

基于环形聚焦技术的小口径管件内壁的激光重熔

俞照辉^{1*}, 文忠¹, 李玮¹, 闫国华¹, 李东²

¹国核电站运行服务技术有限公司, 上海 200233;

²上海工程技术大学, 上海 201620

摘要 采用自主研发的分离式激光整形和环形反射聚焦系统, 对小口径管件内壁进行了重熔, 并对重熔后的试样进行了宏观成形与显微组织分析。结果表明: 该系统无需旋转机构即可实现对口径在 30 mm 以下的管件进行内壁重熔; 在优化的工艺参数条件下, 重熔层成形质量良好, 无螺旋形搭接边和焊接鱼鳞纹; 熔池呈圆环形, 可有效防止热裂纹的产生; 随着激光扫描次数增加, 重熔层的熔深先增大后变小; 随着扫描速率增大, 重熔层的熔深降低, 表面粗糙度降低。

关键词 激光技术; 聚焦系统; 重熔; 小口径管件内壁; 堆焊

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0402010

Laser Remelting for Inner Face of Small-Bore Tube Based on Ring Focusing

Yu Zhaohui^{1*}, Wen Zhong¹, Li Wei¹, Yan Guohua¹, Li Dong²

¹State Nuclear Power Plant Service Company, Shanghai 200233, China;

²Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract A self-developed laser processing system consisting of discrete designed transformation module and reflected ring focusing module is employed to re-melt the inner face of small-bore tube, and the macro appearances and microstructures of remelted layers are analyzed in details. The results show that the processing system can re-melt the inner face of the small-bore tube with diameter below 30 mm without a rotating mechanism. The quality of remelted layer is good without spiral overlapping edges and ripples under the optimum processing parameters. The molten pool is ring-shape and the cracking tendency is remedied obviously. The penetration of remelted layer increases first and then decreases with the increase of the number of laser scanning, and the penetration and surface toughness reduce with the increase of scanning speed.

Key words laser technology; focusing system; re-melting; inner face of small-bore tube; overlaying

OCIS codes 140.3460; 140.3390; 140.3510

1 引 言

内壁堆焊或补焊是管道维修最为经济、有效的方法, 但当管径小到一定尺寸时, 一些常规的堆焊方法便不再适用^[1]。这主要是由于设备终端执行单元(焊枪、焊炬)的固有构造限制了其可缩小的尺寸下限, 从而难以进入蒸汽发生器和热交换器的传热管、化工冷凝管和排管等口径小于 30 mm 的管道内部实施堆焊或补焊作业^[2]。因此, 目前的传热管维修主要采用堵管、衬管、切割

更换等方式, 但这些方法存在传热效率低、可靠性差、维修成本高且工期长等缺点^[3]。另外, 在海洋、化工及武器等领域, 由于工况的要求, 经常需要内壁具备耐蚀、耐磨以及一些特殊的性能^[4]。当管径小到传统堆焊方法无法进行时, 为了满足性能的要求, 管件通常采用价格昂贵的单一材料进行制造, 存在加工难度大、制造成本高、资源浪费严重等问题。很少有堆焊层内衬相对廉价的小口径金属复合管可供商用选择^[5]。因此, 开发小口径管内壁堆焊技术是管道维修和金属复合管材

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2018-12-31; 录用日期: 2019-01-23

基金项目: 国家科技重大专项(2015ZX06002-005)、国家核电员工自主创新项目(SNP-KJ-CX-2014-7)

