

文章编号: 0258-7025(2009)12-3308-05

车身覆盖件的三维激光切割工艺

梅丽芳 陈根余 刘旭飞 赵 智 黄丰杰

(湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要 针对采用 CO₂ 激光和三维(3D)激光切割机切割镀锌钢车身覆盖件时,上、下坡和转角处易发生碰撞和过烧等问题,提出相应改进措施。通过添加工艺点,调整切割头方向,使其偏离法线方向一个角度可以消除碰撞。实验发现,为获得切缝质量好、切割精度高及热影响层小的 3D 切割工件,应尽可能使切割头位姿改变时光束入射角小于 20°。通过降低激光功率、采用脉冲激光并减小占空比或采用空气作为辅助气体等能有效避免上、下坡和转角处切割时产生过烧。同时,从切缝宽度、切割面粗糙度、切割面波纹及热影响层宽度等方面对 3D 切割工件质量进行了评定。

关键词 激光技术;三维激光切割;车身覆盖件;过烧;激光工艺参数;切割质量

中图分类号 TG485 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093612.3308

Three-Dimensional Laser Cutting Technology in Auto-Body Panel

Mei Lifang Chen Genyu Liu Xufei Zhao Zhi Huang Fengjie

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract When the galvanized auto-body panel steel sheets were cut by CO₂ laser and the three-dimensional (3D) laser cutting machine, problems such as collision and burn-off are easily generated in the uphill, downhill and corner. So the corresponding improvement measurements are proposed in this paper. Experimental results indicate that to obtain 3D cutting workpiece with good cutting quality, high cutting precision and small hot effect width, the incident angle changed along with the pose of cutting head should be limited less than 20°. The collision can be eliminated by increasing craft spot, adjusting cutting direction and changing incident angle. Burn-off in uphill, downhill and corner can be effectively avoided by decreasing laser power, and opting pulse laser and reducing its duty ratio and using the air to take as auxiliary gas and so on. At the same time, the cutting quality is evaluated from the kerf width, cutting surface roughness, cutting surface ripple and hot affected width.

Key words laser technique; three-dimensional laser cutting; auto-body panel; burn-off; laser technological parameter; cutting quality

1 引 言

覆盖件是车身结构的主要零件,具有形状复杂、结构尺寸大等技术特点,其加工精度直接影响着车身的质量,因此工业生产中覆盖件的加工精度和工艺性有较高的要求^[1]。三维(3D)激光切割技术用于加工车身覆盖件,可以取代传统制造工艺的修边模和冲孔模,其工艺步骤简单、制造周期短、切割速度快、加工质量高。此外,3D 激光切割具有较高的柔性,可提高汽车产品质量、降低汽车制造成本,

缩短新车型的研发周期,具有良好的经济价值和应用前景^[2~4]。

对于车身覆盖件的 3D 激光切割,如何获得高的切割质量和切割精度是工业应用最为关注的问题。要保证良好的激光切割质量,必须保证入射激光的光束始终垂直于被加工表面^[5,6]。在 3D 复杂曲面的激光切割中,上、下坡和转角处因切割头位姿的变化易产生碰撞和过烧现象,严重影响了 3D 激光切割质量。因此有必要对上、下坡和转角碰撞和

收稿日期:2009-03-20;收到修改稿日期:2009-04-22

基金项目:国家 863 计划(2007AA042006)资助项目。

作者简介:梅丽芳(1982—),女,博士研究生,主要从事白车身激光加工技术研究。E-mail:meilifang0804@163.com

导师简介:陈根余(1965—),男,教授,主要从事激光加工方面的研究。E-mail:hdgychen@163.com

过烧作深入的实验研究,确保 3D 激光切割质量。

2 实验条件与方案

2.1 实验设备

实验采用的激光切割机床为龙门式 3D 五轴联动机床,且机床传输光路采用龙门式混合光路,如图 1 所示。在切割头的喷嘴处带有一个传感检测装置(随动装置)调整控制焦点位置。实验用激光器为德国 ROFIN 的 DC025 Slab CO₂ 激光器,其主要技术参数如表 1 所示。数控编程系统采用编程软件 PEPS Pentacut。

