

# 厚板搅拌摩擦焊多维动态压电测力仪研究\*

佟 生, 任宗金, 张 军, 王郁赫  
(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 针对 18 mm 厚 2219 铝合金搅拌摩擦焊过程焊接力变化范围大、速度快, 导致难以准确测量的问题, 设计了一种大量程四支点压电测力仪, 主向 100 kN、侧向 8 kN。经理论推导发现测力仪上板厚度及跨距是影响传感器输出的主要因素, 利用有限元仿真对二者进行参数化分析, 在满足现有测力单元量程基础上确定了其合理取值。最后对测力仪进行了静态标定、动态冲击实验, 结果表明: 测力仪线性度误差小于 0.62%、向间干扰小于 0.65%, 固有频率大于 1000 Hz, 达到了焊接过程跨尺度多维力测试精度要求。

**关键词:** 大量程; 压电测力仪; 参数化; 标定实验; 搅拌摩擦焊

中图分类号: TH823

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2024)10-0035-03

## Study on multidimensional dynamic piezoelectric dynamometer for friction stir welding of thick plate\*

TONG Sheng, REN Zongjin, ZHANG Jun, WANG Yuhe  
(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the welding force of 2219 aluminum alloy with 18mm thickness variation range is wide and the speed is fast in friction stir welding(FSW) process, which lead to the difficulty of accurate measurement, a large-range four-fulcrum piezoelectric dynamometer with the principal of 100 kN and the lateral of 8 kN is designed. Through theoretical derivation, it is found that the thickness and span of the upper plate of the dynamometer are the main factors affecting the output of the sensor. The parametric analysis of the two factors are carried out by finite element simulation, and the reasonable valuing is determined on the basis of satisfying the range of the existing force measuring unit. Finally, the static calibration and dynamic impact experiment of the dynamometer are carried out. The results show that the nonlinearity of the dynamometer is less than 0.62%, the interdirectional interference is less than 0.65%, and the natural frequency is more than 1000 Hz, which can meet the requirement of multi-dimensional force measurement precision in the welding process.

**Keywords:** large range; piezoelectric dynamometer; parameterization; calibration experiment; friction stir welding

### 0 引言

搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)是由英国焊接研究所于 1991 年提出, 因具有焊接性能好、高效节能等优点在航空航天、汽车等行业得到了广泛应用<sup>[1,2]</sup>。经研究发现, 焊接三向力对焊缝质量影响很大<sup>[3]</sup>, 对焊接过程中力信号的获取亦是研究其他工艺参数及信号影响规律的基础和前提<sup>[4]</sup>。

南京航空航天大学王吉胜等人<sup>[5]</sup>使用自制造的应变式八角环结构配以后端信号调理电路和 LabVIEW 开发系统, 实现了焊接过程中力、温度及振动信号的测量, 监测系统轴向量程为 40 kN, 侧向量程为 6 kN。东华大学麦允杰、

徐天天等人<sup>[6,7]</sup>面向 3 mm 厚 6061 铝合金, 设计了一种置于主轴前端的压电式焊接力监测系统, 主向量程分别为 10、15 kN。大连理工大学刘一川等人<sup>[8]</sup>对 18 mm 厚 2219 铝合金 FSW 过程进行仿真, 得到三向力值分别为: 顶锻力 82 kN、进给力 8 kN、侧向力 7 kN。重型运载火箭燃料贮箱需要实现厚度为 18~30 mm 的焊接, 显然上述测力系统已经不再适合, 火箭贮箱的大厚度对 FSW 多维动态力测量而言是一个挑战。

压电测力仪具有很高的测量精度及固有频率, 非常适用于焊接过程中力的测量<sup>[9,10]</sup>。本文面向 FSW 设计了一种主向量程为 100 kN、侧向 8 kN 的压电测力仪, 探究了

影响测力单元输出的主要因素及规律并确定了其合理取值,为稳定焊接提供了保障。最后通过标定实验对测力仪静、动态性能进行了验证。

## 1 测力单元理论输出公式推导

为适应某搅拌摩擦焊焊接设备安装需求,将整体式四支点测力仪改进为两段拼接式,1、2号测力单元为一段,3、4号测力单元为另一段,组装后仍为四点支撑式。但受安装需求限制, $Y$ 向跨距已经固定。简化模型如图1所示。

