

文章编号: 1001-3806(2013)05-0565-06

激光切割碳纤维复合材料的实验研究

花银群, 肖 淘, 薛 青, 刘海霞, 叶云霞, 陈瑞芳
(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了获得激光切割参量对碳纤维复合材料的影响规律, 利用额定功率为 500W 的毫秒脉冲 Nd:YAG 激光器, 分别进行了在空气中和水下切割碳纤维复合材料(CFRP)的实验研究。采用单因素实验法, 考察了脉冲能量、频率、切割速度与气体压力等激光参量对切割质量的影响, 获得了激光参量对切割 CFRP 材料切口的切缝宽度、正面纤维拔出长度、背面纤维拔出长度与锥角的影响规律, 并对激光切割机理进行了分析研究。结果表明, 水下切割能有效地减小激光切割产生的热影响区。这为继续开展激光水下切割 CFRP 的研究提供了参考。

关键词: 激光技术; 影响规律; 单因素试验; 水下切割

中图分类号: TG485 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.05.002

Experimental study about laser cutting of carbon fiber reinforced polymer

HUA Yin-qun, XIAO Tao, XUE Qin, LIU Hai-xia, YE Yun-xia, CHEN Rui-fang
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to obtain the influence rule of laser cutting parameters on carbon fiber reinforced polymer (CFRP), CFRPs were cut with a 500W millisecond pulsed Nd:YAG laser in air and under the water respectively. The relationships of pulse energy, frequency, cutting speed, gas pressure with the cutting quality were investigated by means of the one-factor experimental design. The influence of the laser cutting parameters on kerf width, fiber pull out at the beam entrance, fiber pull out at the beam exit and taper angle were obtained. The laser cutting mechanism was also analyzed and studied. The research shows that the laser cutting under the water can greatly reduce the heat affected zone generated by the laser cutting, which provides some reference for the further research of the laser cutting CFRP under the water.

Key words: laser technique; influence rule; one-factor experimental design; cutting under the water

引 言

碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced plastics, CFRP)是由具有优秀力学性能的碳纤维作为增强体、树脂作为基体固化成形的先进复合材料, 这两种材料的组合使得 CFRP 具有比强度高、比刚度高、重量轻及可设计性等优点, 因此, 越来越广泛地应用于航空航天和汽车领域^[1]。但是, 由于其性能主要受到碳纤维和基体的特性差异、纤维的取向以及纤维和基体的体积含量的影响, 导致它具有层间强度低、各向异性、硬度高、脆性大等特点, 这使得 CFRP 的传统接触式机械加工容易出

现一系列的问题, 比如: 刀具极易被磨损、复合材料分层和纤维容易破碎等加工质量不高、材料加工后性能变差等^[2]。

激光切割以其切缝窄、切割速度快、无机械切削力和可切割各种复杂形状的部件等优点, 已经成功应用于金属和非金属的切割。然而由于碳纤维在径向和纵向热膨胀系数的不同以及碳纤维与树脂基体的热性能上的巨大差异, 使得激光切割 CFRP 非常的困难^[3], 主要表现在激光切割后出现的一系列热损伤: 热影响区、纤维拔出、分层等。LAU^[4]使用 1064nm 的近红外 Nd:YAG 激光源切割 CFRP, 实验表明, 与 CO₂ 激光源相比, 短波长的 Nd:YAG 激光源具有高的功率密度和小的聚焦光斑, 因此热负载低、切缝窄、热影响区域小。FENOUGHTY^[5]等人利用脉冲 Nd:YAG 激光切割 CFRP, 试验表明, 由于脉冲激光的每个脉冲之间有一小段的时间能让材料进行冷却, 导致热损伤比用连续激光切割时更小。

作者简介: 花银群(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光表面强化技术和激光数字化制造技术等方面的研究。

E-mail: huayq@ujs.edu.cn

收稿日期: 2013-01-15; 收到修改稿日期: 2013-02-26

MATHEW 等人^[6]研究激光切割 CFRP 的规律,并得出了一组最优切割参量。LAU^[7]用脉冲 Nd:YAG 激光源对层板碳纤维进行了实验,发现切面也有条纹,但与加工速度无关,任意速度加工,都存在条纹,加工表面都会覆盖一层碳化层。TAGLIALERRI^[8]移除碳化层后,观察到加工面有纤维突出。

