

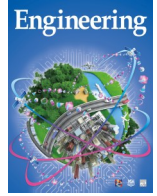


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Hydraulic Engineering—Review

水利水电工程领域的创新材料

Emanuele Quaranta^{a,*}, Peter Davies^b

^a European Commission Joint Research Centre, Ispra 21027, Italy

^b Marine Structures Laboratory, IFREMER Centre Bretagne, Plouzané 29280, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 October 2020

Revised 7 April 2021

Accepted 25 June 2021

Available online 15 September 2021

关键词

轴承

复合材料

大坝

水电

海洋

密封件

涡轮机

摘要

水电行业目前正在经历几项技术发展。新技术和方法的不断涌现,使水力发电更加灵活和可持续。研究人员最近还开发出了新材料以提高水电技术的性能、耐用性和可靠性;然而,缺乏对其进行系统讨论的研究文献。因此,本文介绍了用于水电应用的新型材料,并对它们的性能、优势和局限性进行了讨论。例如,复合材料可以使钢铁设备的重量减轻50%~80%,聚合材料和超疏水材料可以减少4%~20%的压头损失,新型轴承材料可以减少6%的轴承磨损。虽然某些材料的初始成本相对于传统材料的成本尚不具有竞争力,但这些改进提高了材料的效率,延长了材料寿命,减少了浪费和维护需求。本文根据以下类别描述新型材料:涡轮机、大坝和水道、轴承、密封件及海洋水电的新型材料。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

水力发电是一种可再生能源,它通过涡轮机和发电机的旋转,将水能转化为电能。2020年全球水力发电装机容量为1308 GW,预计到2050年将增长约60%,以遏制主要由化石燃料引起的全球气温上升问题,并满足能源需求。水力发电发展将有助于创造60万个专业工作岗位,预计需要1.7万亿美元的投资[1]。

水力发电行业受到了以下新挑战的影响:①需要增加灵活性以弥补风力和太阳能发电的高度不稳定性,并在日常和季节性规模上提供辅助服务,在非设计条件下高效工作。抽水蓄能电站对于按需提供和消耗能源至关重要。②需要建设更大的水库来缓解洪涝和干旱问题。③农村电气

化还通过为现有的水力建筑和小型屏障提供电力,刺激了小型水力发电站的发展,而这些设施已经有了其他用途。④要最小化水力发电站产生的影响,并且要使水力发电是环保的。因此,一些新兴的水力发电技术正在开发中,以满足这些需求[2–6]。新型材料可以在降低生产劳动成本,减少污染、浪费和材料(特别是由于涡轮转子等水力部件的重量大幅减少)方面发挥重要作用,同时提高了性能和耐久性。然而,由于制造成本和原材料成本较高,一些新材料的初始成本还不具有竞争力。

然而,尽管相关主题研究很重要,但文献中尚未报道水力发电中应用新材料的最新科学综述。例如,迄今为止,关于复合材料在水力发电涡轮机中的开发或使用的报道很少,而且少数已发表的报道要么仅限于理论研究,要

* Corresponding authors.

E-mail addresses: emanuele.quaranta@ec.europa.eu, quarantaemanuele@yahoo.it (E. Quaranta).

么局限于非常具体的应用[7]。因此, 本文结合一些相关案例研究, 讨论了用于水力发电应用的新材料, 特别是过去几十年才引入的材料。本文并非旨在描述和分析水力发电应用的传统材料, 这方面的内容在文献中可以找到。

新型材料分为以下几类: 用于涡轮机的新型材料、用于大坝和水道的新型材料、用于轴承的新型材料、用于密封件的新型材料和用于海洋水力发电的新型材料。本文将留出一节来讨论其局限和未来展望。

2. 用于涡轮机和液压设备的新型材料

涡轮机是将水能转化为机械能的部件。涡轮机由叶片组成, 叶片在与水流相互作用时绕旋转轴旋转。水轮机可分为主要利用水压力的反击式涡轮机和利用水流速度, 即水动能的冲击式涡轮机。重力机利用水的重力, 仅用于非常低水头 ($< 5 \text{ m}$) 的应用[8]。水轮机利用河流的动能, 原理类似于风力涡轮机。

通常用于高水头涡轮机的材料为铬含量 17%~20% (最低铬含量应为 12%, 以提供耐大气腐蚀性) 的奥氏体不锈钢, 以提高保护膜稳定性, 延长转轮叶片的寿命。叶片也可选用马氏体不锈钢来制造, 其强度是奥氏体不锈钢的两倍[9]。低水头机器通常由不锈钢或考登钢制成[10]。水轮机通常由玻璃纤维、碳纤维或增强塑料制成[11]。

通常, 用于高水头应用的涡轮机必须采用能够抵抗水压产生的高应力以及疲劳、侵蚀和气蚀的材料。低水头涡轮机不会承受高应力和压力; 但是, 其功率/重量比相当小。因此, 选择材料的主要目的是减轻重量[†], 抵抗磨损和疲劳。此外, 大型涡轮机的重量会显著增加运输和安装成本, 尤其是在偏远地区。因此, 减少涡轮机的重量使非常低水头的应用更经济可行十分重要[7]。例如, 在参考文献[12]中, 一个实验室规模的涡轮机材料从钢换成铝后, 其效率从 33.6% 提高到 34.8%, 重量从 15 kg 降低到 6 kg。减轻重量的另一个好处是可以简化运输和安装程序, 特别是在海上和山区的运输和安装。

如上所述, 新型材料还可以通过限制气蚀、侵蚀、腐蚀和疲劳的影响, 确保水力设备更长的使用寿命[13–16]。气蚀现象的发生是由于空隙和气泡的形成, 此时液体压力迅速变化。这种空隙的内爆会因流体压力的变化而形成强烈的冲击波, 尤其是在冲击式涡轮机中。泥沙腐蚀是颗粒

