K-TIG焊接技术研究进展及在核电中的应用前景

曾凡勇，肖志威，柯联邦，朱称生，方一
中国核工业第二二建设有限公司　湖北武汉　430051

摘要：K-TIG作为新兴的自动高效焊接技术，其在中厚板焊接领域具备独特的优势。介绍了K-TIG焊接技术的原理、特点及关键技术，概括了不同材料的K-TIG焊接研究情况，介绍了目前热门的复合K-TIG焊接技术，分析了K-TIG技术用于核电中厚板焊接的优势与前景，为各位学者和应用单位提供一定的借鉴。

关键词：K-TIG；中厚板；碳素钢；不锈钢；核电

1　序言

焊接作为制造技术的重要支撑，一直以来起到了举足轻重的作用。受到国内制造业精细化发展、自动化水平提升、高技能焊工资源稀缺等多方面影响，高效自动焊接技术已成为新的发展趋势及急迫需求。其不仅可降低对焊工的依赖，而且在提升焊接质量和焊接效率、降低焊接成本及提升公司综合竞争力方面具有明显优势。

核电中厚板的焊接主要采用焊条电弧焊、埋弧焊、手工TIG焊等，为了提高焊接效率，热丝TIG焊、等离子弧焊等也开始逐步被应用，尤其是不锈钢覆面车间拼板的焊接。本文介绍了K-TIG（Keyhole-TIG）焊接技术的原理、特点及关键技术，不同材料的K-TIG焊接研究成果及最新研究动态，并概括了K-TIG技术在核电行业的应用前景，为各位学者和应用单位提供一定的借鉴。

2　K-TIG焊接原理及特点

K-TIG焊接技术于1997年由澳大利亚联邦科学与工艺研究组织（CSRIO）提出并发明。它是在传统TIG焊的基础上，将焊接电流提高到300A甚至更高并配合枪身冷却加强的焊枪来形成小孔效应，最终实现大熔深的焊接工艺方法，其原理如图1所示[1]。K-TIG焊接时，因为大电流的存在，电弧对工件不断进行熔化与深挖，形成凹陷，并将熔融金属不断排挤到熔池周围，直到小孔的形成。小孔周围的熔融金属受到电弧压力、表面张力及自身重力作用并保持动态平衡。焊枪在向前移动过程中，小孔也随之移动，直到小孔后方的熔融金属冷却形成焊缝。

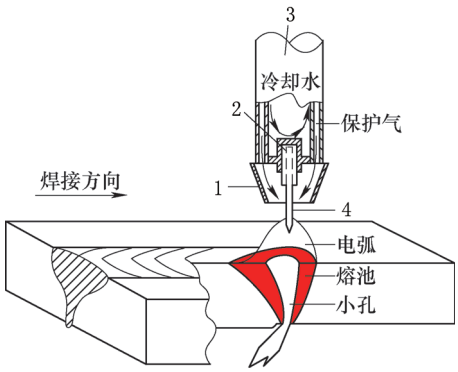


图1　K-TIG焊接原理[1]

1.喷嘴　2.纯铜导电嘴　3.自主设计焊枪　4.钨极

与K-TIG焊接原理不同，等离子弧焊接采用的是压缩电弧，通过机械压缩和气流压缩提升电弧密度和弧柱区温度，一般当电流为100A时即可实现小孔法焊接。随着板厚的增加，需更大的电弧吹力将试板穿透，一般最佳板厚为3~8mm。在最佳板厚范围内，可通过调整电弧吹力（气体流量）来保证小孔焊接的稳定性，而保护气流量对K-TIG焊接电弧压力几乎没有影响[2]。

K-TIG主要依靠自身电弧大电流密度产生的电磁场自我约束，压缩程度不及等离子弧，基本形状仍为锥形。而等离子弧焊因为喷嘴和气流的双重约束，一般电弧张角不超过5°[3]。因此，等离子弧对组对间隙和最大错边量有严格的要求，一般而言，等离子弧焊接最大错边量一般控制在1mm以内。而

K-TIG可容许的最大组对间隙为2mm，最大错边量可控制在2mm以内。接头性能上，采用K-TIG焊接碳素钢时，接头冲击性能较差，甚至在−20℃时冲击性能不合格，见表1。这是由于K-TIG焊接热输入较大，导致焊缝和热影响区晶粒粗化，性能较低[4]。

表1 Q345R碳素钢接头的力学性能[4]

试验项目	抗拉强度/MPa	弯曲试验	−20℃冲击吸收能量/J（55mm×5mm×10mm）	
			焊缝	热影响区
K-TIG	560、560	面弯、背弯合格	17、18、13	19、24、18
PAW	520、520	面弯、背弯合格	67、70、60	56、64、61