* E-mail: yuzhaohui@foxmail.com

生产领域亟待解决的问题。

近年来,研究人员在管内壁熔覆和堆焊方面进行了大量的技术革新,并取得了一些可喜的成绩^[6-8]。目前,以电弧为热源的堆焊技术在小口径管内作业时仍存在诸多问题,如:难以适应内径较小的管件,加工深度受限,焊接头易因过热而损毁等。鉴于上述问题,研究人员将关注的重点转向一些新型热源,其中,最具代表性的是大功率激光光源^[9-11]。在核电维修领域,研究人员针对蒸汽发生器传热管的维修开发了激光衬管设备,其终端执行机构可以伸入传热管内部进行焊接,完成一道环焊仅需几秒^[12]。然而,该设备只能在短时间内作业,无法用于内壁堆焊等长时间的工作。本课题组采用自主研发的激光整形和分离式环形反射聚焦系统,尝试在不添加焊材的前提下,对口径为 30 mm 的 304 不锈钢管件内壁进行重熔,以检验环形热源的熔深能力及重熔层的成形质量,目的是为该设备未来在小口径管道内壁的堆焊或补焊操作中提供技术参考。

2 实 验

实验采用内径为 30 mm、壁厚为 5 mm、长度为 100 mm 的 304 不锈钢管为研究对象。保护气体采用纯度为 99.99% 的高纯氩气。激光器采用美国 IPG 公司的 YLS-5000 型大功率光纤激光器,重熔设备采用自主研发的小口径管内壁激光加工装置,其结构如图 1 所示。从图 1(a)中可以看出,该设备主要由整形单元、夹具、聚焦镜、水冷管及直线运动机构构成。实验前,通过底座调节器将整形单元和夹具上的待焊管件调至与聚焦镜同轴。水冷管为双层刚性结构,由电机和丝杠驱动的直线运动机构通过水冷管使聚焦镜作直线运动。图 1(b)给出了锥形聚焦镜的外形特征及反射聚焦后的环形光斑形状。锥形聚焦镜的外形为圆锥形,直径为 24 mm,与管壁的最小距离为 3 mm,聚焦面为抛物面,焦距为 15.5 mm,管壁处的环形光斑宽度为 0.5 mm,直径为 30 mm。图 1(c)给出了采用自主研发的分离式激光整形和环形反射聚焦系统对管件进行加工的过程。

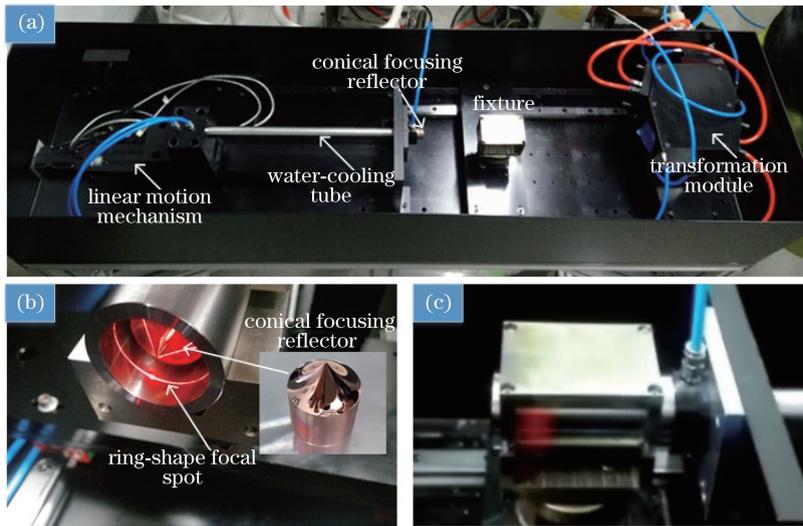


图 1 小口径管内壁激光加工装置。(a)总体结构;(b)环形聚焦光斑;(c)管件的加工过程
Fig. 1 Laser processing device for the inner face of small-bore tube. (a) Main structure;
(b) ring-shape focal spot; (c) processing for the tube

