

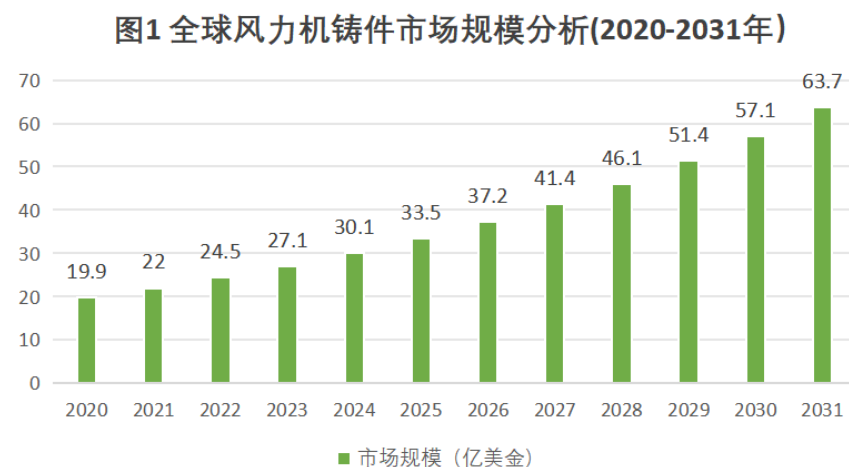
# 风电产业铸件制造技术与设备的现况与趋势

文 | 林子钦

随着全球暖化和气候变迁对我们生活环境的影响越来越大，全世界都在着急减少空气中的碳排放量。目标是到了2050年能让地球上的碳排放量达到零排放。中国台湾也不例外，正全力以赴，推动能源的转型，比如用更多的再生能源来取代传统的石油和煤炭，以此提高我们能源的自给自足率，同时也保证能源供应的稳定和清洁。在这些能源转型的领域中，离岸风电成为一个关键领域，不仅在中国，也是全球许多国家积极投资和研究的重点。

风力机中的其中一个关键零组件是铸件，包含轮毂铸件及机舱底座铸件等。观察全球的风力机铸件市场，从2020年的约19.9亿美元，预计到2031年会增长到63.7亿美元。这表示在未来十年里，全球的风力机铸件市场会增长超过3倍。同时，该趋势也显示全球对于再生能源的需求正在快速增加，尤其是对风力发电的需求。

近年来，全球对风力机铸件的需求稳步增加，但国际风力机制造商面临俄乌冲突与疫情等因素造成的成本上升压力。面对绿色能源需求的持续扩大，如何利用智慧化制造技术提升风力机铸件



的生产效率并有效控制成本，成为该产业关注的重点。

当前，风力机铸件制造业正在向智慧化、自动化和节能化方向转型，以提升生产安全性和效率，并降低能源损耗。自动化设备的导入是为了降低制程的生产安全风险，同时，鉴于铸造业是能耗密集型行业，面对气候变迁带来的挑战，行业正推进高效、环保的制造技术。此外，物联网、感测技术、机器学习与人工智能的整合，正提升运营效率与稳定性，进一步增强铸件产品的市场竞争力。

随技术进步与成熟，智慧制造在风

力机铸件制造领域的应用将在未来变得更广泛、深入。这不仅促进风力机技术创新，也为再生能源转型提供稳固的基础，以加速实现净零排放目标。

## 国际风力机铸件智慧化制造技术布局

### 风力机铸件制造流程

风力发电机组件的制作过程极为关键，涵盖从原料准备至成品检验的一系列复杂步骤。此过程起始于精选适当的铸造砂和结合材料，将其填充至模具所在的砂箱，以形成铸件的模型。金属随

后在高温下熔化并注入模具，此阶段必须严格控制温度和浇注时间，并防止气泡和不均匀分布现象，以确保铸件的高质量。

在金属凝固后，砂型将被拆除以取出铸件，随即进行清理砂痕和去除多余材料等后续处理，例如切割浇口和流道。此外，砂磨和抛光工序将用于整理铸件表面，而高速喷砂则用于去除表面残余物质，进一步提升铸件的外观和质感。细节检验阶段包括进行精确尺寸量测、超声波检测及表面磁粉测试，以验证铸件达到规定要求，并通过机械性能的测试。基于特定需求，铸件可能需要进一步的加工，如钻孔、铣削等机械加工工序。最终，铸件将接受全面品质审查，以确保满足所有设计和质量标准。考量到防蚀和美观，多数风力机制造商会要求进行表面涂装，涂装后的铸件需再次检验，以确保涂层均匀、附着力强。