正是由于激光切割存在不可避免的热损伤问题,作者在利用 Nd:YAG 脉冲激光器在空气中切割 CFRP 的同时,创造性地引入水辅助冷却切割,即激光在水下切割 CFRP,将两者切割质量进行对比,研究了激光脉冲能量、频率、切割速度、气体压力对激光切割 CFRP 质量的影响。

1 试 验

试验中所使用的材料为碳纤维复合材料,增强纤维为 T300,基体为环氧树脂,各占 50%,铺层为对称铺层,属于正交层合板(铺层方向仅为 0°与 90°),板厚 2mm。试验件切割采用 RF-Q500 型 Nd:YAG 脉冲激光切割机,激光波长为 1.06μm,额定平均功率为 500W,聚焦光斑直径为 0.2mm~0.4mm。采用 500 倍 USB 高清数码显微镜来测量其切割质量。

在空气中与在水下切割均采用氮气作为辅助气体,而水下切割的激光切割头在水下 100mm 处,其余操作与在空气中切割相同。分别调整脉冲能量、频率、切割速度、气体压力 4 个激光参量进行切割,测量其切缝宽度(在本文中如无特别说明,均指正面切缝宽度)、正面纤维拔出长度、背面纤维拔出长度和锥角,并将两切割方式得到的切割效果进行对比。其中锥角利用下式计算得到:

$$\theta = \arctan\left(\frac{w_1 - w_2}{2d}\right) \quad (1)$$

式中, w_1 为正面切缝宽度, w_2 为背面切缝宽度, d 为材料厚度。

2 试验结果与分析

图 1 所示为激光切割 CFRP 材料的热损伤纤维拔出,从图 1a 中可以看出,因正面切缝两边树脂的汽化和熔化,使表层纤维裸露于材料切缝两边,形成正面纤维拔出;而从图 1b 中可以看到,背面切缝两边有较大范围内的树脂熔化,虽然未被辅助气体给吹除掉,却已对 CFRP 造成热损伤,使树脂基体无法保护和支承增强纤维,形成背面纤维拔出。

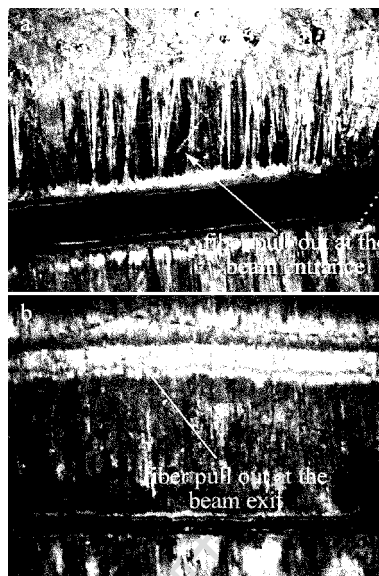


Fig. 1 The thermal damage of laser cutting CFRP when fiber pull out

2.1 脉冲能量对切割质量的影响

图 2 所示是当频率为 150Hz、切割速率为 100mm/min、气体压力为 0.6MPa 时,脉冲能量与切缝宽度、正面纤维拔出长度、背面纤维拔出长度和锥角的关系图。图 2a 和图 2d 分别显示切缝宽度和锥角随着脉冲能量的增加而增大,这是因为在频率不变、而单脉冲能量增加时,材料在单位时间内获得的能量增加,汽化和熔化速度加快,从而使正面切缝增大,而背面切缝宽度的增加速度比正面切缝宽度的增加速度小,故锥角也必定增大;图 2b 和图 2c 表明,空气中切割试样的纤维拔出长度随着脉冲能量的增大而大幅增长,这主要是由于单位时间内获得热量的增加,使得热影响区和热损伤相应的增大,导致了纤维拔出长度的大幅增加。同时,从图 2 中可以很明显看出,水下切割试样的纤维拔出长度要比空气中切割的小很多,且其增幅都很小,而切缝宽度和锥角都未能有较大的减小,这表明水下切割 CFRP 能极大地降低激光切割的热损伤效应,却未能有效地降低切缝和锥角。

