# 钛合金窄间隙TIG焊试板热处理前后表面残余应力研究*

姜云禄[1],余　陈[2],陈　静[1],陈怀宁[1],易耀勇[2]

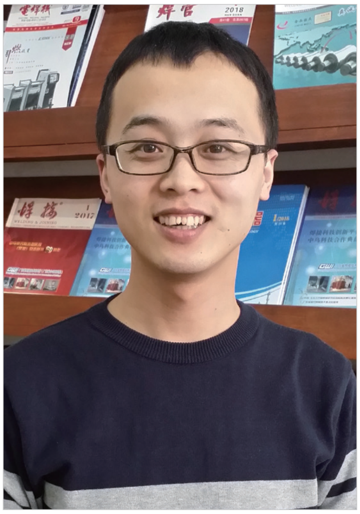
（1. 中国科学院金属研究所,沈阳 110016;

2. 广东省焊接技术研究所(广东省中乌研究院)广东省现代焊接技术重点实验室,广州 510650）

[摘要] 采用磁控窄间隙 TIG 焊接方法对 31mm 厚 TC4 钛合金试板进行焊接,焊接完成后采用压痕应变法测量真空退火处理前后表面焊接残余应力分布。结果表明,试板表面纵向焊接残余应力 $\sigma_x$ 和横向焊接残余应力 $\sigma_y$ 均较高;试板下表面焊接残余应力高于上表面焊接残余应力;峰值焊接残余应力出现在高温热影响区,数值可以达到材料屈服强度的 50%~60%。经过 650℃的真空退火热处理,焊接试板的纵向和横向残余应力均显著降低,残余应力降低幅度最高超过 50%,剩余残余应力峰值均低于 200MPa,表面残余应力重新分布。

关键词:TC4 钛合金;窄间隙 TIG 焊接;残余应力;真空退火;压痕应变法

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.08.062



姜云禄

硕士、助理研究员,研究方向为焊接工艺对接头性能与残余应力的影响。

*基金项目:广东省科技项目(2016B070701025);攀钢科技合作项目 2015-10。

钛合金因比强度高、抗腐蚀性好、温度适应范围广、无磁性、高韧性、可焊性突出等特征,在航空、航天、军事等领域有较广泛的应用,拥有“太空金属”的美誉[1-2]。钛合金是一种轻质结构材料,其应用水平已成为衡量飞机选材先进程度的一个重要标志。在军用飞机方面,国外第 3 代战斗机用钛量占机体结构总质量的 20%~30%,美国第 5 代战斗机 F-35 用钛量已高达 27%, F-22 战机用钛量更是高达 41%[3-5]。近年来,工业领域对钛合金应用又以厚板钛合金结构居多,因此研发和推广一种高效便捷、经济性好、用于焊接厚板钛合金结构的方法具有重要意义。

目前厚板钛合金主要采用电子束进行焊接,电子束焊接具有焊接速度快、焊接变形小、热效率高等一系列优点,但是生产成本高,且许多结构受到真空室的限制[6-7]。磁控窄间隙 TIG 焊接方法利用外加的横向交变磁场使得电弧发生摆动,克服了厚板窄间隙焊接过程中侧壁融合难的问题[8-9]。

在所有的熔化焊工艺中,由于焊接过程的不均匀加热及快速冷却,不可避免地在焊接接头中产生焊接残余应力。焊接过程的不均匀温度场是产生焊接残余应力的根本原因。焊接残余应力的存在对构件的刚度及尺寸稳定性具有较大影响,会降低构件的疲劳性能与抗脆断及抗应力腐蚀开裂的能力[10-11]。因此,焊接残余应力的存在影响着焊接件的使用寿命及可靠性,准确测量焊接残余应力具有重要意义。

为了消除残余应力的不利影响,对于重要的焊接构件,工程上一般要进行焊后热处理(post-welding heat treatment, PWHT)。采用试验测试或数值模拟的方法研究焊接残余应力

的数值和分布特征，对于焊接结构设计和工艺优化具有重要的意义，并已成为当前的研究热点。

本文利用磁控窄间隙TIG焊对31mm厚的TC4钛合金板进行焊接试验，采用压痕应变法研究焊接试板热处理前后的焊接残余应力分布特征，进而对焊后热处理效果进行评价，试验结果可为厚板钛合金的应用提供一定的参考依据。