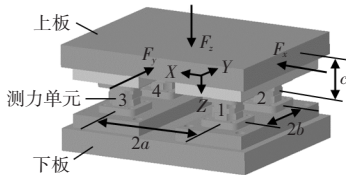


图1 测力仪简化模型

考虑到测力仪由于主向受力产生变形所引起的侧向输出、侧向受力产生附加力矩而带来的主向输出,推导出4个测力单元在3个方向上的理论输出公式如下

$$F_{x1} = F_{x2} = F_x/4 - F_{z-x}, F_{x3} = F_{x4} = F_x/4 + F_{z-x} \quad (1)$$

式中  $F_{z-x}$  为由于  $Z$  向加载产生的变形而引起的测力单元  $X$  向力值输出

$$F_{y1} = F_{y3} = F_y/4 - F_{z-y}, F_{y2} = F_{y4} = F_y/4 + F_{z-y} \quad (2)$$

式中  $F_{z-y}$  为由于  $Z$  向加载产生的变形而引起的测力单元  $Y$  向力值输出

$$F_{z1} = \frac{1}{4}F_z - \frac{F_x \cdot c}{4a} - \frac{F_y \cdot c}{4b}, F_{z2} = \frac{1}{4}F_z - \frac{F_x \cdot c}{4a} + \frac{F_y \cdot c}{4b},$$

$$F_{z3} = \frac{1}{4}F_z + \frac{F_x \cdot c}{4a} - \frac{F_y \cdot c}{4b}, F_{z4} = \frac{1}{4}F_z + \frac{F_x \cdot c}{4a} + \frac{F_y \cdot c}{4b} \quad (3)$$

式中  $2a$  为测力单元  $X$  向跨距,  $2b$  为  $Y$  向跨距,  $c$  为测力仪侧向加载点与测力单元内部石英晶片法向间距。在测力仪量程一定的情况下,  $F_{z-x}$ ,  $F_{z-y}$  与上板厚度直接相关,通过式(1)~式(3)综合分析可知:测力仪上板厚度及跨距是影响测力单元输出的主要因素。

## 2 参数化仿真分析

现有测力单元量程为主向 50 kN、侧向 5 kN。为避免在焊接过程出现测力单元所受力超过其量程而造成无法继续测量的情况,利用 Ansys 对测力仪上板厚度及  $X$  向跨距进行参数化分析,在测力仪上施加三向力  $F_x = F_y = 8$  kN,  $F_z = 100$  kN,得到4个测力单元在3个方向上的输出。

### 2.1 上板厚度参数化

根据焊接设备实际尺寸情况,初步取测力仪  $X$  向跨距  $2a = 280$  mm,此时两段测力仪相距 100 mm,以测力仪上板即焊接台的厚度  $h$  为参数进行仿真,变化范围取 50 ~ 130 mm,间隔为 10 mm,仿真结果如图2所示。

通过图2可知:随着测力仪上板厚度增加,4个测力单

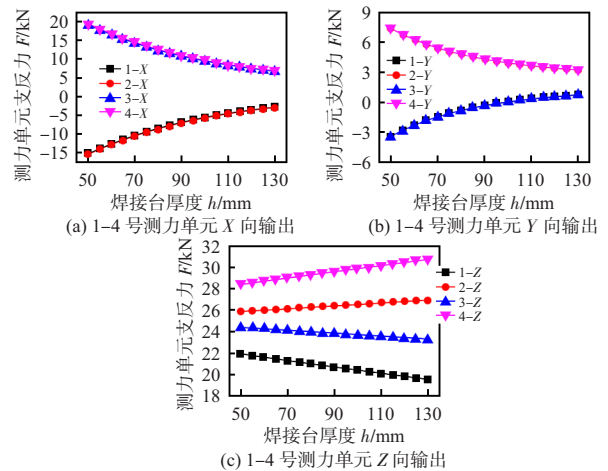


图2 上板厚度参数化仿真结果

元侧向输出均减小,在主向上,4号测力单元输出最大,并随着板厚增加而增大。

考虑到设备重量及4号测力单元主向输出随焊接台厚度变化趋势,希望其厚度尽可能小。但随着板厚减小,测力单元侧向输出增加,可能会超过量程 5 kN。仿真数据显示测力单元主向输出都在 25 kN 左右,根据传感器设计特点知:超出的主向量程可以分配到螺栓预紧力上,以提高其侧向量程。测力单元受力情况如图3所示。