同时实验结果也表明,因为水的吸收和反射会消耗掉部分激光能量^[9],所以通常在水下切割材料的功率要比在空气中高一点。

2.2 频率对切割质量的影响

图 3 所示是当脉冲能量为 1.7J、切割速率为 100mm/min、气体压力为 0.6MPa 时,激光切割频率与切缝宽度、正面纤维拔出长度、背面纤维拔出长度、锥角的关系图。

图 3a 和图 3d 分别显示切缝和锥角都与频率成

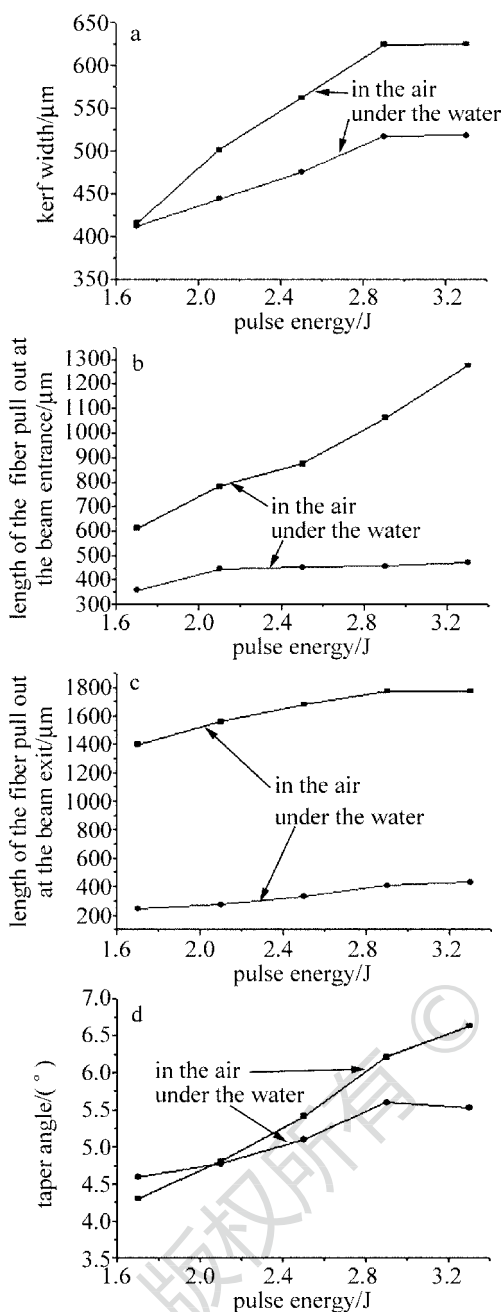


Fig. 2 Relationship of pulse energy with kerf width, length of the fiber pull out at the beam entrance, length of the fiber pull out at the beam exit, taper angle and pulse energy

正比关系,这主要是由于在单脉冲能量、切割速度与光斑直径不变时,随着频率的增加,单位时间内发射的脉冲增加,功率密度也随之增大,材料在单位时间内获得的热量更多,切口处更多的材料被汽化和熔化,使切缝宽度增大,而背面切缝宽度的增加速度比正面切缝宽度的增加速度小,使锥角增大。图 3b 和图 3c 表明,对于空气中切割的试样,纤维拔出长度也随频率增加而大幅增大,这是因为单位时间内获得的热量增加,材料的热损伤也相应增大,导致正面