## 试验材料及方法

尺寸为650mm×300mm×31mm的TC4钛合金磁控窄间隙TIG焊接试板由两块钛合金板材、垫板、引弧板和收弧板组成，采用I型坡口，坡口间隙10mm。焊丝、垫板、引弧板和收弧板的材质与母材相同，焊丝直径2.0mm，垫板尺寸为750mm×30mm×10mm，引弧板和收弧板尺寸为50mm×100mm×31mm。焊接时先通过焊接将两块待焊试板与垫板、引弧板和收弧板固定在一起，使根焊道与垫板熔合在一起。焊接参数如表1所示。焊后经测量，试板正面焊缝余度5mm、宽度24mm，背面焊缝宽度12mm（去除垫板后获得）。

焊后对焊接试板的残余应力进行测量，测量下表面焊接残余应力时先采用线切割方法将垫板去除。根据残余应力的可能分布特征和对比热处理效果的测量需要，本文所确定的测量方案如下：

首先将650mm长的试板中间进行线切割，获得2块尺寸为325mm×300mm×31mm，应力分布特征相同的试样。然后取一块试样进行上下表面的原始残余应力检测，另一块试样进行真空热处理后测量残余应力，热处理规范为650℃/3h，测量过程以焊缝为中心，测量半宽度焊接试板的残余应力。上下表面沿垂直焊缝方向布置应变片，数量为6~7个，间距5~15mm（根据实际应力测量结果进行调整），如图1所示。

本文采用压痕应变法[12]测定表面应力，应变片为BA120-1BA-zky双向片。应力测试仪为KJS-3P型。TC4钛合金的压痕应变法测量系数需要事先进行标定试验，以便确定压痕应变增量和残余弹性应变之间的关系，为后期计算残余应力奠定基础。标定在自制水平拉伸装置上进行，采用与测量残余应力相同的应变片和压痕制造装置。图2为TC4钛合金的压痕应变法标定曲线，该曲线显示了弹性应变和输出的压痕应变增量之间的关系。

表1 TC4钛合金磁控窄间隙TIG焊接参数

| 厚度/mm | 焊道总数 | 焊接电流/A | 焊接电压/V | 焊接速度/（mm·s$^{-1}$） | 填丝速度/（mm·s$^{-1}$） | 磁感应强度/mT | 电弧逆变频率/Hz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 31 | 6 | 370~390 | 16~18 | 7 | 105~110 | 8 | 20 |

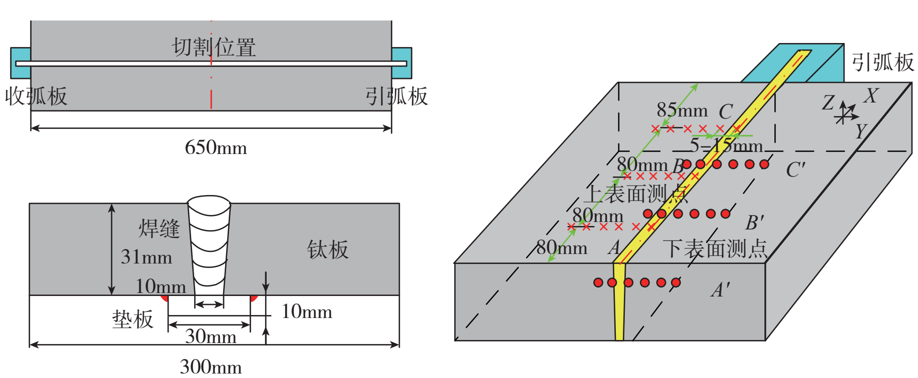



图1 上下表面应力测点示意图

Fig.1 Schematic diagram of stress determination points arrangement on the upper and lower surface

