DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.05.005

激光拼焊在线精刨技术研究

王晓,陈东,王今可,徐焕萍,李传祥

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院,辽宁 鞍山 114051)

摘　要:激光拼焊是汽车实现节能减排的一种重要方法,对接间隙是激光拼焊中亟需解决的关键问题,精刨技术通过对钢板对接边缘进行少量的切削,减小了接边的形状误差,从而有效解决间隙问题。结合激光拼焊的工艺特点,对精刨设备进行结构设计,并完成了相应的工艺设计。依据拼焊板的材料属性和切削工艺特点,选取工艺参数与刀具几何参数的参数范围,建立精刨过程的切削仿真模型;基于正交试验理论,以刨削过程中刀具所受最大切削反作用力的大小为优化目标,对刀具的几何形状进行优化设计,确定了 3 个因素对切削力大小影响的主次顺序,最终得出较优的前角、后角和刃倾角角度。设计了组合刀具,可以在单次切削中同时完成接边刨削和倒角。该技术可以有效提高激光拼焊的焊缝质量。

关键词:激光拼焊;精刨设备;焊缝间隙;组合刀具

中图分类号:TH162^{+}.1　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5276(2026)05-0033-05

Research on Online PrecisionPlaning Technology for Laser Tailor Welding

Wang Xiao, Chen Dong, Wang Jinke, Xu Huanping, Li Chuanxiang

(School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: Laser tailor welding is an important method for reducing energy consumption and emissions in automobiles. The butt gap is a key issue that urgently needs to be addressed in laser tailor welding. Precision planing technology effectively solves the gap problem by removing a small amount of material from the butt edges of steel plates, thereby reducing the shape error of the edges. Based on the process characteristics of laser tailor welding, the structural design of the precision planing equipment is carried out, along with the corresponding process design. According to the material properties of the tailor-welded blanks and the cutting process characteristics, the parameter ranges of the process parameters and tool geometric parameters are selected, and a cutting simulation model for the precision planing process is established. Based on the orthogonal experiment theory, with the maximum cutting force reaction force on the tool during planing as the optimization objective, the geometric shape of the tool is optimized. The primary and secondary order of three factors affecting the cutting force is determined, and the optimal rake angle, clearance angle, and inclination angle are obtained. A combined tool is designed, which can simultaneously complete edge planing and chamfering in a single cut. This technology can effectively improve the weld quality of laser tailor welding.

Keywords: laser tailor welding; precision planing equipment; weld gap; combined tool

0　引言

激光拼焊是指将不同厚度(或不同材质)的钢板在冲压成型前用激光对焊连接在一起的工艺方法[1]。激光拼焊技术广泛应用于白车身制造,通过合理分配钢板厚度,在不降低强度和安全性的前提下实现汽车轻量化和节能减排[2-3]。

由于激光光斑直径很小,焊接时能够熔化的范围有限,因此对焊前钢板对接边缘形成的间隙有严格限制[4-5],过大的间隙将导致漏光及熔化金属不足,引发焊缝凹陷、咬边等缺陷[6-7]。为减小间隙并提高焊接质量,文献[8]中提出了挤压预成型技术、碾压技术和过盈量补偿机制等多种方法,但上述方法属于间接方法且机制比较复杂,因此本文提出激光拼焊精刨技术,通过直接减小钢板接边形状误差来减小间隙,从而提高焊接质量。

1　精刨设备及工艺设计

在激光拼焊前,钢板的接边通常采用精剪工艺以提高接边几何精度,但精剪后的料片接边同时存在直线度误差(0.15 mm/1 000 mm)和端面形貌误差,在对接后会出现局部间隙和 X 形接

基金项目:辽宁省教育厅科学研究项目(JYTZD2023094);辽宁省自然科学基金项目(20170540457)

第一作者简介:王晓(1997—),女,河南省漯河人,硕士,研究方向为机器人技术与应用,1337045493@qq.com。

通信作者简介:陈东(1972—),男,辽宁鞍山人,教授、研究生导师,博士,研究方向为机械结构强度性能分析与优化,机器人技术及其应用, chendongas@126.com。

