

文章编号: 0258-7025(2001)05-0471-05

空间曲率半径对三维物体激光 切割质量的影响*

黄开金¹ 谢长生¹ 许德胜²

(华中科技大学¹ 国家模具技术重点实验室; 激光技术国家重点实验室 武汉 430074)

提要 研究了空间曲率半径对管材激光螺旋切割后切割质量指标的影响。当管径不变、螺距增大时,随着空间曲率半径的增加,切缝宽度、热影响区宽度及切口横截面半垂直度增大,切口表面粗糙度减小。热积累和预热效应是造成上述现象的主要原因。

关键词 空间曲率半径, 三维激光切割, 螺旋线, 激光切割质量

中图分类号 TG485 文献标识码 A

Effects of Spatial Curvature Radius on the Three-dimensional Laser Cutting Quality

HUANG Kai-jin¹ XIE Chang-sheng¹ XU De-sheng²

(¹The State Key Laboratory of Plastic Forming Simulation and Mould Technology, ²The State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract The effects of spatial curvature radius on the laser cutting quality indexes of pipe with spiral cutting pattern such as the top kerf width, the extent of heat-affected zone (HAZ), the cut surface roughness R_z , the microhardness ($HV_{0.1}$), the half-squareness were investigated. The results show that the values of the kerf width on the upper surface, the half-squareness, and the HAZ increase with the increase of spatial curvature radius except for the values of the cut surface roughness R_z as the diameter of pipe remains unchanged and the pitch increases. The main reason is the heat accumulation and preheating effects.

Key words spatial curvature radius, three-dimensional laser cutting, spiral curve, laser cutting quality

1 引 言

随着国外三维五轴激光切割机系统售价的降低,国内有关汽车生产厂家拟进口此类设备,用于含空间曲面的冲压件或覆盖件的激光切割和焊接,以提高产品质量,迎接我国加入 WTO 后对汽车行业所带来的挑战。而在空间曲面上进行激光切割,不外乎是在该空间曲面上走出一条空间轨迹曲线。如果空间曲面上的轨迹曲线发生变化,即所切割的三维物体形状发生变化,实质上是该空间曲面上曲线的曲率半径发生变化^[1]。因此研究空间曲率半径变化对激光切割质量的影响,反过来就知道实际三维激

光切割过程中不同的变化切割轨迹曲线对切割质量的影响。激光切割尺寸偏差不仅依赖于定位系统的精度和重复性,而且也依赖于激光束对加工材料的热影响^[2]。有关二维板材激光切割时激光束对加工材料的热影响已有较多的报道^[3-6],特别是在板材尖角、小孔和慢速激光切割情况下,这种热影响极为显著。而三维物体激光切割时激光束对加工材料的热影响,特别是空间曲率半径的影响,目前国内外的报道不多^[7-11]。为了便于人们在三维零件激光切割设计阶段进行补偿,开展这方面的研究是必要的。

由于空间圆柱螺旋线的曲率半径 $\rho = \frac{R^2 + (H/2\pi)^2}{R}$ (其中 R 为圆柱半径, H 为螺距)^[12], 通过改变参量 R 或 H , 即可获得不同的空间曲率半径。我们已研究过螺距 $H = 0$, 管径 R 变化时曲率半径对激光切割质量的影响情况^[13]。本文则研究管径

* 国家自然科学基金(编号: CN59635170)和激光技术国家重点实验室开放基金资助项目。

收稿日期 2000-01-14; 收到修改稿日期 2000-04-14

R 不变,螺距 H 变化时的情况。

2 不同轨迹的管材激光实验

选用了两种管径(外管径 D × 壁厚 t = 73 mm × 5.5 mm, D × t = 51 mm × 3.5 mm)的管材进行正交螺旋线轨迹的激光切割实验。管材激光切割方式和大小见图 1。表 1 是不同管径和螺距条件下的空间曲率半径。实验机型为 PRC2200 型 CO₂ 激光器,采用出口孔径 d = 1.5 mm 的锥形同轴喷嘴和专用管

