第 50 卷 增刊
2016 年 7 月

上 海 交 通 大 学 学 报
JOURNAL OF SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

Vol. 50 Sup.
Jul. 2016

文章编号：1006-2467(2016)S-0102-04　　DOI：10.16183/j.cnki.jsjtu.2016.S.026

低合金钢 Q345 的深熔 TIG 焊研究

樊文飞[1,2]，罗　震[1,2]，冯悦峤[1,2]，李　洋[1,2]，敖三三[1,2]

（1.天津大学 材料科学与工程学院，天津 300072；
2.高新船舶与深海开发装备协同创新中心，上海 200240）

摘　要：针对 8 mm 厚 Q345 低合金钢的深熔 TIG 焊中焊接电流、焊接速度、保护气体流量对 Q345 焊缝成型的影响进行了研究，并对成型较好的焊接接头进行了硬度测试和金相观察．试验结果表明，虽然深熔 TIG 焊在对低合金钢焊接时的焊接参数不稳定，焊接窗口较窄，不易形成良好的焊缝．但在适当的焊接条件下，可以实现深熔 TIG 焊对 8 mm 厚 Q345 的一次性单面焊双面成型，焊缝性能较好并且成型良好的焊缝区组织由铁素体和少量针状贝氏体组成，焊缝熔合区和热影响区的硬度较母材上升了 50%，无软化现象．具有继续研究深熔 TIG 焊应用于低合金钢 Q345 的意义．

关键词：深熔 TIG 焊；低合金钢；力学性能；金相组织
中图分类号：TG 453.9　　文献标志码：A

Study on the Deep Penetration TIG Welding of Q345 Steel

FAN Wenfei[1,2]，*LUO Zhen*[1,2]，*FENG Yueqiao*[1,2]，*LI Yang*[1,2]，*AO Sanan*[1,2]

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Collaborative Innovation Center of Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper studies the deep penetration TIG welding of Q345 steel plate with 8 mm thickness. The effects of welding current, welding speed, gas flow rate on the weld appearance were investigated. The microstructure and mechanical properties of the weld joint made by the optimized welding parameters was studied. The results show that the parameters of the welding are not stable. The fusion zone of the weld joint with good performance consisted of low-carbon martensite and needle-like or feathery bainite. The hardness of fusion zone is increased by 50% than that of base metal. This indicated that the one-side welding with double-sided shaping of 8 mm thickness Q345 steel can be realized by the deep penetration TIG welding.

Key words: deep penetration TIG; low alloy steel; mechanical properties; microstructure

目前大量中厚板用于船舶的建设，而船舶建设中 70%的工作量和 30%-50%的成本涉及焊接，当前常用的低碳钢中厚板焊接方法有埋弧焊、二氧化碳气体保护焊、多丝焊和激光-电弧复合焊等．其中

收稿日期：2016-05-25
基金项目：高等学校博士学科点专项科研基金(20130032110004)；国家自然科学基金面上项目(51275342)；国家自然科学基金面上项目(51275338)；国家自然科学基金青年项目(51405335)
作者简介：樊文飞(1992-)，男，籍贯山西临汾，硕士研究生．主要从事点焊及深熔 TIG 焊方面的科研工作．E-mail：120882989@qq.com.
通讯作者：罗震，教授，电话(Tel.)：13302055307；E-mail：lz@tju.edu.cn.

埋弧焊、二氧化碳气体保护焊、多丝焊需要进行焊前处理，焊接工艺复杂且效率不高，激光-电弧复合焊需要精密的焊接条件以及复杂的焊接设备，所以很有必要对中厚板新的焊接方法进行研究。

深熔 TIG 焊是一种新颖的中厚板焊接方法，它是在传统 TIG 焊接方法的基础上，通过大电流（> 300 A）形成的较大电弧压力与熔池液态金属表面张力实现相对平衡形成小孔而实现深熔焊的焊接方法[1,2,3]，具有高速、高效、低成本的优势。

目前澳大利亚的 Lathaba[1] 和国内天津大学的冯悦峤[4]等人就深熔 TIG 焊对锆及不锈钢等低热导率材料的焊接性进行了研究，但未有学者研究热导率较高材料诸如低合金钢的深熔 TIG 焊，所以对广泛应用的低合金钢的深熔 TIG 焊进行研究具有重要意义。