## 结果与讨论

原始焊接试板和焊接残余应力测量过程照片见图3。

为了反映焊缝长度方向上的残余应力分布特征，分别选取如图1所示的上表面*A*、*B*、*C*及下表面*A*′、*B*′、

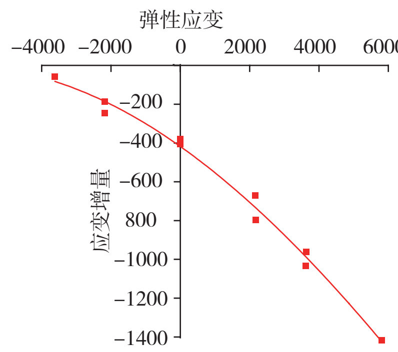
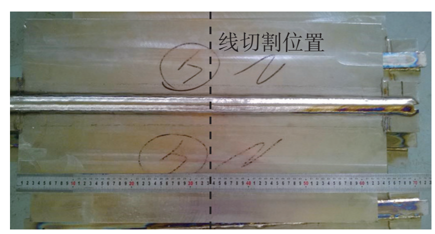
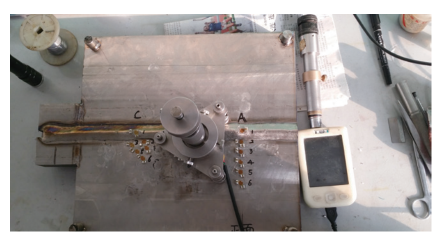



图2 TC4钛合金压痕应变法标定曲线

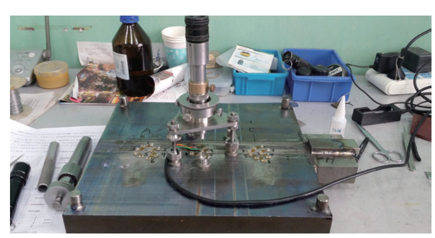
Fig.2 TC4 Ti-alloy calibration result of indentation strain-gage method




（a）磁控窄间隙TIG焊缝正面形貌



（b）半长试板热处理前焊接残余应力测量过程



（c）半长试板热处理后焊接残余应力测量过程

图3 应力测量现场照片

Fig.3 Stress determination field

$C'$ 6个位置进行焊接残余应力测量，测量结果如图4、图5所示。

图4为上表面残余应力测量结果，可以看出，热处理前纵向残余应力 $\sigma_x$ 在 $A$、$B$、$C$ 3个位置的峰值分别为357MPa、330MPa和363MPa，达到材料屈服强度的45%左右；横向残余应力 $\sigma_y$ 峰值分别为260MPa、275MPa和232MPa，达到材料屈服强度的30%左右。经过真空退火热处理，焊接残余应力明显降低，剩余峰值残余应力均低于200MPa，尤其位置 $B$ 处横向焊接残余应力 $\sigma_y$ 近乎为零，而且热处理后焊接残余应力出现重新分布。

图5为下表面残余应力测量结果，可以看出，热处理前试板下表面焊接残余应力 $\sigma_x$ 峰值出现在熔合线附近，3个位置分别为449MPa、470MPa和428MPa，达到材料屈服强度的55%~60%，高于上表面的结果。而横向残余应力 $\sigma_y$ 的数值也明显高于上表面，达到材料屈服强度的45%~55%。与前面结果相似，经过真空退火热处理，焊接残余应力峰值明显降低，剩余峰值残余应力均低于200MPa。

进一步分析图4、图5结果可以发现，在焊接状态下，试件下表面的焊接残余应力，无论是纵向还是横向，均要高于上表面的焊接残余应力，尤以横向更为明显。对于下表面来说，纵向和横向应力相差不大，但对于上表面，纵向应力要高于横向应力。最大残余应力一般位于焊缝两侧的高温热影响区。

由于该试板的焊接过程是单面多层焊，导致每焊一层焊缝都会对下表面的焊接残余应力有所叠加，同时背面垫板的刚性固定对试件产生的拘束使得焊件收缩变形更加困难，从而造成下表面的焊接残余应力高于上表面的焊接残余应力。而且对于多层焊来说，焊接残余应力的叠加效应对横向应力 $\sigma_y$ 的影响尤为明显，所以导致下表面横向焊接残余应力显著增加。