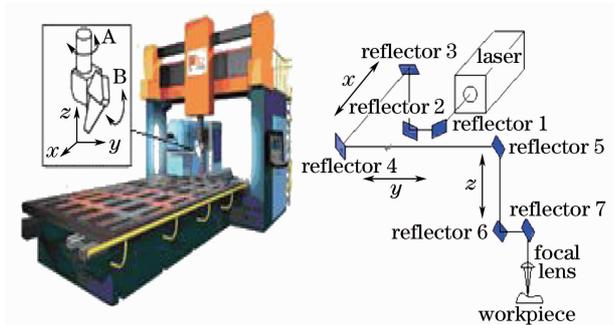


图 1 3D 激光切割机床及其光路传输系统

Fig. 1 Cutting machine and its light transmission system

表 1 激光器主要技术参数

Table 1 Laser technology parameters

Parameter	Value
Wavelength / μm	10.6
Laser mode	TEM ₀₀
Output power /W	250~2500
Divergence angle /mrad	<0.15
Pulse frequency /Hz	2~5000
Spot diameter /mm	20~25 (in 10 m)

2.2 实验材料

实验选用的工件为经拉伸冲压成型的车身侧围中的一覆盖件。工件材料为深冲压用超低碳钢,表面镀有锌铁合金,钢的牌号为 DC53D+ZF。工件厚度为 1.5 mm,其化学成分^[7]如表 2 所示。

表 2 DC53D 钢板的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of DC53D steel
(mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	S	Alt	Ti	Nb
≤0.01	—	≤0.40	≤0.03	≤0.03	—	—	—

2.3 夹具

3D 激光切割的工艺具有特殊性,即激光头和工件之间没有力的接触作用,因此 3D 激光切割的夹具只起定位的作用,其结构设计也变得简单,在设计

时考虑更多的是定位准确性、重复定位精度、柔性化和快速制造^[8]。常用的夹具设计制造方法有两种。一种是简易夹具,一种是网格夹具。由于简易夹具定位精度较低,在较高精度的激光切割中,一般使用较少。因此本文中采用网格夹具,如图 2 所示。

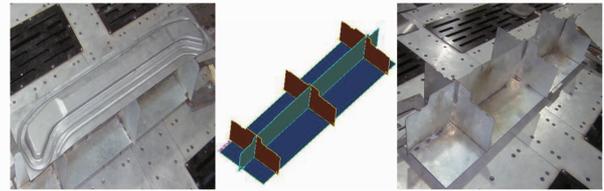


图 2 实验切割工件与网格夹具设计和实物图

Fig. 2 Workpiece and the design and assembly picture of grid jig

2.4 实验方案

采用连续和脉冲激光进行切割,使用纯度为 99.9% 的氧气和空气分别作为切割辅助气体。聚焦透镜焦距 $f = 5''$ (127 mm),圆柱形喷嘴直径 $\phi = 2$ mm,随动距离(喷嘴和工件表面的距离)保持 1.5 mm 不变。分析影响覆盖件上下坡和转角处切割质量的因素以及切割头姿态调整时入射角对切割质量的影响;在工件的转角处使用连续激光或脉冲激光进行切割实验,比较两种激光形式对切割质量的影响;单一改变激光功率、脉冲频率、切割速度、辅助气体压力、离焦量及入射角等进行实验;从切缝宽度、切割面粗糙度、切割面波纹及热影响层宽度等对切割质量进行评价。

3 实验结果与分析

3.1 3D 激光切割的特殊工艺分析

3.1.1 碰撞的工艺处理

车身覆盖件的曲面形状复杂,在进行 3D 激光切割时,切割头要追踪切割轨迹上各点的法线方向,需要不断地变换运动姿态^[9]。在运动过程中的某些特殊位置(如上下坡的转角处),如果切割头和切割轨迹上该点的法线方向保持一致,切割头可能会和工件发生碰撞。此外切割速度太高时,机床运动加速度增大,在进行上下坡转角切割时,切割头会产生抖动,易发生碰撞或超程,切割不能顺利进行。在实物切割时,如果发生碰撞将会导致切割头、聚焦镜片等设备的损坏。因此,需要检测切割头与工件是否产生碰撞。如果产生碰撞,则需要通过手动添加工艺点,调整切割头的方向,使其偏离法线方向一个角度(通常称为“入射角”)等合理的工艺措施来消除