材激光切割机床。激光切割参数:激光功率 P = 1000 W/1500 W,辅助切割氧气的纯度为 99.5%,压力 P_{O₂} = 170 kPa,切割速度 V = 1.2 m/min(由螺旋线的形成可知:V = √(V_x² + (πDn)²);实际激光切割时保持转速 V_x = 0.9 m/min 不变,转速 n 依据管径 D 的大小而改变;当管径 D 一定,转速 n 保持不变时,由公式 H = V_x × t 可知,改变螺旋线切割时间 t,即可获得不同的螺距 H),ZnSe 聚焦镜,透镜焦距 f = 127 mm,离焦量 Δf = -0.2 mm,喷嘴出口到工件表面的距离 Z = 1.2 mm。

表 1 不同管径 R 和不同螺距 H 条件下的空间曲率半径

Table 1 Spatial curvature radius ρ under the different pipe radius R and the pitch H

D = 2R (mm)	ρ (H = 20 mm)	ρ (H = 40 mm)	ρ (H = 60 mm)	ρ (H = 80 mm)	ρ (H = 100 mm)
51	25.8977	27.0910	29.0796	31.8639	35.4435
73	36.7779	37.6115	39.0009	40.9460	43.4468

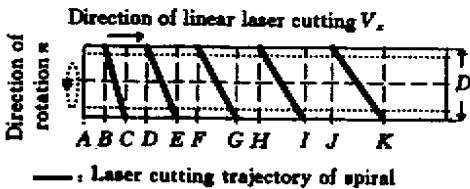


图 1 管材螺旋线轨迹激光切割方式及大小示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser spiral cutting of pipe

D = 73 mm 51 mm

AB = 10 mm, BC = 10 mm, CD = EF = GH = IJ = 15 mm,

DE = 20 mm, FG = 30 mm, HI = 40 mm, JK = 50 mm

实验完毕后,用日本 SHIMADZU 公司生产的 A 型读数显微镜测量切缝宽度及半垂直度;采用美国 BUEHLER 公司生产的 MICROMET3 型显微硬度测试仪测试了切口横截面中部的显微硬度和热影响区宽度(根据热影响区组织较基体组织细小的特征判断热影响区与基体的界限)的大小;在国产 9J 型光切显微镜上测量切口表面中部的微观不平度十点高度 R_Z。

此外,平均切缝宽度 $w = (\sum_{i=1}^N w_i) / N$,其中 w_i 代表第 i 等分段测得的切缝宽度,N 代表切割长度的等分数;为了对切口横断面几何形状进行定量评定,在假定切口横断面切缝对称的前提下,特引入半垂直度^[14]的概念,其定义为 $u = (w_1 - w_2) / 2$,其中 w₁ 代表上切口切缝宽度,w₂ 代表下切口切缝宽度。

3 实验结果

随着激光与材料作用时间的增加,热平衡过程逐步建立起来,热积累和预热效应愈来愈明显,从而造成切割区的温度不断上升,使得单位时间内熔化的材料不断增加,最后在气流压力梯度和重力的共同作用下,去除的熔化物亦不断增加,留下的切缝宽度亦愈大;当热平衡过程完全建立后,激光切割过程基本处于稳定状态,切缝宽度基本保持不变(图 2)。由于存在这种切割宽度不均匀的现象,为了便于研究空间曲率半径对切缝宽度的影响以及减少误差,便将 18 个点切缝宽度的算术平均值作为每种切割工艺的切缝宽度,即令平均切缝宽度计算公式中的 N = 18 即可。根据这一公式便可计算出图 2 的平均切缝宽度为 w = 0.52 mm。

