



厚板单道全焊透的大电流 潜弧焊接方法

刘忠杰 马场勇人 惠良哲生 河合宏和 侯松杰 井上雅博 上山智之

【摘要】 本文对500~1000A大电流潜弧焊接电弧的稳定性进行了观察研究，找到了稳定电弧的方法。开发了相应的大电流焊接用焊接电源及高使用率的焊枪。同时，开发了可高达100m/min的高速送丝系统，在起弧和收弧时也能做到送丝平稳、电弧稳定。通过该焊接系统使用650A焊接电流，实现了19mm厚板、不开坡口或小角度单边坡口的单道全焊透焊接效果，与传统的气体保护焊相比生产效率提高了5倍。

关键词： 厚板；大电流；焊接

1. 概述

在非常耗时、耗力的厚板焊接方面，为了提高生产效率，开发和应用了各种各样的焊接方法，如埋弧焊、电渣焊、气电焊、摩擦搅拌焊、激光焊以及等离子弧焊等。这些焊接方法都有各自的特点，且都能应用于厚板高效焊接方面。但是，由于焊接材料、焊接姿势、焊接方向或夹具等原因，所以这些焊接方法在焊接施工方面都存在一定的制约因素，并不是普遍适用于各种焊接。

相对于以上的焊接方法，气体保护焊具有比较高的焊接自由度，广泛地应用于各种材料的焊接。但是，气体保护焊与前述焊接方法相比，焊接效率低，在厚板焊接时需要多层多道焊接。在这种背景下，期待着潜弧焊比一般气体保护焊有较高的焊接效

率。近年来，利用500A左右的潜弧焊实现了10mm左右熔深的单道焊缝已见于报道。

笔者利用500A以上的潜弧焊，实现了10mm以上钢板的单道全熔透焊接。本文就大电流潜弧焊的电弧稳定控制机理和大实例进行阐述。

2. 大电流潜弧焊电弧现象的观察及电弧的安定化

现在常用的气体保护焊的电流范围为500A，为了进行500A以上气体保护焊电弧现象的观察，开发了最大输出为1000A的焊接电源，图1为1000A电源的等价回路。焊接电源是由两台并行500A数控逆变焊接电源构成，两电源间采用串行通信技术进行同步，可以实现各种焊接波形。另外，开发了由两台送丝机和一台缓冲器构成的最大送丝速度可达100m/min的送丝系统。

利用高速摄像机和大阪大学接合科学研究所的高辉度X射线透视系统进行了熔池的观察。如图2所示，利用高速摄像机进行熔池观察是从熔池的斜上部来进行的。如图3所示，利用高辉度X射线透视系统对熔池内部的流动的观察是在焊接部位的水平方向进行的。在对潜弧焊接进行观察时使用的条件如表1所示。焊丝为普通的实芯焊丝，保护气为二氧化碳气体。

(1) 潜弧焊接电弧现象的观察 在进行大电流潜弧焊接电弧进行观察时，采用的是在平板上的堆焊。送丝速度为40m/min，焊接电流为570A，电弧电压为48V。电源的外特性采用的是常用的定电压特性的-1V/100A。图4表示了每隔10ms的高速摄像机的视频截图，图中除去0ms照片外，焊丝的顶端全

部潜藏在熔池中，直接观察不到电弧。另外，熔池非常不稳定，熔池的开口部的大小在变动。在某种情况下，熔池开口闭合，焊丝与熔池发生短路，当短路消除、重新燃弧时会产生大量的飞溅，同时，焊缝成形也极为不稳定。为对这种现象有更为详细的了解，采用了高辉度X射线透视系统进行熔池内部的观察。

图5为利用高辉度X射线透视装置观察到的熔池内部流动状况的视频截图，图中虚线所示为焊丝的位置。焊丝顶部白色区域为由潜弧在熔融金属中形成的空间（简称 潜弧空间）。由图5a可看出，焊丝顶端低于母材表面，潜弧空间较大的情形。由图5b可看出，焊丝顶端高于母材表面，潜弧空间较小的情形。焊接过程中，图5a、图5b所示两种情形进行无规律的相互转换，造成焊丝顶端位置及潜弧空间进行不规则的摆动，成为焊缝成形不良的主要因素。