碰撞,如图3所示。虽然入射角的存在会造成激光功率密度的减小,但是只要在该处降低切割速度,仍然能够达到较好的切割质量。

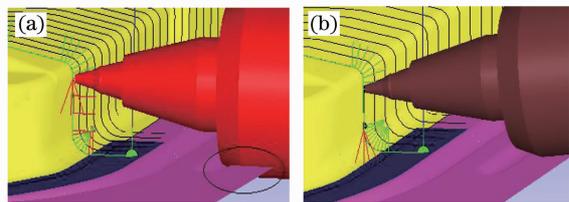


图3 碰撞的工艺处理。(a) 碰撞情况;(b) 碰撞消除

Fig. 3 Technical process with collision

(a) in case of collision; (b) eliminated collision

3.1.2 爬坡转角过烧的工艺处理

对车身覆盖件进行3D激光切割时,在切割轨迹的上下坡转角处经常会出现法线密集现象(如图4所示),激光能量会在此处累积,特别是使用氧气作为切割的辅助气体,铁的氧化反应放出大量的热,容易产生过烧。此外切割速度太低时,在上下坡的转角处,材料吸收的激光能量大量积累,也容易产生过烧缺陷。因此需要采取适当的工艺措施加以改善。通过PEPS自动编程软件在法线密集处添加多个工艺点,并手动修改各工艺点的法线方向,使各工艺点之间的法线平滑过渡,均匀转向,从而改变法线的密集程度;在转角处应该使用脉冲激光,并降低激光功率、减小占空比,避免激光能量在此处的积累;在转角处采用空气作为切割辅助气体,可以降低因剧烈氧化放热而产生过烧的缺陷。

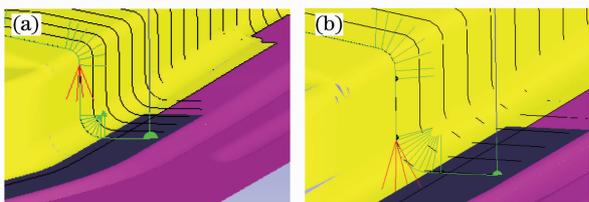


图4 法线密集的工艺处理

(a) 密集法线;(b) 修改法线

Fig. 4 Technical process of densely normal line

(a) densely normal line; (b) revised normal line

3.1.3 工件变形的工艺处理

在车身覆盖件的实际生产过程中,覆盖件拉伸成型时都有不同程度的回弹变形,和产品的数模存在一定的误差,这会对切割轨迹的位置产生影响,进而影响切割的精度。因此,在用激光切割变形的覆盖件时,需采取合适的工艺处理方法。对于回弹变形较小的覆盖件,通常在非碰撞区域添加压钳压紧变形位置来减小变形,如图5所示。对于变形较大



图5 工件变形的处理

Fig. 5 Technical process of workpiece deformation

但仍然属于合格产品的覆盖件,切割时会出现多处碰撞和超程。这时,需要在由数模编制的程序基础上进行手动修改。即,关闭激光光闸,降低机床运动速度,运行数控程序,如果发生碰撞或超程,则机床会自动停止。切割头停止的位置则为变形较大的位置,然后通过观察,根据实际变形量的大小,反复手动修改原程序的点坐标值来完善程序,直到该位置不再出现碰撞和超程为止。

3.2 3D激光切割质量的评定

3.2.1 切缝宽度

切缝宽度是衡量切割质量好坏的一个重要因素,同时对切割的精度也会产生影响。通过分析激光功率、切割速度、入射角等不同切割工艺参数对切缝宽度的影响,得出了切缝宽度随各切割工艺参数的变化曲线,如图6所示。