物碰撞在材料上引起部件的损坏。疲劳是重复循环应力产生的过程, 如在载荷变化和振动期间。水力发电工业也受到生物污染的影响 (如斑马贻贝等入侵物种在涡轮机和其他结构上因细菌积聚而生长)。腐蚀是氧气和空气共同作用的结果, 用新材料代替钢可以将腐蚀降到最低。不锈钢是一种复杂的合金, 主要含有 Cr、Ni 和其他微量元素, 如 Mo、Mn、C、N 和 Ti。基于它们的溶解度, 这些元素能够以硫化物、碳化物、氮化物等二次颗粒物的形式析出, 从而提高已安装部件的机械性能和耐腐蚀性[11]。

最近, 新型材料已经被引入涡轮机和液压设备: ①涂层可以更好地抵抗侵蚀、腐蚀和气蚀, 并减少摩擦 (即相关水头损失); ②结构材料可以更好地抵抗载荷并减轻重量[7]。新型制造技术, 如三维 (3D) 打印[17][‡]和表面处理技术[15]也正在开发中。

2.1. 新型涂层材料

超疏水涂层材料为减少表面摩擦提供了绝佳的机会 [14,18–19]。该材料应用在一个非常低水头的涡轮机上进行了数值测试[20], 在设计点将涡轮机效率提高了 4% (图 1 [20])。此外, 超疏水材料具有自清洁、耐腐蚀、防结冰等特点[20–21]。类似地, 超疏水润滑剂融合复合材料可以防止贻贝附着在水力发电结构上。它是在美国水力技术办公室的支持下, 并与美国垦务局、美国陆军工程兵团和美国 BioBlend Renewable Resources 公司合作[22]开发的。

涂层对于抵抗气蚀和磨损也很重要 (尤其是在高泥沙负荷的水域)。涂层主要分为氧化物、碳化物和氮化物的硬质涂层, 非金属 (聚氨酯、环氧树脂和尼龙) 的软质涂

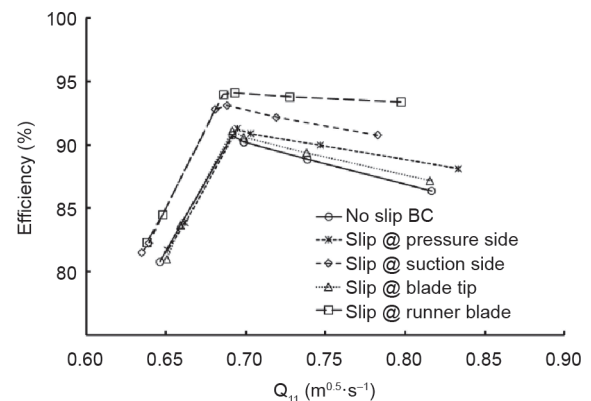


图 1. 不同壁边界条件 (BC) 下液压效率与单元排放 Q_{11} 的关系。不同的情况包括: 整个流道无滑移、压力侧滑移 (即超疏水材料)、吸入侧滑移、叶尖滑移以及整个叶片表面滑移[20]。

[†] The power generated by a turbine is proportional to the product of the head and flow, thus turbines installed in low head sites need high flow rates to generate significant power, and thus require a large runner diameter. Further considerations on this can be found in Ref. [10] for water wheels, Kaplan and Francis turbines.

[‡] It is worth mentioning that a type of 3D printing in turbine manufacturing exists since the 1990s when the "MicroGuss" by Sulzer (now Andritz) was developed. With this method, a Pelton turbine is sprayed by micro-welding which gives much higher resistances than forging from one piece.

层和硬质基体材料中增强体的复合金属陶瓷涂层[15]。

参考文献[23]对用于水轮机的新型涂层材料进行了综述。与纳米和常规涂层相比，同时具有纳米和微米级碳化钨（WC）晶粒的双峰涂层，如35CrMo上的WC-10Co-4Cr双峰涂层，具有更好的微观结构、更低的孔隙率、更高的硬度和更高的抗泥浆侵蚀能力。此外，双峰结构表现出最大的抵泥浆侵蚀能力。

在参考文献[13]中，已经提出了用于涡轮机的新型涂层。使用13Cr4Ni钢细化层进行细化后，显微硬度提高了2.6倍。含60%氧化铝的Ni-Al₂O₃基复合涂层展现出最强的显微硬度，并使腐蚀情况有所减少。高速氧燃料（HVOF）涂层钢具有比等离子氮化12Cr和13Cr-4Ni钢更强的抗腐蚀性。参考文献[24]中提到用HVOF喷涂碳化钨涂层代替离子氮化12Cr和13Cr-4Ni钢。等离子氮化是一种防止水轮机磨损的优秀的表面处理技术。在气蚀和喷浆侵蚀下，它使空化侵蚀率降低了96%，而HVOF涂层使喷浆侵蚀率降低了46%，在气蚀侵蚀下效果不佳[24]。更多的研究应该集中在这些材料在不同操作下的更好的性能表现。

在参考文献[15]中，已经报道了改变晶粒尺寸、相含量或不同机械性能的材料产生不同的抗气蚀性；因此，先进的表面处理技术，例如，搅拌摩擦加工正处于研究中。

通过小型机械触点发电的摩擦电材料也正处于开发中[25]。例如，使用丙烯酸酯树脂（添加含氟材料）作为摩擦层材料，制备了一种新型有机涂层纳米摩擦生电纳米发电机，以改善现有液-固摩擦生电技术的不足（成本高、复杂度高、微结构容易损坏）。该涂层通过在航行期间收集波浪能，为船舶上多个商用发光二极管（LED）供电，具有输出性能好、稳定性高、工艺简单、成本低等优点[26-27]。未来其在海洋水力发电技术和水轮上的应用具有广阔的前景[28]。