随着技术进步，部分制造流程已开始利用先进的智慧化设备，以提升制造效率、精确度及安全性，同时减少生产成本。整体而言，风力机铸件的制造是一个高度专业化且技术密集的过程，涉及众多细节和技术要求。从选材、铸造、加工到最终的检验和处理，每一步都需精确控制，以确保最终产品能达到最高的质量标准。未来，随着更多智慧化制造技术的引入，风力机铸件的生产效率和质量将进一步提升，为全球风力发电技术的发展贡献重要力量。

## 国际风力机铸件智慧化制造技术介绍

### 铸件镗铣加工设备

铸件镗铣加工设备在风力机铸件生产中扮演着关键角色，这些高精度的机



荣田精机 PL-600CM

械不仅确保了铸件的尺寸精确与表面光滑，而且大幅提升了生产效率和产品质量。尤其轮毂铸件等风力机内部零组件有着较高难度且复杂的加工形状需求，特别在随着风力发电机朝向大型化发展，这些设备的应用更显其重要性。在制程中，先进的控制系统被广泛应用于铸件的镗削、铣削和钻孔，以形成所需的产品规格、形状和细节。

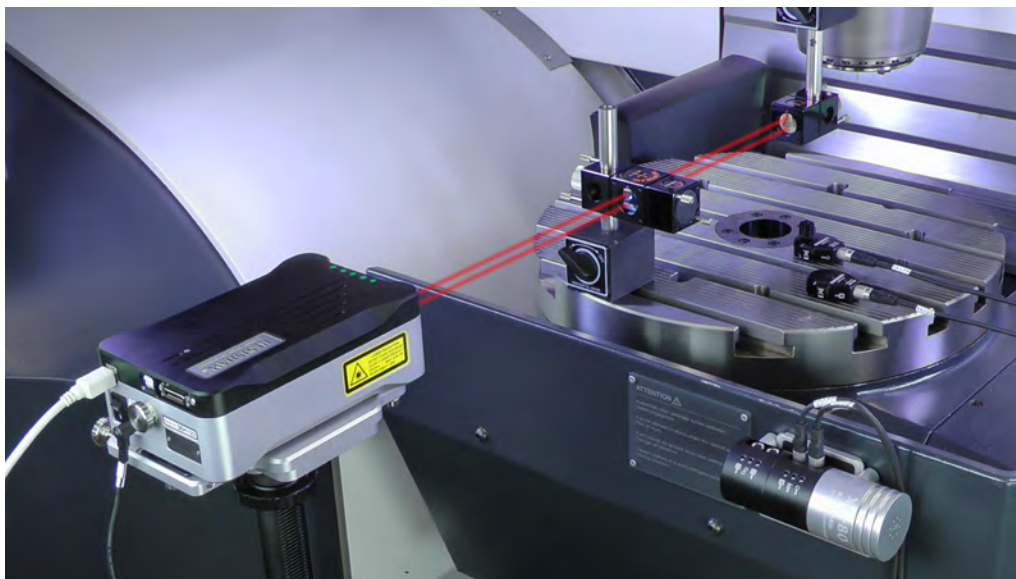
在全球范围内，多家知名的设备制造商已经开发出适用于处理大尺寸铸件的加工设备，以满足离岸风电产业对于大型铸件加工的需求。这些设备制造商，包括意大利的 PAMA、中国的沈阳机床、德国的 Heckert 以及日本的三菱重工，都在这一领域有着突出的贡献。特别是 PAMA 公司所开发的 SPEEDRAM 系列镗铣床，已被广泛应用于加工离岸风电领域所需的大型铸件。

为了迎合离岸风力发电机向大型化发展的趋势，PAMA 的 SPEEDRAM 镗铣床提供了 8 公尺的加工范围，能够满足 20MW 甚至更大功率风力发电机铸件的加工需求。随着未来更大型风