3 K-TIG关键技术

K-TIG焊接可以在不开坡口情况下一次熔透一定厚度的板材，实现单面焊双面成形。但针对不同的材料，能够一次焊透的厚度也不相同，这与材料本身的物理性质相关。由K-TIG焊接技术的原理可知，要想实现稳定的焊接，其关键技术在于保证小孔的稳定性，即保证焊接过程电弧压力、熔池重力及表面张力的动态平衡。根据研究，稳定性的影响因素包括物理性能、试件厚度、钨极尺寸、保护气成分及焊接参数（焊接电流、电弧电压、焊接速度）等。

LATHABAI等[5]提出实现稳定焊接需满足公式：

$$wh<\lambda/\rho g$$

式中 λ——表面张力系数；

ρ——熔融金属的密度（kg/m^3）；

g——重力常数；

w——焊接过程背面焊缝小孔的宽度（mm）；

h——焊件的厚度（mm）。

一般而言，材料表面张力随着温度升高而降低，且碳素钢的表面张力系数约为不锈钢的1/3，因此使用K-TIG焊接碳素钢时需注意小孔的稳定性问题。焊接过程中熔融金属表面形成的表面张力越小，能够托住焊缝金属使其不下坠的能力就越弱。小孔的宽度越小，焊件的厚度越小，则形成的熔融金属相对就少。另外有学者认为，表面张力与液态金属化学成分有关，特别是S、O含量，在铁基体金属中，高S、O含量会降低表面张力，并降低焊接稳定性。

国内天津大学、华南理工大学等在研究K-TIG焊接稳定性方面做了很多研究，比如观察分析小孔的特征，研究成形规律，通过工装、工艺甚至复合焊接的方式增大工艺窗口和稳定性等，取得了一定的进展。

4 国内外研究现状

4.1 不锈钢K-TIG焊接

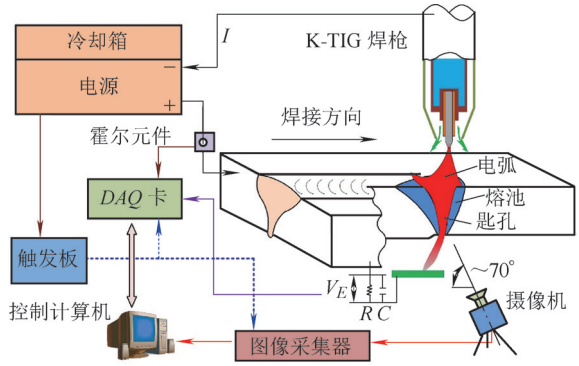
多项研究表明，K-TIG焊可以在不开坡口的情况下，对一定厚度的金属板材一道焊透，实现单面焊双面成形。针对不同的金属板材，K-TIG焊能够一道焊透的最大板厚也不相同，这主要是因为不同金属材料的液态金属导热系数也不相同。如早期ROSELLINI等[6]进行了可焊材料K-TIG全熔透焊接试验，结果表明，K-TIG适合于焊接奥氏体不锈钢、镍基合金、钛合金、奥氏体-铁素体双相钢等材料。

熊剑[1]研究了6mm厚304不锈钢K-TIG焊接，熔深随着焊接电流增加而增加，当电流达到380A时，可实现熔透焊接，且当电流超过300A时存在Mn元素烧蚀情况。另外，对比了K-TIG与等离子弧焊接头的差异，K-TIG焊接电流几乎是等离子弧焊的2倍，焊接接头熔宽和余高稍大，接头力学性能均与母材相当。

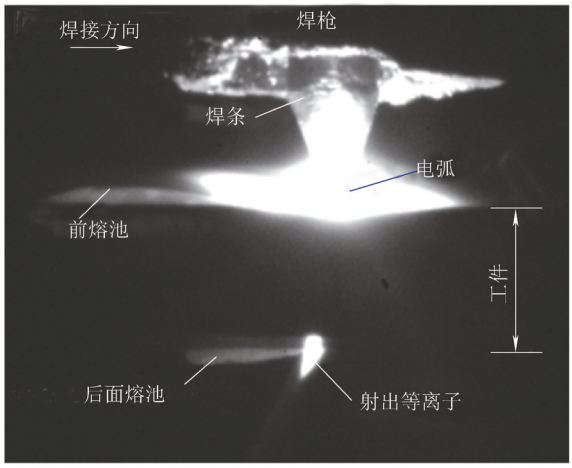
LIU Zuming等[7]采用自制的K-TIG焊枪对8mm厚不锈钢进行焊接，并采用CCD高速相机对小孔的特征进行观察分析（见图2），且对背部小孔特征参数化。研究结果表明，稳定焊接过程小孔呈椭圆形，且处于焊枪轴线后方。同时观察到焊接过程中小孔呈现稳定的开孔特征，小孔的尺寸与焊接电流有关。