经过650℃的真空退火处理，焊接残余应力明显降低，上下表面峰值残余应力均小于200MPa，原始峰值残余应力越高，应力消除比例越为明

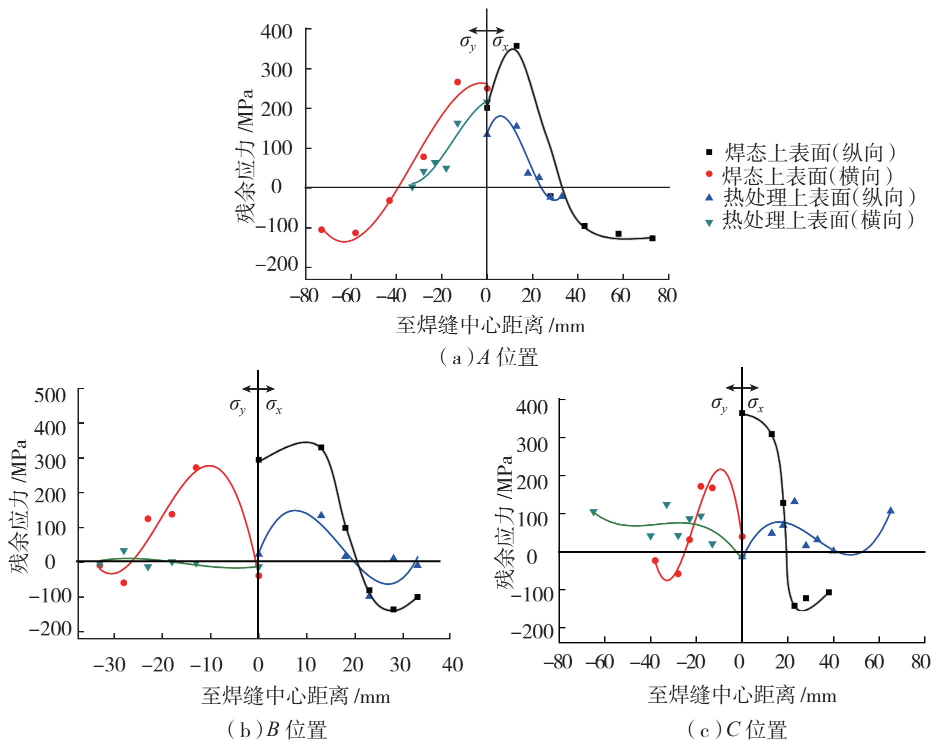



图4 31mm厚钛合金热处理前后上表面应力分布状态

Fig.4 Residual stress distributions on upper surface for 31mm thick weldment before and after PWHT

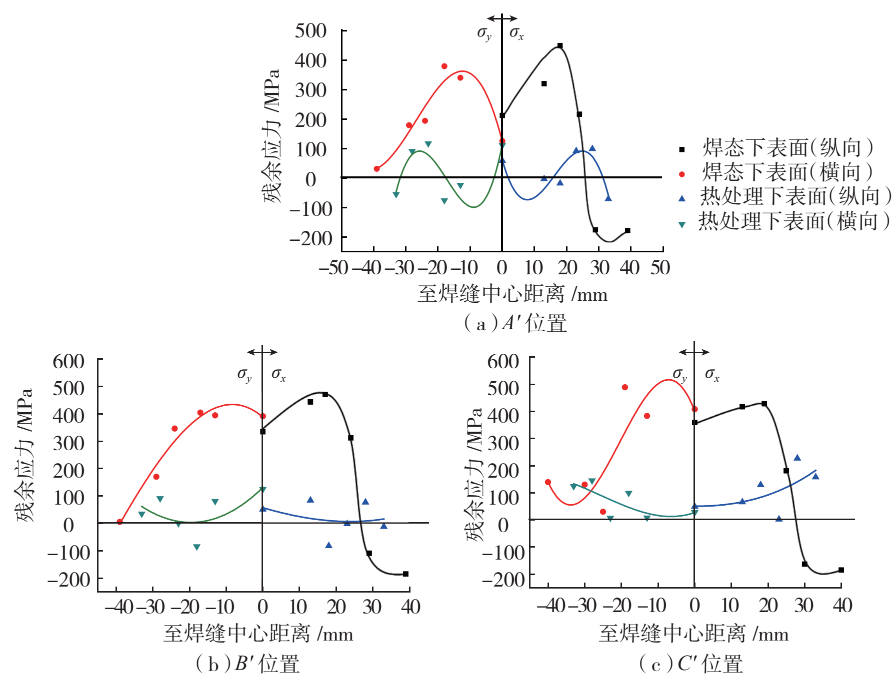



图5 31mm厚钛合金热处理前后下表面应力分布状态

Fig.5 Residual stress distributions on the lower surface for 31mm thick weldment before and after PWHT

