

曲率半径和切速对小管径激光切缝宽度的影响*

黄开金 曾大文 谢长生

(华中理工大学材料科学与工程学院, 武汉, 430074)

摘要: 研究了曲率半径(管径)和切割速度对薄壁小管径(外径 $D < 80\text{mm}$, 壁厚 $t = 2.5\text{mm}$)无缝钢管激光圆周切缝宽度的影响,发现:(1)随着激光切割圆周角度(弧长)的增加,切缝宽度增加;(2)在相同激光工艺参数条件下,随着曲率半径(管径)的减小,圆周平均切缝宽度增加,且当 $D < 25\text{mm}$ 时,圆周平均切缝宽度急剧增加;(3)随着切割速度的增加,圆周平均切缝宽度减少。曲率效应和激光作用时间不同是造成上述现象的主要原因。最后提出,为了获得均匀宽度的圆周切缝,对于薄壁小管径无缝钢管激光切缝,应采取变工艺参数的措施。

关键词: 曲率半径 激光切割 切缝宽度 薄壁小管径无缝钢管

The effects of curvature radius and cutting speed on the top kerf width of laser cutting of thin pipe with a small diameter

Huang Kaijin, Zeng Dawen, Xie Changsheng

(Department of Materials Science & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: The effects of curvature radius and cutting speed on the top kerf width of circumferential laser cutting of thin seamless steel pipes with a small diameter (outer diameter of pipe $D < 80\text{mm}$ and wall thickness $t = 2.5\text{mm}$) were investigated experimentally. Experiments showed three main conclusions: (1) as the cutting curve length increases, the top kerf width of laser cutting also increases, (2) the average top kerf width of laser cutting increases with decreasing curvature radius, and increasing quite dramatically as D is less than 25mm , (3) as the cutting speeds increase, the average top kerf width of laser cutting decreases. The main reasons are curvature effects and different laser interacting on times. At last, the authors regard that variable parameters are necessary for people to adopt in order to obtain a uniform kerf width for thin seamless steel pipe with a small diameter.

Key words: curvature radius laser cutting kerf width thin seamless steel pipe with a small diameter

引 言

由于激光切割具有切缝窄、热影响区小、热变形小、切割速度快等优点,目前,已在板材加工中得到广泛的应用。随着三维激光切割机的问世,人们开始进行具有立体轮廓的零件切割研究^[1~4]。管材作为已在汽车、摩托车、自行车、钢制家具、锅炉制造、机电(如变压器散热管)、石油、化工等行业得到广泛应用的三维物体,在用穿孔、开槽、切边等工序制造复杂管材方面,像钻孔、冲压、铣削、锯切或清理毛刺等传统的加工工序中,都可用一个激光加工站予以取代^[5]。目前,人们已将激光切割技术引进管材切割中,如汽车排气管^[4]、石油筛管^[6]、G-17 运

* 国家自然科学基金资助。

轮机上的铁基 Ni+Cr 高温合金排气管^[7]等的激光切割。

最近, Sheng P.^[8]用 PMMA 材料研究了平面曲率半径对激光板材切缝宽度等参量的影响, 发现小的平面曲率半径使切缝宽度增加。而空间曲率半径对管材(特别是薄壁小管径)激光切割宽度的影响尚未报道过。我们从曲率半径(管径)和切割速度对薄壁小管径 20[#] 无缝钢管激光圆周切缝宽度影响的角度进行了研究, 目的在于探讨二者对薄壁小管径激光切割宽度的影响规律, 以便为下一步的小管径切割等工艺优化打下基础。

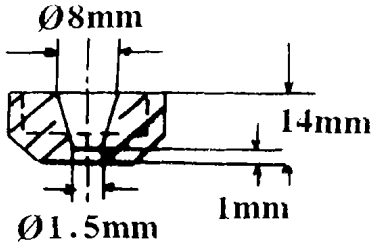
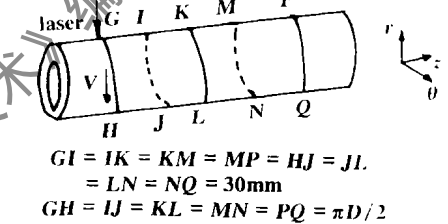