2.2. 新型结构材料——复合材料

复合材料因其刚度大、比强度高、成本合理的特点，已经成为大型风力涡轮机叶片的主要材料。然而，由于在这方面的研究还很缺乏，它们还没有广泛应用于水力涡轮机上。复合材料可使涡轮机组件的重量减轻80%。不锈钢的密度在7500~8000 kg·m⁻³之间，而复合材料的密度通常在1500 kg·m⁻³（如碳纤维增强聚合物）到2500 kg·m⁻³（如玻璃纤维增强聚合物）之间[7]。

由于复合材料具有低密度、高刚度、高韧性和良好的疲劳性等优异性能，因此可以为水力发电行业提供新的机遇。此外，它们耐腐蚀抗磨损，易于组装，耐化学试剂，

可以延长涡轮机叶片的使用寿命，同时最大限度地降低维护成本。然而，复合材料通常具有更高的形变能力，这可能成为高速旋转机械在套管连接和间隙安全方面的一个问题[29]。

复合材料由微观或宏观成分的混合物组成，这些成分在形态和化学成分上不同，基本上互不相溶，用以改进材料的性能，如刚度、强度和韧性。这些成分在复合材料中保留了它们的特性；因此，尽管它们共同作用，但其并不完全溶解或融合在一起。通常而言，这些组件可以被物理识别，并在彼此之间显示出不同的界面[30]。纤维增强复合材料的开发通常是为了提高比强度和比刚度（即生产既坚固又坚硬的轻质结构）。纤维有三种基本形式。

- 连续纤维：长而直，通常在单向层中相互平行使用。
- 多向连续纤维：用于机织物或缝合层，提供具有适应负载条件的多向强度。
- 短切纤维：短且通常随机分布（一般为玻璃纤维）。

复合材料中有三种主要的增强纤维材料：玻璃、碳和芳纶（Kevlar™），它们通常与聚合物基体结合在一起。碳纤维复合材料比玻璃更轻、更硬、更坚固、更昂贵。它们广泛应用于飞机结构和风力涡轮机叶片，这些叶片通常很长（100 m）[15,31-32]。碳纤维和玻璃纤维复合材料不需要昂贵的防腐蚀保护，因为它们不像钢一样腐蚀和降解；但它们会经历湿老化[33-35]。芳纶纤维，如Kevlar™，通常作为复合增强材料被添加到复合材料中，以提供抗冲击性能[36]。然而，纤维增强聚合物主要限于在低转速涡轮上的应用（例如，在海洋应用和低水头涡轮中），因为在高转速下可能发生脆性破坏，这可能会产生灾难性后果。

过去十年中，复合材料的研究一直是计算力学研究的主要目标之一。基于正交各向异性复合材料组分的平均性能，对其进行了数值模拟；然而，很少有模型能超过成分弹性极限状态。因此，大多数程序都局限于弹性情况下的数值计算。研究人员已经提出了不同的理论来解决这一问题，他们通过考虑复合材料的内部结构来预测其性能。最常见的两个理论是均质化理论和混合理论[37]。这两种理论在参考文献[37]中被应用于流体动力涡轮机的研究中，研究发现由复合材料制成的转轮的启动扭矩比钢转子低5.5倍，在低水流速度下性能更好，并且更易于运输、操作、维修和启动。

在参考文献[7,30,38-39]中可以找到复合材料应用于高水头涡轮机的一些有趣的例子。在参考文献[30]中，使用Kevlar™ 49和短切玻璃纤维作为环氧树脂基体中的增强纤维制造了带有22个桶形叶片的Pelton水轮机。它们的

制造过程已被描述过，尽管涡轮机还没有在使用效率和使用寿命方面进行测试。在参考文献[39]中，Pelton水轮机的桶形叶片是由复合材料（碳+热塑性塑料）使用3D打印机生产的，比钢材料轻1/8，且与钢材料具有相近的强度。Pelton复合桶形叶片所用复合材料的材料成本为200欧元，而金属桶形叶片的单位成本为300欧元。在参考文献[7]中，作者研究了用轻质复合材料叶片替代小型螺旋桨式涡轮不锈钢叶片的可能性。选用碳纤维增强的热塑性塑料的原因，是因为其密度更低，叶尖位移更小，且展现出与不锈钢涡轮相同的峰值效率。然而，复合材料叶片的叶片弯曲程度略高，水头增大。在参考文献[38]中，一项关于2 MW混流式涡轮机可行性的研究表明，复合式涡轮机的重量可能比目前的钢制涡轮机轻50%~70%。当考虑压力管、螺旋外壳、导叶、涡轮转子和尾水管时，重量减轻情况如图2所示。

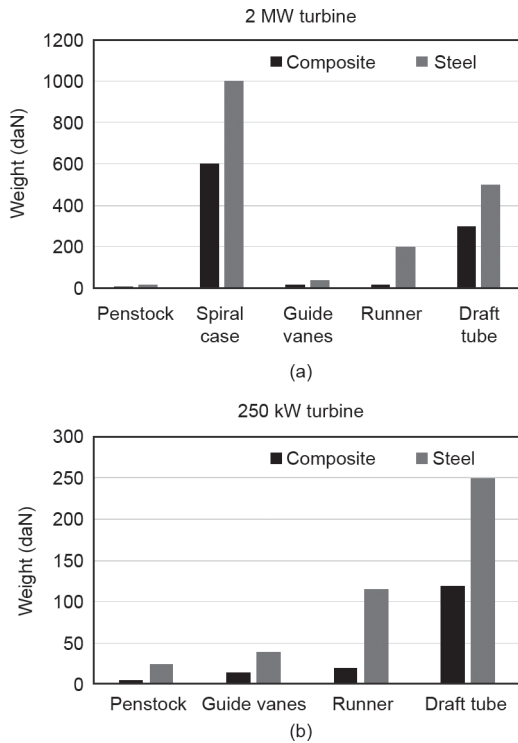


图2. 在两个研究案例中，比较了复合材料和钢材料（改编自参考文献[38]）的组件重量。(a) 2 MW 涡轮机；(b) 250 kW 涡轮机。1 daN = 10 N。

