

基峰值电流作用期间熔宽的最大最小值之差是随着焊接时间的增加逐渐减小。王厚勤等^[2]在电子束定点焊接熔池的模拟过程中考虑了金属蒸气反作用力的存在。Zhou 等^[3]提出了一种电弧和金属传输的三维弱耦合模型,利用 VOF 的方法对电弧、熔池流动以及熔滴碰撞进行了研究,发现了电弧压力、电磁力以及等离子剪切力对熔池的影响。Huang 等^[4]建立了 P-TIG 定点焊接的数学模型,利用 VOF 的方法模拟熔池振荡并通过激光光栅反射的视觉检测系统进行验证,发现熔池振荡是熔池直径的函数以及峰值电流和基值电流交替下熔池的振荡规律。Cho 等^[5]利用 VOF 的方法建立了钛合金激光熔池振荡的数值模型,他们通过不断调整激光吸收率和导电率等参数使其模拟结果与实验中熔池的直径相匹配,以达到更精确的结果。虽然国内外学者在焊接熔池数值分析和熔池震荡方面进行了大量研究^[6-10],但是在超薄板焊接熔池方面的研究相对较少。

课题组利用 FLUENT 对直流和脉冲微束等离子弧焊超薄板的焊接熔池进行数值模拟,研究 2 种状态下焊接熔池的振荡行为,同时利用计算机视觉检测系统对焊接实验进行图像采集并验证模拟的结果。

1 数学模型与实验

采用 50 mm × 10 mm × 0.1 mm 的 304 不锈钢作为实验材料,焊接方法使用 MPAW,在焊接过程中焊接电压采用 22 V,焊接速度为 4.1 mm/s。

1.1 模型假设

对数学模型作出以下假设^[11-12]:①熔池内部属于层流,是不可压缩的流体;②熔池自由表面是平面;③金属流体的性能相对稳定。

1.2 控制方程

根据模型的假设,MPAW 熔池的控制方程^[11-12]如下:

1) 连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0。 \quad (1)$$

2) 能量方程

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + H。 \quad (2)$$

3) 动量方程

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = S_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right); \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = S_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)。 \quad (4)$$

式中: ρ 为密度; u, v 分别为 x, y 方向上的速度; t 为时间; S_x, S_y 分别是 x, y 方向上的体积力; p 为流体压力; μ 为液态金属的动力黏度系数; T 为温度; λ 为导热系数; H 为高斯热源。

1.3 边界条件及模型选择

在边界条件设定时将对称面设置为“symmetry”,定义为:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0; \frac{\partial u}{\partial x} = 0。 \quad (5)$$

其它的面统一设置为“wall”,然后设置对流换热和热辐射参数。笔者利用 UDF 对材料的热物理性能参数^[13]以及熔池所受的表面张力、电弧压力、电磁力和浮力等进行编译加载。在数值模拟时采用 Solidification & Melting 模型及 SIMPLIC 算法。

1.4 实验

图 1 为熔池视觉检测系统,在焊接过程中进行熔池图像的采集。其中 LED 灯主要是作为背光光源;使用采集速率为 1 200 帧的千眼狼高速相机采集图像,然后传输到计算机中利用图像处理算法进行处理。

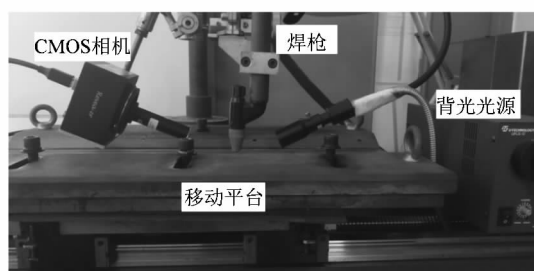
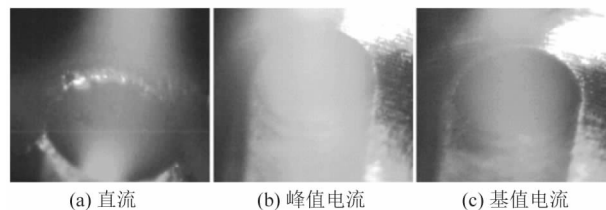