(2) 潜弧的安定化 根据上述结果，就焊接电源外特性对焊缝成形稳定性的影响进行了调查。在送丝速度为40m/min，焊接电流为570A，电弧设定电压为48V的情况下，变动外特性的斜率为-2V/100A，-10V/100A，-20V/100A的三种水平，所得到的结果如表2所示。

在电源外特性为-2V/100A时，与其他条件相比焊缝宽度总体较宽，且不均匀。这是由于电源外特性斜率较大，在电弧电压发生波动时，相应的电流波动很大，引起潜弧空间不稳定，使熔融金属沿母材表面向外扩散而引

起的。

另一方面，在电源外特性为-20V/100A（接近于定电流特性电源的外特性）时，焊缝宽度

略有些不均匀。虽然潜弧空间比较稳定，但由于相对于电压的波动，电流波动较小，所以弧长的自我调节功能较弱。在发生

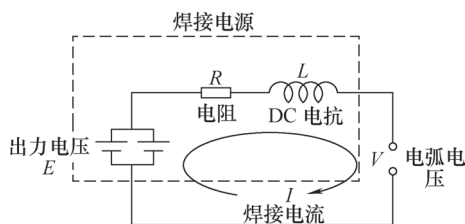


图1 焊接电源的等价回路

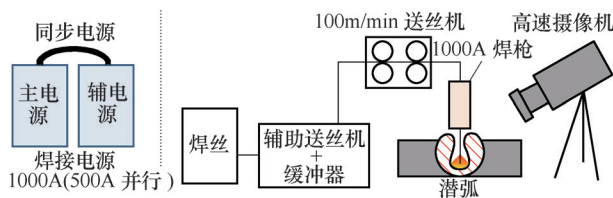


图2 试验系统构成及高速摄像装置模式

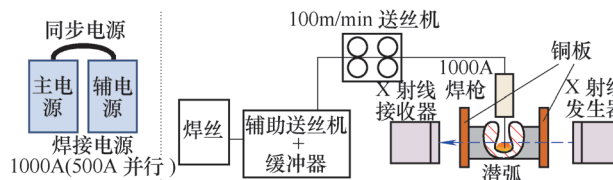


图3 试验系统构成及X射线透视装置模式

表1 观察大电流潜弧时所用的通用条件

焊丝	保护气体	焊丝直径/mm	母材	喷嘴到母材距离/mm	焊接速度/cm·min ⁻¹
JIS YGW12 (AWS ER 70S-6, EN G 42 2 C G3Si1)	100% CO ₂	1.2	JIS SS400 (ASTM A36, EN S275)	25	30

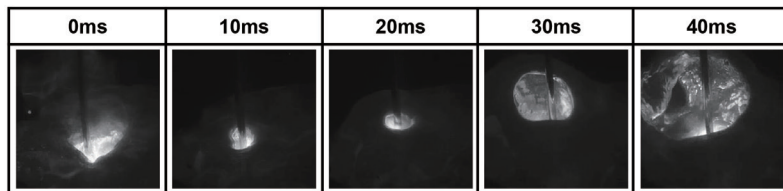


图4 不稳定潜弧的高速摄像机观察结果

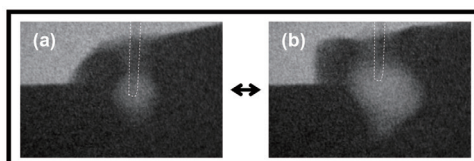


图5 不稳定潜弧的X射线透视系统的观察结果

表2 各种电源外特性下所得到的焊缝成形结果

焊接条件			记号	外部特性	焊缝外观
送丝速度 /m·min ⁻¹	平均电流 /A	平均电压 /V	(a)	-2V/100A	
40	570	48	(b)	-10V/100A	
			(c)	-20/100A	

短路等外界干扰时，电弧长度容易不稳定。

在上述两者中间的电源外特性-10V/100A时，焊缝宽度相对均匀，被认为是大电流潜弧焊中最合适的电源外特性值。但是，焊缝宽度并不是非常均匀，还需要进一步的进行稳定电弧的工作。

(3) 大电流潜弧电弧的熔滴过渡 为提高大电流潜弧焊电弧的稳定性，讨论波形控制时，首先利用高速摄像机对大电流潜弧焊熔滴过渡现象进行了观察，这时采用的电源外特性为-10V/100A。在送丝速度分别为30m/min、50m/min和60m/min条件下，观察的结果如表3所示。