CUI Shuwan 等[8]采用K-TIG实现了10.8mm厚S32101双相不锈钢焊接，接头抗拉强度和硬度高于母材，焊缝冲击性能达到了母材的83.4%。

冯悦峤[9]研究了10mm厚316L不锈钢K-TIG焊接，实现了不开坡口自熔焊接，发现焊接电流、焊接速度、钨极间距及保护气流量对焊缝形状有较重要影响。焊接接头射线检测合格，接头抗拉强度达到母材的96.64%，焊缝冲击性能达到母材的92.2%。通过电化学腐蚀试验，焊缝的抗腐蚀性能优于母材。因此证明K-TIG焊接非常适于中厚板不锈钢的单面焊双面成形，目前等离子弧焊还无法



a）试验系统



b）K-TIG焊接过程

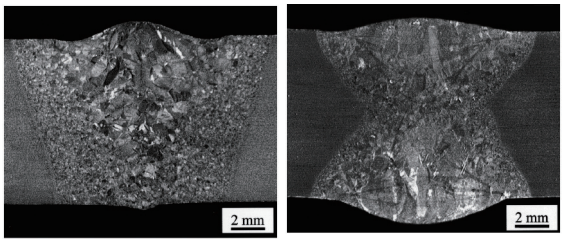
图2 试验系统及K-TIG焊接过程[7]

做到。

XIE Yan等[10]采用K-TIG焊接了8mm厚430铁素体不锈钢，接头优良，抗拉强度为母材的59.2%，达到了传统气体保护焊、GTAW的强度，但焊缝区的抗腐蚀性能降低。另外，还采用了高频脉冲K-TIG焊接，与常规K-TIG相比，可降低焊接热输入，接头强度增加35.6MPa。

从以上研究可以看出，K-TIG非常适合不锈钢中厚板焊接，最大厚度可达到10mm，接头强度优于母材。

除了不锈钢外，LATHABAI等[5]还采用K-TIG焊接12.7mm厚商业纯钛，并与传统的TIG焊接技术进行了对比（见图3）。结果表明：采用K-TIG焊接的热输入更大，加热速率和冷却速率也更大，因此热影响区宽度更广，晶粒大小差异更大。但接头横向拉伸性能差异不大（K-TIG：538MPa，TIG：542MPa）。K-TIG焊接在生产效率上更具有发展前景，相比于传统TIG的多层多道焊（6层），K-TIG焊接实现了单面焊双面成形。



a）K-TIG焊接　　b）TIG焊接

图3 焊接接头微观组织[5]

4.2 碳素钢K-TIG焊接

尽管K-TIG焊接在中厚板一次焊透方面具有明显的优势，但随着学者的研究发现，对于碳素钢类材料的焊接存在一定的局限性。其主要原因在于焊接过程不稳定，因此国内外学者对此进行了分析，并从焊接工艺、工装及其他方面采取措施进行研究，一定程度上拓宽了K-TIG焊接技术的材料适用性。

K-TIG焊接过程小孔的稳定性是保证焊接质量的前提，小孔的稳定性与电弧压力、熔池重力和熔池表面张力有关。诸多学者发现，采用K-TIG焊接碳素钢时稳定性不够，分析认为主要与材料的导热系数、表面张力有关，通过采取各种措施进行改善，取得了一定的进展。

樊文飞等[11]通过对8mm厚Q355钢进行焊接试验，结果表明，焊接过程不稳定，且工艺窗口较窄。认为主要是材料本身热导率较高[碳素钢约为0.59W/（m·K），奥氏体不锈钢约为0.14W/（m·K）]，电弧熔化金属增多，熔池体积增大，而碳素钢熔融金属表面张力小（约为不锈钢的1/3），因此容易打破三力平衡，导致小孔失稳。

王泰等[12]采用在待焊工件背后铺加保护焊剂（SJ101），对8mm厚Q235低碳钢进行K-TIG焊接，焊接过程如图4所示。焊剂的加入有效增大了焊接窗口（430~480A），提高了焊接过程的稳定性。因此可以认为焊剂的加入在熔化过程因吸热而减少了热积累，同时在焊接过程中起到了托举背部熔池的作用。但此种方法有一定的局限性，原因之一在于焊剂的铺设与回收可能成为另一个问题，但这也从侧面证明了使小孔稳定存在的可行性。此外，焊剂对焊缝化学成分的影响研究也并未考虑。保护焊剂的添加在对熔融金属起到托举作用的同时，可能也改善了表面张力，这给熔融金属表面张力较小类的金