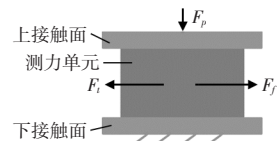


图3 测力单元受力情况

根据预紧力  $F_p$ 、摩擦力  $F_f$  及侧向力  $F_t$  之间应满足的关系,可得到

$$n\mu F_p = F_f \geq \lambda F_t \quad (4)$$

$$F_t \leq \frac{n\mu F_p}{\lambda(1-\sqrt{2})} \quad (5)$$

式中  $n$  为摩擦面数,为 2;  $\mu$  为接触面间摩擦系数,取 0.1;  $\lambda$  为安全系数,取 1.1。基于此得到测力单元侧向量程增量  $\Delta F_t$  的范围为 [3 200, 4 500] N,故侧向量程可提高至 [8 200, 9 500] N,结合前述数据可知:为满足测力单元各向输出均在其量程内,测力仪上板厚度  $h$  至少为 105 mm。

### 2.2 X向跨距参数化

选取上板厚为 105 mm,对测力仪  $X$  向即横向跨距  $2a$  进行参数化,变化范围取 200 ~ 310 mm,间隔 10 mm,仿真结果如图4所示。

通过图4可知:随着  $X$  向跨距增加,测力单元  $X$  向输出变大, $Y$  向和  $Z$  向输出变化不大。

因此,为保证焊接过程平稳进行, $X$  向跨距应尽可能小,同时还要留有足够的安装空间,综合考量取上板厚度  $h = 120$  mm,  $X$  向跨距  $2a = 300$  mm。此时4个测力单元各向输出情况如表1所示,均在各向量程内。

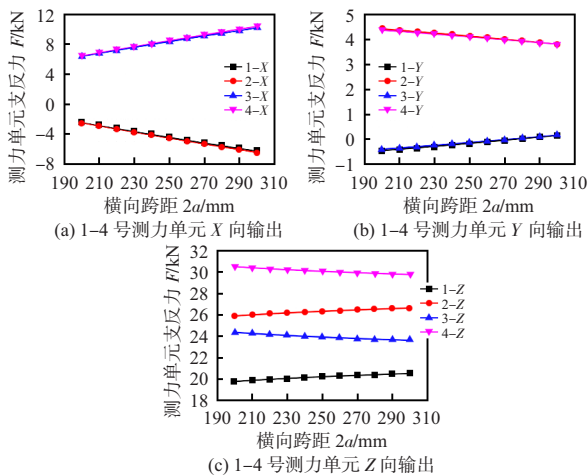


图 4 X 向跨距参数化仿真结果

表 1 测力单元各向输出力值

输出力值/N	X 向	Y 向	Z 向
1 号单元	-3 546	544	19 843
2 号单元	-3 670	3 429	26 811
3 号单元	7 513	569	23 463
4 号单元	7 657	3 411	30 448

3 标定实验

3.1 单段测力仪静态标定实验

对单段测力仪进行静态标定,如图 5 所示,使用标准力传感器在单段测力仪 3 个方向上施加阶梯力。其中主向加载至 50 kN,侧向加载至 5 kN,实验现场如图 6 所示。

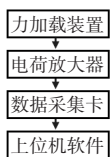


图 5 标定系统示意

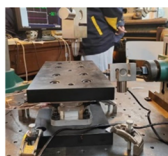


图 6 静态标定实验现场

实验重复 3 次,对所得数据进行拟合、解耦处理后,得到测力仪三向重复性误差、线性度误差、向间干扰等静态指标如表 2 所示。

表 2 单段测力仪三向静态指标 %

静态指标	重复性	线性度	向间干扰	
X 向	0.35	0.09	$F_x \rightarrow F_y$	$F_x \rightarrow F_z$
			0.51	0.65
Y 向	0.60	0.39	$F_y \rightarrow F_x$	$F_y \rightarrow F_z$
			0.45	0.61
Z 向	0.23	0.62	$F_z \rightarrow F_x$	$F_z \rightarrow F_y$
			0.32	0.29

通过上述数据可知:单段测力仪三向重复性误差最大为 0.6%,线性度误差最大为 0.62%,向间干扰最大为 0.65%,达到了压电多维力测试精度要求。

3.2 单段测力仪动态标定实验

在焊接过程中,测力仪受到随时间变化的动态载荷,为

实现焊接力的准确测量,要求测力仪具有较高的固有频率。对单段测力仪施加锤击脉冲信号,将其产生的电荷信号接入放大器、采集卡转换为可测量的电压信号,再经 DEWEsoft 软件内部快速傅里叶变换后得到其三向幅频特性曲线如图 7 所示。