在送丝速度为30 m/min时，焊接电流为450A，电弧电压为39V。熔池表面的开口较小，熔滴过渡形式为大滴过渡。在潜弧空间内熔滴沿着焊丝的轴向向熔池底部过渡，飞溅量较少。

在送丝速度为60m/min时，焊接电流为700A，电弧电压为65V。熔池表面的开口较大，熔滴过渡形式为旋转射流过渡。旋转射流过渡是指在焊丝顶端形成的液柱高速旋转，同时部分熔化金属脱离焊丝形成熔滴，同时形成很多的飞溅。

在设定送丝速度在上述两

种设定值的中间区域，50m/min时，焊接电流为620A，电弧电压为55V时，出现了一种非常特殊的熔滴过渡形式。在这种过渡形式中，焊丝顶端的液柱与旋转射流过渡相似，该液柱在同一个垂直平面内摆动，同时该垂直平面也沿焊丝轴线旋转，本文称作“摆动过渡”。这种熔滴过渡形式类似于MAG焊接中的“swinging spray transfer”。这种过渡形式的熔池表面开口大小介于旋转射流过渡与大滴过渡之间。

在450A以上电流域的潜弧

焊接中，存在着三种熔滴过渡形式。这三种熔滴过渡形式的特点如表4所示。在观察过程中，也观察到了介于大滴过渡与摆动过渡之间，以及摆动过渡与旋转射流过渡之间的混合过渡区域。

(4) 电压波动控制 为提高大电流潜弧的稳定性，得到宽度均匀的焊缝，在电源外特性控制的基础上，开发了电压波动控制方法。这种控制方法是在电源外特性为恒压特性的基础上，周期性的改变设定电压，到周期新变化的电流，从而实现大滴过渡和摆动过渡，或摆动过渡和旋转射流过渡的相互转换，稳定电弧。图6是设定电压周期性波动时的电流、电压出力波形。

在送丝速度为40m/min，焊接电流为570A，电弧电压为(48±10)V，设定电压波动频率为100Hz的条件下，利用高速摄像机对电弧现象进行了观察。

表3 大电流域潜弧焊的三种熔滴过渡形式

焊接条件		过渡形式	0ms	0.4ms	0.8ms
送丝速度/m·min ⁻¹	30	大滴过渡			
焊接电流/A	550				
电弧电压/V	39				
送丝速度/m·min ⁻¹	50	摆动过渡			
焊接电流/A	620				
电弧电压/V	55				
送丝速度/m·min ⁻¹	60	旋转过渡			
焊接电流/A	700				
电弧电压/V	60				

表4 各种熔滴过渡形式的特点

熔滴过渡模式	潜弧区域的电弧指向	飞溅
大滴过渡	底部	几乎没有(小飞溅)
摆动过渡	底部和四围	相对较小
旋转过渡	四围	大

观察结果如图7所示。

图7a是在低电压设定阶段的滴过渡的情形，这时的输出电流约300 A。一定时间后，输出电流进入高电压设定阶段，如图7b所示。在这个阶段，随着电压升高、电流增大，焊丝熔化速度加快，在焊丝顶端形成液柱，焊丝顶端的位置开始升高。同时，电弧变宽，熔池开口变大。随着弧压的增高，潜弧空间底部的液态金属被吹开，裸露出未熔化的母材。随后，如图7c所示，液柱开始旋转，熔滴过渡，潜弧空间底部的金属开始熔化，增加熔深。图7d是在高电压设定阶段末期的熔滴过渡形态。可以看到比较小的熔滴从旋转液柱的顶端向潜弧空间内壁过渡，过渡的金属对潜弧空间的壁面起到支撑作用，使熔池开口保持一定的大小。图7e为高电压设定阶段向低电压设定阶段过渡时的熔滴过渡形式。电流减小，电弧的宽度也减小，焊丝顶端的位置开始降低，进入下一个周期。

上述周期性的变化电流、电压可以维持稳定的潜弧空间和增大熔深。表5为只利用外特性控制及利用外特性-电压波动复合控制的焊缝成形。表5为只利用外特性控制及利用外特性-电压波动复合控制的焊缝成形，利用外特性-电压波动复合控制可以得到非常均匀的焊缝。