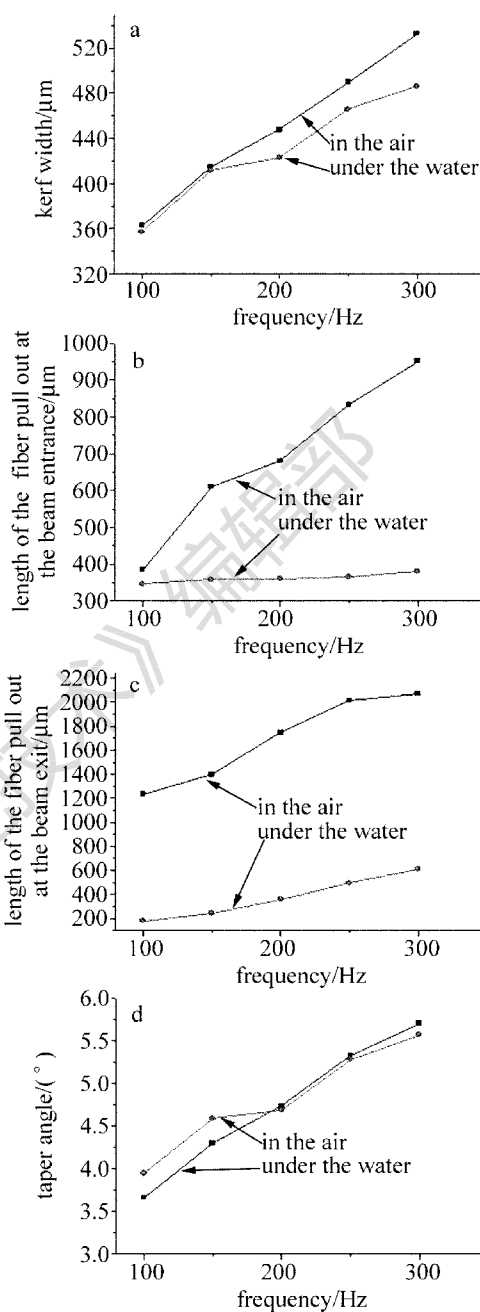


Fig. 3 Relationship of frequency with kerf width, length of the fiber pull out at the beam entrance, length of the fiber pull out at the beam exit, taper angle and frequency

与背面纤维拔出长度的增大。而水下切割试样的纤维拔出长度依然很小且仅缓慢地上升,体现了水下切割的优越性。

2.3 切割速率对切割质量的影响

图 4 是当脉冲能量为 1.7J、频率为 200Hz、气体压力为 0.6MPa 时,切割速率与切缝宽度、正面纤维拔出长度、背面纤维拔出长度和锥角关系图。

图 4b 和图 4c 表明,当其它条件不变、而切割速率增大时,材料单位时间内获得的能量减小,所以热

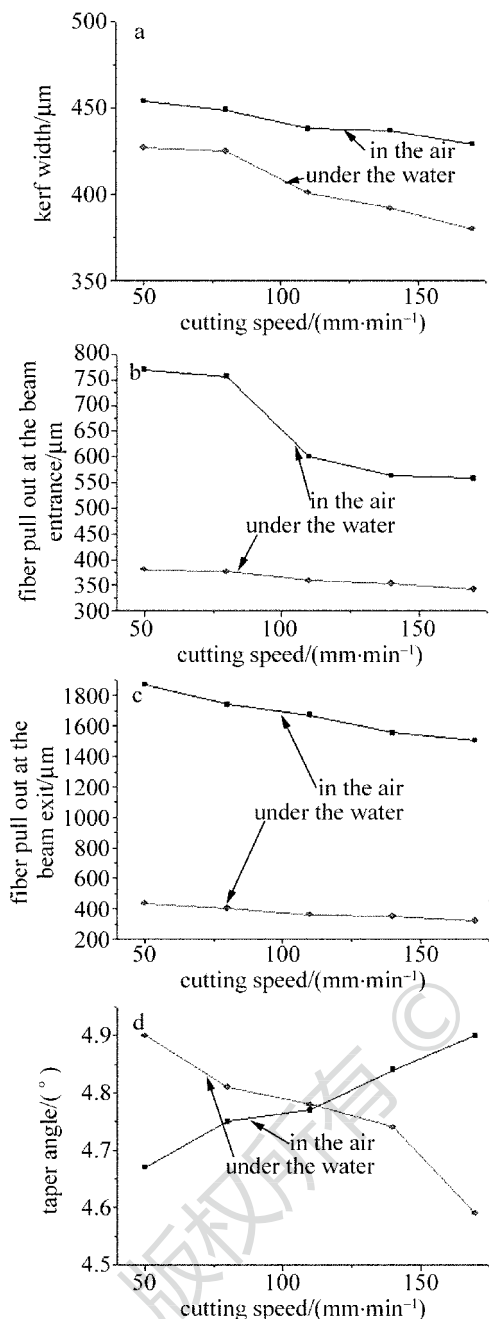


Fig. 4 Relationship of the cutting speed with kerf width, length of the fiber pull out at the beam entrance, length of the fiber pull out at the beam exit and taper angle