属带来一定的改善方向。

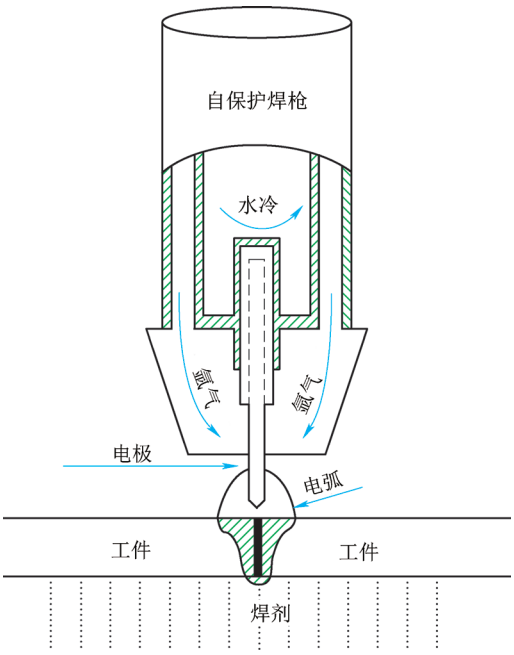


图4 焊接过程[12]

Fan Weifei等[13]采用水冷方式对8mm厚Q355钢进行焊接（见图5），并采用有限元方法模拟了焊接过程的温度场。结果表明：采用水冷方式成功实现了K-TIG焊接，其减小了焊缝根部熔宽，且因为水冷的原因增大了熔池的托举力。焊缝底部温度场较常规K-TIG焊接差异较大，焊缝冷却速度增大，且峰值温度相差600℃左右。焊缝表面组织和底部组织差异较大，HAZ组织在厚度方面比较均匀，因为K-TIG较大的热输入，焊缝并未出现马氏体组织。焊缝、热影响区、母材的冲击吸收能量分别为126J、130J、140J。文中并未研究水冷对焊缝化学成分的影响，尤其是H元素，尽管文中解释了因为试件上表面的干燥避免了电弧中H的引入。

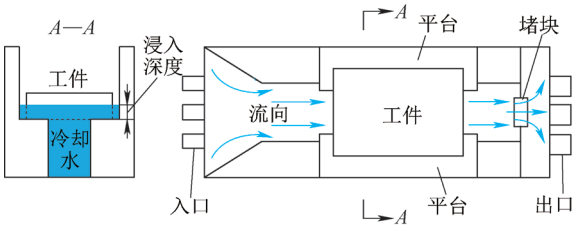


图5 水冷焊接原理[13]

国内学者徐良等[14]分析了10mm厚Q235钢的焊接难度问题，认为主要与焊接过程的大热输入和热积累有关，导致在开始出现焊透，焊缝背面的金属由固态瞬间变成液态的过程中，液态熔池的重力、表面张力失衡，焊缝成形出现坍塌失稳。为此有针对性地设计了焊接/工装平台（见图6），开槽宽度小于热影响区宽度，通过改变散热条件维持熔池的体积在一定范围之内，同时在焊接时设置一定的装配间隙，减小所需电弧压力，使电弧更易穿透。结果表明，焊接稳定性增加，工艺窗口能有效拓宽，且接头室温冲击吸收能量达到132J，远大于母材的65J。

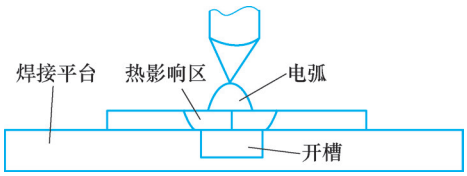


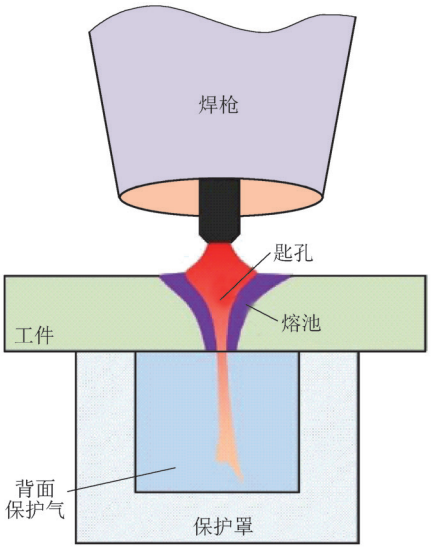
图6 K-TIG 焊接平台截面[14]

天津大学LIU Zuming等[15]采用背面充Ar气体保护方式焊接16Mn低合金钢（见图7）。研究表明，若背面没有气体保护，则很难进行稳定焊接；当背面充满静态Ar后，在焊接电流为410~450A时可实现稳定焊接。当保护气体为射流时，因为附加压力的存在，所以焊接过程的稳定性增加，电流范围扩大到420~560A。同时大电流的增加对接头的质量没有明显影响。另外，理论分析了气体的引入对稳定小孔的机理，基本原则还是力的动态平衡。