3. 高效厚板焊接系统的开发

(1) 焊接系统的构成 开发的大电流、高效厚板潜弧焊接系统如图8所示。

焊接电源是由两台具有恒压特性的逆变焊机，通过并行通信进行输出控制，最大输出电流为1000 A。送丝系统是由焊接机器

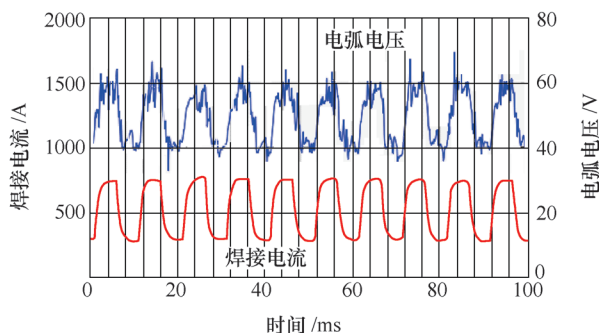


图6 电压、电流周期性摆动

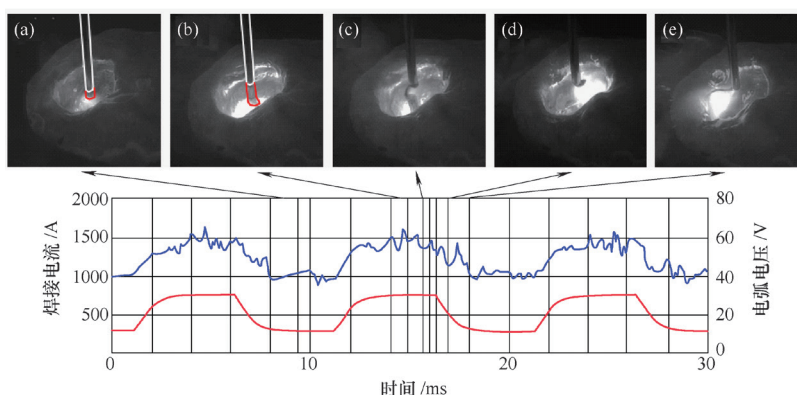


图7 潜弧焊接中电压波动控制的电弧现象

表5 外特性控制及外特性-电压波动复合控制的焊缝成形

送丝速度 /m·min ⁻¹	焊接条件			记号	电压控制	焊缝外观
	平均电流 /A	平均电压 /V	外部特性			
40	570	48	-10V/100A	-10V/100A	—	
				-10V/100A	± 10V/100Hz	

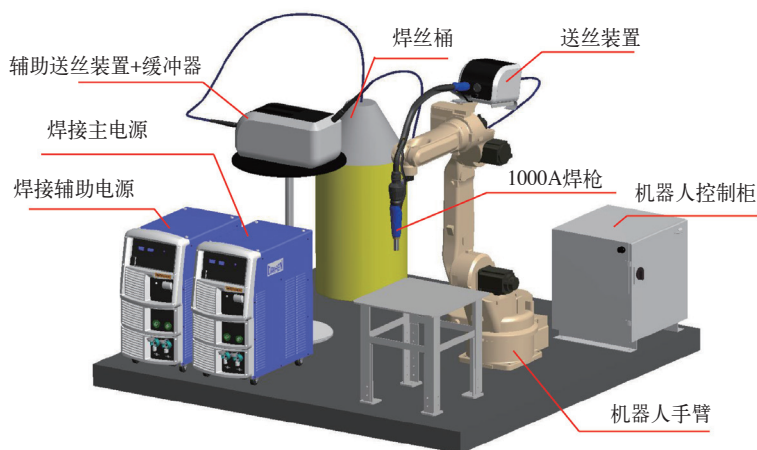


图8 高效机器人焊接系统构成示意

人上部的送丝装置和特别设计的辅助送丝装置构成,最大稳定送丝速度为100m/min。辅助送丝装置包括送丝部分和焊丝缓冲部分,该辅助送丝装置可以设在焊接系统的任何位置,设定方便。焊枪是利用3D打印技术所设计的具有非常好的冷却效果的小型焊枪,其最大使用电流可达1000 A。

(2) 高效焊接系统的应用案例 利用新开发的厚板用大电流、高效焊接系统,实现了单道25 mm的大熔深焊接。本文以19 mm普碳钢板的单道全焊透为例,介绍该焊接系统。图9是传统的多层、多道焊与新开发的单道焊缝截面的比较。传统方法使用的是钢垫板,新方法使用的是铜垫板。传统方法焊接时,坡口形状是根据JARAS 1012(WES 8703): 2004及JARAS 1013(WES) 8704: 2004的规则,坡口面角度为35°,无钝边,根部间隙为4 mm。