影响区和纤维拔出长度会减小,只是减小的幅度较小;图 4a 显示,正背面切缝宽度随着切割速率的增大而相应减小,但是水下切割与空气中切割试样的切缝宽度减小的幅度不同。这是因为材料单位时间内获得的热量减小,汽化和熔化的材料也将减少,所有切缝宽度会相应减小,但是由于水的动荡增大,吸收更多热量,所以在水下切割的正面切缝宽度减小的幅度要比在空气中的更大。图 4d 表明,空气中切割试样的锥角随着切割速率增大而少许增大,水下

切割试样的锥角随着切割速率的增大而适当减小,这主要是因为速率增大时,水下切割试样的正面切缝宽度减小的幅度较大,而水下切割背面切缝宽度由于受到水冷却的影响,本来就较小,所以其减小的幅度比较小,根据锥角计算公式,可以得到水下切割试样的锥角会随着切割速率的增大而适当减小;而空气中切割试样在速率增大时,正面切缝宽度减小的幅度比较小,背面切缝宽度减小的幅度较大,根据锥角计算公式,可以得到空气中切割试样的锥角会随着切割速率的增大而有少许的增大。

切割速率对正面切缝的影响比脉冲能量与频率对正面切缝的影响小,而对背面切缝的影响较大,这可能主要是因为正面切缝主要决定于脉冲能量、频率与光斑直径的大小。而背面切缝主要取决于上面往下面传递的热量大小,所以当速率过大时,下面获得的热量过小,材料就切不透了,当速率过小时,材料单位时间内获得的能量过大,会导致材料过度烧蚀,热影响区和炭化层严重,所以速率既不能过大也不能过小。

2.4 气体压力对切割质量的影响

图 5 是当脉冲能量为 1.7J、频率为 200Hz、切割速率为 100mm/min 时,气体压力与切缝宽度、正面纤维拔出长度、背面纤维拔出长度和锥角的关系图。

图 5a 和图 5d 显示,随着气压的增大,切缝和锥角都逐渐增大,然后在 1.0MPa 处突然下降,这主要是因为随着气压增大,气流去除熔融材料的作用加强,所以正面切缝宽度增大,而背面切缝宽度的增加速率比正面切缝宽度的增加速率小,故锥角会有一定程度的增大。而图 5b 和图 5c 显示,当气压增大时,正面与背面纤维拔出长度均是从很大值突然下降,然后下降趋于平缓,在 1.0MPa 处时,空气中切割试样的纤维拔出长度几乎持平,而水下切割的却反而有些增大。这主要是因为气压非常小的时候,纤维拔出长度会非常的大,随着气压的增大,气体流量增加,能带走更多的热量进行冷却,热影响区减小,所以纤维拔出长度明显下降,但气压对纤维拔出长度的影响不大,使之下降趋于平缓。而图 5 中曲线在 1.0MPa 处出现的转折,是由于气压过大,在工件表面形成涡流,涡流削弱了气流去除熔融材料和冷却的作用而导致的^[10],而且在水下切割时,气压过大会产生过多的气泡,过多的气泡破裂与涡流一样会削弱气流的作用,这就是在 1.0MPa 时水下切割纤维拔出长度