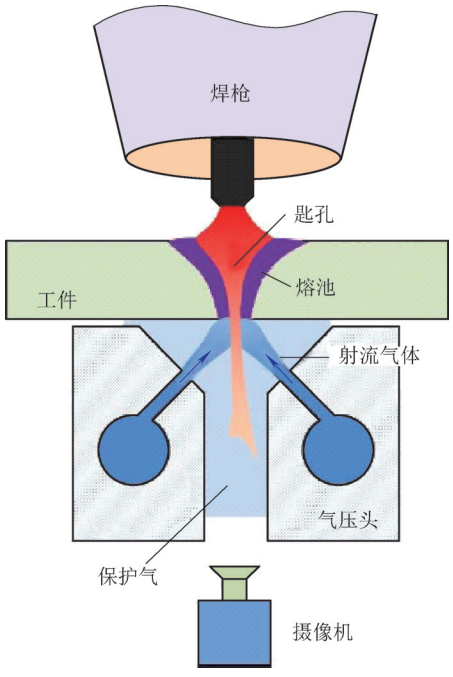
除了采用背面气体保护方法之外，FANG Yuexiao等[16]首次采用高频电流（见图8），以提高5.5mm厚Q355钢K-TIG焊接接头的组织及力学性能。试验采用38.6kHz的高频电流，与常规K-TIG焊接技术相比，高频K-TIG稳定焊接时焊接电流从430A降低到340A，实现稳定焊接的电流值得到降低（430~460A降低到340~420A）；采用高频电流后，焊缝区晶粒组织更加细化，且针状铁素体含量增多，接头力学性能高于母材。通过电弧形态发现，采用高频电流焊接电弧宽度受到一定的压缩。

4.3 复合K-TIG焊接技术

为了弥补K-TIG焊接的缺点，随着研究的深入，有学者开始引入复合焊接技术，主要包括磁场复合、激光复合。磁场在焊接中的应用可追溯到1962年，Brown发现在焊缝中引入磁场后，电磁搅拌效应可对焊接组织起到明显的晶粒细化作用。此后磁场复合焊接技术引起了国内外学者的重视。各项研究表明，在电弧焊过程中外加磁场，不仅可改



a）静态气体保护模式



b）射流气体模式

图7 K-TIG背面保护模式焊接原理[15]

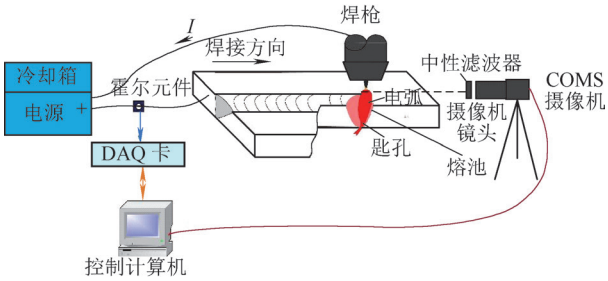


图8 高频K-TIG焊接[16]

变电弧形态、影响母材熔化及焊缝成形，还可细化晶粒组织、降低成分偏析，减少熔合区气孔、裂纹缺陷，显著提高了焊缝的力学性能[17]。

钟少涛等[18]设计了一种旋转电弧磁场控制器，并用于机器人自动焊接，如图9所示。针对Q345R钢在不同旋转磁场（不同励磁频率和励磁电流）下进行了焊接。结果表明，电弧扫描半径随着磁场频率的增加而增加，焊缝组织中的铁素体含量优于旋转磁场的作用明显提高。

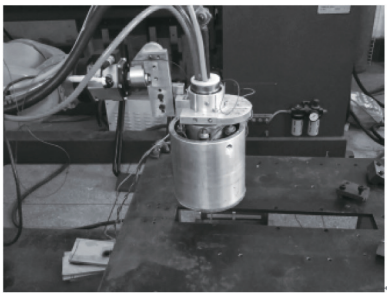
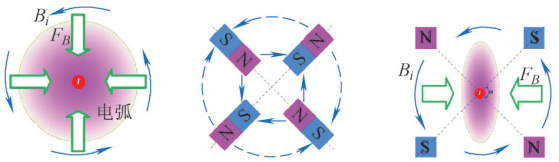


图9 旋转电弧磁场控制器[18]

LIU Zuming等[19]采用电磁增强K-TIG焊接SUS304不锈钢，通过在焊枪周围施加尖角磁场（见图10），磁场强度为175mT。通过试验发现，电弧形态由圆锥形变成椭圆形，稳定焊接时的阈值电流降低了近30A。焊缝组织和尺寸没有明显发生改变。但文中并未对磁场强度的影响进行研究，因为此种施加方式对焊缝的电磁搅拌作用较弱，电流降低不大，因此组织变化不明显。