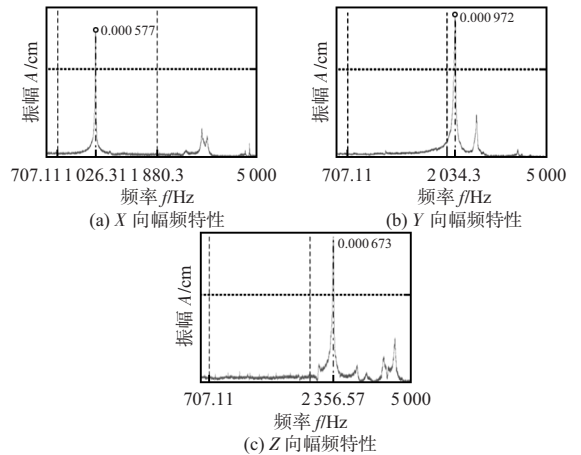


图 7 单段测力仪三向幅频特性

从图 7 中曲线可以看出,单段测力仪三向固有频率分别为: X 向 1026.31 Hz, Y 向 2034.3 Hz, Z 向 2356.57 Hz,具有良好的动态特性。

4 结论

本文设计了一种面向厚板搅拌摩擦焊的两段式多维动态压电测力仪,经理论推导及有限元参数化分析得出了影响测力单元输出的主要因素是测力仪上板厚度及测力单元的布置跨距,并且随着上板厚度增加,测力单元侧向输出均减小,最大主向输出增大;随着 X 向跨距增加,测力单元 X 向输出变大, Y 向和 Z 向输出变化很小。在满足现有测力单元量程基础上,同时考虑到测力仪重量及测力单元安装空间,最终取上板厚度为 120 mm, X 向跨距为 300 mm。对加工后的单段测力仪进行了静、动态标定实验,结果表明:其三向重复性误差、线性度误差在 0.62% 以内,向间干扰小于 0.65%,固有频率均在 1000 Hz 以上,具有良好的静、动态性能,可胜任 18 mm 厚 2219 铝合金搅拌摩擦焊跨尺度多维动态力在线测量工作。

参考文献:

[1] 宋晓村,朱政强,陈燕飞. 搅拌摩擦焊的研究现状及前景展望[J]. 热加工工艺,2013,42(13):5-7.  
 [2] 王强,刘东利,白石峰,等. 铝合金厚板搅拌摩擦焊焊接工艺研究[J]. 有色金属加工,2023,52(1):28-31.  
 [3] RADISAVLJEVIC I, ZIVKOVIC A, RADOVIC N, et al. Effect of friction stir welding process parameters on forming quality and mechanical properties of 2024-T351 Aluminum alloy lap welding joint[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013,23(12):3525-3539.

(下转第 41 页)

制备工艺条件下进行重复实验。通过实验确定了能获得最佳辐射功率及光电转换效率的 CBL 线宽尺寸为  $13\ \mu\text{m}$ , 此时, 辐射功率可提高约  $1.3\%\sim 3.2\%$ , 光电转换效率可提高  $1.0\%\sim 2.1\%$ 。实验结果表明, 在水平结构的 LED 芯片中, CBL 阻挡了 p-pad 下电流流经电极下方区域, 减少电极下方的注入电流, 从而抑制了该区域内光子的产生。同时, CBL 提高了电流横向扩展, 从而在有源层的有效光发射区域内提供了较大的电流密度, 增加了辐射功率, 有效地提高了光电转换效率。然而, 随着 CBL 线宽的继续增加超过  $13\ \mu\text{m}$  时, CBL 面积也增加, 引起从 n-pad 到 p-pad 的最佳垂直电流路径区域变小, 导致局域电流密度增加, 使得电子与空穴的复合发生在较窄的区域, 从而导致温度升高引起非辐射复合增加, 降低了 LED 芯片辐射功率与光电转换效率。通过研究, 确定了尺寸为  $40\ \text{mil}\times 22\ \text{mil}$  的水平结构的 GaN 基 LED 获得最大输出功率的最佳 CBL 尺寸。研究结果有望在未来高效 LED 芯片的设计中得到有效应用。