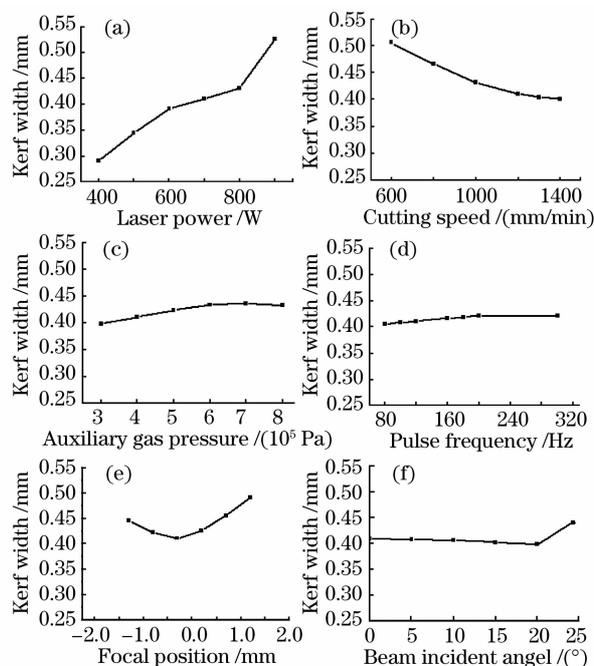


图6 切缝宽度随切割工艺参数的变化情况

Fig. 6 Relations between kerf width and craft parameters

由图6可见,3D激光切割时切缝宽度很窄,在0.28~0.50 mm之间,受激光功率和切割速度的影

响较大,而受辅助气体压力和脉冲频率的影响较小。焦点位于工件表面下方0.3 mm时,切缝宽度最小。入射角小于 20° 时,对切缝宽度影响较小。入射角超过 20° 时,切割面严重过烧,切缝宽度超过3 mm,切割质量非常差,如图7,图8所示。光束入射角增加后会导致反射加大,实际输入工件材料的激光能量减少,用于切割的有效能量越小使切缝变窄,但入射角增大后,同时导致焦点位置发生变化,又使切缝变宽,两者的综合作用决定了最终的切缝宽度^[10,11]。在进行3D激光切割时,入射角的变化有一临界值,离线编程软件PEPS Pentcut中的最大可调入射角为 34° ,而实验发现,在一定工艺条件下,光束入射角在 20° 范围内变化时,对薄板覆盖件的切割质量影响不大。



图7 转角过烧

Fig. 7 Corner burning

图8 入射角超过 20° 时的切缝Fig. 8 Kerf obtained when incident angle surpass 20°

3.2.2 切割面粗糙度

由文献[12]可知,以切割面近下缘粗糙度作为切割面质量评价的主要指标。实验时,取距切割后工件下表面约1/3处的粗糙度值作为评价标准。图9为切割后的工件实物。通过对试样切割面粗糙度值进行测量分析,发现切割面的粗糙度数值变化范围在 $3.27\sim 7.22\ \mu\text{m}$ 之间,和机械加工中的半精车



图9 3D激光切割后的工件

Fig. 9 Workpiece after being cutted by 3D laser

所能达到的表面粗糙度数值相当,满足实际生产中对覆盖件加工精度的要求。

3.2.3 切割面波纹

车身覆盖件在进行3D脉冲激光切割时,在切割面上会出现一定的波纹,波纹与激光切割的质量密切相关。由于切割轨迹空间曲线,因此分别选取上下坡转角处与直线段轨迹进行分析。由图10可见,在转角处采用连续激光切割时易产生过烧,而采用脉冲激光时可有效地避免产生过烧。采用脉冲激光切割工件的平缓处时,存在较多波纹,切割质量较采用连续激光差。通过分析,在切割复杂3D工件时,转角处应采用脉冲激光,以及较小的占空比和较慢的速度来完成;平缓处应采用连续激光,以及较大的激光功率和较快的速度来完成,这样既能获得较好的3D切割质量,又能提高切割效率。

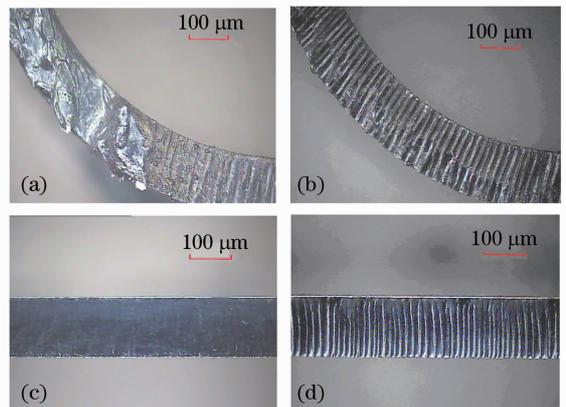


图10 3D激光切割时的切割面波纹。(a)转角连续激光切割;(b)转角脉冲激光切割;(c)平缓处连续激光切割;(d)平缓处脉冲激光切割

Fig. 10 Ripple existed in specimen surface in laser cutting. (a) corner cutting by continuous laser; (b) corner cutting by pulse laser; (c) flat area cutting by continuous laser; (d) flat area cutting by pulse laser

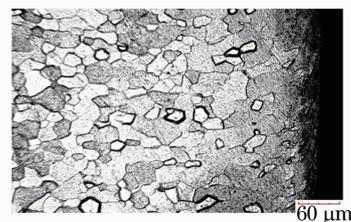


图11 试样热影响层金相显微组织(200×)