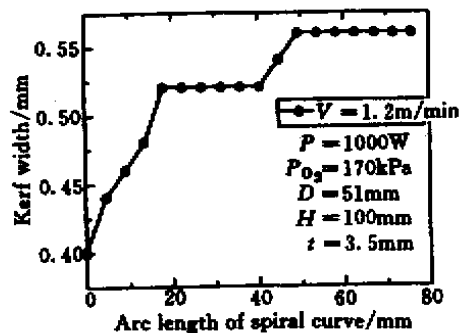


图 2 激光切割螺旋线弧长对切缝宽度的影响

Fig. 2 Effect of arc length of laser cutting spiral curve on the kerf width

3.1 空间曲率半径对切缝宽度的影响

图 3 是空间曲率半径对切缝宽度的影响曲线。由图可知,在管径 D 不变,螺旋线螺距 H 增大的条件下,随着空间曲率半径 ρ 的增大,切缝宽度增加。

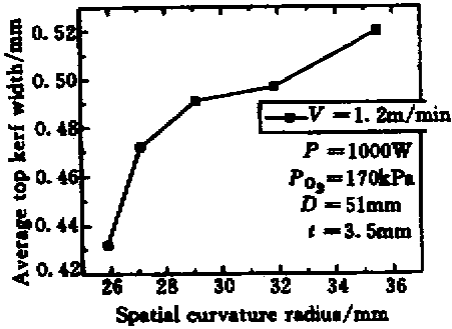


图 3 空间曲率半径对切缝宽度的影响
Fig.3 Effect of spatial curvature radius on the average top kerf width

对于直线运动方式而言,当物体的长度足够大时,热源(如激光和电弧等)与材料作用的起始段和结束段分别为非稳态(热源作用区的温度随作用时间的增加而急剧增大的现象),中间段为准稳态(热源作用区的温度随作用时间的增加而缓慢增大的现象),且与物体的长度有关,热加工(如激光加工和电弧焊等)过程是一个预热过程。有关这些现象已经得到国内外学者的证实^[15,16]。

对于圆周运动方式而言,热源与材料作用时间愈长,材料中出现热积累和预热效应现象愈明显,有关这一现象已经在管材 GTA 圆周焊接^[15,17,18]、板材尖角和小孔激光切割^[3~5]及管材圆周激光切割^[19]中得到证实。

而螺旋线是由一个旋转运动(转速 n)和一个直线运动(速度 V_x)合成的。因此,螺距 H 增大,激光切割时间 t 增加(由公式 $H = V_x \times t$ 及 V_x 保持不变得知),即激光与管材的作用时间增加,对应的实际切割螺旋线长度增加,热积累和预热效应增加,从而导致切缝宽度增加。

3.2 空间曲率半径对半垂直度的影响

图 4 是空间曲率半径对切口横截面半垂直度的影响曲线。由图可知,在管径 D 不变,螺旋线螺距 H 增大的条件下,随着空间曲率半径 ρ 的增大,切口横截面半垂直度增加。由半垂直度的定义式知,这可能与实际切割长度增加,上切口切割宽度增加有关。

3.3 空间曲率半径对表面粗糙度的影响

图 5 是空间曲率半径对切口表面微观不平度十点高度 R_z 的影响曲线。由图可知,随着空间曲率半径的增加,微观不平度十点高度 R_z 减小。这是因为螺距 H 减小时,稳定的激光切割尚未建立,温度处于上升阶段,切口表面粗糙,因而切口表面微观不平度十点高度 R_z 值增大。

3.4 空间曲率半径对热影响区宽度的影响

图 6 是空间曲率半径对切口横截面热影响区宽度的影响曲线。由图可知,当管径 D 不变,螺旋线螺距 H 变化时,随着空间曲率半径的增加,热影响区宽度增大。这与螺距 H 增大,热积累和预热效应增大有关。

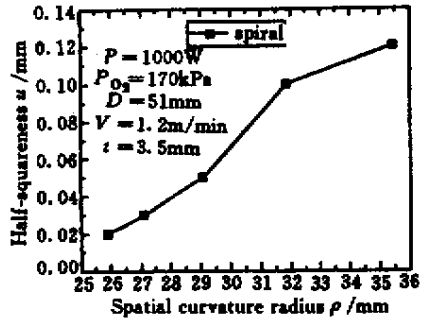


图 4 空间曲率半径对半垂直度的影响
Fig.4 Effect of spatial curvature radius on the half-squareness and inclination

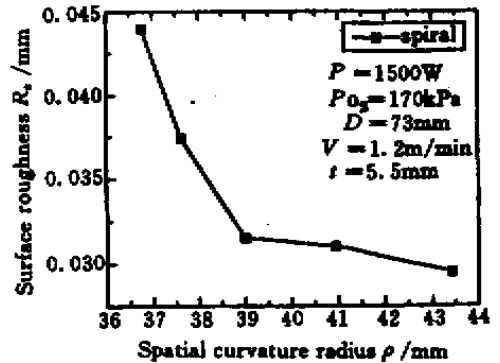


图 5 空间曲率半径对切口表面微观不平度十点高度 R_z 的影响
Fig.5 Effect of spatial curvature radius on the surface roughness R_z