头,如图 1 所示,对焊接质量有较大影响。

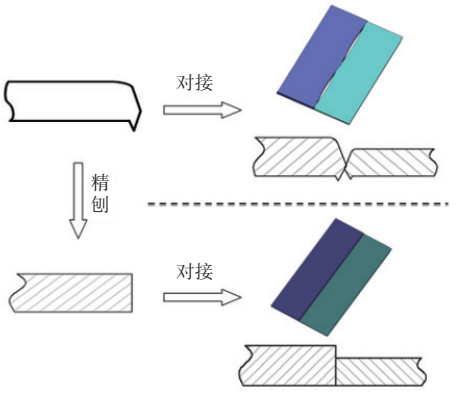

图 1　精刨的作用

为提高料片接边直线度和改善端面形貌,提出激光拼焊精刨技术。在焊接前,先对钢板接边进行微切削精刨加工。采用精刨技术不但可以提高料片接边直线度,而且加工后的焊接边可获得较好的垂直端面,消除剪切加工后的圆角塑性变形、下部撕裂带以及毛刺等固有缺陷,具有对接后料片间隙小、上下间隙均匀性好等优点。为实现在线精刨工艺,本文对在线精刨技术的设备和刀具进行研究。

1.1　设备的结构设计

结合激光拼焊的工艺特点,本文设计了精刨设备,如图 2 所示,设备主要由框架、支撑台、压紧机构、传动机构、定位机构、刀具单元以及控制系统组成。

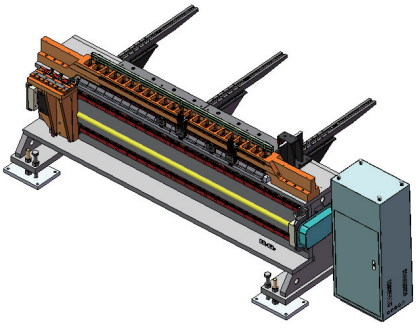

图 2　精刨设备

如图 3 所示,压紧机构采用均布多气缸结构,为钢板提供均匀、可靠的高强度压紧力,避免出现局部压紧力不均匀,引发刨削时钢板振动或让刀。

如图 4 所示,传动机构由伺服电机、同步带和精密滚珠丝杠副组成,为刨削刀具提供高速、高精度驱动,并提供退刀动作。定位机构采用气缸驱动,定位销定位,为钢板提供正向定位基准。

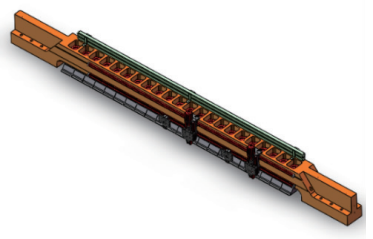

图 3　定位压紧系统

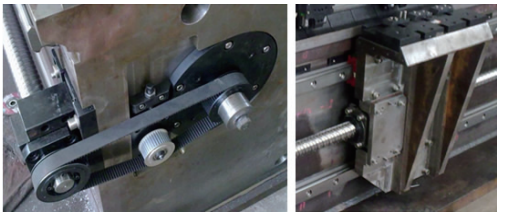

图 4　传动系统

刀具为刨削加工提供高寿命、低成本刀具组,并具备刨削加工所需的刀具微调整功能。控制系统控制设备的运行,协调各部分动作完成精刨作业。精刨设备的主要技术指标如表 1 所示。

表 1　精刨设备的主要技术参数

序号	参数	值
1	刨削长度范围/mm	200~2 200
2	刨削厚度范围/mm	0.5~3.0
3	加工直线度/mm	0.05
4	加工垂直度/mm	0.02
5	表面粗糙度/μm	6.3
6	最大刨削速度/(m/min)	24
7	单刀最大进给量/mm	0.5

1.2　精刨工艺设计

料片接边经过常规处理后进入精刨工序,激光拼焊精刨设备开机后进入工作准备状态:正向定位机构升起到工作位置;压紧机构抬起到待机位置;刨削传动机构调整为刨前待机位置。

工艺流程如下:

1)刀具调整:刀具组由若干把刨刀组成,可整体换装,并通过专用量具调整进刀量,并可根据钢板厚度微调上倒角刀进刀量,以保证倒角大小。

2)定位:机械手将钢板放置在支撑台面上,并将待刨削边靠紧在定位基准销上。

3)压紧及刨削:当位置传感器检测到钢板时,压紧机构压紧钢板,同时定位基准销降下,刨削传动机构启动,带动刨削刀具一次完成高速刨削作

业,然后刀具退回至待机位置,同时压紧机构松开,定位基准销升起。

4)料片运输:压紧机构松开后可将料片直接送入下一工序。

2　精刨刀具优化设计

2.1　刀具类型和材料

1)刀具类型的选择

选择刀具类型需考虑工件材料、加工精度和生产批量等因素。激光拼焊板的材料为冷轧钢板,厚度范围为0.5~3 mm,长度一般在2 200 mm以内,通常采用横剪下料,直线度为0.15 mm/1 000 mm,生产批量为大批量。激光拼焊对料片接边的基本要求:直线度要求全长范围内小于0.05 mm;加工面垂直度要求小于0.02 mm,表面粗糙度要求小于6.3 μm。考虑最小刨削余量,设定精刨工序的总余量约为0.5 mm,结合对表面粗糙度的要求,本文确定刀具类型为宽刃精刨刀。

2)刀具材料的选择

刀具材料选择得是否合理对生产效率有重要影响。硬质合金和高速钢是两种最常用的刀具材料,硬质合金的硬度比高速钢及其他工具钢要大,因此生产效率也比较高,条件允许情况下优先采用。考虑到加工对象的材料为中等强度的钢板以及平面精加工对刀具的要求,参照硬质合金的性能指标,本文选择采用硬质合金YT05或YT15制造的刀具。

2.2　基于有限元仿真的刀具几何参数优化

刀具切削部分的材料确定之后,它的切削性能便由其几何参数决定。主要包括:切削刃形状、前刀面、后刀面及刃区参数和刀具角度。选择合理的刀具几何参数才能充分发挥刀具材料效能,保证加工质量,提高生产效率,降低生产成本。宽刃精刨刀具的几何参数相对比较简单,主要包括前角、后角和刃倾角。

前角γ的主要功用是在保证刃口和刀头具有一定强度和散热条件的情况下,使刀刃尽可能的锋利。刀具前角与被加工材料和刀具材料的力学物理性能以及加工条件密切相关。拼焊板的材料属于中等强度的塑性材料,刀具材料硬质合金属于高强度、高韧性材料,结合精加工的加工性质,应选取较大的前角,取值范围大约在22°~30°。

后角α是在刃截面内后刀面与切削平面之间的夹角。优选合理的后角,有利于获得较好的加工表面质量和较高的刀具耐用度。后角与加工表面质量密切相关,因此精加工时主要根据表面质量要求来选择合适的后角,综合考虑散热和钢板材料条件,后角在6°~10°之间选取。

刃倾角λ_s是在切削平面内刀刃与基面之间的夹角。刃倾角为正、流向工件的前向分力增大,切削轻快、平稳,但刃倾角不能过度地增大,刃倾角的增大会引起z方向分力的增加,由于加工对象是薄板,过大的z方向分力会引起薄板悬边的变形,同时引发振动等不利影响。综合多方面因素,本文认为刃倾角在5°~10°之间取值是比较合适的。

本文采用Abaqus仿真软件建立YT15刀具刨削2 mm厚Q235钢板三维模型,如图5所示。在上述初步确定的前角、后角和刃倾角角度的范围内,通过正交试验的方法,以模拟计算得出的刨削过程中刀具所受最大切削反作用力的大小为衡量标准,对刀具的几何参数进行优化,最终得出较优的前角、后角和刃倾角角度。

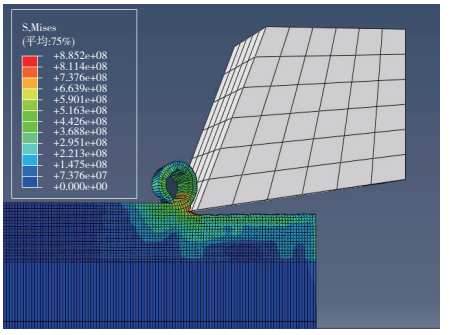

图5　刨削Q235钢板三维模型

2.3　有限元仿真模型的建立

1)材料本构关系

一个精确的材料本构模型能够真实可靠地模拟出切削过程中金属切削层的物理变化。在众多本构模型中,本文选用应用较为广泛的Johnson-Cook本构方程来建立Q235的本构模型,采用文献[9]中给出的模型参数,具体数值如表2所示。