重力机也在经历新型材料的发展。在奥地利的尤登堡[40]，碳钢已被用于上射式水轮的4 m水头应用（图3）。使用碳钢可以制造更轻的水轮，其重量为7 kN，低于预计的9.8 kN的钢制水轮重量[通过应用公式（1）估算][10]。

$$G = g \rho_s \varphi (H(Q+k))^{\psi} \quad (1)$$

式中， G 为上射式钢质水轮的重量（kN）； H 为水头（m）； Q 为流量（ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ）； $k=0.15$ ， $\varphi=0.151$ ， $\psi=2.042$ ，为上射式水轮的经验系数； ρ_s 为材料（钢）密度。



图3. 上射式水轮，直径为4 m，宽0.75 m。

高密度聚乙烯（HDPE）是最近在低水头水力发电行业引入的另一种材料。它比钢更轻，已被用于水轮的制造。相对而言，它更便宜，并且更耐非腐蚀性水（海水是腐蚀性水）。此外，由于HDPE组件的重量轻，现场水轮拆卸和重新组装工作更为容易[41–42]。

2019年7月，Perceron Power公司在美国西北太平洋国家实验室（PNNL）和犹他州立大学水资源研究实验室的支持下，利用先进的制造方法，设计并测试了一种由复合材料制成的阿基米德螺杆。研究发现，轻质树脂转移模塑具有更低的生产成本、更少的浪费和排放，以及重量比钢制的轻25%~30%。由于复合材料叶片在模具中有凝胶涂层，因此不需要底漆或耐腐蚀涂料，并且降低了腐蚀和摩擦，最大限度地减少了摩擦水头损失[43]。

此外，海洋水力发电技术也包括在低水头环境中，并使用了复合材料。例如，第一台潮汐轮机原型SeaGen潮汐轮机（在北爱尔兰装机功率为1.2 MW [31,44]），由玻璃纤维和碳纤维在聚合物基体中组合而成。其优点是重量轻、刚度高，具有有效的比强度及复杂形状制造的规模经济。然而，海水的腐蚀可能是一个问题。更多细节见下文海洋水力发电部分。

3. 用于大坝和水利工程建筑的新型材料

大坝是一种水力结构，它拦截河流的水流，并在上游形成一个人工盆地。当一个大坝被建造用来调节河流上游水位，而没有形成一个合适的人工盆地来储存大量的水时，它被称为堰坝或屏障。水库是一种多功能的基础设施，具有防洪、灌溉、发电和供水等功能。大坝的安全性已经得到了显著改善，特别是20世纪90年代以来。然

而，大坝工程师仍在继续寻求新的技术来建造更安全、更经济、更环保的大坝。对大坝及其常见材料的回顾可以在参考文献[45–46]中找到：如今拱坝通常采用大体积混凝土建造，水泥含量相对较低，而重力坝则采用松散材料建造。用松散材料建造的大坝被称为堤坝，特别是土坝或石坝。重力坝作为黏土-粉砂心墙之外的一种紧密构件，也可以有混凝土（称为混凝土面板堆石坝）或沥青层甚至土工膜的上游面构件[46]。

最近，新型大坝材料被不断引入。对于大坝附属结构，玻璃纤维增强混凝土是一种水泥基复合材料，耐碱玻璃纤维随机分散在整个产品中。其还能用作表面保护，例如，除了其他混凝土复合材料外，玻璃纤维增强混凝土在溢洪道结构上具有很高的抗磨损性和抗气蚀性。与钢筋混凝土中的钢筋相似，纤维能够承受拉伸应力，从而延长结构的使用寿命。在预制混凝土结构中添加导电碳纤维使材料能够提供结构上的实时荷载信息，从而在应力或裂纹变得肉眼可见之前就能识别问题[47]。

另一个创新是岩石螺栓支撑系统[48]。全球定位系统（GPS）指导下的岩石螺栓支撑系统提供了与河床的连接。这使得结构的安装和固定更加容易。每一部分都用多个岩石螺栓固定在河床或现有的大坝上，每个岩石螺栓都能承受较大的荷载。虽然金属岩石螺栓已在采矿中应用多年，但它们也被应用于大坝[49–50]。在某些应用中，拉挤复合材料岩石螺栓可能也很重要，其较轻的重量可降低环境影响[51]。

堆石混凝土大坝是通过将来自采石场的非常大的岩石分层放置，然后用高流动性和自密实混凝土填充空隙来建造的，这种混凝土可以轻松填充空隙[52]。除了混凝土在施工过程中的热效应和开裂风险之外，堆石混凝土的优点包括减少水泥/混凝土的数量且不需要压实混凝土。而挑战在于找到充足的高黏度、高强度自密实混凝土。这种方法是压实混凝土的一种替代方法，压实混凝土是将水泥含量低的干混凝土分层浇筑，然后用振动压路机压实，比如土壤压实。堆石混凝土大坝的优点在于，在极端洪水期间，以及在施工期间，大坝即使被淹没也没有破坏风险。因此，以导流隧道为例的导流结构可以受到限制。与传统堆石材料相比，胶结堆石具有更大的形变模量，降低了堆石坝发生大形变的可能性，具有经济效益，从而限制了施工过程中的热效应[53]。胶结材料坝的概念是在2009年提出的：可节省10%~20%的成本，并且可显著缩短施工周期。与混凝土相比，胶结材料的制备涉及更少的加工、筛分、分级和混合过程。碾压混凝土法是最近发展起来的一种新型混凝土坝建设方法，在过去的几十年里，碾压混