本文使用低合金钢 Q345，由于 Q345 系列钢用于中厚板的焊接时间久，在中厚板的产量中所占比例大，涵盖品种规格范围最多[5]，选用 Q345 的其中一种作为试验材料具有一定的代表性，本文研究了深熔 TIG 焊方法焊接参数对焊接 8 mm 厚的 Q345 低合金钢板焊缝成型的的影响，对成型较好的焊缝进行了金相组织观察和硬度测试。

1　试验方法

本试验采用自行设计搭建的深熔 TIG 焊焊接平台系统，包括深熔 TIG 焊电源、深熔 TIG 焊枪、水冷箱和行走平台等，母材选用 8 mm 厚的 Q345 低碳钢板，其化学成分如表 1 所示，为保证焊接过程中的稳定性以及防止工件表面的油污、杂质等对焊接过程造成影响，焊前对焊接板材用细钢丝刷进行机械清理，然后用乙醇清洗表面油污、尘垢，焊接时使用夹具来保证接头的装配精度。

表 1　Q345 的化学成分　　w/%

C	Mn	Si	S	p
0.17	1.48	0.35	0.08	0.21

表 2　深熔 TIG 焊优化焊接参数

焊接电流 I/A	焊接速度 v/mm·min^{-1}	钨极间距 L/mm	钨极尖端角度，θ/(°)
530	250	0.5	90

本文使用控制变量法来分别研究不同焊接参数对平板堆焊焊缝成型的影响，研究的焊接参数包括焊接电流、焊接速度、保护气体流量，此后进行了堆焊焊接工艺参数的优化，得到了较优化的焊接参数列于表 2，对在优化焊接参数下得到接头进行硬度性能测试和金相观察，硬度测试采用维氏硬度方法，保压时间 10 s，打点位置横跨母材、焊接热影响区、焊缝熔合区，打点间隔为 0.5 mm，在焊缝区域沿垂直于焊缝方向截取金相试样进行观察，对试样进行预磨和抛光处理，用 4% 的 HNO_3 酒精溶液进行腐蚀。

2　试验结果

2.1　焊接参数对焊缝成型的影响

如图 1 所示，在焊接电流对焊缝成型影响的研究中，随着焊接电流的增大，焊缝的熔宽基本没有变化，主要增大的是焊缝的熔深和深宽比，当焊接电流达到最佳参数时，焊缝的熔深为 8，是由于所规定的焊接熔深即为母材的上表面到焊缝熔池的相对距离而不包括余高，说明电流的增大主要增加的是焊接过程中电弧的穿透力和垂直方向的热输入，当电流很小的时候，电弧的穿透能力有限，这时由钨极发射的离子束的能量和速度也较低，较低能量的离子打在未焊透熔池的底部发生折射从而产生焊接过程中的气孔，当焊接电流增大直至产生焊接过程中的小孔时，焊接气孔消失，当焊接电流继续增大，热输入过大，无法维持熔池重力、表面张力的平衡，这时就会发生熔池的坍塌，所以合适的电流能够消除气孔并获得良好的焊缝。