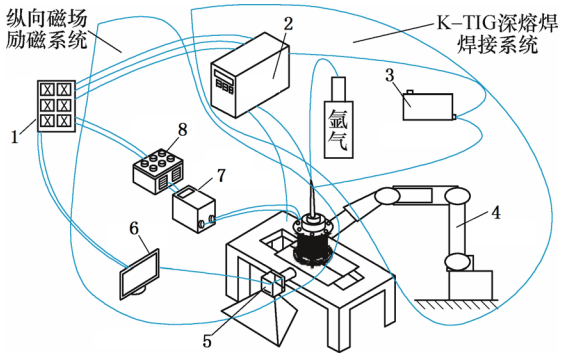


a）普通电弧形式　b）磁场分布　c）磁场增强电弧

图10 尖角磁场增强电弧原理[19]

华南理工大学石永华等[20]在10mm厚Q355钢K-TIG焊接过程中施加纵向磁场（与钨极平行），并设计了相应的系统和装置，如图11所示。励磁波形分别采用了半波波形、全波波形、正弦波形等。试验结果表明，纵向磁场作用下，当励磁波形为半波时，焊缝组织中铁素体含量最高，冲击吸收能量也较高，达53.6J（与表1相比，已达到PAW水平）。纵向磁场作用Q355钢K-TIG焊缝组织中铁素体含量依半波、全波、正弦波、励磁波形依次递减，分析认为是电磁对熔池的搅拌效果随着电磁频

率的增大而减小。但文章中缺乏与无施加磁场时的组织及性能对比结果，同时磁场辅助下的稳定焊接效果也不得而知。



a）K-TIG焊接系统

b）K-TIG焊接装置

图11　外加纵向磁场辅助K-TIG焊接试验系统和装置[20]

1.电源　2.焊机　3.冷却水箱　4.机器人
5.高动态相机　6.工控机　7.波形调节装置　8.变阻箱

除符合磁场外，还有学者将激光引入到K-TIG焊接中。李京洋等[21]研究了光纤激光+K-TIG复合焊接的电弧特性与稳定性，如图12所示。结果表明，激光功率与焊接电流存在最佳搭配范围，超过此范围电弧稳定性下降。同时激光的聚焦方式和离焦量也影响电弧的整体稳定性，通过试验得出最佳离焦量为0mm。证明了复合焊接对工艺窗口的扩展有一定的积极作用，但针对碳素钢类材料的焊接并未开展相关研究。

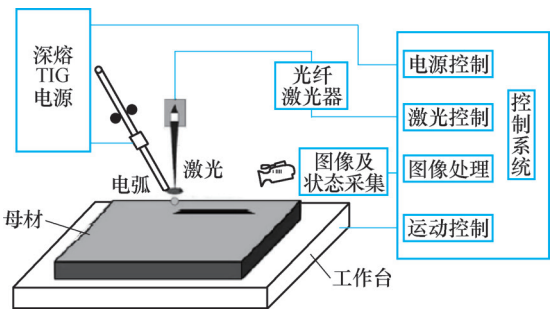
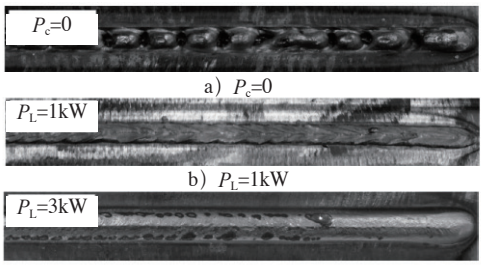


图12　激光-K-TIG复合焊接原理[21]

李京洋等[22]对10mm厚度Q355B钢进行激光+K-TIG复合焊接，结果表明，激光能量的引入使得焊缝更加光滑平整，如图13所示。分析认为是激光对熔池起到了冲击和搅拌的作用，且激光功率主要对焊缝熔深起作用。另外，还对比了激光的离焦量、热源间距的试验。



a）P_c=0

b）P_L=1kW

c）P_L=3kW

图13　不同激光功率下的焊缝表面形貌[22]

可以看出外加能量场（激光、磁场）的引入可改变电弧的形态、能量的分布，但目前研究体现在试验效果上，对于理论方面的研究和复合能场下的定量对应关系还需进一步深究。

另外，K-TIG焊接目前主要用于平焊，其对于空间位置的适用性有待进一步改善，包括横焊和立焊位置，这也是后续待研究和解决的方向。

5　在核电中的应用前景

核电站中存在较多的不锈钢覆面[23, 24]，如乏燃料水池、内置换料水箱等，厚度一般在3~6mm。为了节约工期，目前主要采用先贴法施工[25]，其优势在于可将水池进行模块划分，预先在车间完成模块的预制，然后再到现场进行安装，因此涉及到大量的不锈钢拼板焊缝。