力发电机的出现，这些加工机具也正逐步扩展至 10 ~ 12 公尺的加工范围，以适应这一发展趋势。

PAMA 的 SPEEDRAM4000 型镗铣床不仅在离岸风电行业中有着广泛的应用，也被广泛使用于航空、重型机械制造、军事国防以及其他能源产业领域。该机型拥有强大的加工能力和灵活性，X、Y、Z 三轴的大行程设计使其能够处理各种大型工件。此外，其工作台最大承重达到 180 吨，可客制化提升至 230 吨，能够处理极为重型的铸件或金属组件。多轴运动能力（包括 X、Y、Z 和 W 轴）确保其在多方向上的高精度加工能力。此外，这些机器配备了先进的数位控制系统，能够进行高精度且高效率的加工作业。

除此之外，我国在大型金属加工领域，也在风力发电领域中拥有突破性的进展。荣田精机目前已经开发出 6 公尺龙门式车铣复合中心，以因应国际间日益成长的大型铸件生产需求。该设备的推出，不仅标志着荣田精机在风力机制造市场的积极布局，也展示了其在高端制造技术领域的实力。另外，荣田精



激光追踪仪 XL80

机凭借其创新的 PL-600CM 智慧复合加工设备，成功获得国际市场，包括欧洲、美国等地风力机制造商的认可与订单。这款设备能够一次完成多种加工程序，包括数控立车加工和龙门式加工中心的铣削与钻孔，大幅提升了生产的效率和加工件的精度。

我国目前大型风电铸件制造商永冠能源，也在新厂房采用了荣田精机的先进设备。这不仅凸显了荣田精机设备在满足复杂和大尺寸加工需求方面的能力，也展现了我国在全球风力发电供应链中的重要地位。荣田精机的创新不仅促进了本土制造业的发展，同时也为全球的可再生能源事业贡献了重要的技术力量。

#### 质量检验设备

在风力机铸件的质量检验方面，对于刚从模具中取出的半成品进行质量检查是不可或缺的一步。这项检查主要聚焦于评估铸件的外观和尺寸准确性，确保每件铸件都达到了预定的制造规格。

对于规模较小或是预算有限的铸造厂来说，他们可能会选择成本较低、操作简便的检测工具，比如采用红外线追踪仪等单向测量设备来进行尺寸精度的初步评估，如 RENISHAW 公司生产的激光追踪仪 XL80，能够有效追踪并确认铸件的尺寸是否符合精准的制造标准。这类仪器的选用往往基于成本效益和操作效率的考量，但前提是使用的设备必须拥有高稳定性的激光波长，以保障测量结果的准确性和可靠性。

然而，面对 8MW 或更大功率的离岸风力机铸件，由于这些铸件的尺寸通常超出了传统三坐标测量机的测量范围，尽管设备制造商能够提供定制化解决方案以满足这些特殊需求，这往往会导致成本的进一步增加。因此，在离岸风电产业中，许多业者可能仍会选择使用操作更为灵活的单向测量设备来完成尺寸测量和质量检验工作。

另外，部分业者采用先进的大型三坐标式测量设备，这类设备的投资

成本虽然较高，但能提供更高的测量精度和稳定性，尤其适用于大型且要求高精度的加工件。在众多制造这类量测设备的公司中，德国蔡司公司 (Carl Zeiss AG) 开发的桥式三坐标测量机 (Bridge-Type Coordinate Measuring Machines) 是工业加工领域中常用的一种，被广泛应用于各种成熟的制造业中。

#### 铸件喷砂 / 珠击设备

在风力机铸件的制造和加工过程中，珠击和喷砂是两种关键的表面处理技术，它们在制程上有明显的差异且各自扮演着不同的角色。珠击，又称为珠击或喷丸，通过使用小圆形钢珠连续敲打铸件表面，使工件可达到一定程度的表面处理，或者透过连续撞击来增强铸件的硬度和抗疲劳性。而喷砂则主要用于清洁铸件表面和提升表面粗糙度，以利于后续加工如电镀、烤漆等。它通过高速喷射砂粒或其他磨料，去除铸件表面的氧化层、锈蚀、残留砂粒和其他杂

质，达到清洁和精加工之目的。在铸件制造的毛胚阶段，通常会使用珠击来强化表面而不是喷砂，而喷砂则是在涂装前的阶段使用，以确保涂层的良好附着。

尽管珠击和喷砂在原理上相似，设备和流程的差异却很大。珠击过程中除了要考虑回收、集尘、强度外，还需对变形和破碎的钢珠进行筛选和分离，并严格控制钢珠的流量和大小。这些控制措施确保了珠击制程的效果和质量。而喷砂设备则需考虑砂回收、集尘及使用的砂质强度等。