图 1 熔池视觉检测系统

Figure 1 Molten pool visual inspection system

图 2 为焊接熔池视觉检测系统采集的熔池图像。由图可知,由于没有脉冲频率的干扰,直流时熔池的轮廓更清晰。在经过图像预处理、图像滤波、锐化和填充之后使用 sobel 算子进行边缘检测,最后再进行特征提取。



(a) 直流 (b) 峰值电流 (c) 基值电流

图 2 熔池视觉检测系统采集的熔池图像

Figure 2 Molten pool image collected by molten pool visual inspection system

2 结果与讨论

图 3 为平均电流 $I = 1.8 \text{ A}$ 时直流 MPAW 熔池温度场的分布图。从图中可知,随着焊接时间的增加,熔池的温度逐渐升高直至稳定在 $2\ 200 \text{ K}$ 左右,受热源影响的区域也逐渐扩大。熔池的宽度随着焊接时间的增加逐渐变宽,并在 0.5 s 之后变化的速率降低逐渐趋于定值。但是,熔池的长度却在慢慢变长,熔池由半圆形逐渐向半椭圆形过度。这是由于在电弧高斯热源的作用下,熔池在很短的时间内长大,形成圆形轮廓,然后在工件移动过程中会产生惯性,所以熔池在移动方向会变长,使得熔池的整体轮廓逐渐变成椭圆形。由于在焊接过程中熔池周围的能量来不及散失,所以在焊接过程中会出现后拖尾现象。

图 4 为平均电流 $I = 1.8 \text{ A}$ 时直流焊接熔池流场的分布图。熔池中的液体在电磁力的作用下从熔池的中心向外沿同一方向流出又流回熔池中心形成一个回流。在电磁力、浮力、电弧压力以及 Marangoni 力共同作用下,熔池中液态金属的流速可达到 0.265 m/s 。随着温度的升高,熔池中液态金属的流速逐渐增加,这是由于随着温度的升高,熔池所受的 Marangoni 力逐渐增加。另外 Marangoni 力是作用在熔池表面的,它是促使熔池液态金属沿同一方向往四周扩展的主要作用力,所以随着它的增加熔池的宽度也逐渐增加。

图 5 为脉冲频率 $f = 25 \text{ Hz}$ 、占空比为 50% 、基值电流 $I_b = 1.2 \text{ A}$ 、峰值电流 $I_p = 2.4 \text{ A}$ 、平均电流 $I = 1.8 \text{ A}$ 的 MPAW 熔池温度场分布图。随着焊接时间的增加,熔池的温度逐渐升高直至稳定在 $2\ 100 \text{ K}$ 附近。与图 3 相比脉冲电流作用下熔池的最高温度要低于直流焊接熔池的最高温度,这是由于在脉冲频率作用下峰值电流对于熔池温度的升高起主要作用,但它作用于熔池的时间比直流时要短,不足以使熔池的温度升至直流状态下的温度。在 0.2 s 时熔池的温度要高于直流时的温度,这是由于峰值电流大于直流,电弧能量更高。随着焊接时间的增加,熔池也会逐渐成为椭圆形,并出现后拖尾,其原因与直流作用下的情况相同。由此分析,熔池的形状是由电弧热源模型与惯性共同作用的结果。

图 6 为脉冲频率 $f = 25 \text{ Hz}$ 、占空比为 50% 、基值电流 $I_b = 1.2 \text{ A}$ 、峰值电流 $I_p = 2.4 \text{ A}$ 、平均电流 $I = 1.8 \text{ A}$ 的 MPAW 熔池流场分布图。与直流时相比,不同周期内液态金属的流动速度不同,熔池内液态金属的最高流动速度要高于直流时的最高速度。这是由于电流越大电弧压力、电磁力也越大,峰值电流明显要大于直