土坝已经得到了优化，例如，基于面板对称硬填坝和梯形胶结砂砾坝的新概念[54]。相较于采用水泥-砂砾混合物作为普通混凝土的滚筒压实混凝土，混凝土面堆石坝和胶结土坝则将水泥添加到几乎未经处理的土料中。对称或梯形剖面能够补偿较低的抗力。

沥青砾岩是另一种正处于开发中的覆盖坝体表面的发展方向[55]。改性沥青密封膜（MBSM）由改性沥青与粒料的复合物组成。防水作用是通过改性沥青密封膜的黏结层来实现的，从抵抗机械冲击的角度来看，这相当于一层3 cm厚的沥青砾岩[56]。然而，沥青材料被限制在大坝的一定高度，因为沥青层在一定的自重下会转变为塑料，因此应注意坝顶上的水平接缝，最终应对其加固以避免层面向下滑动产生溪流和渗透。

一个重要的主题是使用化学助剂的混凝土和注射先进技术的开发，旨在紧固、自压实，降低黏度，改善热性能、柔韧性，快速浇筑和裂缝焊合。在过去几十年里，这一领域已经取得了重大进展[52]。

充气式橡胶堰的开发也在进行中，尤其是适用于小型水力发电行业和3 m以下水头的应用。充气式堰是一种由橡胶材料制成的柔性椭圆形结构，附着在刚性混凝土基座上，利用空气、水或两者的结合进行充气。当这个结构充气后，它可起到堰的作用，当需要冲洗沉淀物时，可以将其放气。其成本一般低于同等规格普通堰[57]。钢制隔板被用来连接橡胶体。然而，它们可能会腐蚀，玻璃纤维增强聚合物复合材料的研究正在进行中，以取代钢材在连接橡胶体中的应用[58]。

水工建筑和水道的新型涂料和表面处理也处于研究中。新型水涂层（如压力水管）减少了表面摩擦，从而增加了发电量。2016年有一篇关于传统材料和创新材料的详细综述[59]发表，此处总结了该综述的要点。混凝土衬砌隧道的环氧基涂料涂层可减少摩擦损失并预防将来的降解，同时衬砌通常采用钢材或由玻璃纤维增强的聚乙烯。然而，尽管较新的衬砌有更长的使用寿命和有限的维护，但衬砌1 m隧道的成本通常是挖掘1 m隧道成本的两到三倍。参考文献[59]中介绍的一些涂层材料及相关案例研究如下：①聚合物改性水泥基砂浆，用于12 km长、平均直径为9.45 m的马蹄形断面隧道，其水头损失降低20%，成本为每平方米30美元；②基于乳胶的底漆和面漆，以及一种清洁后使用的添加了硬粒的环氧底漆，能够增加11%的功率；③相关减阻率高达30%的超疏水材料和减阻率高达5%的超亲水表面（通过水-水界面减阻）。这些措施在翻修项目中特别重要。

参考文献[60]描述了另一种用于压力管的新型材料的

例子，其中 Kanangawa 工厂使用了高抗拉强度的钢材 ($950 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$) 来降低成本。然而，可能会出现脆性破坏，焊接对于微裂纹包含物至关重要。参考文献[61]对此进行了详细描述。考虑到材料的缺陷，特别是焊接缺陷，对这种高强度钢必须采用概率设计方法。

4. 用于轴承的新型材料

轴承是水轮机组的关键部件，用于支持旋转部件，同时最大限度地减少摩擦（即需要润滑脂）并保持部件的轴对齐。水轮机轴承的运行具有挑战性，因为在 40 年的使用寿命内，极端接触压力条件非常高（超过 30 MPa ）[62]。流体动力滑动轴承是最常用的，可以分为三大类：径向轴承、推力轴承和轴套[62–63]。

机组维护和成本花销主要在摩擦和磨损。因此，大多数涡轮机使用增压油来润滑涡轮机轴承，以减少摩擦，降低磨损，维护干预和缩减成本，并提高机器性能。然而，水轮机漏油可能会对环境造成负面影响，并带来一些运行和维护问题[64]。因此，使用生态友好型摩擦学部件/技术（如轴承），即生态摩擦学，被认为是一种提高水力发电应用可持续性的有效工程实践[64]。

为了消除水力发电机组可能出现的漏油危险，近年来水力发电行业的生态摩擦学概念得到了迅速发展，特别是在轴承行业。已经开发出了水基润滑剂、生态/植物润滑剂和自润滑轴承（含摩擦材料），与传统润滑剂相比，其具有有所改善的或类似的摩擦学性能。

植物/生态油是可生物降解的；然而，其缺点是，当与水混合时，它们比其他矿物油分解得更快，这影响了其机械性能。此外，它们比矿物油更昂贵，一些密封材料在接触植物油时容易损坏[66]。参考文献[67]描述了一个工业案例研究，而参考文献[66]则讨论了使用植物油的水力发电公司的经验。

由于水的黏度较低，水润滑轴承在边界或混合润滑状态下运行的时间相对较长，特别是在考虑低滑动速度和启动/停止循环的情况下[68]。Ingram 和 Ray [69]指出，与油润滑轴承相比，水润滑轴承由于其成本低、无毒性、热容量大，可以减少摩擦损失和维护，将有助于提高设备的整体效率。Oguma 等[70]描述了一种专门为多喷嘴立式 Pelton 涡轮机设计的水润滑导向轴承的性能。然而，由于水的低黏度、溶剂性（腐蚀性）和高挥发性，在严酷的工程应用中，水其实是一种劣质的润滑剂[62]。低黏度会显著

增加摩擦，缩短轴承的有效磨损寿命。因此，水基润滑的使用带来了新的工程挑战，特别是轴承表面材料的选择，可以确保摩擦系数低于 0.1，寿命为 40 年[68]。

引入自润滑轴承是为了避免使用润滑剂。它们通常由青铜（金属基）或聚四氟乙烯（塑料基）制成[63,71]。对于涡轮机，复合材料和自润滑聚合物也被用作流道、耐磨板的推力轴承和溢洪道闸门的耳轴轴承。类金刚石碳涂层技术在过去十年中也得到了显著发展[65]。然而，由于输出量不可预测的间歇性风力发电厂和太阳能发电厂广泛存在，水力发电站的运行条件因电网要求而越来越多变，用于控制涡轮叶片和导流叶片的自润滑轴承是受影响最严重的组件之一[72]。