重熔加工时,同轴设置在管内的聚焦镜作回抽式直线运动,进行单向扫描,扫描距离为 60 mm。调整的工艺参数包括:激光功率、扫描速率及重复扫描次数,具体设置如下:激光功率 P 固定为 4 kW;扫描速率 v 为 1 mm/s 时,分别扫描 2、3、4、5 次;扫描速率 v 为 2 mm/s 时,分别扫描 3、4、5、6 次;扫描速率 v 为 3 mm/s 时,分别扫描 5、6 次。加工完成后,将管件试样剖开,观察表面的成形质量,然后截取小块试样,用 50 mL HCL + 10 mL HNO₃ +

100 mL H₂O + 10 g FeCl₃ 溶液腐蚀 40 s,观察试样的显微组织,并用像素法测量熔深。

3 工作原理

图 2 给出了小口径管内壁激光加工装置的光路原理。从图中可以看出,经光纤导入的发散型激光束照射到准直反射镜的表面,反射后形成准直实心光束。准直光束经凸锥面反射镜反射后形成中空发散光束,然后再经锥形凹面镜反射,就形成了实验要

求的中空、准直光束,其内、外径分别为 6 mm 和 18 mm。将整形后的光束导入待加工管的内部,使其照射到同轴设置在管内的锥形聚焦镜上,经周向偏转反射聚焦后,在管内壁形成圆环形高能量密度的焦斑。与此同时,聚焦镜作直线运动,环形焦斑在管内

壁产生圆柱面加工轨迹,从而实现了对整个管内壁的加热熔化。从原理上看,本研究的聚焦模块结构简单,且于管内同轴布置,空间干涉小。另外,加工过程仅作直线运动,省略了结构复杂的无极旋转机构及大量的线缆,故能适应小口径管件的内壁加工。

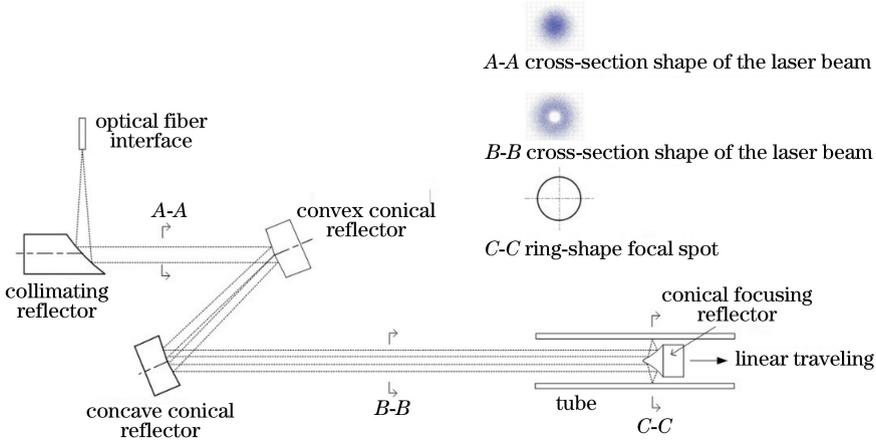


图 2 小口径管内壁激光加工装置的光路结构

Fig. 2 Optical path structure of laser processing device for the inner face of small-bore tube

4 结果与分析

4.1 重熔层的成形特点与显微组织

图 3 给出了管内壁重熔层的成形特征,可以看出:重熔层表面较为平整,未出现焊道鱼鳞纹,以及由于旋转加热所产生的螺旋形搭接边,也未观察到肉眼可见的裂纹、气孔及夹杂等焊接缺陷。实际上,这种成形效果与熔池形状有关。在常规的重熔或堆焊工艺中,熔池大多呈椭圆形,从中心到边缘,结晶速度逐渐降低,晶粒的生长速度不一致,从而会在焊道上形成周期性的鱼鳞纹^[13]。在本实验中,熔池形状为首尾相接的圆环形,各处同时加热和冷却,凝固结晶速度一致,因而,不会出现鱼鳞状凝固纹路。另外,熔池各处同时熔化和凝固带来的另一个优点是凝固收缩和热收缩所产生的应力在环向上相互抵消,可以有效防止热裂纹的产生^[14]。

