

大径中厚壁管道坡口对 MAG 焊操作的影响

陈鹏^{1, 2}, 李哲³, 高月^{1, 2}, 杨晓冬^{1, 2}, 董安³, 潘国伟^{1, 2}, 王志康^{1, 2}, 李刚^{1, 2}, 王金明^{1, 2}, 张正根^{1, 2}

1. 核工业工程研究设计有限公司 北京 101300

2. 中核集团高效智能化焊接重点实验室 北京 101300

3. 中国核电工程有限公司 北京 100840

摘要: 多层多道焊是核电大直径厚壁管道常用的焊接工艺, 坡口形式作为影响焊道层数和道数的直接因素, 不仅决定了生产成本和效率, 还进一步影响着焊接过程中焊缝排道及焊枪的可操作性。采用TIG打底、MAG进行填充、盖面, 分别对20°、15°和9°的U形坡口进行了试验, 分析了不同坡口形式下的电弧稳定性、焊缝排道和焊枪可操作性。结果表明: 坡口尺寸对电弧稳定性影响较小; 15°的U形坡口既可以使电弧对坡口两侧壁进行相对充分的加热和填充, 又可以保证较小的填充量, 打底焊可操作性好、焊接效率高。

关键词: 多层多道焊; 坡口形式; 电弧稳定性; 焊缝排道; 焊枪可操作性

Influence of large diameter medium-thick-walled pipe groove on MAG welding operation

CHEN Peng^{1, 2}, LI Zhe³, GAO Yue^{1, 2}, YANG Xiaodong^{1, 2}, DONG An³, PAN Guowei^{1, 2},

WANG Zhikang^{1, 2}, LI Gang^{1, 2}, WANG Jinming^{1, 2}, ZHANG Zhenggen^{1, 2}

1. Industry Research and Engineering Co., Ltd., Beijing 101300, China

2. China National Nuclear Corporation Key Laboratory of High Efficiency Welding, Beijing 101300, China

3. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China

Abstract: Multi-layer and multi-pass welding is a common welding process for large-diameter thick-walled applications. As a direct factor affecting the number of weld layers and passes, the groove form not only determines production costs and efficiency but also further influences the arrangement of weld seams and the operability of the welding torch during the welding process. In this paper, experiments on 20°, 15°, and 9° U-groove were conducted based on TIG root welding and MAG filling and capping welding processes. The arc stability, weld seam arrangement, and welding torch operability under different groove forms were analyzed. The results indicate that the groove size has virtually no impact on arc stability. The arc can adequately heat and fill both sides of the groove while ensuring a relatively smaller fill volume under the 15° U-groove. Therefore, 15° U-groove offers good operability and high welding efficiency for root welding.

Keywords: multi-layer and multi-pass welding; groove form; arc stability; weld seams arrangement; welding torch operability

1 序言

核电具有低碳环保、成本低、安全等优点, 有助于缓解能源需要与环境保护之间的矛盾, 其发展

前景会越来越广泛^[1]。目前, 我国所建核电站部分管道为大径厚壁类管道, 而涉及到大径厚壁管道的焊接其难度很大, 工艺也较为复杂和严苛, 同时严

苛的焊件服役条件对大径厚壁管道的焊缝焊接质量提出了更高的要求^[2]。

熔化极气体保护电弧焊 (GMAW) 是一种兼具高质量和高效率的焊接方式, 其在焊接操作、焊接质量、焊接条件以及焊接速度等方面都具有更高的优越性。另外, 因其合格率高、焊接质量稳定、熔率高、飞溅低、抗裂性能强等优势, 而在核电领域中得到了非常广泛的应用^[3]。在实际生产中, 通常采用TIG焊对大径厚壁管道进行打底, 采用多层多道MAG焊对大径厚壁管道进行填充和盖面^[4]。