如图9所示,使用传统方法完成19mm单边开坡口的接头需要焊6道;然而,采用新方法只需要1道。

从开坡口截面来看,传统方法的坡口截面面积为123.5 mm²,而新方法的开坡口截面面积38.5mm²,仅为传统开坡口的30%。从焊接结果看,传统方法的焊接变形量为7°,而新方法的焊接变形量为1°,仅为原来的15%。如文献所述,母材入热多,且熔深大,则焊接变形小。本例是因为单道全焊透的原因,而减小变形的实例。

最后,采用相同焊接条件

(焊接电流为620A,电弧电压为44 V,焊接速度为30 cm/min),对三种开坡口方式的对接接头进行焊接。焊接结果如图10所示,无论采用何种开坡口方式,都可以得到没有任何焊接缺陷的焊接接头,说明新开发的焊接方法对接头的开坡口方式有较强的适应能力。

4. 结语

对于使用实芯焊丝二氧化碳气体保护焊,通过采用恒压外特性和电压波动复合控制,稳定了大电流的潜弧电弧。

(1) 在500A以上的电流,观察到了三中熔滴过渡方式,最为特殊的为“摆动过渡”。在焊丝顶部形成的液柱在同一个垂直

平面内摆动,且该平面也转动。

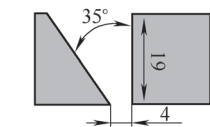
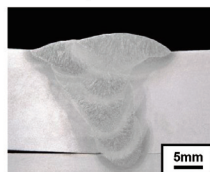
(2) 基于恒压外特性控制,开发了电压波动控制方法,掌握了电弧稳定机理,稳定了大电流域的潜弧电弧

(3) 采用稳定电弧控制方法,开发高效、厚板焊接系统。该系统具有单道全焊透的特点,且焊接缺陷少,对开坡口的适应性强。

参考文献:

- [1]村岡典之,小原昌弘,忽那太裕.電源出力変調による炭酸ガスアーク溶接におけるビード形状の改善[J].溶接学会全国大会講演概要,第96集(2015-4) 134-135.

焊接电流300A,电弧电压30V,焊接速度30cm/min



焊接电流620A,电弧电压44V,焊接速度30cm/min

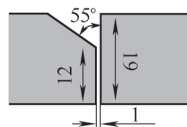
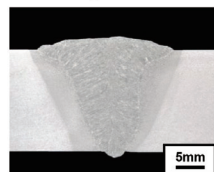


图9 多层多道焊与单道全焊透接头截面的比较

送丝速度23m/min,焊接电流620A,电弧电压44V,焊接速度30cm/min,外部特性-10/100A,电压振幅10V,电压振动频率200Hz

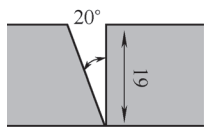
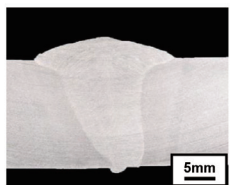
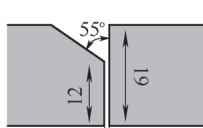
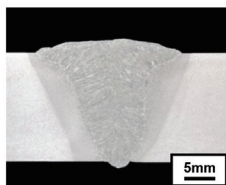
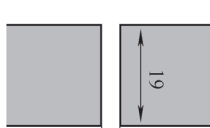
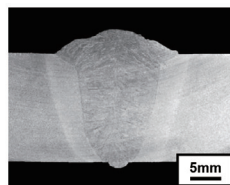


图10 三种开坡口方式及焊接接头截面的比较

[2]足立浩隆, 堅田寛治, 平田好則.大電流マグ溶接の熔滴移行現象[J].溶接学会全国大会講演概要, 第79 集 (2006-9) 112-113.

[3]Masatoshi Murayama, Daisuke Oazamoto and Kensuke Ooe. Narrow Gap Gas Metal Arc (GMA) Welding Technologies[J]. JFE TECHNICAL REPORT 20 (Mar. 2015) 147-153.

[4]Katsuyuki Tsuji, Akira Ogawa, Kei Yamazaki and Yimin Yuan. Robot Welding Process for medium and Heavy Plate[J]. KOBELCO TECHNOLOGY REVIEW 32 (DEC. 2013) 9-15.