Fig. 1 Schematic sketch of nozzle structure

另外, 切割时采用 $f = 127\text{mm}$ 的 ZnSe 聚焦透镜, 离焦距 $\Delta f = -1.0\text{mm}$, 喷嘴到管件表面的距离 $Z = 1.0\text{mm}$ 。所用辅助气体是纯度为 99.995% O_2 , 切割压力为 0.5kgf/cm^2 。切割时, 激光输出功率为 1.0kW , 功率不稳定度 $\leq \pm 1.0\%$ 。待切割试样的方式及大小如图 2 所示。实验完毕后, 先将已切割的半圆周进行 18 等分, 然后在日本 Shimadzu 科学仪器公司制造的 A 型移动式读数显微镜上(放大 $40\times$) 测量切缝宽度, 测量 18 个点, 然后根据要求取平均值。

1 实 验

本实验在 RS-1500 型 CO_2 激光器上进行。此激光器的最大输出功率为 1.5kW , 模式为准基模。实验采用 6 种规格($i 74\text{mm}$, $i 61.5\text{mm}$, $i 49\text{mm}$, $i 37\text{mm}$, $i 25\text{mm}$ 和 $i 16\text{mm}$) 的无缝钢管(壁厚均为 2.5mm), 每根管长均为 200mm , 材质为 20[#] 钢。切割速度在 $1.5\text{m/min} \sim 3.5\text{m/min}$ 之间变化。切割时采用图 1 所示结构的喷嘴。另外,



$$GI = IK = KM = MP = HJ = JL \\ = LN = NQ = 30\text{mm}$$

$$GH = IJ = KL = MN = PQ = \pi D / 2$$

Fig. 2 Schematic sketch of half-circumferential laser cutting

2 实验结果及分析

图 3 是两种不同管径在相同激光切割工艺参数条件下的切缝宽度照片。由图可知管径大小影响切缝宽度的事实。



Fig. 3 Photographs of top kerf widths for half-circumferential laser cutting at a- $D = 74\text{mm}$ b- $D = 49\text{mm}$ ($P = 1.0\text{kW}$, $P_{\text{O}_2} = 0.5\text{kgf/cm}^2$, $V = 3.0\text{m/min}$)

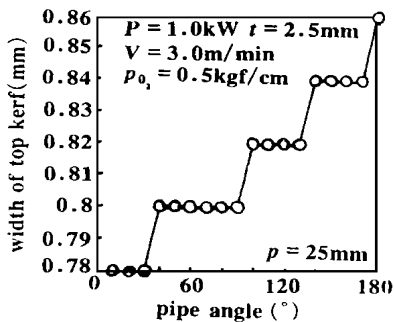


Fig. 4 The change of top kerf width with pipe angle

图 4 是切缝宽度随管径圆周角变化的曲线。由图可知, 在激光切割工艺参数不变的条件下, 随着管径圆周角的增加, 切缝宽度有增加的总趋势。由于切割和焊接互为逆过程, 因此, 这和在整个焊接长度范围内焊接工艺参数保持不变的小管径圆周焊接时焊道宽度变宽^[9]的道理是相同的, 即由于热积累和预热效应造成^[9, 10]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。事实上, 在对小管径进行圆周激光切割时, 可观察到未切割圆周的表面

颜色由黑色逐渐变为暗红色或红色,而且管径越小或切割速度越慢,这种现象愈明显。这从侧面证实了热积累和预热效应的确存在。

由于存在这种切割宽度不均匀的现象,为了便于研究管径和切割速度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。图 5 和图 6 分别是根据上述取数原则获得的切缝宽度-管径曲线和切缝宽度-切割速度曲线。

由图 5 可知,圆周平均切缝宽度是曲率半径(管径)的函数,当管径大于 60mm 时,圆周平均切缝宽度急剧减少;当管径小于 25mm 时,圆周平均切缝宽度急剧增加;处于二者之间的圆周平均切缝宽度随着管径增加而缓慢地减少。这暗示薄壁小管径的圆周切缝宽度会很大,因此,在零件的切缝宽度精度设计阶段,必须考虑切缝宽度增加的影响问题。

