

钼：对风力发电机至关重要

为了防止气候变化带来最糟糕的后果，风能和太阳能等可再生能源在全球发电量中的份额必须要增加两倍以上。而钼在多项绿色技术中都发挥了作用，对于风力发电的作用尤为关键。因此，随着对风力发电机需求的增长，许多风电设备部件对钼的需求也将增加。



根据世界气象组织的数据，2020年和2021年大气中温室气体浓度创历史新高。2021年7月是地球有记录以来最热的月份。疫情造成的经济放缓未能遏制环境中的温室气体浓度，尽管温室气体排放量暂时有所下降。人类有太多的必要活动如供暖和交通，一直严重依赖或完全依赖化石燃料。根据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）的估计，如果世界保持目前的排放水平，预计气候变化将产生严重的负面影响，包括极端干旱和洪水，人类大规模流离失所以及粮食供应受到威胁。尽管风能、太阳能和水力发电等可再生能源技术已经占到当今发电总量的25%，但到2050年，它们的份额还需要增加到接近80%。为实现这一转变，需要大量的土地和原材料。钼就是这样一种材料——一种不可替代的合金元素，提供足够的机械性能来承受风力发电过程中巨大的作用力。

克服传动系统的问题

风力发电过程会将庞大的叶片捕获的巨大且变化的风力集中在相对较小的齿轮齿和其他部件上。风对部件施加的巨大应力甚至可能损害或破坏传动系统。为了克服齿轮箱故障并提高效率，开发了无齿轮风力涡轮机或"直接驱动"系统。在这些系统中，转子直接连接到发电机，免去了传动系统。然而，大多数直接驱动系统要依靠钕等稀土金属制造的大型磁铁，这带来了供应上的潜在风险，因为在未来几十年，可再生能源对稀土金属的需求将呈指数级增长。电动汽车和消费类电子产品等其他应用也在争夺这些关键资源。与此同时，稀土金属的开采特别是精炼集中在少数几个国家，增加了供应风险。幸运的是，传动系统的问题也可以通过添加钼改善齿轮钢性能来解决，钼提高了这些钢的硬度、强度和韧性。并且钼的供应没有风险，主要矿床遍布美洲和中国，地理分布较平衡。

目前，无齿轮传动系统主要用于大功率的海上风力发电机和部分3兆瓦的陆上风电机，大部分在欧洲。而除了稀土磁体相关的供应链风险外，未来的趋势是向更高功率的陆上涡轮机发展，这也有利于采用齿轮箱的设计。考虑到未来设计的转矩要求，若采用直接驱动系统，将需要十分巨大笨重的发电机，因此无法在现实中广泛使用。

风力发电机概览

目前，在所有可再生能源技术中，风力发电对于增加钼的使用量具有最大的潜力。与其他发电技术相比，风电设备需要的钢和铸铁数量最多。塔架重量中钢的占比是绝大部分（约98%），这两种材料都用于机舱部件—涡轮机中容纳所有发电部件的部分，包括齿轮箱，钢约占后者重量的一半。铸铁主要用于机舱（40%）和转子（30%）中。海上风力发电机的机舱和转子轮毂的重量可达900吨，还不包括由玻璃纤维增强聚合物材料制成的叶片的重量。海上风力发电机还需要固定在海床上的锚固结构，这通常是钢制的单桩或三桩结构。

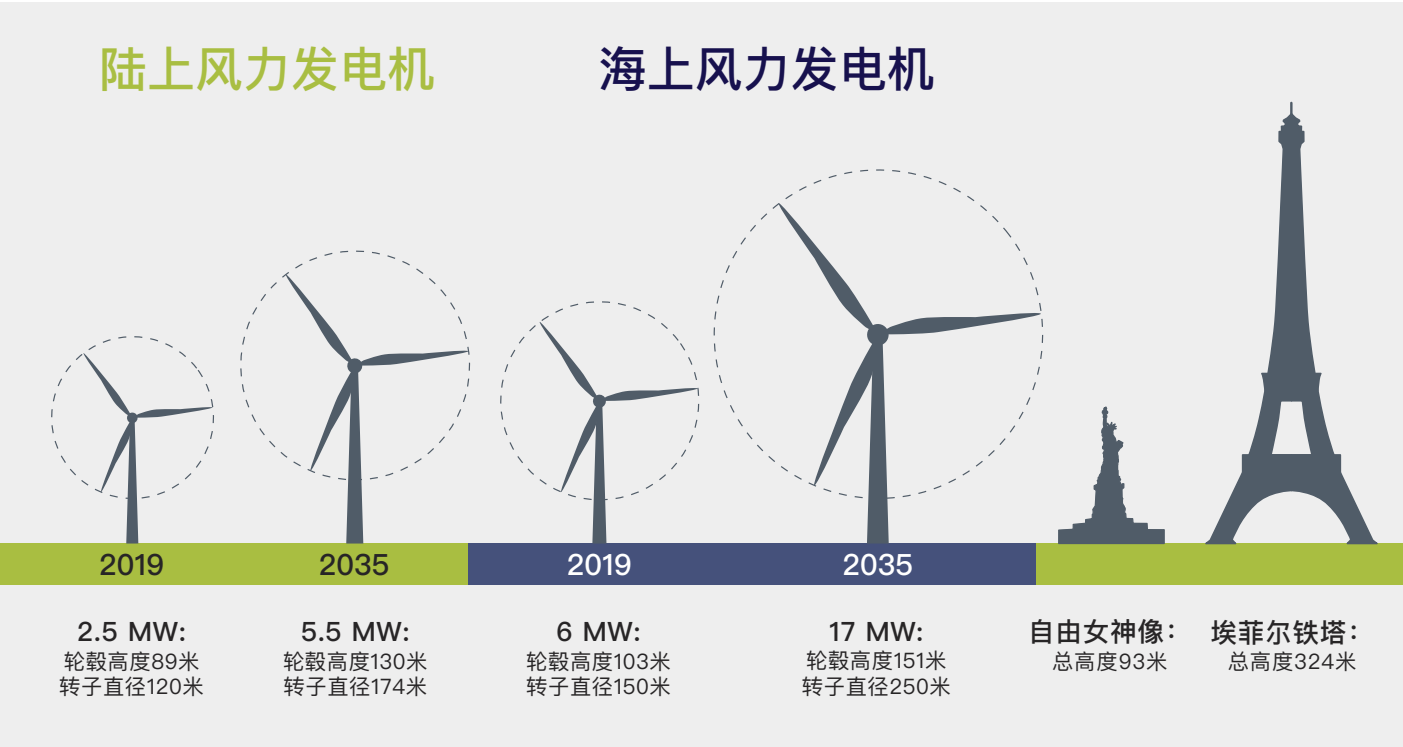
风力发电机按照它们在理想条件和风速下的发电量划分功率等级。目前，陆上风力发电机的平均额定功率为3兆瓦（MW），但主要涡轮机制造商已经开始瞄准5兆瓦范围的更大输出功率的市场。可参考以下数据，最近建造的容量系数为42%的5兆瓦风力涡轮机足以为大约5000个中等大小的欧盟家庭供电。海上风力发电机要大得多，能够产生更多的电力：目前它们的运行功率为7兆瓦，但正在探索设计功率高达16兆瓦的涡轮机。在欧洲，目前陆上风电与海上风电装机容量比为80:20，