显，焊接残余应力的分布特点也随之发生改变。

## 结论

（1）31mm厚的TC4试板经磁控窄间隙TIG焊后，试板下表面焊接残余应力要高于上表面，下表面峰值焊接残余应力达到材料屈服强度的60%，而上表面焊接峰值焊接残余应力约为材料屈服强度的45%，峰值焊接残余应力均出现在焊接接头高温热影响区附近。

（2）经过650℃真空退火热处理，焊接试板纵向和横向残余应力均显著降低，残余应力降低幅度最高超过50%，热处理后的残余应力峰值均不超过200MPa，表面残余应力出现了重新分布。

## 参考文献

[1] 吕世雄，崔庆龙，黄永宪，等．厚板钛合金窄间隙TIG焊接头组织与性能[J]. 焊接学报，2012, 33(8): 81–85.

LÜ Shixiong, CUI Qinglong, HUANG Yongxian, et al. Research on microstructure and mechanical properties of thick plate titanium alloys with narrow–gap welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(8): 81–85.

[2] 曲恒磊，周义刚，周廉，等．近几年新型钛合金的研究进展[J]. 材料导报，2005, 19(2): 94–97.

QU Henglei, ZHOU Yigang, ZHOU Lian, et al. Recent progress of study on new titanium alloys[J]. Materials Review, 2005, 19(2): 94–97.

[3] 刘全明，张朝晖，刘世锋，等．钛合金在航空航天及武器装备领域的应用与发展[J]. 钢铁研究学报，2015, 25(3): 1–4.

LIU Quanming, ZHANG Zhaohui, LIU Shifeng, et al. Application and development of titanium alloy in aerospace and military hardware[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 25(3): 1–4.

[4] 黄张洪，曲恒磊，邓超，等．航空用钛及钛合金的发展及应用[J]. 材料导报，2011, 25(1): 102–107.

HUANG Zhanghong, QU Henglei, DENG Chao, et al. Development and application of aerial titanium and its alloys[J]. Materials Review, 2011, 25(1): 102–107.

[5] BOYER R R. An overview on the use of titanium in aerospace industry[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 213(1/2): 103–114.

[6] AKHONIN S V, BELOUS V Y, ROMANYUK V S. Narrow–gap welding of up to 110 mm thick high–strength titanium alloys[J]. Welding Journal, 2010, 89(5) : 34–37.

[7] 宫平，罗宇，王亚军，等．TC4钛合金电子束焊接工艺参数对焊缝形状的影响[J]. 航空制造技术，2008, 51(6): 72–75.

GONG Ping, LUO Yu, WANG Yajun, et al. Effect of TC4 titanium alloy electron beam welding parameters on weld shape[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(6): 72–75.

[8] PATON B E, ZAMKOV V N, PRILUTSKY V P. Narrow–groove welding proves its worth on thick titanium[J]. Welding Journal, 1996, 75(5): 37–41.

[9] 郑喜刚，赵勇，蒋成禹．钛合金窄间隙TIG焊技术研究[J]. 钛工业进展，2006, 23(5): 40–43.

ZHENG Xigang, ZHAO Yong, JIANG Chengyu. Research on narrow–gap TIG welding technology of titanium alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2006, 23(5): 40–43.

[10] 吴冰，张建勋，巩水利，等．厚板钛合金电子束焊接残余应力分布特征[J]. 焊接学报，2010, 31(2): 10–12.

WU Bing, ZHANG Jianxun, GONG Shuili, et al. Residual stress distribution of large thickness titanium alloy joints by electron beam welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 10–12.

[11] 王利发，刘建中，胡本润．TA15钛合金电子束焊焊接接头力学性能[J]. 焊接学报，2007, 28(1): 97–100.

WANG Lifa, LIU Jianzhong, HU Benrun. Mechanical properties of TA15 titanium alloy electron beam welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(1): 97–100.

[12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会．金属材料 残余应力测定 压痕应变法：GB/T 24179–2009[S/OL]. [2017–12–03]. http://www.std.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=5DDA8BA05D7A18DEE05397BE0A0A95A7.

General Administration Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s, Republic of China, Standardization Administration of the People’s Republic of China. Metallic materials—residual stress determination—the indentation strain–gage method GB/T 24179–2009[S/OL]. [2017–12–03]. http://www.std.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=5DDA8BA05D7A18DEE05397BE0A0A95A7.