坡口形式作为影响焊道层数和道数的直接因素, 不仅决定了生产成本和效率^[5], 还进一步影响着焊接过程中电弧稳定性、焊缝排道及焊枪的可操作性。然而, 不同坡口形式对厚壁管道焊接过程中电弧稳定性、焊缝排道及操作性等方面的影响较少进行研究。因此, 本文采用实际生产中常见的3种坡口形式探究焊接过程中坡口形式对电弧稳定性、焊缝排道及焊枪可操作性的影响。

2 试验材料、设备及方法

试验使用的3种U形坡口的接头形式如图1所示。其中, 图1a为目前生产现场所采用的坡口。这种坡口形式能够提供足够的空间, 使焊工能够更好地控制焊接过程, 进而保证焊缝质量。图1b的坡口形式在保证具有一定运枪空间的同时, 还能够减少填充量, 从而提高生产效率。图1c为目前管道熔化极焊接常用的坡口形式之一, 这种坡口形式能够减少填充量, 从而提高生产效率。

试验采用母材牌号为P280GH、尺寸为 $\phi 273\text{mm} \times 21.44\text{mm}$ 的碳素钢管道, 焊接材料型号为

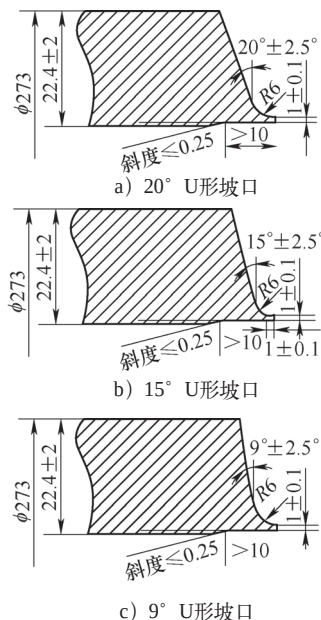


图1 坡口形式

大西洋CHG-56、 $\phi 2.0\text{mm}$ 的焊丝, 试验采用手工TIG焊工艺进行打底, 采用自动MAG焊工艺进行填充盖面焊接。TIG打底焊采用威特力WSM-400焊机, 填充盖面焊采用中国熊谷DPS-500焊机、A-305W全位置焊接小车。焊接过程中采用高速摄像机对熔滴过渡图像进行采集, 高速摄像机型号Cyclone-2-2000-M, 该相机最大分辨力为 2048×1088 像素, 最大帧率为10kfps。通过电流电压信号采集系统对焊接过程中的实时电流电压信号进行采集, 采集频率为2kpps, 电流模块为CHB-1000S型闭环霍尔电流传感器, 额定输入参数为1000A直流、交流及脉冲电流; 电压模块为CHV-25P/100型闭环霍尔电压传感器, 额定输入参数为100V直流、150V交流, 搭建的焊接系统如图2所示。

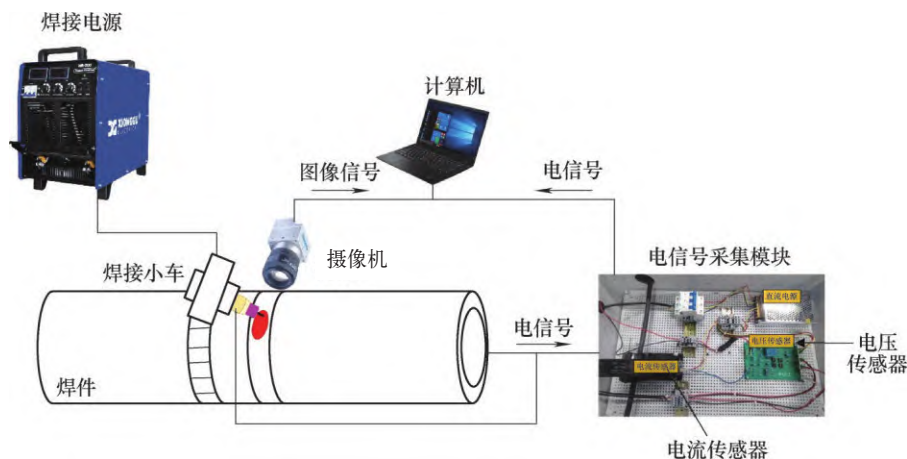


图2 焊接系统

焊接流程如图3所示。①焊前打磨去除坡口两侧的氧化物和杂质。②将需要焊接的坡口进行组对，错边量控制在0.5mm以内，调整好后用夹具固定住。③在坡口间预留一定间隙以保证摇摆焊能够焊透，本次预留3.2mm。④对坡口进行定位焊，每