3.5 空间曲率半径对显微硬度的影响

图 7 是空间曲率半径对切口横截面显微硬度的影响曲线。由图可知,当管径 D 不变,螺旋线螺距

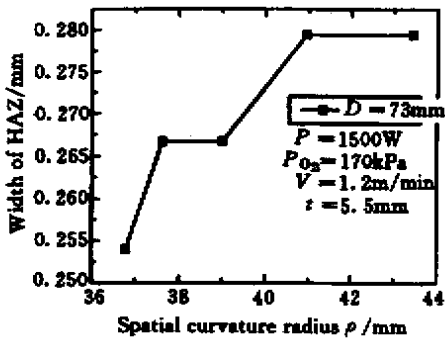


图6 空间曲率半径对切口横截面热影响区宽度的影响

Fig.6 Effect of spatial curvature radius on the width of HAZ

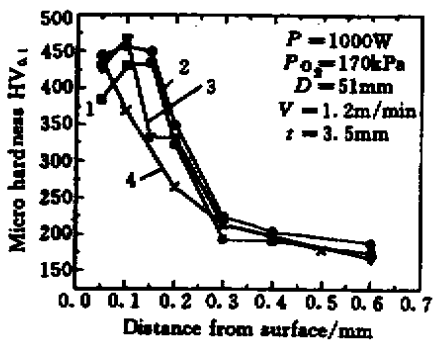


图7 空间曲率半径对切口横截面显微硬度的影响

Fig.7 Effect of spatial curvature radius on the microhardness

1 : $\rho = 25.8977$ mm ; 2 : $\rho = 27.0910$ mm ;
3 : $\rho = 31.8639$ mm ; 4 : $\rho = 35.4435$ mm

H 增大时,随着空间曲率半径的增大,切口横截面的显微硬度变化不大,不过仍然表现出先增大后减小的特征。这是因为当螺距 H 由小变大(对应的空间曲率半径也由小变大)时,实际激光切割长度增加,热积累和预热效应逐步表现出来,基材升温愈来愈明显,碳元素扩散作用也愈来愈强,冷却后的切口横截面显微硬度也愈来愈高;当螺距 H 超过一定数值后,因实际激光切割长度增加较大,热积累和预热效应十分明显,出现先淬火后自回火的现象,使得切口横截面的显微硬度反而出现降低的现象。

4 实现优质三维激光切割的条件

从理论上讲,实现优质三维激光切割或二维激光切割的条件是激光切割头空间运动轨迹(三维)或平面运动轨迹(二维)的实现与激光切割工艺参数的适配。

要保证激光切割头空间运动轨迹的实现,主要取决于硬件的好坏,即三维激光切割机如何快速、便利地实现从三维 CAD/CAM 设计(包括预编程优化或切割头运动轨迹优化等)到准确、有效地控制激光切割头按优化后的运动轨迹动作。

关于三维激光切割工艺参数与激光切割头空间运动轨迹实现的适配问题,我们认为这包括两方面的情况:首先要保持激光切割头在动作过程中始终与空间曲面的法矢平行,这可在三维 CAD/CAM 设计阶段用程序实现;其次,在涉及具体的激光切割工艺参数选取时,除考虑材质及其厚度等材质固有因素外,还要考虑因散热(包括热传导)路径不同而引起的热积累和预热效应以及空间曲率效应等因素的影响。关于后一种情况,可从本文的研究结果得到佐证。换言之,三维激光切割和二维激光切割一样,在零件设计阶段,同样要考虑切割尺寸补偿问题。

5 结论

本文在管材上研究了正交螺旋线空间轨迹对激光切割后切割质量指标(如切缝宽度、热影响区宽度、半垂直度、切口表面粗糙度、显微硬度等)的影响。发现空间曲率半径对激光切割后的切割质量产生了重要影响,具体表现为:

1)对于螺距不大的螺旋线而言,当管径 R 不变,螺距 H 增大时,随着空间曲率半径的增加,切缝宽度、热影响区宽度及半垂直度增大,切口表面粗糙度减小,显微硬度变化不大,不过仍然表现出先增大后减小的特征。

2)热积累和预热效应是造成随着空间曲率半径的增加,切缝宽度和热影响区宽度增大,显微硬度变化不大的主要原因。

3)三维激光切割和二维激光切割一样,在零件设计阶段,同样要考虑切割尺寸补偿问题。

参考文献

- 1 Handbook of Mathematics, edited by the group of handbook of mathematics. Beijing: Beijing Education Press, 1979. 420 ~ 422 (in Chinese)
- 2 R. Aloke, V. Girish, R. F. Scrutton *et al.*. A model for prediction of dimensional tolerances of laser cut holes in mild steel thin plates. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 1997, **37** (8): 1069 ~ 1078
- 3 P. Sheng, Li-Hong Cai. Model-based path planning for laser cutting of curved trajectories. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 1996, **36** (6): 739 ~ 754
- 4 P. Sheng, L. Cai. Predictive process planning for laser

- cutting. *J. Manuf. Systems*, 1998, **17**(2):144 ~ 158
- 5 P. Di. Pietro, Y. L. Yao. Improving laser cutting quality for two-dimensional contoured paths. Transactions of the ASME. *J. Manuf. Science and Engineering*, 1998, **120**(3):590 ~ 599
 - 6 U. Dilthey, M. Faerber, J. Weick. Laser cutting of steel-cut quality depending on cutting parameters. *Weld. World*, 1992, **30**(9-10):275 ~ 278
 - 7 Huang Kaijin, Xie Changsheng. Development of three-dimensional (3D) laser cutting. *Laser Technology (激光技术)*, 1998, **22**(6):352 ~ 356 (in Chinese)
 - 8 J. Spitznagel. Quality control loop for 3D laser beam cutting. *SPIE*, 1996, **2787**:76 ~ 85
 - 9 G. Reinhart, J. Milberg, H. Lindl *et al.*. Laser systems in modern production environments. *Opt. Quantum Electron.*, 1995, **27**(12):1103 ~ 1125
 - 10 A. Gropp, J. Hutfless, S. Schuberth *et al.*. Laser beam cutting. *Opt. Quantum Electron.*, 1995, **27**(12):1257 ~ 1271
 - 11 P. Di Pietro, Y. L. Yao. An investigation into characterizing and optimizing laser cutting quality—a review. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 1994, **34**(2):225 ~ 243
 - 12 Spatial Analytic Geometry. edited by Jiang Dawei. Xi'an: Northwest Industrial University Press, 1996. 174 ~ 175 (in Chinese)
 - 13 Huang Kaijin, Zeng Dawen, Xie Changsheng. The effects of curvature radius and cutting speed on the top kerf width of laser cutting of thin pipe with a small diameter. *Laser Technology (激光技术)*, 2000, **24**(1):51 ~ 54 (in Chinese)
 - 14 G. Engblom, K. Falck. Quality classification of thermally cut surfaces—comprehensive review of different standards. *Weld. World.*, 1990, **28**(11/12):204 ~ 215
 - 15 S. Kou, Y. Le. Heat flow during the autogenous GTA welding of pipe. *Metall. Trans. A*, 1984, **15A**(6):1165 ~ 1171
 - 16 Zeng Dawen. Ph D Thesis: Numerical Analysis of Fluid Flow Field, Temperature Field and Concentration Field in the Laser Melting Pool. *Huazhong University of Science and Technology*, 1998. 7576
 - 17 H.J. Lee, S. J. Na. A study on heat flow in circumferential pipe welding using a semi-analytical finite element method. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 1991, **205**(B1):179 ~ 185
 - 18 T. J. Lho, S. J. Na. A study on three-dimensional transient heat flow in circumferential GTA welding of pipes using periodicity conditions. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 1991, **205**(B4):271 ~ 278
 - 19 Huang Kaijin, Zeng Dawen, Xie Changsheng. A numerical simulation for three-dimensional (3D) unsteady-state temperature field in laser circular cutting of pipe. *Chinese J. Lasers (中国激光)*, 2000, **B9**(4):367 ~ 375 (in English)