Fig. 11 Microstructure of heat affected layer in specimen (200×)

3.2.4 热影响层宽度

激光切割过程中由于工件的热传导,在切割面

附近会出现热影响层,导致能量损失,影响切割质量。热影响层宽度是评定切割质量的一个重要因素。

使用金相显微镜观察测量了 3D 激光切割工件端面的热影响层宽度,结果表明热影响层宽度非常小,在 60 μm 左右,如图 11 所示。

4 结 论

1) 3D 激光切割车身覆盖件时在上、下坡和转角处易发生碰撞和过烧。通过添加工艺点,调整切割头方向,使其偏离法线方向一个角度等工艺措施可以消除碰撞。在转角处,采用脉冲激光、降低激光功率、减小占空比或采用空气作为辅助气体可有效避免产生过烧。在切割平缓处时,则应采用连续激光切割,既能得到较好的切割质量,又能提高效率。

2) 从切缝宽度、切割面粗糙度、切割面波纹和热影响层宽度等方面对切割质量进行了评定,结果表明入射角小于 20° 时,切缝宽度窄(0.28 ~ 0.50 mm)。切割面光滑,粗糙度变化范围为 3.27 ~ 7.22 μm ,热影响层宽度非常小,约 60 μm 。当激光束入射角大于 20° 时,切缝质量急剧变差。

参 考 文 献

- Lin Zhongqin. Control Techniques of Autobody Manufacturing Quality [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. 1~2
林忠钦. 汽车车身制造质量控制技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2005. 1~2
- Chen Tao, Wang Zhiyong, Chen Kai *et al.*. Laser materials processing technology applied in large scale autobody panel [J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, **13**(1):8~11
陈涛,王智勇,陈凯等. 激光加工技术在汽车车身大型覆盖件中的应用[J]. 中国机械工程, 2002, **13**(1):8~11
- Zuo Tiechuan, Wang Xubao. Characteristic short technological process of laser manufacturing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11):1660~1663
左铁钊,王旭葆. 激光制造的短流程优势[J]. 中国激光, 2008, **35**(11):1660~1663
- Chen Genyu, Huang Fengjie, Liu Xufei *et al.*. Application and research of three-dimensional laser cutting technology in autobody panel manufacturing [J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(3):67~69
陈根余,黄丰杰,刘旭飞等. 三维激光切割技术在车身覆盖件制造中的应用与研究[J]. 激光杂志, 2008, **29**(3):67~69
- Chen Jimin, Zuo Tiechuan. Effect of laser beam incident angle on laser cutting quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(11):1037~1040
陈继民,左铁钊. 激光切割中入射角对切割质量的影响[J]. 中国激光, 2001, **A28**(11):1037~1040
- Chen Genyu, Cao Maolin, Huang Fengjie. Application and research of three-dimensional laser cutting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(3):38~42
陈根余,曹茂林,黄丰杰. 三维激光切割的应用和研究[J]. 激光与光电子学进展, 2007, **44**(3):38~42
- Enterprise standard of Baosteel [S]. Continuous Hot-Galvanized / Zinc-iron alloy steel sheets and Steel strip. 2003
- Ma Yongbing, Gan Zhongming, Shao Xiaodong. The developments and applications of new locating mechanism used for laser cutting vehicles stamping [J]. *Technology of Equipment Maintenance*, 2006, (4):26~31
马勇斌,甘中明,邵晓东. 汽车冲压件激光切割新型定位支架的开发和应用[J]. 装备维修技术, 2006, (4):26~31
- Zhang Yongqiang, Wu Yanhua, Chen Wuzhu *et al.*. Effect of laser beam attitude on 3D laser cutting quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):124~127
张永强,吴艳华,陈武柱等. 激光束姿态对三维激光切割质量的影响[J]. 中国激光, 2006, **33**(1):124~127
- Yan Qi, Liu Feng. Influence of technology parameters on the laser cutting quality [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(3):151~153
阎启,刘丰. 工艺参数对激光切割工艺质量的影响[J]. 应用激光, 2006, **26**(3):151~153
- B. S. Yilbas. Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2004, **155-156**:2106~2115
- Zhang Yongqiang, Wu Yanhua, Chen Wuzhu *et al.*. On-line method for evaluation of laser cutting quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1580~1584
张永强,吴艳华,陈武柱等. 激光切割质量的在线评价方法[J]. 中国激光, 2006, **33**(11):1580~1584