道坡口定位焊位置不少于4处，每处焊道长度控制在5~10mm，防止坡口在打底焊过程中发生移位或变形，影响焊接质量。⑤在最大间隙处起弧进行打底焊，焊完一圈后在此处收尾，以减小焊接热变形。⑥进行填充盖面焊。

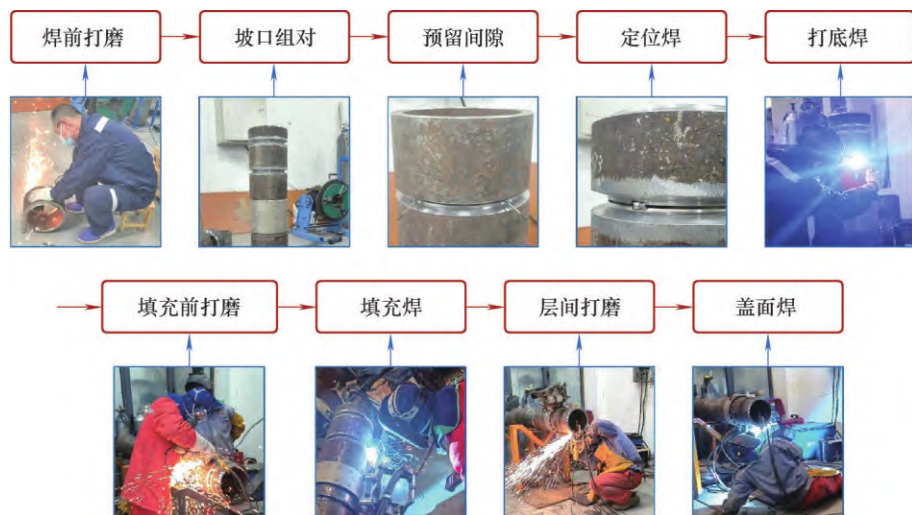


图3 焊接流程

3 电弧稳定性分析

电弧是热源也是力源，电弧不稳定，导致熔滴过渡的力也不稳定，从而影响焊缝成形，因此有必要针对不同形式下的电弧稳定性进行分析。电流-电压曲线是电弧稳定性的一个重要体现，曲线的横坐标为采集点数，每1000个点代表1s，从电流-电压曲线中可以反应出熔滴过渡的形式、周期，以及电流-电压的波动幅度和大小。 $U-I$ 图是将包括起弧、稳态过程、收弧内所有时刻的焊接电流和电弧电压以散点的形式表示出来而得到的图像。从点的密集程度中可以反映出熔滴过渡的形式，同时可以根据点的分布来判断整个焊接过程中电流和电压的分布范围。点的分布越是集中，就越能够说明焊接过程中的熔滴过渡形式稳定。

20° 、 15° 、 9° 的U形坡口在使用自动MAG填充焊的方法进行焊接时，所测量的电信号如图4所示。从图4可看出，MAG焊接过程中电流-电压曲线总体上呈现出一定的周期性，即每个周期内焊接电流、电弧电压的变化规律相似，表明电源输出的焊接电流、电弧电压稳定。但同时也表现出一定的波形震荡现象，即每个周期内焊接电流、电弧电压的峰值和谷值有所不同，这可能与飞溅的产生和不同

位置导致变化的重力影响有关。飞溅会影响电弧的连续性，而重力会影响熔滴的转移。焊接电流、电弧电压数据点存在一定程度上的分散分布，这可能与焊枪的摆动等有关，但总体上表现出较好的电弧稳定性。