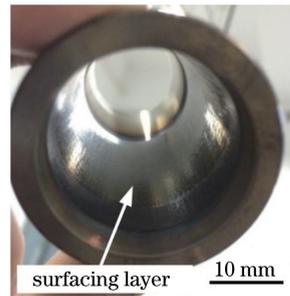


图 3 管内壁重熔层的外形

Fig. 3 Appearance of remelted layer in inner face of tube

图 4 给出了管内壁重熔层的显微组织照片。从图 4(a)中可以看出,重熔层的晶粒非常细小,管壁表层的晶粒平行于轴线,内部的晶粒斜向上生长。在堆焊过程中,熔池随着热源而移动,而晶粒的初始生长方向指向瞬时热源的位置,且与散热方向相反。因此,熔池表层的晶粒几乎平行于表面生长,熔池内

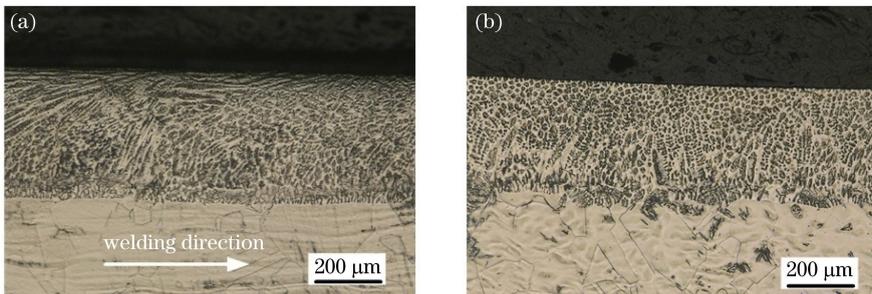


图 4 管内壁重熔层的显微组织。(a)纵截面;(b)横截面

Fig. 4 Microstructures of remelted layer in inner face. (a) Longitudinal section; (b) transversal section

部的晶粒以一定的角度斜向上生长,且生长的角度随深度的增大而增大。另外,表面线和熔合线非常平直,几乎无起伏,说明工艺过程稳定,成形良好。

从图 4(b)中可以看出,重熔层的显微组织呈胞状晶结构,主要由亮色的奥氏体胞状树枝晶和分布在晶界、亚晶界处的暗色铁素体组成,表层的晶粒尺寸均匀,形态一致。环形光斑作为热源时,在圆周方向上加热均匀,这给管内壁各处的熔体提供了相同的结晶条件。晶粒形核后,以相同的温度梯度和生长速度进行凝固,从而保障了内壁重熔层宏观性能的一致,这对提高管件的服役寿命具有重要作用^[13]。

4.2 工艺参数的影响

图 5 给出了扫描速率为 2 mm/s 时,不同扫描次数下重熔层的成形形貌。对比图 5 左侧的宏观形貌可以发现,随着重复扫描次数增多,重熔层表面出现了规则、等距的横纹,而且纹路的深度随着扫描次数的增多而加深。这可能与焊接热输入增多导致环形熔池的宽度增大有关。另外,在扫描 6 次的试样中,重熔层出现了氧化发黑的痕迹,其原因在于该试样所对应的焊接热输入相对较高,而焊后没有适当延长保护气的通气时间,导致该管件未充分冷却而发生了氧化。