表2　Q235材料的J-C模型参数

A/MPa	B/MPa	n	m	c
244.8	400	0.36	0.151 5	0.039 1

2)切削参数及刀具几何参数设定

切削力大小的主要影响因素为刨削速度、单刀刨削进给量及刀具几何参数。本文将刀具的刨削速度设定为0.4 m/s,单刀刨削进给量设定为0.3 mm。则影响切削力大小的因素为刀具前角、后角和刃倾角,每个因素在初步确定的角度范

围内,各取3个水平,开展正交仿真,刀具因素水平如表3所示。

表3　刀具几何参数因素水平　单位:(°)

水平	前角(A)	后角(B)	刃倾角(C)
1	22	6	5
2	26	8	7
3	30	10	10

2.4　试验及结果分析

对表3中刀具的几何参数进行全因子模拟仿真,并提取27组试验数据,试验结果如表4和表5所示,其中最大切削力 F 为切削过程中 x 方向、y 方向、z 方向3个方向切削分力的合力。

表4　Q235刨削有限元模拟试验结果

序号	因素			最大切削力 F/N
	A	B	C	
1	1	1	1	990.86
2	1	2	1	1 317.31
3	1	3	1	1 033.30
4	1	1	2	1 094.59
5	1	2	2	1 061.99
6	1	3	2	1 154.16
7	1	1	3	968.36
8	1	2	3	997.62
9	1	3	3	1 010.34
10	2	1	1	1 055.25
11	2	2	1	1 093.41
12	2	3	1	1 187.53
13	2	1	2	1 126.39
14	2	2	2	1 078.32
15	2	3	2	1 269.26
16	2	1	3	1 033.69
17	2	2	3	1 000.59
18	2	3	3	1 198.79
19	3	1	1	1 081.87
20	3	2	1	1 140.20
21	3	3	1	1 269.84
22	3	1	2	1 054.61
23	3	2	2	1 202.18
24	3	3	2	1 115.03
25	3	1	3	1 284.46
26	3	2	3	1 108.82
27	3	3	3	1 151.61

表5　Q235刨削有限元模拟试验分析　单位:N

参数	指标	因素		
		A	B	C
水平总和	K_1	9 628.53	9 690.08	10 169.55
	K_2	10 043.19	10 000.44	10 156.50
	K_3	10 408.59	10 389.87	9 754.28
水平均值	k_1	1 069.84	1 076.68	1 129.95
	k_2	1 115.91	1 111.16	1 128.50
	k_3	1 156.51	1 154.43	1 083.81

对表5中试验数据进行分析,确定了3个因素对切削力大小影响的主次顺序为A>B>C。经过比较发现,在A因素、B因素、C因素3种情况下,其对应的极差分别为86.67,77.75,46.14。当刀具前角为22°、后角为6°、刃倾角为10°时,总切削力最小,能够有效提高刀具的使用寿命,为实际生产中量产刀具提供参考。

2.5　刀具结构与组合方式设计

1)可调刃倾角精刨刀设计

斜角切削具有进刀冲击小、切削平稳、排屑可控等优点,因此本文采用带刃倾角的刀具。激光拼焊对料片接边垂直度要求很高,因此对刀具刃磨精度提出较高的要求,而刃倾角的存在增加了刀具刃磨难度,同时刃倾角需要调整以适应不同强度的材料,因此本文设计了刃倾角可调刀具。

刀具结构如图6所示,刀架和刀杆采用分体结构,刀片通过螺钉固定在刀架上,利用刀架旋转实现刀具刃倾角可调,并通过紧定螺钉锁紧刀架,刀杆上安装有弹性缸套,保证刀杆具有合适弹性以避免扎刀,这样刀片只需按零刃倾角刃磨,使用中可依照料片材料强度调整刃倾角。该刀杆既降低了刀片的刃磨难度,又提高了刃倾角选择的灵活性。