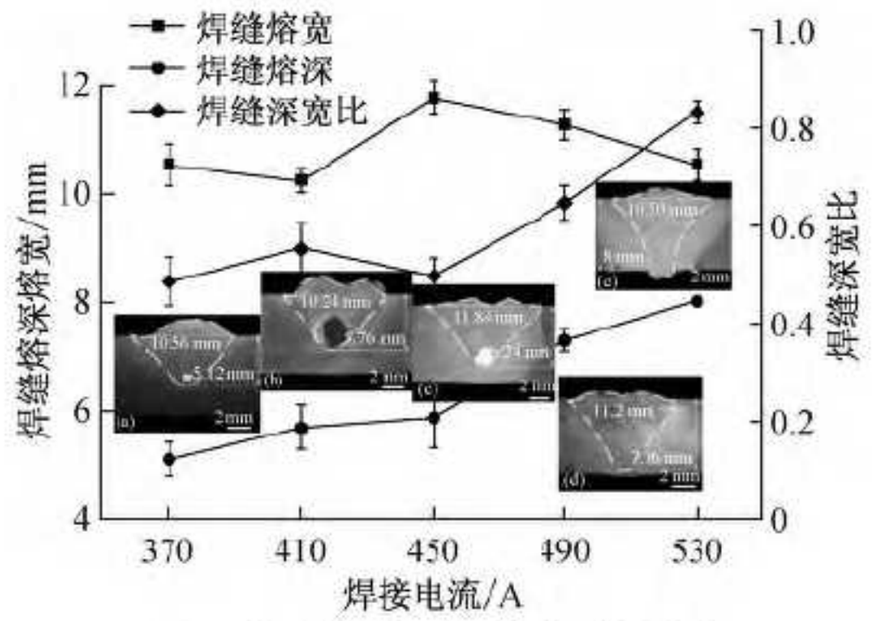


图 1　焊接电流对焊缝成型的影响

实验过程所使用的保护气体为普通氩气，氩气为深熔 TIG 焊接过程提供导电离子和保护环境，从图中 2 可以看到保护气体对于焊缝熔宽的影响较大，随着保护气体流量的增加，焊缝的熔宽减小，因为保护气体流量的增加为焊接过程中的电弧提供更多的导电粒子从而增加了电弧的穿透力和垂直方向的热输入，但是保护气体的流量对熔深的影响并非十分显著，如图所示，当保护气体流量较小时，保护环境容易受外界环境和电弧变化影响从而产生气

孔. 但是当保护气体流量过大为 30 L/min 时, 过大的保护气体反而容易在熔池中产生紊流从而削弱电弧穿透力, 所以最适宜的保护气体流量为 25 L·min^{-1}.

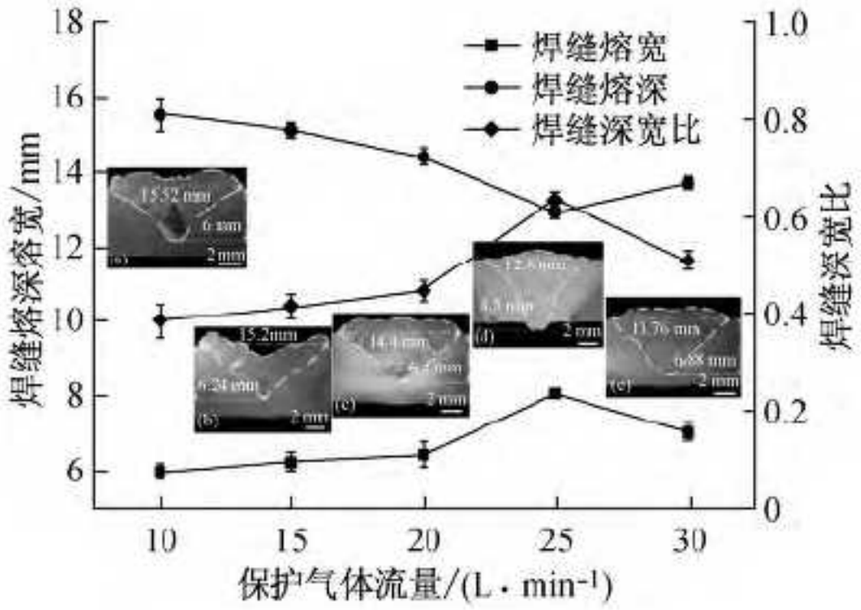


图 2 保护气体对焊缝成型的影响

图 3 为焊接速度对焊缝成型的影响, 从图中可以看出焊接速度的改变对于焊缝的熔宽和熔深都有影响, 对于焊缝的深宽比则没有太大的影响. 这说明焊接速度下的单位热输入基本没有改变. 当焊接速度逐渐增大时, 单位热输入没有变化, 但是此时的焊接过程不稳定, 电弧中的离子更容易与熔池壁碰撞折射使熔池不稳定而产生气孔.