不锈钢覆面以往主要采用手工TIG焊接，焊接质量不稳定，且效率较低。随后引进了热丝自动TIG焊，虽然效率得到一定提升，焊接速度可提高2倍，但对4mm和6mm焊缝仍需多层多道焊接。等离子弧焊能够实现单面焊双面成形，但其对间隙、平整度、错边量的要求较高，无形中增加了工装的制作复杂程度。若将K-TIG焊接技术应用到不锈钢焊接，不仅可实现中厚板一次焊透，提高生产效率，且对板材组对间隙和错边量容错率较高。即便如此，在实际核电现场工况下焊接时，还可能涉及到导轨的设计、背面保护的考虑及整体设备刚性固定

等问题。

综上所述，K-TIG在核电不锈钢焊接领域具备很好的应用前景，一旦实现应用，将具有显著的经济效益和社会效益。除了不锈钢之外，核电还涉及碳素钢材料的焊接，如核电安全壳钢衬里等物项，若需将K-TIG用于实际生产，还需进一步验证其可靠性和稳定性，并按相关标准进行评定。

6 结束语

1）K-TIG焊接属于自动高效焊接技术，非常适于中厚板的单面焊双面成形，特别是不锈钢。

2）K-TIG焊接小孔稳定性与被焊材料物理特性密切相关，但可通过对工装、冷却方式等进行改进，还可通过外加辅助能量如磁场、激光等方式改善电弧分布。

3）核电的不锈钢覆面、钢衬里等物项若采用K-TIG，可提高生产效率，具有广泛的应用前景。

4）目前，K-TIG焊接位置主要为平焊，在其他焊接位置的适用性和稳定性还待解决，尤其是空间位置复杂，且焊缝平整度、间隙、错边量等现场环境存在复杂变化的情况。

参考文献：

[1] 熊剑.304不锈钢K-TIG焊电弧特性及接头性能研究[D].南昌：南昌航空大学，2019：73.

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

[3] 陈祝年.焊接工程师手册[M].北京：机械工业出版社，2002.

[4] 陈俭峰，王昌盛，鲍碧霞.深熔氩弧焊与等离子弧焊工艺性能对比分析[J].金属加工（热加工），2020（8）：37-39.

[5] 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（1-2）：81-93.

[6] ROSELLINI C J L.The keyhole TIG welding process：a valid alternative for valuable metal joints[J].Welding International，2009，23（8）：616-621.

[7] LIU Zuming，FANG Yuexiao，CUI Shuanglin，et al.Stable keyhole welding process with K-TIG[J]. Journal of Materials Processing Technology，2016，238：65-72.

[8] CUI Shuwan，SHI Yonghua，SUN Kun，et al.Microstructure evolution and mechanical properties of keyhole deep penetration TIG welds of S32101 duplex stainless steel[J].Materials Science & Engineering A，2018，709：214-222.

[9] 冯悦峤.中厚钢板的深熔TIG焊工艺研究及温度场数值模拟[D].天津：天津大学，2016：68.

[10] XIE Y，CAI Y，ZHANG X，et al.Characterization of keyhole gas tungsten arc welded AISI 430 steel and joint performance optimization[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2018，99（1-4）：347-361.

[11] 樊文飞，罗震，冯悦峤，等.低合金钢Q345的深熔TIG焊研究[J].上海交通大学学报，2016，50（S1）：102-105.

[12] 王泰，敖三三，魏祺，等.K-TIG焊接中厚板的工艺窗口改进[J].工程科学学报，2020，42（6）：763-768.

[13] FAN W，AO S，HUANG Y，et al.Water cooling keyhole gas tungsten arc welding of HSLA steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2017，92（5-8）：2207-2216.

[14] 徐良，欧阳凯，杨海锋.K-TIG焊接动态过程及组织和性能分析[J].焊接学报，2020，41（8）：68-72.

[15] LIU Zuming，FANG Yuexiao，QIU Jiayu，et al.Stabilization of weld pool through jet flow argon gas backing in C-Mn steel keyhole TIG welding[J]. Journal of Materials Processing Technology，2017，250：132-143.

[16] FANG Yuexiao，LIU Zuming，CUI Shuanglin，et al.Improving Q345 weld microstructure and mechanical properties with high frequency current arc in keyhole mode TIG welding[J].Journal of Materials Processing Technology，2017，250：280-288.