在参考文献[62,68]中，讨论了用于自润滑轴承的新型多尺度热塑性聚合物复合材料的实例。它们是通过向聚合物中添加宏观、微观增强材料[短碳纤维（SCF）、玻璃纤维（GF）和碳纤维（CF）]、碳基纳米填料[纳米金刚石（ND）和碳纳米管（CNT）]以及二维材料[氧化石墨烯（GO）、二硫化钼（ MoS_2 ）]而发展起来的。通过多尺度模式获得协同效应，从而产生更好的性能（机械和摩擦学）。这减少了对“顶油”的需求（在启动过程中，高压油被注入到轴承与对立面之间的间隙，以分离表面，直到形成自保持薄膜）[73]。热塑性聚合物复合材料可应对摩擦和磨损问题，因为它们在运行期间具有极端接触压力（约 30 MPa ）和高的使用寿命（约 40 年）[62]。在水润滑条件下，与纯超高分子量聚乙烯相比，含有 GO、ND 和 SCF 的超高分子量聚乙烯多尺度复合材料显著降低了摩擦和磨损。而与未填充的聚四氟乙烯（PTFE）相比，用 GF 和 MoS_2 增强的聚四氟乙烯（PTFE）具有更低的磨损率[62]。

美国合成公司（US Synthetic）正在开发一种新型多晶金刚石（PCD）轴承轴，用于流体动力环境下的 RivGen 电力系统，以向现有的偏远社区电网供电[6]。美国阿拉斯加大学的研究人员比较了四种轴承/衬套材料在淡水条件下 60 h 的磨损情况，并进行了磨损（mm）测量。图 4 [74]显示了 PCD 轴承材料与 Vesconite™（自润滑热塑性塑料）、哥伦比亚工业产品公司（Columbia Industrial Products）固体润滑剂海洋复合材料[†]和 Ferroform™（PTFE 复合材料）材料相比的优势。该测试比较了轴承/衬套的远端、中心和驱动侧的磨损情况。通过在 RivGen 电力系统中使用 PCD 轴承技术（图 5），实现了以下优势：

- 工艺流体冷却轴承轴组件：①彻底清除了密封件；

[†] This material is a medium-weave PTFE and polyester fabric blend. The addition of solid lubricants to the resin reduces friction, extends wear life, and improves performance in wet and dry applications (<https://www.hydroreview.com/worldregions/bearings-and-seals-applying-the-latest-technologies/#gref>).

②减少了多余组件的重量；③消除了对污染性润滑油和持续维护的需要。

• 金刚石材料，易于抵抗磨料颗粒并破坏水中流动的沉积物。

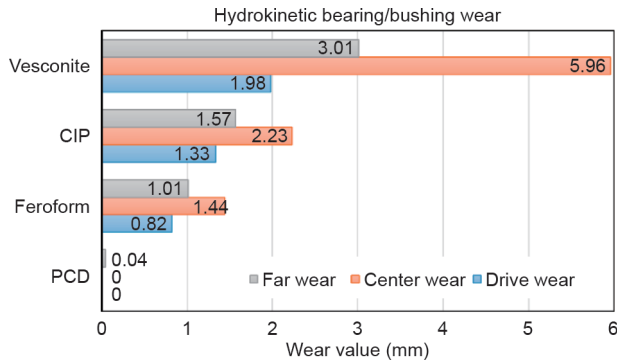


图4. 流体动力装置中使用的关键滑动部件磨损特性的实验研究，在载荷超过60 h的情况下进行磨损试验 (mm) [74]。

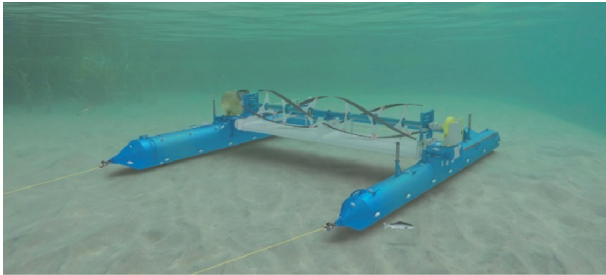


图5. 水动力条件下的RivGen电力系统[照片由美国海洋可再生能源公司(ORPC)的Susy Kist提供]。

5. 新型密封材料

密封连接部件能最大限度地减少漏水，防止水和污物的侵入。轮机主轴的密封是一个主要的挑战。理想情况下，密封后应不产生任何泄漏；然而，由于成本较高，轴密封的主要目的仅限于将泄漏控制在可接受的范围内。在参考文献[75]中，讨论了水力密封技术。

第一台水轮机使用压缩填料来密封水轮机轴。然而，前期填充需要大量的水来冷却。随着压缩填料装置的发展，新型材料、润滑剂和封阻剂已经被开发出来，通过减少冷却水的量来延长填料的寿命。多年来，人们开发了多种技术，包括碳精密封环和弹性径向密封元件[75-76]。轴向面机械密封作为一种可行的水轮机长期密封解决方案，越来越受欢迎。

软碳石墨通常用作密封面，并与硬面材料（如氧化铝陶瓷）搭配使用。然而，氧化铝陶瓷作为非常好的绝缘体，其热性能和压力-速度 (PV) 性能较差。PV 性能的评估方法是将密封界面处的压力乘以机械密封平均端面直径