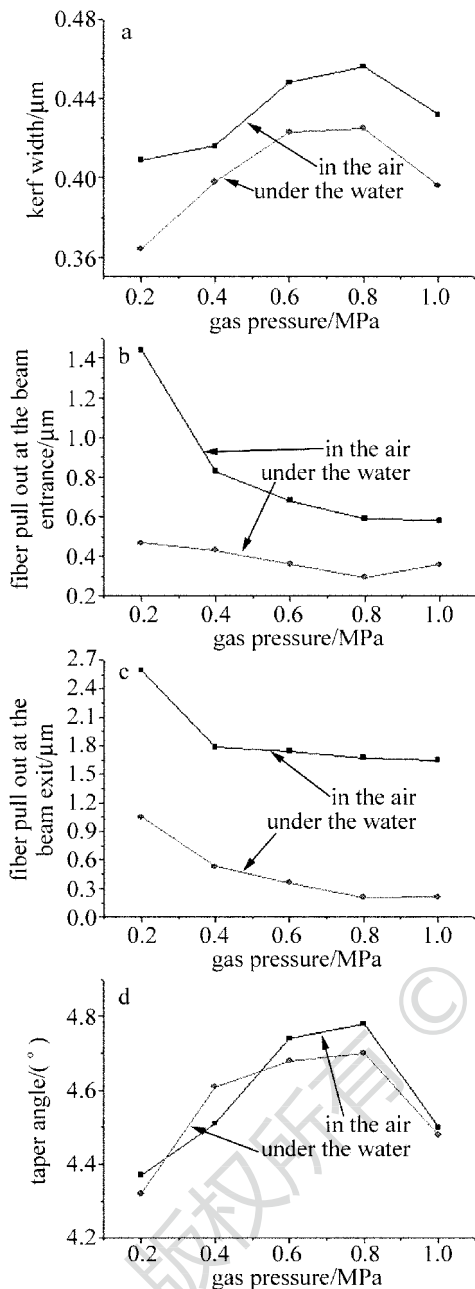


Fig. 5 Relationship of gas pressure with kerf width, length of the fiber pull out at the beam entrance, length of the fiber pull out at the beam exit and taper angle

不减小反而增大的原因。

所以,如果喷嘴气体压力过低,就不能进行及时冷却,吹不走切口的熔融材料,出现切口不平整、热影响区(heat affected zone, HAZ)大等问题,如图 6a 所示;如果气体压力过高,就容易在工件表面形成涡流,削弱了气流去除熔融材料和冷却的作用,影响切割质量,如图 6b 所示。

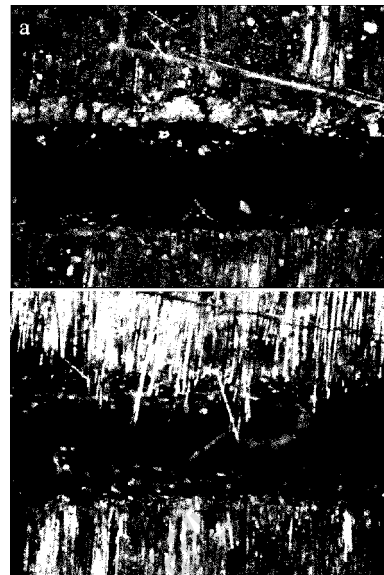


Fig. 6 a—when the gas pressure is too low, there will be a rough kerf and large HAZ b—when the gas pressure is too high, there will occur eddy current which affects the cutting quality

3 激光切割 CFRP 的机理分析

激光切割是一种热加工工艺,被切割材料切缝附近肯定会产生一定宽度的热影响区。由于碳纤维和环氧树脂热性能相差巨大,导致激光切割 CFRP 的热影响区一般表现为切缝附近的树脂被炭化和烧蚀,碳纤维裸露于材料表面,表现为纤维拔出。

空气中激光切割 CFRP 材料热影响区的特点是上表面热影响区较窄,而下表面较宽,如图 7 所示。形成这种上窄下宽的热影响区与激光切割特点有关,激光在材料上表面功率密度很高,使材料迅速汽化,而且有辅助气体的高压气流冷却,激光束对切缝附近区域作用时间较短,热影响区较窄。而熔融的材料不断地往下流动,并且不断地向四周传递热量,越靠近下面,被熔融材料加热的时间则越长,温度也越高,所以形成了较大的热影响区。但碳纤维的熔点较高,仅依靠熔融材料传递来的热量和高压气流