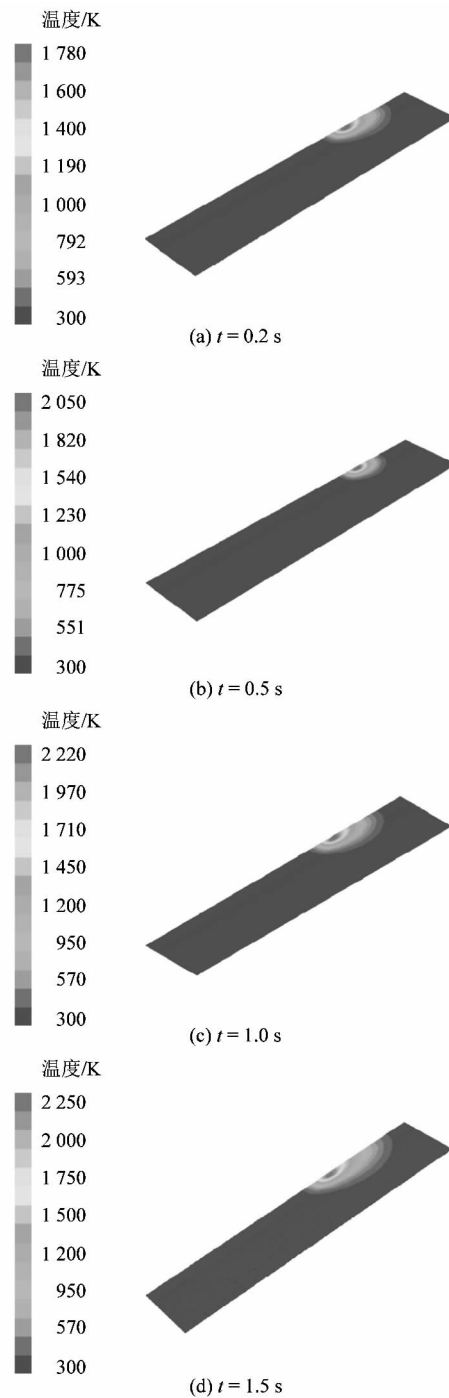


图 3 直流焊接熔池温度场分布
 Figure 3 Distribution of temperature field in molten pool of DC welding

流,且基峰值的交替时间很短只有 0.02 s ,所以脉冲时液态金属流动速度更快。虽然脉冲时流场也形成了回流,但是其最大的流速并不都是出现在熔池的中心,只有在基值电流时最大流速在熔池中心,而峰值电流时最大流速出现在熔池边缘。

