al. Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces in turning of Fe-based amorphous overlay for remanufacture[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65: 735-743.
- [6] 王胜,郑志谊,周明安,等. 45钢表面激光熔覆316不锈钢涂层的工艺参数对熔覆层车削性能的影响[J]. 激光与光电子学进展,2021,58(21):214-221.
WANG Sheng, ZHENG Zhiyi, ZHOU Ming'an, et al. Influence of laser cladding parameters on turning performance of laser-cladded 316 stainless steel coating on 45 steel surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 214-221.
- [7] SHEN X H, SU H, WANG J T, et al. New approach towards the machining process after laser cladding[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021, 21(1): 1-17.
- [8] ZHANG P R, LIU Z Q, DU J, et al. On machinability and surface integrity in subsequent machining of additively-manufactured thick coatings: A review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 53: 123-143.
- [9] AVDOVIC P, XU L, ANDERSSON M, et al. Evaluating the machinability of inconel 718 using polar diagrams[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 133(7): 072101.
- [10] 曹晓卿,贺海燕,周珊珊,等. H13钢表面激光熔覆Ni60A合金组织及性能分析[J]. 太原理工大学学报,2010,41(4):360-363.
CAO Xiaoqing, HE Haiyan, ZHOU Shanshan, et al. Microstructure and property analysis of laser cladded Ni60A alloy on H13 steel surface[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2010, 41(4): 360-363.
- [11] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1983, 21: 541-548.
- [12] 于浩,赵军,盖少磊,等. 42CrMo钢精车加工表面残余应力有限元仿真研究[J]. 现代制造工程,2021(11):87-92.
YU Hao, ZHAO Jun, GAI Shaolei, et al. Finite element simulation study on surface residual stress of 42CrMo steel in finish turning[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(11): 87-92.
- [13] 王印培. 钢的硬度值与屈服强度之间的经验关系[J]. 化工与通用机械,1982(12):59-61.
WANG Yinpei. Empirical relationship between hardness value and yield strength of steel[J]. Chemical and General Machinery, 1982(12): 59-61.
- [14] TAN C L, WENG F, SUI S, et al. Progress and perspectives in laser additive manufacturing of key aeroengine materials[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture: Design, Research and Application, 2021, 170: 103804.
- [15] 姜静. 振动切削应力波传播有限元分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.
JIANG Jing. Study on the transmission of the stress waves in vibratory cutting[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
- [16] 张培荣. Cr/Ni合金激光熔覆层车-滚复合加工表面完整性及耐腐蚀性研究[D]. 济南:山东大学,2018.
ZHANG Peirong. On surface integrity and corrosion resistance of laser cladded Cr/Ni alloy finished by hybrid turning and burnishing[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [17] JACOBUS K, DEVOR R E, KAPOOR S G. Machining-induced residual stress: Experimentation and modeling[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2000, 122(1): 633-647.
- [18] ZHANG P R, LIU Z Q. Plastic deformation and critical condition for orthogonal machining two-layered materials with laser cladded Cr-Ni-based stainless steel onto AISI 1045[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 149: 1033-1044.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)