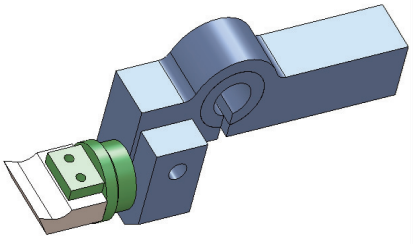

图6　可调刃倾角精整刨刀

2)刀具组合设计

根据最长料片的直线度误差(0.2 mm左右),结合精加工合理的切削深度(0.1~0.5 mm),本文设计

了双刀切削刀具组,如图 7 所示,一次完成加工过程,同时配合倒角刀处理毛刺问题。双刀采用反刃倾角,使 z 方向力部分相互抵消,解决了薄板悬边对 z 方向力敏感的问题。倒角刀在处理毛刺的同时,增加了拼焊工艺的灵活性,如在大板厚差拼焊时,可采用大倒角来降低厚板厚度,从而提高焊接速度。

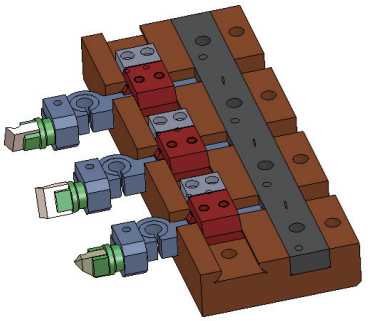

图 7　精刨刀具组合

3　精刨技术在线实现方式讨论

针对采用激光拼焊“固定料片,运动焊接”的生产线方案,精刨技术可较方便的融入生产工序中。如图 8 所示,可将精刨工序布置在定位工位前面,料片可采用定位销定位并实现切削量的调整,直接利用焊接穿梭工作台实现料片夹紧和刨削运动,精刨结束后,料片经二次定位后进行焊接及下料等操作。采用在线精刨技术,极大降低了对前道工序的精度要求,降低了生产成本,提高了生产效率和拼焊板的质量。

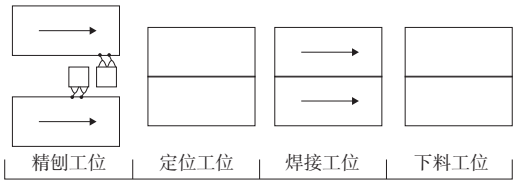

图 8　激光拼焊生产线布局

4　结语

研究了适用于激光拼焊薄板的精刨技术。基于激光拼焊的特点,设计了激光拼焊在线精刨设备,并研究了设备的工作流程;对精刨刀具的几何参数进行了研究,在仿真实验的基础上,对刀具的几何参数进行了优化,完成刀具组合结构设计,进一步提升了精刨的加工质量;在此基础上,对精刨技术的在线应用进行了初步探讨。

参考文献:

[1] 袁晓瑛,王冬波,袁银辉,等. 激光拼焊工艺在冲压件个性定制中的应用[J]. 模具制造,2023,23(9):50-53.

[2] 邓璐璐,叶又,魏一凡. 不同工艺激光拼焊硼钢板热冲压性能研究[J]. 上海汽车,2023(4):50-56.

[3] Mayavan T, Karthikeyan L, Balamugundan B, et al. Forming of tailor-welded blanks through centerline and offset laser welding [J]. International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering, 2022,12(1):1-14.

[4] 陈东,赵明扬,朱天旭,等. 间隙对不等厚板激光拼焊焊缝质量的影响及其补偿方法研究[J]. 中国机械工程,2011,22(12):1489-1493.

[5] 董好志,张雨,任海林. 热振载荷下某星载 SAR 有源单机焊接疲劳损伤研究[J]. 机械制造与自动化,2023,52(3):62-65.

[6] An F P, Liu X W, Zhang H D, et al. Comparison of performance of laser powder bed fusion thin-walled TC11 alloy samples welded via laser welding and electron beam welding[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 170:110256.

[7] 陈东,景宽,宋华,等. 不等厚激光拼焊板咬边缺陷研究[J]. 机械设计与制造,2015(5):236-238.

[8] 许敏,李治,陈东,等. 不等厚板激光拼焊在线碾压机构碾压轮结构参数优化设计[J]. 中国机械工程,2019,30(7):872-876.

[9] 林莉,支旭东,范锋,等. Q2358 钢 Johnson-Cook 模型参数的确定[J]. 振动与冲击,2014,33(9):153-158,172.

收稿日期:2024-04-08