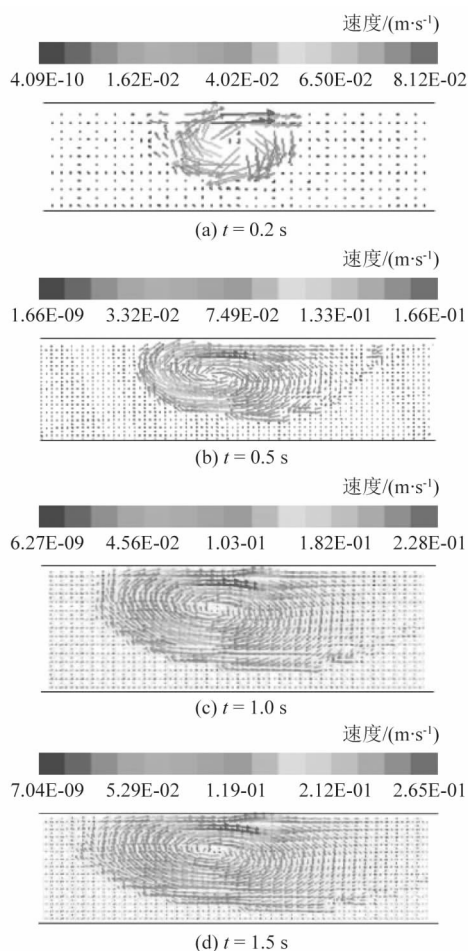


图4 直流焊接熔池流场的分布
Figure 4 Distribution of flow field of DC welding pool

图7为直流与脉冲电流焊接熔池模型中熔宽的变化。从图中可知,随着焊接时间的增加,焊接热输入增多,熔池逐渐长大,熔宽也逐渐增大直至增大到最大值,并在最大值附近上下浮动。整体比较可知,直流状态下的熔池宽度要大于频率为25 Hz时脉冲的熔池宽度。这是由于脉冲时基峰值电流的变化频率较大,熔池在峰值电流时逐渐长大,在基值电流时会有一定程度的减小;而直流状态下熔池一直处于长大状态直至达到最大值,所以直流时熔宽要大。在初始时刻直流的熔宽小于脉冲熔宽,这是因为初始时刻峰值电流大于直流,电弧能量密度更大。在达到最大值后,直流的熔宽比较平稳、振荡幅度很小;但是脉冲时熔宽的振荡幅度比直流大,这是由于在基峰值阶跃转换的瞬间熔池受力不均衡,所以会造成一定的上下波动。

图8为MPAW熔池模拟与实验测量的熔宽变化。由图可知,通过高速摄影拍摄的熔池图像在经过图像

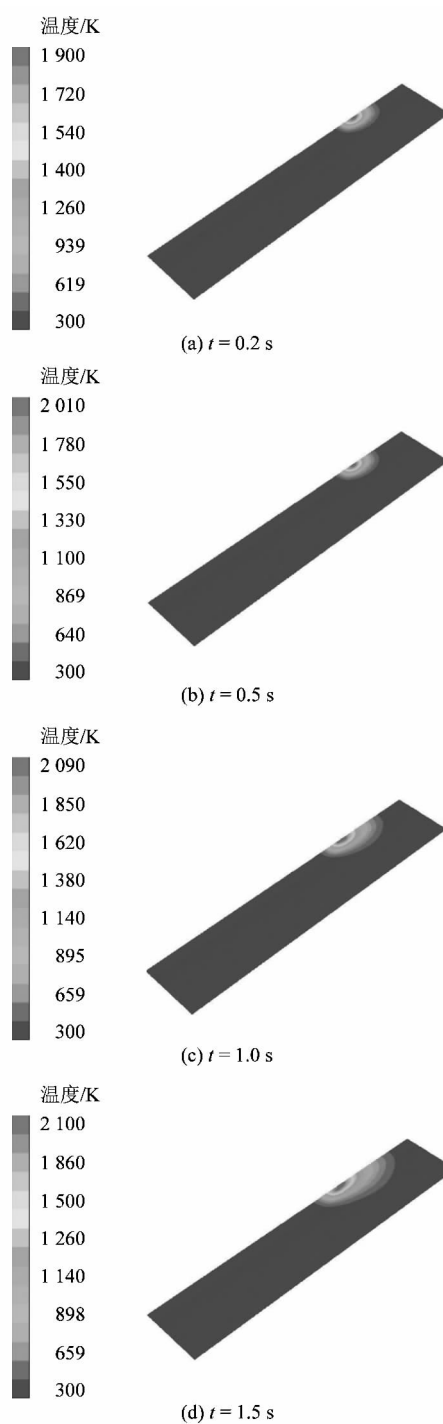


图5 脉冲电流焊接熔池温度场分布
Figure 5 Temperature field distribution of molten pool in pulse current welding

算法处理之后得到的熔池宽度与FLUENT数值模拟得到的熔池宽度变化趋势一致,尺寸相差很小。但是模拟得到的熔宽大于实验测量的熔宽,这是由于模拟的结果是理想模式,而实验过程中还会出现许多干扰因素,如:弧光干扰、工装干扰及外部环境干扰等。图8