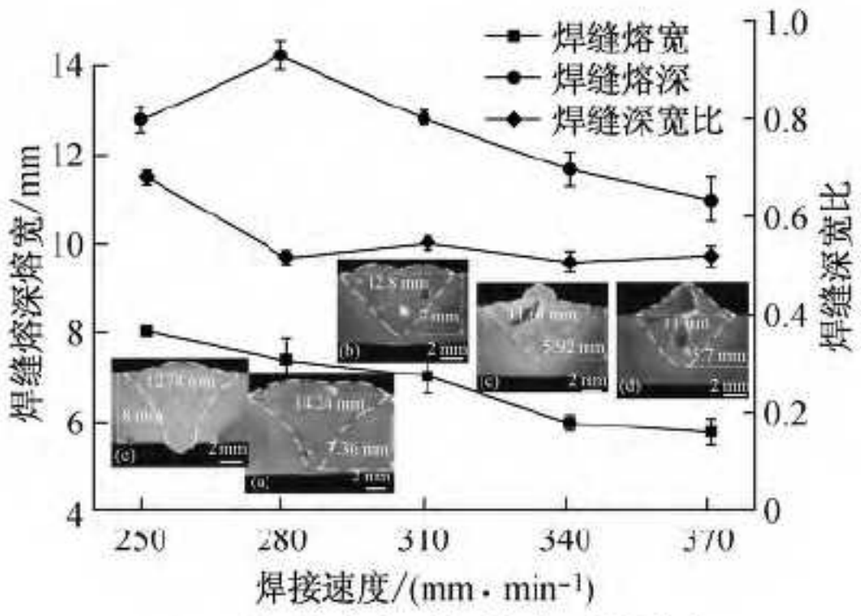


图 3 焊接速度对焊缝成型的影响

2.2 焊接接头组织分析

图 4 所示为在较优化参数下的焊缝断面宏观金相图, 整个宏观断面图中包括母材、焊接热影响区、焊缝熔合区. 宏观金相中并未出现 Q345 钢焊接时易出现的气孔及冷裂纹缺陷.

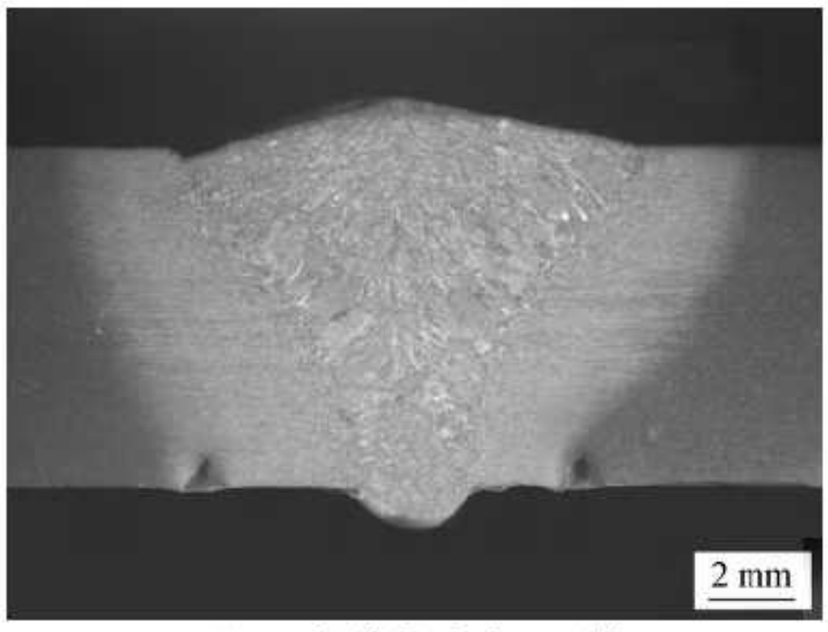
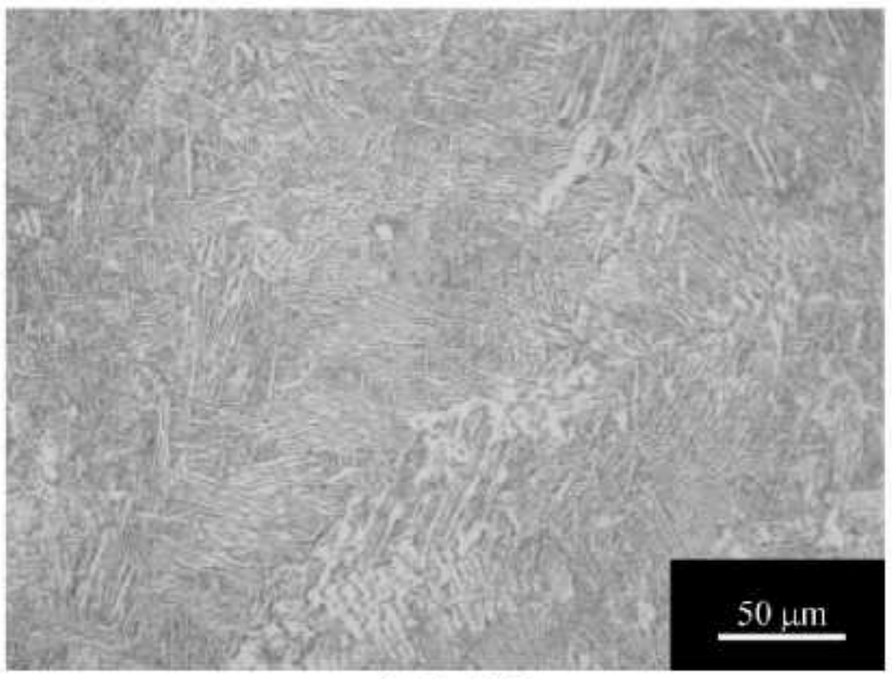
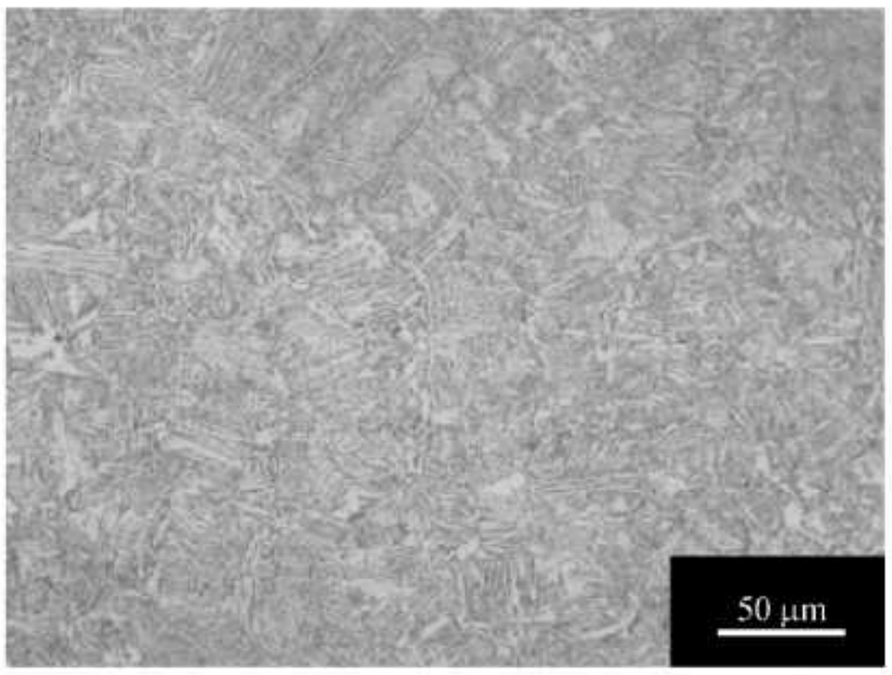