预计不会有大的变化。其他地区运行中的海上风电机组份额要低得多，但预计未来会接近欧洲的比例。

风力发电机的塔筒由单独的环形构件组成。它们的长度为20–25米，由扁平轧制碳钢厚板制成。大多数现代风电塔筒高70–140米，直径为4–5米。最新最大的海上风电塔筒一般由合金钢 S355 (AISI A276) 建造，其屈服强度约为350兆帕（或50 ksi）。由于仅在生产屈服强度水平为500兆帕及以上的钢板时才需要钼，因此在可预见的未来，钼不会被用于塔筒的环形构件。但钼在连接固定塔筒方面发挥了重要作用。塔筒的各个部分通常使用不超过M72（直径72毫米）的螺母和螺栓进行组装。典型的螺栓用合金钢是34CrNiMo6 (1.6582) 或30CrNiMo8 (1.6580)，钼含量在0.2–0.5%之间，可满足对强度和韧性的很高要求。

准备好迎接风的到来

含钼合金钢在风电机组的动力总成部件上应用最广泛。转子的低转速必须被传输并转换为较高的转速，以适合驱动发电机，因此，需要轴和齿轮箱。由于这些部



最近和未来的陆上和海上风力发电机模型尺寸和额定功率比较（来源：伯克利国家实验室）。为便于比较，右侧是纽约自由女神像和巴黎埃菲尔铁塔的高度。



➤ 带有传动系统的风力发电机机舱内部



➤ 风力涡轮机机舱在高空中，人员很难进入进行维护和检修。采用较好的材料，可以减少进行代价不菲的维修

件在可靠性和性能方面十分关键，因此需要一个结合了优异的强度、韧性和抗疲劳性能的钢种。调质钢如42CrMo4 (AISI4140) 是驱动轴的完美解决方案。CrNiMo合金渗碳钢是齿轮部件的首选。通常，这些钢中钼含量为0.2–0.3%。

然而，随着风电机尺寸和额定功率的不断增加，转矩密度也不断增加，齿轮钢面临着更苛刻的性能要求。受以往IMOIA项目的启发，齿轮制造方面的最新发展表明，通过将钼含量提高到0.5–0.8%，可以大幅度提高材料性能。在减重要求的推动下，未来还可能开发出其他潜在的钼应用。因此，等温淬火球墨铸铁铸件和超高强度钢板在动力总成承载框架和壳体方面可发挥越来越重要的作用。现在这些钢材的钼添加量通常在0.3–0.8%之间。

风力发电机使用多少钢、铸铁和钼？

110–140吨钢/兆瓦*
18–21吨铸铁/兆瓦*
100–120公斤钼/兆瓦*

* 每兆瓦的具体金属需求量

示例：

3 MW陆上风电机： 400吨钢
最大的海上风电机： 1500吨钢

预计到2050年的需求**：

4亿吨钢
6500万吨铸铁
30万吨钼

** 根据国际能源署的“超过2度情景”，到2050年，需要增加3500 GW的风电容量。这些估算不包括安装船、自升式作业平台、起重机等特殊设备所需的钢材。

对当前风电机各种部件的详细分析表明，每额定兆瓦需要100–120千克钼。考虑到技术的发展，特别是风力涡轮机的额定功率不断提高，预计风力发电市场的很大一部分将会较密集地使用钼。根据国际能源署“超越2度情景”对齿轮传动和无齿轮传动混合技术的预测，从现在到2050年，风力发电行业对钼的需求量应该在30万吨左右，超过了钼一年的开采总量。就建造船舶、起重机和自升式钻井平台等必需的重型运输和安装设备所用的钢铁合金材料而言，考虑到钼在其中的用量，这一数字还会大大增加。

为世界供电却不产生碳排放似乎是不可能的，但就像开发有效的新冠疫苗和适应疫情一样，人类完全有能力面对挑战。无论未来哪种可再生能源发电的预测被证明是正确的，钼都会随风而行，大有作为。
(Hardy Mohrbacher)