20° 、 15° 、 9° 的U形坡口在使用自动MAG填充焊的方法进行焊接时，所采集的熔滴过渡图像如图5所示。图5分别显示了1个过渡周期内熔滴的形成、长大、缩颈直至脱落的过程。由图5可发现，不同坡口下的电弧形状和熔滴过渡形式偏差较小，熔滴过渡形式均为射滴过渡。此外，观察图5中的熔滴过渡过程，可发现电流处于基值阶段时（0.2ms前），高速摄像图像观察不到电弧亮点区，此时焊丝中的电流仅对焊丝末端有一定的预热作用。电流处于上升阶段时，电弧亮点区逐渐形成，焊丝不断熔化，金属悬滴体积持续增大。在峰值阶段，阳极斑点区扩大并由熔滴底部上爬，逐渐覆盖熔滴的大部分或全部表面，同时焊丝加速熔化，金属悬滴体积达到最大值，悬滴重力、表面张力等各种力的平衡达到临界点。在下降阶段，金属悬滴与焊丝末端形成缩颈，缩颈不断拉长并最终断裂，熔滴直径与焊丝直径基本相同并开始落向熔池，电弧逐渐熄

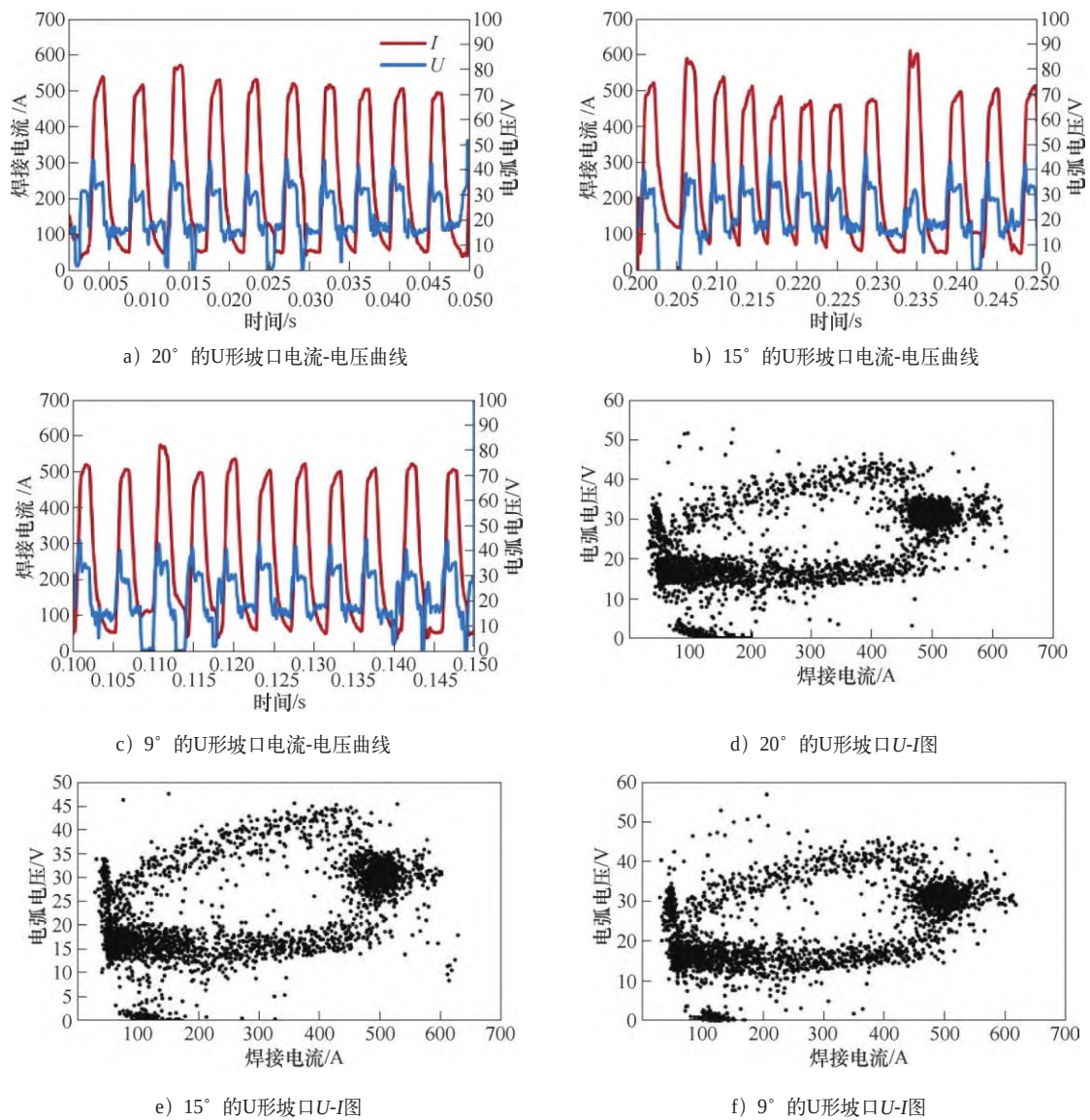


图4 填充焊时的电信号