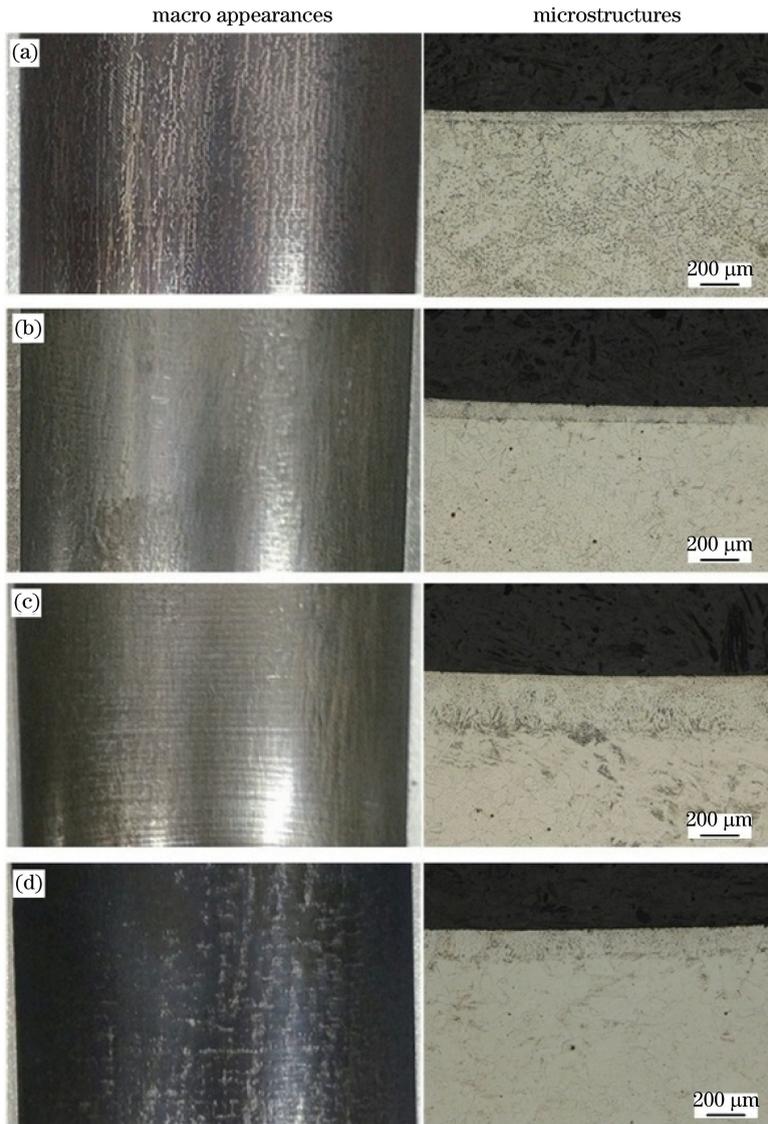


图 5 不同扫描次数下重熔层的成形形貌。(a) 3 次;(b) 4 次;(c) 5 次;(d) 6 次

Fig. 5 Appearances of remelted layers obtained at different scanning times.

(a) Three times; (b) four times; (c) five times; (d) six times

从图 5 右侧的显微组织照片中可以看出,管内壁的表面线和熔合线非常平直,几乎无起伏,说明环

形光斑各处的能量密度非常均匀。另外,对比显微组织照片还可以发现,随着重复加热次数增多,重熔

层的熔深先增大后变小。理论上,熔深会随着扫描次数的增多而增大,但在本实验中,当重复加热到6次时,熔深反而降低。经仔细观察后发现,该工艺所对应试样的底部出现了金属堆积的现象,说明熔池金属出现了流动。其原因在于,重复加热次数增多,熔池中熔融金属的体积增大,在重力的作用下,熔融金属沿环形熔池流向管件底部,导致管件顶部和侧壁的重熔层减薄。因此,在小口径管内壁激光重熔或堆焊工艺制定中应避免这类现象的发生。

当激光功率为4 kW,扫描速率为2 mm/s时,重熔层的熔深与激光扫描次数的关系如图6所示。由图6可见,随着扫描次数增加,熔深逐渐增加,当扫描次数为5时,熔深最大,达到334 μm,随后熔深随着扫描次数的继续增大而减小至172 μm。这表明在该工艺条件下,小口径管内壁重熔层的熔深存在一个最大值。同样的变化趋势也出现在扫描速率为1 mm/s的工艺中。