[5] Masao Ushio, Kenji Ikeuchi, Manabu Tanaka and Takeshi Seto. Effects of Shielding Gas Composition on Metal Transfer Phenomena in High

Current GMA Welding[J]. Trans. JWRI, Vol. 22, No. 1 (1993) 7-12.

作者简介: 刘忠杰等, 日本OTC公司。刘忠杰, 现任日本OTC公司研究开发部代理科长。主要从事等离子弧焊、电弧焊、等离子-电弧同轴、激光-电弧等复合焊接新工艺及焊接电源的研究、开发工作。

MW 20170521

第二十二届北京·埃森焊接与切割展览会技术讲座安排表

日期	公司	题目	房间
6月27日13:00-14:00	飞马特等离子切割	自动等离子切割中的成本因素	N4-M45
6月27日13:00-14:30	株式会社 神户制钢所	大组立焊接机器人系统	N4-M46
6月27日13:00-14:00	伊萨焊接切割	伊萨先进工程自动化解决方案 - 激光复合焊接-HLAW - 搅拌摩擦焊接- FSW	N5-M48
6月27日13:00-16:30	中国航空制造技术研究院	1.搅拌摩擦焊技术在中国的发展和运用; 2.电化学加工技术与装备在航空领域的应用; 3.金属高能束流增材制造技术研究; 4.高能束流焊接技术及装备	N3-M43
6月27日14:00-15:00	伊萨焊接切割	膜式壁的高效焊接方法	N5-M48
6月27日15:00-16:00	伊萨焊接切割	伊萨高级环保焊接材料在汽车行业的应用	N5-M48
6月27日15:00-16:30	北京斯达峰控制技术有限公司	1. 基于激光检测焊缝跟踪的多轴智能焊接系统; 2. 基于视觉检测的智能切割系统; 3. 基于激光测距的封头, 高压容器的切割系统; 4. 图形化的异型管道的切割系统	N4-M45
6月28日	伊萨焊接切割	Arcair SLICE强力破拆救援系统-全能切穿工具, 助力火速救援	N5-M48
6月28日 10:00-11:30	南京晟芯半导体有限公司	1.晟芯FRD & IGBT单管产品介绍; 2.晟芯FRD & IGBT模块产品介绍; 3.阻断相电流填补整流焊接电源; 4.最新IGBT模块的封装技术及常见问题	N3-M43
6月28日10:00-11:30	珠海市科盈焊接器材有限公司	全自动管道焊接装备及技术新发展	N2-M42
6月28日10:00-11:30	株式会社 神户制钢所	造船焊接的效率化提案	N4-M46
6月28日11:00-12:00	伊萨焊接切割	STOODY焊材-石油与矿业极端磨损的最佳选择	N5-M48
6月28日13:00-14:00	伊萨焊接切割	伊萨焊接切割 伊萨旋转电弧过渡 (SAT) 焊接工艺在机器人焊接的应用	N5-M48
6月28日13:00-14:30	株式会社 神户制钢所	耐热钢焊接	N4-M46
6月28日13:00-14:30	无锡华联科技集团有限公司	1.结构焊接领域的高效智能化技术应用; 2.智能焊接车间整线方案设计及应用实例; 3.IGM智能焊接车间应用案例	N5-M47
6月28日13:00-14:30	珠海市科盈焊接器材有限公司	Fronius TPS/i智能化焊机的机器人焊铝系统解决方案	N2-M42
6月28日 13:00-14:30	浙江钱江机器人有限公司	1.钱江机器人介绍; 2.驱控一体控制器发布; 3.激光跟踪、视觉技术; 4.机器人搅拌摩擦焊技术; 5.焊接技术	N4-M45
6月28日 13:00-16:30	库卡机器人(上海)有限公司库卡工业自动化(昆山)有限公司	KUKA焊接行业应用研讨会	N5-M50
6月28日 14:00-15:00	伊萨焊接切割	伊萨小机组自动焊 - 兼具性能和成本高效的最有价值油气管道焊接解决方案	N5-M48
6月28日 15:00-16:00	伊萨焊接切割	伊萨精密坡口切割技术及其应用	N5-M48
6月29日 10:00-11:30	珠海市科盈焊接器材有限公司	镍基合金的连接和堆焊技术	N2-M42
6月29日 12:00-17:00	美国焊接学会	1.AWS及其代理的介绍; 2. 影响中美贸易的因素; 3. AWS各分会的活动及组织指导; 4. 焊接检验人员的国际认证途径	E7-M38