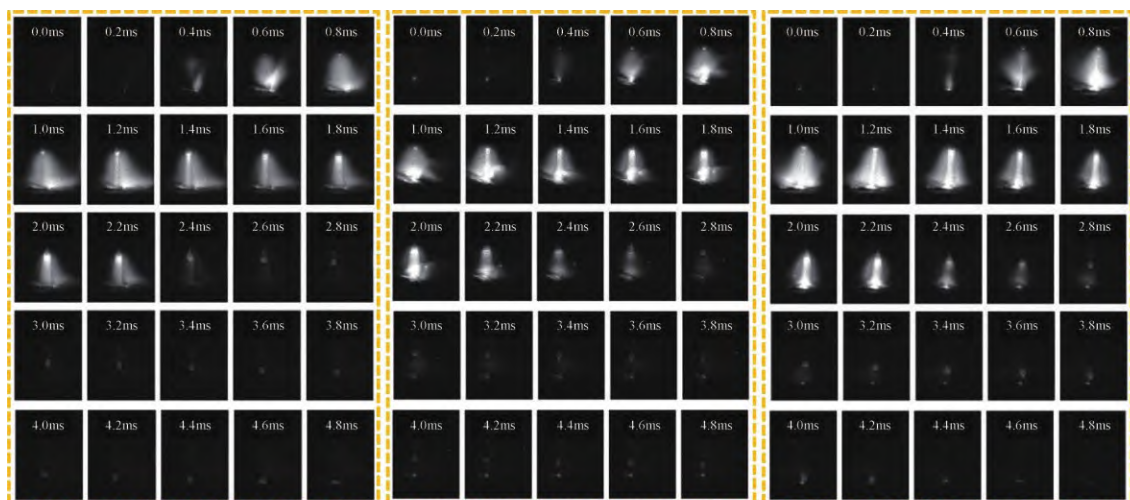


图5 填充焊时熔滴过渡图像

灭, 焊丝末端收缩成半球状。最后又回到电流基值阶段, 重新开始焊丝的机械送进。本试验中的过渡形式为射滴过渡, 并且实现了较为理想的一脉一滴过渡模式, 电流阶段与熔滴行为之间的相位不匹配现象较少, 整个熔滴过渡过程比较稳定。

4 焊缝排道分析

20°、15°和9°的U形坡口焊道排布如图6所示, 其中深灰色代表打底焊道, 中灰色代表填充焊道, 浅灰色代表盖面焊道。20°、15°和9°的U形坡口钝边厚度均为1mm, 20°和9°的U形坡口底部过渡角的半径为6mm, 而15°的U形坡口底部过渡角的半径为3mm, 导致20°和9°的U形坡口底部

间隙略>15°的U形坡口, 因此在进行打底焊排道时, 20°和9°的U形坡口打底焊所需填充量>15°的U形坡口。此外, 由于所开坡口角度不同, 导致20°、15°和9°的U形坡口填充盖面焊时所需填充量逐渐减少, 在进行排道时产生差异。