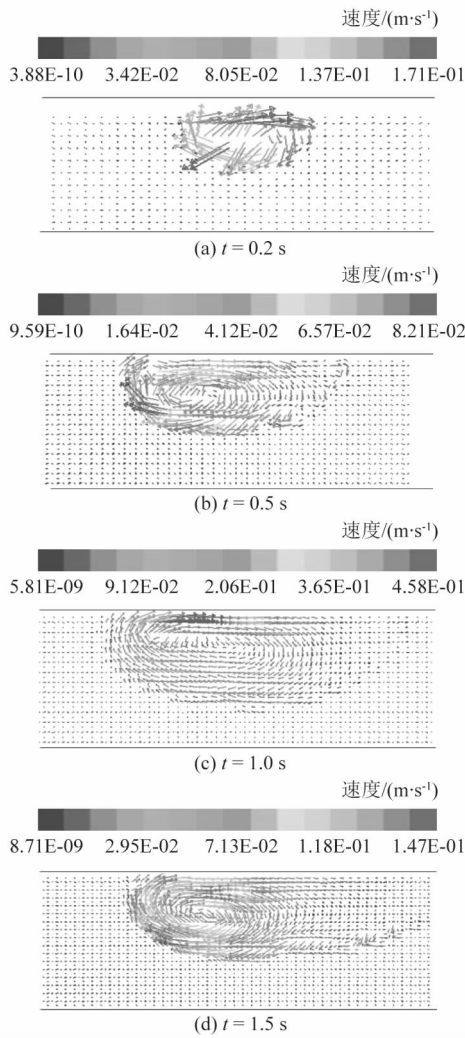


图6 脉冲电流焊接熔池流场分布
Figure 6 Flow field distribution of molten pool in pulse current welding

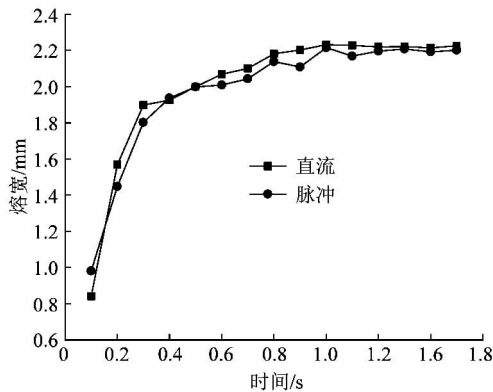


图7 直流与脉冲电流焊接熔池模型的熔宽变化
Figure 7 Melt width variation between weld pool model for DC and pulse current welding

(a)与图8(b)相比,图8(a)中直流时模拟与实验所测得的结果更加吻合,而图8(b)中模拟与实验的结果相差较大。这是由于脉冲电流时弧光与背光光源反射的光影响了图像边缘的检测,所以会产生一定误差。另外通过2个图还发现在焊接实验与模拟过程中直流与脉冲时熔池都存在一定的振幅变化。

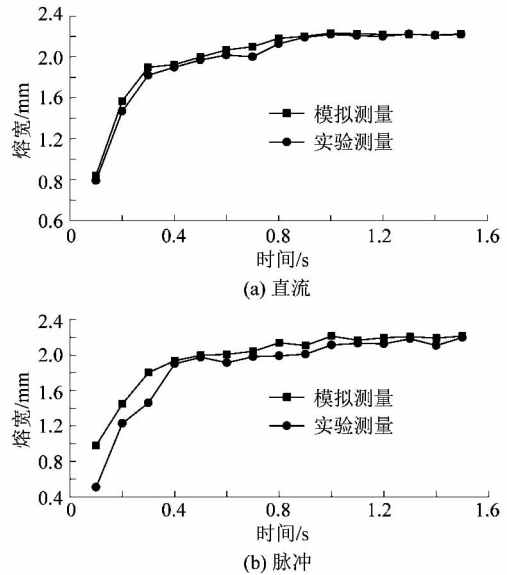


图8 MPAW熔池模拟与实验测量的熔池宽度的变化

Figure 8 Pool width variation between MPAW molten pool simulation and experimental measurement

图9为超薄板直流与脉冲微束等离子弧焊的焊接试样。直流与脉冲电流情况下焊缝的宽度都小于2 mm,图9(a)中直流状态下的焊缝宽度大于图9(b)中脉冲电流状态下的宽度,这与图7所表示的结果一致。另外,从图中也可以发现焊接试样正面的焊缝宽度大于背面的焊缝宽度。

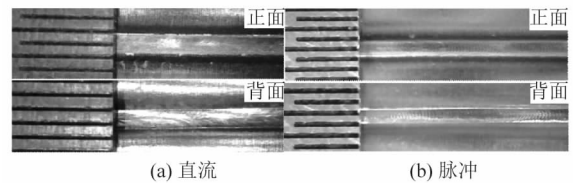


图9 超薄板微束等离子弧焊接试样
Figure 9 Micro-plasma arc welding test specimen of ultra-thin plate