#### 参考文献:

- [1] 陈静, 王计平, 郑奇, 等. 基于多波段红光 LED 的低能量光疗系统设计[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(5): 65-70.  
CHEN Jing, WANG Jiping, ZHENG Qi, et al. Design of lowenergy phototherapy system based on multiband red light LED [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(5): 65-70.
- [2] MA T, WANG Y, TANG M, et al. LED: A fast overlapping communities detection algorithm based on structural clustering[J]. Neurocomputing, 2016, 207: 488-500.
- [3] O'BRIEN D C, ZENG L, LE-MINH H, et al. Visible light communications: Challenges and possibilities[C]//2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, IEEE, 2008: 1-5.
- [4] LIU J P, ZHU Y X, GUO W L, et al. The effect of ITO annealing on electrical characteristic of GaN based LED[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(13): 425-431.
- [5] FUJII T, GAO Y, SHARMA R, et al. Increase in the extraction efficiency of Ga N-based light-emitting diodes via surface roughening[J]. Appl Phys Lett, 2004, 84(6): 855-857.
- [6] LIN H Y, JU K, WANG S W, et al. Improvement of light quality by DBR structure in white LED [J]. Optics Express, 2014, 23(3): 27-33.
- [7] HUH C, LEE J M, KIM D J, et al. Improvement in light-output efficiency of InGaN/GaN multiple-quantum well light-emitting diodes by current blocking layer[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 92(5): 2248-2250.
- [8] PARK J S, SUNG Y H, NA J Y, et al. Use of a patterned current blocking layer to enhance the light output power of InGaN-based light-emitting diodes. [J]. Optics express, 2017, 25(15): 17556-17561.
- [9] LIU C C, CHEN Y H, HOUNG M P, et al. Improved light-output power of GaN LEDs by selective region activation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(6): 1444-1446.
- [10] KAO C C, SU Y K, LIN C L. Enhancement of light output power of GaN-based light-emitting diodes by a reflective current blocking layer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(14): 986-988.
- [11] 曹伟伟, 朱彦旭, 郭伟玲, 等. 不同形状的电流阻挡层对 GaN 基 LED 光效的影响[J]. 发光学报, 2013, 34(4): 480-483.
- [12] CHEN T M, WANG S J, UANG K M, et al. Current spreading and blocking designs for improving light output power from the vertical-structured GaN-based light-emitting diodes [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(9): 703-705.
- [13] CUI H, KIM W J, PARK S H. Analysis for optimal size of current blocking layer in InGaN-based vertical LEDs[J]. Semiconductor Science and Technology, 2019, 34(10): 105003.1-105003.7.

#### 作者简介:

田媛(1994-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事 GaN 基 LED 芯片和先进电子制造方面的研究工作。

闫晓密(1987-), 女, 通讯作者, 硕士, 高级工程师, 主要从事微纳工艺及量子器件先进设备方面的研究工作。

#### (上接第 37 页)

- [4] 肖波, 王庆霞, 杨建国, 等. 搅拌摩擦焊接过程中主轴下压力控制研究[J]. 机械设计与制造, 2018(8): 152-154.
- [5] 王吉胜, 黎向锋, 左敦稳. 基于 LabVIEW 的搅拌摩擦焊在线监测系统[J]. 航空制造技术, 2011(23): 152-154.
- [6] 王庆霞, 麦允杰, 杨建国. 基于 LabVIEW 的搅拌摩擦焊焊接力监测系统[J]. 机床与液压, 2014, 42(20): 94-97.
- [7] 徐天天, 王庆霞, 杨建国, 等. 新型搅拌摩擦焊焊接力监测系统的设计[J]. 制造技术与机床, 2015(2): 49-52.
- [8] 刘一川, 任宗金, 张军, 等. 搅拌摩擦焊焊接过程多维力测试研究[J]. 现代机械, 2022(6): 44-47.
- [9] 张军, 王尊豪, 李新阳, 等. 整体式压电三向车削测力仪的研

制[J]. 仪表技术与传感器, 2022(7): 123-126.

- [10] 张军, 卢炜昌, 任宗金, 等. 用于脆硬材料加工中压电测力仪研制[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(7): 69-71.  
ZHANG Jun, LU Weichang, REN Zongjin, et al. Development of Piezoelectric Dynamometer for Machining Brittle and Hard Materials [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(7): 69-71.

#### 作者简介:

佟生(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为搅拌摩擦焊多维力测试。

任宗金(1978-), 男, 博士, 教授, 主要研究领域为压电机理及压电式传感器在气动力学方面的测量。