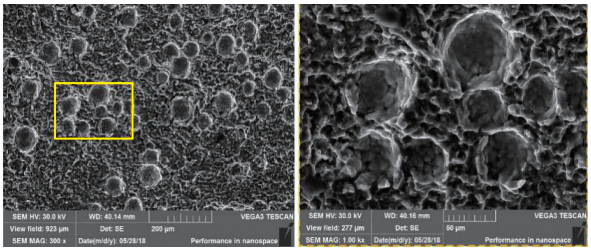
[17] 龙琼，钟云波，余正平，等.外加磁场下焊接技术的研究现状[J].中国材料进展，2020，39（6）：472-479.

[18] 钟少涛，宁强.机器人K-TIG焊接旋转电弧磁场控

（下转第50页）

察。图10为拉伸试件的断口形貌，存在很多大小不一的韧窝，且韧窝的深浅程度不一，断口形貌表现为韧性断口。

由图中韧窝可以判断出其为一个典型的韧性断裂，仔细观察图10可发现，就韧窝数量而言，中间的韧窝数量要多于两边的韧窝数量，且热影响区的韧窝要比焊缝区浅。由于焊接过程中热影响区吸热，使其晶粒变得粗大，进而导致该区域韧性下降，热影响区成为焊接接头中最为薄弱的环节。



a）300×　　b）黄框部分（1000×）

图10　拉伸断口形貌

4　结束语

1）7N01铝合金多层CMT焊接接头层道分界线明显，整体呈“碗状”；焊缝分为细晶区、柱状晶区和等轴晶区，从上至下晶粒逐渐变细，热影响区的晶粒较母材晶粒更粗大，但依然保留着板条状形态。

2）焊接接头焊缝区、熔合区和热影响区的硬度分布较为均衡，在很大程度上可以减弱容易软化的问题。焊缝底部的硬度值最低，从下向上硬度值逐渐增大。

3）焊接接头的抗拉强度平均值为260.2MPa，断面收缩率为4%，断裂位置为热影响区。拉伸断口上存在大小、深浅不一的韧窝，呈现出典型的韧性断裂特征，且由韧窝数量分布可以得知热影响区最为薄弱。

参考文献：

[1] 刘杰.7N01铝合金高温变形行为研究[D].长沙：湖南大学，2008：15-19.

[2] 张海军.7N01铝合金搅拌摩擦焊焊接工艺和接头力学性能研究[D].成都：西南交通大学，2015：46-52.

[3] 林松，贺晓龙.7N01铝合金双面搅拌摩擦焊接头的组织与性能[J].机械工程材料，2020，44（9）：82-86，102.

[4] 王振苏，黄凌骄，柴鹏，等.7N01铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能分析[J].焊接学报，2017，38（9）：115-118，134.

[5] 吴志生，靳鹏飞，高珊，等.铝合金焊接接头的软化及改善措施[J].焊接技术，2010，39（1）：1-3，11.

[6] 余亚东，刁广运，汪殿龙，等.7N01铝合金多层多道MIG焊接头的组织和成分研究[J].热加工工艺，2018，47（9）：184-187.

[7] 康忠生.Fronius TPS/i焊接系统的先进工艺及其应用[J].金属加工（热加工），2020（12）：13-17.

[8] 张文明，韩嘉伟.2319铝合金电弧增材制造成型和组织[J].沈阳大学学报（自然科学版），2020，32（3）：194-199.

[9] 路浩.高速列车用厚板铝合金CMT焊接工艺[J].焊接学报，2015，36（4）：75-78，117.

MW 20201124

（上接第46页）

制器及焊接质量研究[J].自动化与仪器仪表，2019（7）：137-140.

[19] LIU Z，CHEN S，YUAN X，et al.Magnetic-enhanced keyhole TIG welding process[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2018，99（1-4）：275-285.

[20] 石永华，宁强，崔延鑫.Q345R钢纵向磁场辅助K-TIG焊接接头组织和性能研究[J].电焊机，2020，50（9）：87-91.

[21] 李京洋，李伟，焦向东，等.304不锈钢激光K-TIG复合焊接电弧特性的研究[J].电焊机，2020，50（4）：30-35.

[22] 李京洋，肖镌璐，朱加雷，等.激光深熔TIG复合焊接参数对焊缝形貌的影响[J].应用激光，2019，39（3）：423-428.

[23] 王明涛，费松，张科青.核电站不锈钢水池自动焊技术应用研究[J].焊接技术，2016，45（9）：103-108.

[24] 郭辉.压水堆核电站乏燃料水池自动焊工艺研究与应用[J].电焊机，2019，49（4）：274-278.

[25] 刘岳君，隋然，武燕京.内置换料水箱钢覆面先贴法设计：2020年工业建筑学术交流会[Z].北京：工业建筑杂志社，2020，4.

MW 20201124