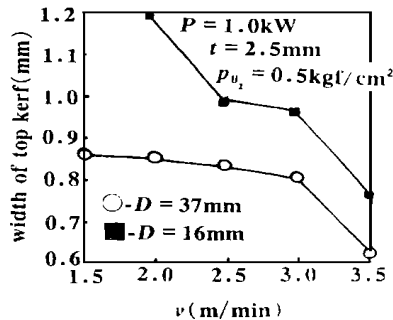


Fig. 6 Top kerf width vs cutting speed

文中描述的管材圆周激光切割过程可看成是一个有限长(管长 $L = 200\text{mm}$)、有限宽(宽度 $W = \pi D$)和有限厚(厚度 $t = 2.5\text{mm}$)的三维物体。它与有限长、有限宽和有限厚板材激光氧化切割的最大不同之处在于,其厚度方向是一个封闭结构,在进行管材和板材激光切割温度场的数值模拟时,前者必须考虑采用周期性的边界条件,而后者板材无此考虑,因而其温度场与三维板材不同。为了简单起见,我们以大管径 $D = 200\text{mm}$ 来近似代替板材。图 7 是 3 种不同管径的激光圆周切割温度场分布(计算时假定激光束为高斯光束;取 $P_{\text{laser}} = 1.0\text{kW}$, $P_{\text{reactive}} \approx (2/3)P_{\text{laser}}$ ^[13]; 20# 钢的熔点 $T_m = 1500\text{ }^\circ\text{C}$, $\rho = 7820\text{kg/m}^3$, C_p 和 λ 分段线性化;吸收率 $\alpha = 0.85$;忽略对流和辐射热损失;管壁厚 $t = 2.5\text{mm}$;管材圆周切割线速度 $V = 3.0\text{m/min}$;光斑直径 $d = 0.6\text{mm}$)。

由图 7 可知,管径 D 愈小,热积累和预热效应愈明显,使得切割区前沿的温度愈高,熔化的基材愈多,因而切割宽度愈大。在激光功率和切割速度等工艺参数相同的条件下,对于相同薄壁厚度的大管径,由于沿圆周方向的热传导长度长,以及沿径向的散热面积大,基材中的热积累和预热效应相对较小。因此,用于切割的有效能量减少,其切割区前沿的温度将比小管径的低,熔化的基材量减少,故切割宽度变小。当管径很小(如 D 小于 25mm)时,由于沿圆周方

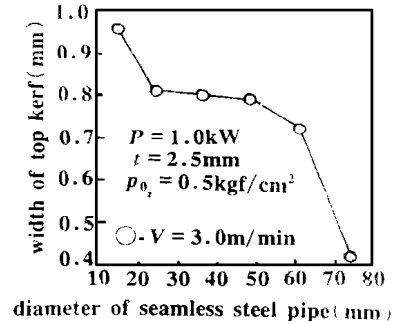


Fig. 5 Top kerf width vs pipe diameter

由图 6 可知,圆周平均切缝宽度也是切割速度的函数,即当切割速度增加时,圆周平均切缝宽度将减少,而且曲率半径(管径)愈小,这种影响愈明显。这和低碳钢板激光氧化切割时切割宽度随切割速度的增加而减少的结论是一致的^[11]。随着割缝速度的增加,激光作用的时间($d_{\text{光斑}}/V_{\text{切}}$)缩短,管件吸收的总能量减少,导致切割前沿温度降低,因而,基材熔化量减少,故割缝宽度减少。这一现象应与板材激光氧化切割相同,而后者已由实验证实^[12]。

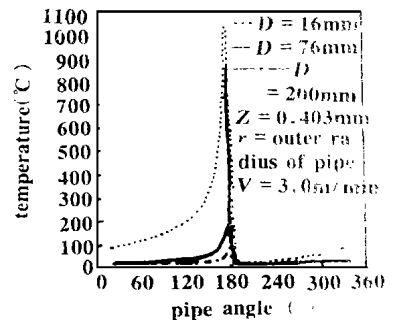


Fig. 7 The temperature distribution in the circumferential direction for different pipe diameters