的旋转速度。当PV值超过端面密封副上的限制时，由于高磨损和发热，其使用寿命将缩短[76]。为了克服PV的限制，以碳化硅为例的新型材料已经被开发出来，它们将PV性能提高了2~3倍，产生的热量减少60%，并减少了所需的冷却用水量。此外，碳化硅具有非常好的耐磨性，对于腐蚀性水来说这是一个有用的性质。与碳/陶瓷表面副相比，SiC/SiC表面副的PV极限高出了33%，同时产生的热量减少了50% [76]。高性能热塑性密封材料和弹性聚合物的开发也在进行中，其耐磨性是传统橡胶弹性体的5倍[75]。关于轴承和密封的其他案例研究可见参考文献[77-78]。

6. 用于海洋水力发电和水动力涡轮机的新型材料

海洋环境中的水力发电厂将潮汐流和波浪能转化为电能。在潮汐环境下，低水头轮机利用潮位变幅的势能，而水动力轮机利用潮流和洋流的动能。在波浪能方面，流体机械装置将波浪的振荡运动转化为机械能[79-80]。

海洋气候特别恶劣多变，海水具有腐蚀性。潮汐能转换器也会承受疲劳负荷，而又不能有很多维护活动，因为进入高能量位置的水下装置是一项挑战。因此，由于以湍流和波流相互作用为例的局部加载事件尚未得到很好的记录[81]，转子往往被过度设计，在某些情况下冗余量高达30%，以确保所需的耐久性。这在材料使用、成本和性能方面都是效率低下的。因此，人们正在开发具有更高强度、抗疲劳性和抗腐蚀性的新型材料，以降低成本并提高耐久性。迄今为止开发的大多数原型都是纤维复合材料，如浸渍环氧树脂基体的玻璃纤维和碳纤维。这些新型材料主要适用于经济型水轮机，因为与以Francis水轮机和Pelton水轮机为例的高水头水轮机相比，经济型水轮机的转速非常低。环氧树脂通常被选择在水下应用，因为在现有的热固性树脂体系中，当化学成分被优化时，环氧树脂具有优异的抗吸湿性和水解降解性[82]。乙烯基酯树脂和热塑性聚合物也被考虑在内。后者提供了回收利用的可能性；然而，它需要具有额外成本的替代制造工艺[83]。表1对海洋水力发电中的传统材料和复合材料进行了比较[84]。

尽管存在一系列材料选择；然而，综合考虑机械性能和耐用性及复杂形状的易制造性，绝大多数开发人员选择纤维复合材料，其中大部分采用碳纤维增强材料以提高抗疲劳性。

表1 潮汐涡轮机材料特性(基于参考文献[84])

Material	Density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)
Carbon Steel	7.85	207	400–500
Stainless steel	7.75	193	750–850
Ti alloys	4.50	114	1170
Al alloys	2.70	70	300–550
GF composite	2.10	45	1020
CF composite	1.60	145	1240

从原型测试中获得的公开信息相当有限，因为这些测试通常是商业开发。在撰写本文时，只有一个具有公开信息的商业案例可供研究，即彭特兰湾的MeyGen项目[85]。一些以流体动力涡轮机形式出现的潮流能量转换器原型的例子如下所示[37,48]。

- 洋流项目是一个300 kW的潮汐原型，是2003年6月在德文郡海岸安装的首批海上试验项目之一。转轮直径为11 m，两个复合叶片上装有应变仪。该建筑包括一个中央65 mm厚的碳复合材料隔板，由加固的玻璃/环氧树脂整流罩覆盖。2008年，一台1.2 MW的双涡轮机投入使用，其设计与SeaFlow（SeaGen项目）类似。叶片长7.5 m。

- 2003年，在哈默菲斯特（挪威）附近安装了一座潮汐发电站，10 m长的叶片由玻璃纤维复合材料制成。

- 美国的RITE项目于2007年在纽约安装了六台涡轮机。涡轮机的直径为4.9 m，有三个复合叶片，类似于现有的风力涡轮机设计。然而，出现了一些叶片故障，因此对叶片进行了重新设计。

- Sabella项目包括2008年4月在布列塔尼海岸安装的D03原型机。2015年在乌山特岛附近安装了一台500 kW的涡轮演示机（D10）。它有六个碳/环氧树脂叶片，由中心为预浸料的复合材料制成，表面为灌注复合材料。发电机盖采用玻璃纤维增强复合材料制成（图6）。

- 2009年，丹麦潮汐发电有限公司（Tidal Generation Limited, Denmark）投入了一台500 kW、叶片长度为6 m的原型机。它装有复合材料（碳和玻璃）叶片。

- 玻璃纤维复合潮汐涡轮机叶片被用于直径11 m的开放水力涡轮机。复合材料也适用于这些系统的护罩、安装框架和其他组件。

- CRIMSON项目价值390万欧元，由美国海洋可再生能源公司（ORPC）制造，使用完全由回收碳纤维制成的管材制造而成，分别减少了33%的资本支出和66%的运营支出。

- MeyGen项目包括四台1.5 MW的复合叶片涡轮机，其中三台来自安德里茨水电站，一台来自亚特兰蒂斯（AR1500）。第一台涡轮机于2016年投入使用，到2017年为止，所有4台涡轮机全部安装完毕。该租约允许在25年项目的不同阶段安装多达400 MW的电力。到2020年1月，MeyGen潮汐阵列发电量已超过25.5 $\text{GW}\cdot\text{h}^{-1}$ 。



图6. 位于布雷斯顿的Sabella D10潮汐涡轮机码头，安装前的照片由Erwann Nicolas（Sabella，法国）提供。

复合材料也被考虑用于一些波能装置；然而，它们在商业上不如潮汐相关的同类产品先进。下面是一些例子。

- Wave Dragon波浪能量转换装置的全尺寸复合结构设计（这个20 kW的原型机是用钢制造的，丹麦）。

- 英国AWS海洋能源公司的阿基米德波浪摆动系统使用了Kevlar™和橡胶复合材料。该系统利用类似水下浮筒的元件，通过改变元件的体积来响应海面上经过的波浪，从而使元件可以浮得更高或更低。引起的垂直运动被转换成电能。