图 4 焊件接头宏观形貌

如图 5 所示, 在焊缝的显微组织中, 最先发生铁素体的析出, 共析出的铁素体沿柱状晶界分布. 晶体内的主要物相有由晶界向晶内生长的无碳贝氏体, 针状铁素体和少量的粒状贝氏体, 并稍呈条状分布. 相较焊缝中心, 熔合线附近的冷却速率更大, 所以更易形成板条状马氏体组织. 热影响区域的过热区处于过热状态, 该区域个别部位细片状先共析铁素体沿晶界分布, 晶内为针状铁素体和少量的粒状贝氏体和马氏体. 热影响区的正火区内有大量小块的铁素体和珠光体, 灰色部分为马氏体[6].



(a) 焊缝熔合区



(b) 热影响区微观组织

图 5 焊缝微观组织

2.3 硬度试验结果分析

对焊缝进行硬度测试, 测试位置与硬度曲线如图 6 所示. 在焊缝热影响区平均硬度为 244.25 HV, 熔合区的硬度约为 258.5 HV, 相较与母材 170 HV 的硬度, 热影响区硬度上升了 43.6%, 熔合区硬度上升了 52%. 热影响区以及熔合区并未出现软化现象, 这是由于出现贝氏体及低碳马氏体组织, 从而使热影响区与焊缝熔合区硬度显著变大.