**通讯作者：**陈怀宁，研究员，研究方向为焊接接头性能控制技术、焊接残余应力测量和控制技术、可靠性连接技术等，E–mail：hnchen@imr.ac.cn。

# Surface Welding Residual Stresses of TC4 Ti-Alloy Weldments by Narrow Gap TIG Welding Before and After PWHT

JIANG Yunlu[1], YU Chen[2], CHEN Jing[1], CHEN Huaining[1], YI Yaoyong[2]

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Guangdong Welding Institute (Chinese-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding), Guangzhou 510650, China)

**[ABSTRACT]** 31mm thick TC4 Ti-alloy plates were welded by magnetically controlled narrow gap TIG, the surface residual stress distributions were measured by indentation strain-gage method before and after vacuum post-welding heat treatment (PWHT). The results show that the levels of longitudinal and transverse residual stress is all high on the weldment surface. The residual stresses on the lower surface are little higher than that on the upper surface, especially for transverse residual stress. The residual stresses peak value of the weldment exists in the high temperature heat affect zone, which reaches 50%–60% of the material yield strength. After 650°C vacuum post-welding heat treatment, longitudinal and transverse stresses on the weldment surface are significantly reduced, maximum stress reduction is more than 50%, the residual stress peak value left on the surface doesn't exceed 200MPa, and the original welding residual stresses on the surface go to redistribute.

**Keywords:** TC4 Ti-alloy; Narrow gap TIG welding; Residual stress; Vacuum post-welding heat treatment; Indentation strain-gage method

（责编　逸飞）

（上接第54页）

al. Dynamic coupling between molten pool and metallic vapor ejection for fiber laser welding under subatmospheric pressure[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 431–438.

[31] LUO Y, TANG X H, LU F G, et al. Spatial distribution characteristics of plasma plume on attenuation of laser radiation under subatmospheric pressure[J]. Applied Optics, 2015, 54(5): 1090–1096.

[32] LUO Y, TANG X H, LU F G, et al. Effect of subatmospheric pressure on plasma plume in fiber laser welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215: 219–224.

[33] LUO Y, TANG X H, LU F G. Experimental study on deep penetrated laser welding under local subatmospheric pressure[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(5–8): 699–706.

[34] 罗燕，唐新华，芦凤桂，等．局部负压激光焊缝成形特点及其影响因素 [J]. 中国激光，2014(6): 96–101.

LUO Yan, TANG Xinhua, LU Fenggui, et al. Effects of welding parameters on bead formation of laser welding[J]. Chinese Journal of Lasers. 2014(6): 96–101.

[35] JIANG M, TAO W, WANG S L, et al. Effect of ambient pressure on interaction between laser radiation and plasma plume in fiber laser welding [J]. Vacuum, 2017, 138: 70–79.

[36] SCHNEIDER A, GUMENYUK A, RETHMEIER M. Mobile vacuum device for laser beam welding of thick materials[C]//Proceeding of 3rd International Conference in Africa and Asia on Welding and Failure Analysis of Engineering Materials. Luxor, 2015.

[37] SCHNEIDER A, GUMENYUK A, RETHMEIER M. Laser beam welding of thick materials under the influence of a local reduced ambient pressure[C]//Proceedings of Conference 8th, Beam Technologies and Laser Application. Petersbug, 2015.

通讯作者：唐新华，教授，研究方向为重大构件材料控性焊接、先进焊接方法与控制，E–mail：xhtang@sjtu.edu.cn。

# Review of Laser Welding Under Subatmospheric Pressure

WANG Tiange[1,2,3], TANG Xinhua[1,2,3]

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
3. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

**[ABSTRACT]** Compared with traditional welding methods, high-power laser welding is characterized by high efficiency and good welding quality, especially in the welding process of thick plates. However, it was found out in recent researches when the laser power increased to a certain level, the welding penetration won't get deeper any longer due to the absorption, refraction and the scattering effect of the plasma plume. That is generated by the evaporation of metal, and to prevent the laser beam from entering the keyhole. Welding under subatmospheric pressure is regard as an effective method and has an impressive promotion on both welding penetration and porosity defects. The development of the high-power laser welding under subatmospheric pressure, as well as some relevant issues are summarized according to recent researches.

**Keywords:** Laser welding under subatmospheric pressure; Penetration depth; Porosity; Molten pool behavior; Plasma plume

（责编　李丹）