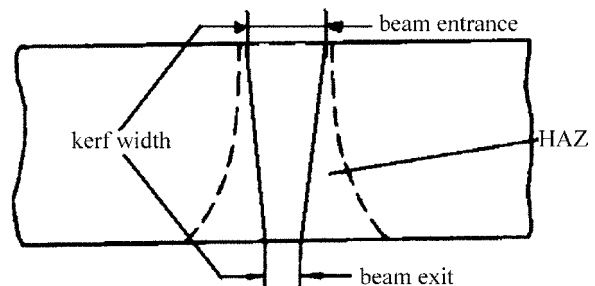


Fig. 7 The HAZ of laser cutting CFRP in the air

的吹除熔融材料的作用,下表面不能和上表面一样切断大量的碳纤维,所以形成了上表面切缝宽,下表面切缝窄的现象。

与空气中切割对比,水下切割 CFRP 的主要不同是上表面热影响区较宽而下表面热影响区较小。这是因为当开始激光切割时,上表面正处于激光焦点处,能量密度极大,材料瞬间汽化,故加工时间极短,而被辅助气体吹开的水分来不及对其进行充分地冷却,所以,必然会存在一定的热影响区和与空气中切割相当的切缝,这也就是水下切割未能极大地降低正面切缝的主要原因。而在材料处于尚未切透时,随着切割的继续进行,热量随着熔融材料往下和往旁边传递,此时,材料下表面和旁边的水肯定会吸收大量的热量,从而使得下表面的热影响区能够非常小,且比上表面的热影响区更小;然而,这会导致下表面吸收到的能量会下降许多,如果激光功率不足够大的话,会出现材料切割不透或者切缝太窄、断口不平整、锯齿状切缝等问题,如图 8 所示。同时,这也是水下切割必然存在较大锥角的主要原因。

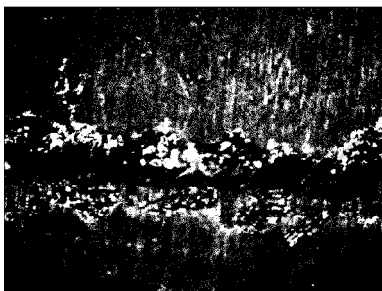


Fig. 8 Zigzag kerf at the beam exit of the laser cutting CFRP under the water

4 结 论

(1) 激光水下切割 CFRP 能很好地降低激光切割导致的热损伤,使正面和背面纤维拔出长度大幅降低,热影响区大大减小。

(2) 在能保证切断 CFRP 的情况下,要想获得较

好的切割质量,必须使脉冲能量和频率较小,而切割速率与气体压力较大。在本实验条件下,激光切割参量为:脉冲能量 1.3J ~ 1.7J,频率 150Hz ~ 200Hz,切割速率 100mm/min ~ 150mm/min,气体压力 0.6MPa ~ 0.8MPa,均能取得较好的切割效果。

(3) 激光切割的切缝为上宽下窄,其中空气中切割的材料的热影响区为上窄下宽,而水下切割的材料的热影响区为上宽下窄。

参 考 文 献

- [1] ZHANG X H, MENG Y, ZHANG W. The state of the art and trend of carbon fiber reinforced composites[J]. *Fiber Composites*, 2004, 50(1):50-58(in Chinese).
- [2] ZHANG L L, JIANG Zh H, ZHANG W. A review of laser processing fiber-reinforced flexible composite material[J]. *Applied Laser*, 2012, 32(3):238-243(in Chinese).
- [3] NEGARESTANI R, LI L, SEZER H K. Nano-second pulsed DPSS Nd:YAG laser cutting of CFRP composites with mixed reactive and inert gases[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 49(14):553-566.
- [4] LAU W S, LEE W B. Pulsed Nd:YAG laser cutting of carbon fibre composite materials[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1990, 39(1):179-182.
- [5] FENOUGHTY K A, JAWAID A, PASHBY I R. Machining of advanced engineering materials using traditional and laser techniques[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, 42(4):391-400.
- [6] MATHEW J, GOSWAMI G L, RAMAKRISHNAN N, et al. Parametric studies on pulsed Nd:YAG laser cutting of carbon fibre reinforced plastic composites[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 89/90:198-203.
- [7] LAU W S, LEE W B. A comparison between EDM wire cut and laser cutting of carbon fibre composite materials[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 1991, 6(2):331-358.
- [8] TAGLIAFERRI V. Laser cutting of reinforced materials. *Handbook of ceramics and composites*[M]. New York, USA: Marcel Dekker, 1990:451-467.
- [9] ZHU B, QI L T, WANG Y. The experimental study of water-assisted laser machining[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2003, 12:73-74(in Chinese).
- [10] LIU J H, CHEN Y J, DUAN J. Design of supersonic nozzles for laser cutting[J]. *Laser Technology*, 2000, 24(1):46-50(in Chinese).