3 结论

为了获得成形质量良好的焊缝,课题组通过对微束等离子弧焊的0.1 mm超薄板熔池进行数值模拟与实验研究,得出以下结论:

1) 平均电流相同的情况下,直流时熔池温度场的温度要高于脉冲电流作用下熔池的温度;直流作用下熔池的宽度也大于脉冲电流作用下的熔宽;但是,直流时熔池的振幅却小于脉冲电流时熔池的振幅。

2) 平均电流相同时,基峰值电流的交替变化会影响电弧热源对工件加热的效率,使得脉冲电流作用下熔池的温度低于直流时熔池的温度。

3) 基峰值的阶跃变化导致脉冲电流作用下熔池中液态金属的流动速度高于直流时液态金属的流动速度。

由于本研究采用的是 0.1 mm 的超薄板,在焊接过程中工件大约 30 ms 就会被熔透,所以无法通过熔深具体地研究熔池的振荡情况,这也是今后研究要突破的难点。

参考文献:

[1] 武传松,郑炜,吴林.脉冲电流作用下 TIG 焊接熔池行为的数值模拟[J].金属学报,1998,34(4):416-422.
 [2] 王厚勤,张秉刚,王廷,等.电子束定点焊接 304 不锈钢熔池流动行为数值模拟[J].焊接学报,2016,37(3):57-61.
 [3] ZHOU Xiangman, ZHANG Haiou, WANG Guilian, et al. Three-dimensional numerical simulation of arc and metal transport in arc welding based additive manufacturing[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2016,103:521-537.
 [4] HUANG J K, YANG M H, CHEN J S, et al. The oscillation of stationary weld pool surface in the GTA welding[J]. Journal of Materials Processing Technology,2018,256:57-68.

[5] CHO J H, FARSON D F, HOLLIS K J, et al. Numerical analysis of weld pool oscillation in laser welding[J]. Journal of Mechanical Science & Technology,2015,29(4):1715-1722.
 [6] LI Chunkai, SHI Yu, GU Yufen, et al. Monitoring weld pool oscillation using reflected laser pattern in gas tungsten arc welding[J]. Journal of Materials Processing Technology,2018,255:876-885.
 [7] LI T Q, WU C S. Numerical simulation of plasma arc welding with keyhole-dependent heat source and arc pressure distribution[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2015,78(1/2/3/4):593-602.
 [8] WANG Houqin, ZHANG Binggang, WANG Ting, et al. Numerical simulation of molten pool flow behavior in stationary electron beam welding of 304 stainless steel[J]. Transactions of China Welding Institution,2016,37(3):57-61.
 [9] WANG Wei, LIU Qi, YANG Guang, et al. Numerical simulation of electromagnetic flow, temperature field and flow field in laser molten pool with electromagnetic stirring[J]. Chinese Journal of Lasers,2015,42(2):48-55.
 [10] LUO Zhen, XIE Yan, CUI Shuanglin. Morphology characterization of molten pool flow behavior during K-TIG welding based on 3D reconstruction techniques[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology),2018,51(5):517-521.
 [11] 吉永丰,何建萍,王付鑫,等.超薄板焊接熔池流场数值模拟[J].轻工机械,2015,33(2):47-51.
 [12] 樊丁,霍宏伟,石珂,等.不锈钢薄板 TIG 焊三维熔池数值模拟与测量[J].兰州理工大学学报,2013,39(6):19-23.
 [13] LI Yan, FENG Yanhui, ZHANG Xinxin, et al. Energy propagation in plasma arc welding with keyhole tracking[J]. Energy,2014,64:1044-1056.

QC检测仪器网
 WWW.QCTESTER.COM

QC检测仪器网
 (www.QCtester.com)
 您身边的仪器采购专家

QR Code:

The advertisement features a computer monitor displaying the website's homepage, which includes various instrument categories like HEIDENHAIN, OLYMPUS, FARO, and Mitutoyo. A hand is shown using a mouse to interact with the website.