图7给出了扫描5次,不同扫描速率下重熔层的宏观形貌。可以看出:当扫描速率为1 mm/s时,试样上的横纹较深,且部分发生了弯曲,说明熔池金属在凝固之前出现了流动现象;当扫描速率为

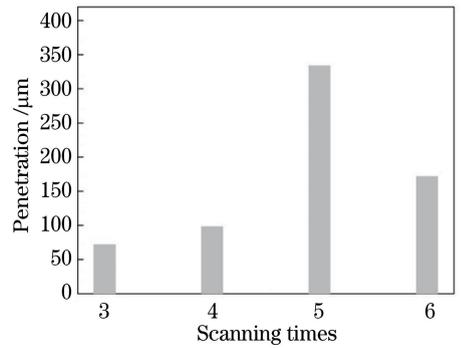


图6 激光扫描速率为2 mm/s时得到的重熔层的熔深
Fig. 6 Penetration of remelted layers obtained at scanning speed of 2 mm/s

2 mm/s时,试样上的横纹非常均匀平直;当扫描速率为3 mm/s时,试样上几乎观察不到横纹,表面非常光洁。由此可以推断,在其他工艺条件相同的情况下,随着扫描速率增大,重熔层的横纹深度变小,表面粗糙度降低。其原因在于:一方面,熔池中熔融金属的量减少,加工过程中的熔池波动和流动幅度减缓;另一方面,凝固时间变短,熔池金属出现流动堆积之前即可凝固^[14]。由此可见,提高扫描速率有利于提高重熔层的成形质量。



图7 不同扫描速率下得到的重熔层的宏观形貌。(a) 1 mm/s;(b) 2 mm/s;(c) 3 mm/s

Fig. 7 Appearances of remelted layers obtained at different scanning speeds. (a) 1 mm/s; (b) 2 mm/s; (c) 3 mm/s

图8给出了不同扫描速率下重熔层熔深的变化趋势。可以看出,随着扫描速率提高,重熔层的熔深变小,这显然与热输入的降低有关。在本研究中,将

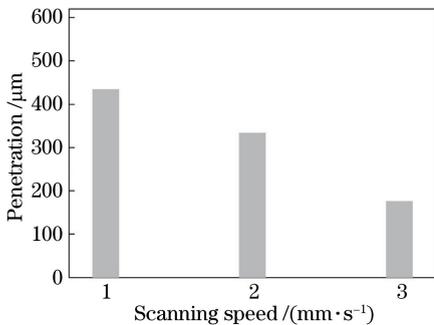


图8 不同扫描速率下得到的重熔层的熔深
Fig. 8 Penetration of remelted layer obtained at different scanning speeds

传统的点状或圆斑状热源改变为环形,不但降低了单位面积的能量密度,而且增大了热源周围的散热边界,这对于重熔或焊接技术中要求的聚热效应是极为不利的^[15]。例如,在激光功率为4 kW时,直径为30 mm、宽度为0.5 mm的环形光斑的能量密度明显要大于100 A、10 V条件下氩弧焊热源(直径为6 mm左右)的能量密度,但熔化效果却明显不如后者。这主要是由于环形焦斑的散热边界长度约为氩弧焊热源的10倍,即热量难以聚集产生升温效果,达到熔化工件的目的^[14]。在这种情况下,虽然提高扫描速率有助于提高成形质量和生产效率,但重熔层的熔深将明显减小。如果要求提高扫描速率的同时保证熔深,提高激光功率是一个最为直接的办法,这就需要选用输出功率更大的激光器。另一个办法是减小目标管件的口径,即目标管径越小,在