焊后实测TIG焊的每道熔宽为4~6mm、熔深为0.5~1mm、余高为1~2mm, MAG填充盖面焊的每道熔宽为5~7mm、熔深为2~3mm。其中, 20°的U形坡口的焊道排布如图6a所示, 总计9层21道。15°的U形坡口焊道排布如图6b所示, 总计8层19道。9°的U形坡口的焊道排布如图6c所示, 总计9层18道。

对比不同尺寸下的坡口发现, 15°的U形坡口

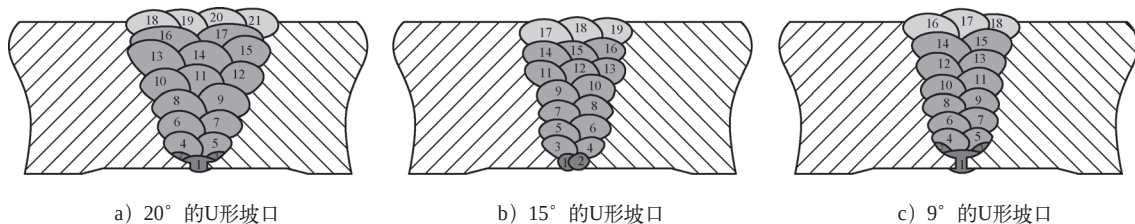


图6 焊道排布

有着良好的可操作性, 既能使电弧对坡口两侧壁进行相对充分的加热和填充, 又可以提供较小的填充空间, 因此15°的U形坡口打底焊排道道数较少。同时, 对比不同尺寸下的坡口发现, 填充焊时20°、15°和9°的坡口的填充道次依次减少, 焊接效率逐渐增大。

焊接完成后的坡口形貌如图7所示。从图7可看出, 打底焊鱼鳞纹细密均匀, 熔池铺展良好, 无明显层间未熔合、侧壁未熔合等焊接缺陷。填充盖面焊焊道排布紧凑均匀、焊角过渡圆滑, 填充金属与坡口上表面接近齐平, 无明显层间未熔合、侧壁未熔合等焊接缺陷。

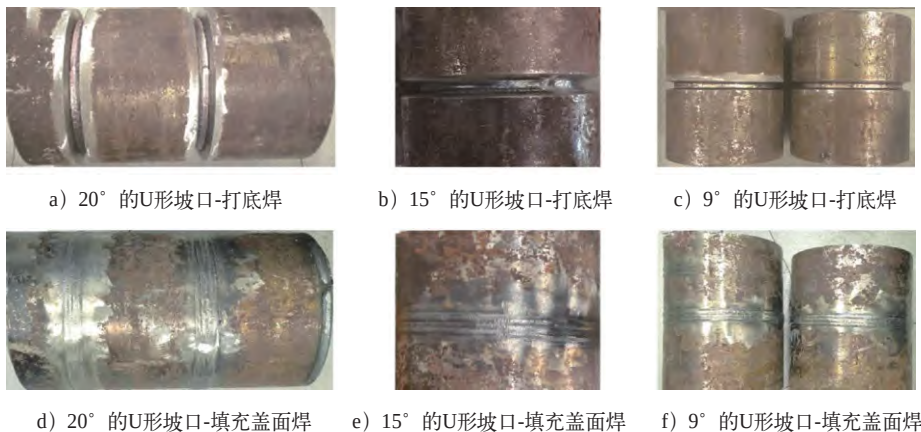


图7 坡口形貌

5 打底焊操作性分析

TIG焊枪喷嘴尺寸如图8所示。由图8可知, 喷嘴底部直径14mm, 钨极伸出喷嘴5mm。打底焊过

程中焊枪深入坡口内部, 并通过摆动焊枪以获得均匀的熔池宽度和熔深, 同时能够减小焊接变形和改善焊缝外观。而坡口宽度限制了焊枪的摆动空间, 通过分别在20°、15°和9°的U形坡口内摆动焊