向的热传导长度和沿径向的散热面积急剧减少,使得基材温度上升更快。这种情况下,热积累和预热效应尤为突出,因此,切割区前沿的温度将会大幅度地上升,熔化的基材量也将大幅度地增加,从而导致切缝宽度的大幅度增加。对于处在中间值的管径,注入到基材中的热量和散失到周围环境的热量基本上能保持平衡,因而切割区前沿的温度将只缓慢地上升,其切缝宽度也只是缓慢地增加。图8是不同管径,在相同切割工艺参数和位置条件下的温度-切割时间分布曲线。可看出曲率效应对温度和切割时间的影响是非常明显的。

最后需要说明的是,为了得到均匀的切缝宽度,对于薄壁小管径圆周激光切割而言,必须采取变工艺参数的方法,即在刚开始切割时注入的激光能量应该高(如可采取增大激光功率或降低切割速度等方法),随后注入的激光能量应该持续减少,如同解决薄壁小管径圆周GTA焊接时焊道变宽方法^[14]一样。

3 结 论

通过选用6种规格($\phi 74\text{mm}$, $\phi 61.5\text{mm}$, $\phi 49\text{mm}$, $\phi 37\text{mm}$, $\phi 25\text{mm}$ 和 $\phi 16\text{mm}$)、采用圆周切割方式对20[#]无缝薄壁钢管(壁厚 $t = 2.5\text{mm}$)进行激光切割研究后,可得出几点重要结论:(1)随着激光切割圆周角度(弧长)的增加,圆周切缝宽度增加;(2)在相同激光切割工艺参数条件下,随着曲率半径(管径)的减少,圆周平均切缝宽度增加,且当 $D < 25\text{mm}$ 时,圆周平均切缝宽度急剧增加;(3)随着切割速度的增加,圆周平均切缝宽度减少;(4)曲率效应和激光作用时间不同是造成上述现象的主要原因;(5)对于薄壁小管径无缝钢管激光圆周割缝而言,为了获得均匀宽度的圆周割缝,应采取变工艺参数的措施。

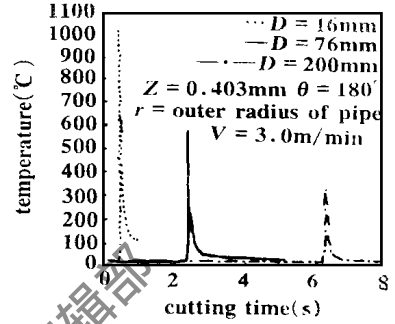


Fig. 8 The temperature vs cutting time at the same location for different pipe diameters

参 考 文 献

- 1 Anon. Laser Focus, 1983; 19(1): 24
- 2 Nilson K, Sarady I. Cutting and welding 3-dimensional sheet metal parts with high accuracy. Proc First Int Conf Lasers in Manufacturing, 1983: 79~86
- 3 Belforte D A. SPIE, 1986; 650: 262~270
- 4 Kellock B. Mach & Prod Engng, 1987; 145(3720): 17~22
- 5 Trotha L V. 应用激光, 1997; 17(3): 131~134
- 6 张 珊, 康少华, 马效贤 *et al.* 石油割缝筛管激光切割技术. 第四届全国激光加工学术会议论文集, 北京: 冶金工业出版社, 1997: 85~88
- 7 黄春峰. 模具技术, 1998; (2): 71~77
- 8 Sheng P, Cai L H. Int J Mach Tools Manufact, 1996; 36(6): 739~754
- 9 Kou K, Le Y. Metallurgical Transactions A, 1984; 15A(6): 1165~1171
- 10 Lee H J, Na S J. Proc Instn Mech Engrs, 1991; B205(1): 179~185
- 11 Ivarson A, Powell J, Kamalu J *et al.* J Mater Process Technol, 1994; 40(1~2): 359~374
- 12 王家金主编. 激光加工技术. 北京: 中国计量出版社, 1992: 440
- 13 Ivarson A, Powell J, Magnusson C. Weld World, 1992; 30(516): 116~125
- 14 Lho T J, Na S J. Proc Instn Mech Engrs, 1992; B206(2): 101~111

* * *

作者简介: 黄开金, 男, 1968年10月出生。博士生。现从事激光切割方面的研究工作。