激光输出功率一定的情况下,环形光斑单位面积上的功率密度就越大,熔化效果就越显著。但须注意对聚焦镜的保护,因为聚焦镜与熔池的距离也会缩短。

5 结 论

本研究所采用的分离式激光整形和反射聚焦系统输出的环形光斑仅通过直线运动即可对口径为 30 mm 的管件内壁进行整体重熔,无螺旋形搭接边产生,成形质量显著提高。当激光功率为 4 kW,扫描速率为 2 mm/s 时,最大熔深可达 334 μm 。环形光斑加热均匀,管内壁各处的结晶速度一致,避免了鱼鳞状焊道凝固纹路的出现,且凝固收缩和热收缩所产生的应力在环向上相互抵消,可有效缓减热裂纹倾向。随着扫描次数增多,熔深先增大后变小,表面粗糙度降低;随着扫描速率增大,熔深降低,表面粗糙度降低。

参 考 文 献

- [1] Miao H. Semi-automatic welding overplay procedure in carbon steel little pipe [J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2013(9): 149-150, 158. 缪红. 碳钢小接管内部半自动焊堆焊工艺[J]. *装备制造技术*, 2013(9): 149-150, 158.
- [2] Zhang J J, Zheng L X, Liu Y W, *et al.* Discussion about degradation issue of steam generator tube in PWR [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2013, 30(12): 57-63. 张加军, 郑丽馨, 刘英伟, 等. 压水堆核电厂蒸汽发生器传热管的降质问题[J]. *压力容器*, 2013, 30(12): 57-63.
- [3] Feng L F, Wei Y F, Yan G H. Research on sleeving technique of steam generator tubes [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2011, 28(4): 35-40. 冯利法, 未永飞, 闫国华. 蒸汽发生器传热管衬管技术研究[J]. *压力容器*, 2011, 28(4): 35-40.
- [4] Cao J B, Zhang Z S. Finite element analysis of underwater explosive forming of bimetal composite pipe [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(2): 61-65, 131. 曹建斌, 张周锁. 双金属复合管水下爆炸成形有限元分析[J]. *焊接学报*, 2018, 39(2): 61-65, 131.
- [5] Guo P F, Wang X N, Zhu G H, *et al.* Microstructures and properties of X100 pipeline steel joints by fiber laser welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1202003. 郭鹏飞, 王晓南, 朱国辉, 等. X100 管线钢光纤激光焊接头的显微组织及性能[J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1202003.
- [6] Tavassolimanesh A, Alavi N A. A new approach for manufacturing copper-clad aluminum bimetallic tubes by friction stir welding (FSW) [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 30: 374-384.
- [7] Kim H G, Kim I H, Choi B K, *et al.* Parameter study for manufacturing an inner and outer cladding tube used in dual-cooled annular fuel [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2012, 248: 35-41.
- [8] Fan Z S, Yu H P, Meng F C, *et al.* Experimental investigation on fabrication of Al/Fe bi-metal tubes by the magnetic pulse cladding process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(5/6/7/8): 1409-1418.
- [9] Wang S L, Fang F Z. High power laser and its development [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 090005. 王狮凌, 房丰洲. 大功率激光器及其发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 090005.
- [10] Shi T, Wang Y Q, Lu B H, *et al.* Laser cladding forming of cantilevered thin-walled part based on hollow-laser beam inside powder feeding technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 1003003. 石拓, 王伊卿, 卢秉恒, 等. 中空激光内送粉熔覆成形悬垂薄壁件 [J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1003003.
- [11] Shi S H, Fu G Y, Li L, *et al.* Realization and research of laser cladding with method of internal wire feeding through a hollow laser beam [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 266-270. 石世宏, 傅戈雁, 李龙, 等. 中空激光光内同轴送丝熔覆工艺的实现及其试验研究 [J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 266-270.
- [12] Kim J D, Kim C J, Chung C M. Repair welding of etched tubular components of nuclear power plant by Nd:YAG laser [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 114(1): 51-56.
- [13] Kou S. *Welding metallurgy* [M]. Hoboken: Wiley-Interscience, 2002: 181-190.
- [14] Lancaster J F. *Metallurgy of welding* [M]. 6th ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 1999.
- [15] Messler R W, Jr. *Principles of welding* [M]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2004.