枪，测量了相应坡口下焊枪能够摆动的最大角度。



图8 TIG焊枪喷嘴尺寸

在20°的U形坡口的焊接过程中，焊枪可以在21°左右的范围内摆动，此时可以使电弧对坡口两侧壁进行充分的加热和填充，从而提高焊缝的质量和强度，如图9a所示。15°的U形坡口具有一定的

优势，开口角度处于20°和9°两种坡口之间的适中位置，焊枪可以在16°左右的范围内进行摆动，如图9b所示。这样既可以使电弧对坡口两侧壁进行相对充分的加热和填充，又可以保证较小的填充量，从而提高打底焊的焊接质量和可操作性。而9°的U形坡口的开口角度过小，焊枪只能在7.5°左右的范围内摆动，如图9c所示，这就限制了焊枪的运动空间，导致在打底焊的第二、第三圈时，电弧不能够覆盖到坡口两侧壁的全部区域，这就有可能造成侧壁未熔合缺陷的发生。此外，在打底焊过程中，采用了3位教练级别焊工进行手工TIG打底焊，均认为相比9°的U形坡口，15°的U形坡口操作性更好，更容易实现良好的打底焊焊缝。因此，在使用该尺寸的TIG焊枪喷嘴进行打底焊时，15°的U形坡口既可以使电弧对坡口两侧壁进行相对充分的加热和填充，又可以保证较小的填充量，打底焊可操作性好。

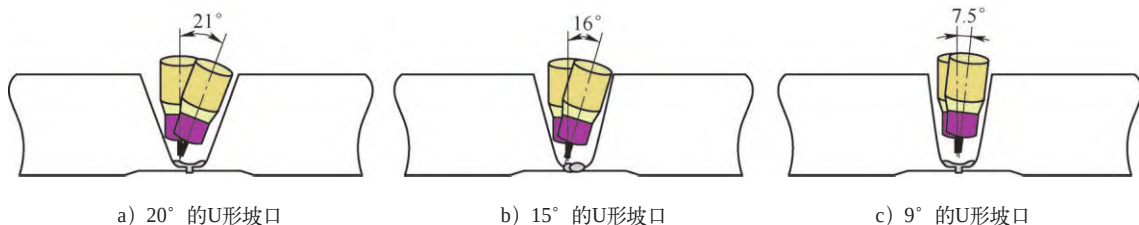


图9 不同坡口下焊枪摆动幅度

6 结束语

本文采用多层多道焊工艺对3种核电大直径厚壁碳素钢管道U形坡口进行了试验，最终获得了较为满意的焊缝质量，并分析了不同坡口形式下的电弧稳定性、焊缝排道和焊枪可操作性，可得到以下结论。

1) 基于TIG打底焊和MAG填充盖面焊，对比了20°、15°和9°的U形坡口下的电弧稳定性，结果表明，坡口尺寸对电弧稳定性影响较小。

2) 20°、15°和9°的U形坡口的填充道依次减少，焊接效率逐渐增大。

3) 在使用底部直径14mm的TIG焊枪喷嘴进行打底焊时，20°、15°和9°的U形坡口中，15°的U形坡口既可以使电弧对坡口两侧壁进行相对充分的加热和填充，又可以保证较小的填充量，打底焊可操作性好。

参考文献:

- [1] 陈小砖, 李硕, 任晓利, 等. 中国核能利用现状及未来展望[J]. 能源与节能, 2018 (8): 52-55.
- [2] 周海涛, 徐连玉, 赵振亮, 等. 核电站大径厚壁不锈钢管道焊接技术探究[J]. 电力设备管理, 2020 (6): 148-150.
- [3] 刘启明, 潘甜, 韩琦. 气保焊应用于特厚板焊接工艺设计[J]. 冶金与材料, 2022, 42 (4): 24-25.
- [4] 苑志波, 严洪丽. 120mm厚板焊接[J]. 钢结构, 2003 (6): 31-32.
- [5] 胡存银, 张富巨. 窄间隙焊接的技术与经济特性分析[J]. 焊接技术, 2001 (2): 47-48.

MW 20240409