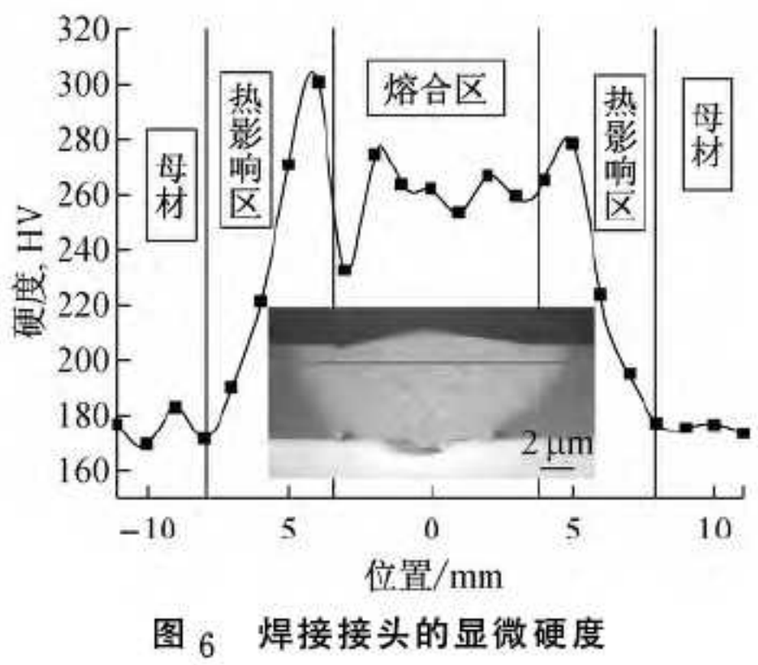


图 6　焊接接头的显微硬度

3　讨　论

对低合金钢 Q345 进行深熔 TIG 焊的参数实验时发现，焊接 Q345 等高热导率材料相较焊接不锈钢等低热导率材料时的熔池小孔不稳定，焊接小孔也不易形成，能够形成良好焊缝的焊接参数窗口窄。这是因为深熔 TIG 焊是一种典型的小孔焊接方法，小孔的稳定保持主要是靠电弧压力、液态熔池的重力和背部焊道液态金属的表面张力之间达到平衡来实现的。与激光焊接等高能束焊接方法相比，深熔 TIG 焊热源的集中程度和能量密度较差。所以在焊接不同热导率的材料时的电弧能量集中程度不同。当被焊材料的热导率较高时，焊接电弧产生的热量会有较大的一部分在热传导的作用下用于熔化电弧作用范围周边的材料金属，一方面导致电弧熔透能力的下降，另一方面会造成熔池体积的加大。相对更高的电弧力和更大的液态熔池重力对于深熔 TIG 焊小孔的维持都具有不利的影响，容易在焊接过程中导致熔池的下淌甚至塌陷，无法完成小孔焊接过程。而且 Q345 低合金钢板，不仅材料本身的热导率较高，其液态下的表面张力系数也很小，只有不锈钢的大约三分之一，液态金属产生的表面张力更加难以托住液态熔池，所以使用深熔 TIG 焊焊接 Q345 低碳钢板时很难获得理想的单面焊双面成型焊道。但是在实验中发现，在焊接中对工件冷却可以有效改善焊接过程中焊缝不易成型的缺陷。

4　结　论

(1)焊接参数影响 Q345 焊缝成型，但是 Q345 的焊接窗口较窄，焊接过程不稳定，仍需要一定的工艺改善促进其成型稳定。

(2)成型良好的焊缝，无冷裂纹及气孔。焊缝熔合区及热影响区的组织得到一定程度的强化，组织主要由马氏体及贝氏体组成。对成型良好的焊缝进行硬度测试无软化现象，焊缝性能基本良好。仍有将深熔 TIG 焊应用在 Q345 低合金钢的研究意义和对 Q345 的焊接参数稳定进行后续试验的必要。

参考文献：

[1] LATHABAI S, JARVIS B L, BARTON K J. Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium[J]. **Materials Science and Engineering A**, 2001(299): 81-93.

[2] 栗海霞. K-TIG 焊接电弧特性的数值分析[D]. 兰州理工大学, 2011.

[3] 张瑞华, 栗海霞, 李明, 等. K-TIG 焊接电弧特性的数值分析[J]. 电焊机, 2012, 12: 7-11.

[4] FENG Yueqiao, LUO Zhen. Keyhole gas tungsten arc welding of AISI 316L stainless steel[J]. **Material and design**, 2015(85): 24-31.

[5] 郭慧英, 许红梅, 张宇, 等. Q345 超细晶粒钢的焊接性能[J]. 金属热处理, 2013, 6: 9-14.

[6] Y. XIONG, X. X. HU. The effect of microstructures on fatigue crack growth in Q345 steel welded joint[J]. **Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures**, 2012(35): 500-512.