喷砂设备透过高速喷射的砂粒或其他研磨材料，能够有效去除铸件表面的各种不纯物，如氧化层、锈迹和残余的砂粒，以强化其外观品质。为了提高生产效率，部分铸造商会引进自动喷砂系统。这种系统可以有效地对铸件进行表面处理，从而节省了时间和人力成本，如 Blastman 的自动喷砂机器设备，可代替传统的人工喷砂作业，提升生产效率并降低人工喷砂作业的安全风险。

### 其他风力机铸件创新技术——WeldCast 铸铁焊接

随着全球对于再生能源需求的持续增加，风力发电已成为推动能源转型的关键力量。风力机的关键零部件，特别是大型铸件，对于保障风力机的高效运行和长期耐用性至关重要。由于这些零组件必须承受强大的机械压力和恶劣的外部环境。这就要求它们必须具有无懈可击的质量和坚固的耐用性，任何制造过程中的小缺陷都可能对风力机的整体性能造成不利影响。

在目前的制造环境中，这些关键零组件的制造不仅依赖于高端的铸造技术，还需投入大量的成本和时间，即便如此，制造过程中的微小缺陷也无法完

全避免，导致生产效率低下且成本高昂。然而，目前的制造和维修过程存在着一些关键的挑战和限制，这正是 WeldCast 计划应运而生的原因。

面对这些挑战，该计划诞生并目标透过创新技术降低大型铸件的制造和维修成本，以提高风力机的整体经济性并因应未来可能的挑战。这个计划的长期研发目的，是为了因应在风力机迈向大型化的同时，能够用扣件连接或焊接的方式，将铸件以模块化的方式拼接，或者可利用该技术修补铸件的瑕疵。除了可降低成本、提高铸件生产的可行性外，亦允许中小型铸造厂有机会使用该技术制造风力机商所需的零件规格。

该计划汇集风力机系统商 SGRE 和 Vestas、丹麦技术商 Force Technology、丹麦技术大学风能研究所 (DTU Wind Energy) 和铸件商 Baettr 共同参与。该计划预计将大型铸件成本降低 10% ~ 15%，对风力机总制造成本的影响预计将在 0.5% ~ 1% 之间。这不仅意味着制造商能以更低成本生产更高质量的风力发电机，还将缩短制造周期，提升生产效率，并为那些受到生产能力限制无法参与供应链的中小型铸造厂开辟新的机会。

### 结论与建议

在目前的全球经济情势中，离岸风电产业正面临多重压力，包括物价上涨、供应链的困难和风场建设成本的持续攀升。这些挑战迫使业界必须迅速采纳创新技术，以提升生产效率并降低制造成本。此外，随着风力发电设备逐渐迈向大型化，全球的铸件制造商也正快速进行技术升级，以迎接市场的需求。

为了适应这一趋势，国际知名的设备制造商，比如意大利的 PAMA 和中国台湾的荣田精机，已经推出了专门针对大型铸件加工的高效能镗铣机，例如 PAMA 的 SPEEDRAM4000 系列和荣田的 PL-600CM。这些高端设备的引入，不仅能够满足对大型零件加工的需求，还能提升整体生产的精度和效率。在尺寸测量及表面处理方面，自动喷砂系统和先进的三坐标测量设备的应用，极大提高了产品质量的检测效率和准确度。此外，WeldCast 计划正集中研发一种创新技术，专注于利用焊接和扣件连接技术来实现铸件的模块化组装，这将为风力机零件的制造提供更多的灵活性和成本效益。

我国风力机大型铸件制造商如永冠能源等，目前正在进行产业的初步探索，尽管面临诸多学习和挑战，但已经取得了一定的成果，并为未来更大型的风力发电机零件生产做好了准备。此外，在加工设备方面的使用因过去在相关领域的经验，亦已有周全的计划且已经开始使用国内生产的加工设备。

未来，我国风力机铸件商应持续深化与国内加工设备商的合作关系，同时也寻求与国内外的设备制造商紧密合作，以确保技术的领先地位。这不仅对提升国内风力机零件制造业的竞争力有着至关重要的意义，也为我国的加工设备制造业带来了新的发展机遇。随着技术的进步和产业的合作，我国在风电设备制造领域的地位将进一步巩固，且在与国际业者共同应对未来风力机迈向大型化挑战的同时，提高国内加工设备产业的技术水平。MFC