聚合物复合材料和夹层材料（复合材料泡沫夹层结构）在浮力至关重要的许多浮式能量转换器中很受欢迎。

在超过50年的小型船舶建造中，我们拥有在海水中使用复合材料的丰富经验，在复合材料是首选的风力发电行业，我们对复合材料的疲劳性能有广泛的了解。然而，关于复合材料同时承受海水和疲劳载荷时会发生什么情况的研究很少，水力发电应用就是如此；因此，这是一个可供研究的领域[86]。如果正确地选择和制造碳纤维复合材料，其长期耐久性极好的[87]。参考文献[82]对玻璃纤维增强环氧材料在海水中的耐久性进行了详细研究。研究了三种等级的玻璃纤维[†]。随着吸水率的增加，因弯曲而产生的残余破坏应力减小，尤其是对于E-玻璃纤维增强复合材料，其轴向模量不变。高性能玻璃纤维（如Ad-

[†] E-GFs were originally developed for electrical insulation applications (that is the origin of the “E”). E-GFs are, by many orders of magnitude, the most widely used of all fibrous reinforcements, owing to their low cost and early development compared to other fibers.

vantex)也是可用的,与标准E-玻璃纤维相比,它能更好地长期保持其性能。一项类似的关于碳/环氧树脂的老化研究表明,在60℃老化条件下,完全水饱和后,其性能略有下降。然而,研究表明,在实际运行条件下,用于潮汐涡轮叶片的厚复合材料不太可能完全饱和[88];因此,基于完全水饱和度的预测可能是非常保守的。

海水浸泡后碳/环氧复合材料性能的变化主要受基体、纤维/基体界面和制造质量的影响。这会使得材料的选择比金属材料更困难,需要严格的质量控制程序;然而,其长期性能可能非常卓越。一项正在进行的关于Sabella材料老化的研究,其研究内容包括在不同温度下浸泡试样7年以上,现在的研究表明其预期寿命远远超过20年[89]。

海洋能源行业的进一步发展与海水抽水储能系统有关,该系统由两个相互连接的水库组成,其中较低的水库是海洋。发电厂在能源需求高峰时以涡轮模式运行,在能源需求低时以抽水模式运行,以消耗太阳能和风力发电厂产生的剩余能源。对于涡轮机和与水接触的部件,腐蚀问题可以通过使用玻璃纤维增强塑料管和耐腐蚀钢来解决。新型材料也被引入部件的制作中,如上部储层衬里采用了三元乙丙橡胶片(EPDM)。已经通过多次试验证明EPDM具有优异的材料性能和耐候性[90]。2017年,英国RheEnergise公司推出了一种密度比水高2.5倍的新型流体,称为R19流体,该流体为惰性非反应性流体,被设计用于闭环抽水式水力发电厂。抽水蓄能项目成本中约65%与土木工程相关,使项目规模缩小了2.5倍,从而提供了巨大的节约机会。

7. 讨论

水力发电是一种清洁的可再生能源,与其他可再生能源相比,水力发电设备不含有锂和钴(用于电动汽车)、钽、镨和镱(用于电动汽车和风力发电)等金属材料[91]。水力发电行业正在引进几种新型材料,许多相关的研究也正在进行[92]。新型材料可以在新发电厂和翻新项目中得到应用[93]。

新型材料的引入可以提高反击式涡轮机和自由面涡轮机(如涡流涡轮机、阿基米德螺旋抽水机和水轮机)的效率,同时会减少涡轮机的重量和延长其使用寿命。然而,涡轮转子重量的减少将导致备转容量的减少,这保证了水力发电的灵活性。以前,一些液压机甚至与飞轮组合在一起,以增加备转容量,这与频率控制有关[94]。超疏水涂层材料可以提高效率,有机涂层纳米摩擦发电机有望在海

洋水力发电行业得到应用。纤维增强复合材料的开发已经广泛应用于海洋和风能行业,但最近又被引入水力发电涡轮机的制备中,特别是碳纤维复合材料。人们对水轮机行业的其他轻质材料(如高密度聚乙烯等聚合物)也感兴趣。这些材料确保了更高的效率、更低的重量以及在恶劣环境下更高的抵抗力。本文介绍的案例研究证实,重量减轻(反击式涡轮机减轻50%~70%,涡流涡轮机减轻50%,水轮机减轻30%)可以提高效率并降低成本。然而,由于碳纤维复合材料与金属之间的耦合而导致的降解在潮湿环境中可能会造成问题;如果碳纤维与金属之间发生电耦合,则可能发生电偶腐蚀。这是一个众所周知的现象,在过去30年里受到了相当多的关注[95];但在设计过程中仍然需要考虑这一点。

新型筑坝材料也已经开发出来,如胶结堆石和胶结土、碳纤维和玻璃纤维材料。它们增加了结构的使用寿命,减少了变形,简化了安装过程。胶结堆石具有比普通堆石料更高的模量,可以改善其力学响应。胶结堆石坝或土坝比堆石坝具有更高的材料抗腐蚀能力,这使得在极端洪水期间,漫顶的破坏风险较低。用沥青砾岩覆盖坝面是另一种简化防水的趋势。

在轴承装配行业,PCD轴承和聚四氟乙烯(PTFE)已被引入,以提高性能并减少对润滑油的需求,从而增加工厂的环境可持续性,且几乎消除了磨损。碳化硅已应用于密封件中,将其PV性能提高了2~3倍,并减少了60%的产热量,减少了密封面所需的冷却水以及磨损和腐蚀磨损。用水和植物油进行润滑是减少油污染的主要策略。

先进的复合材料,如玻璃和碳纤维增强聚合物,可以降低成本并提高海洋条件下的耐久性,文献中已经讨论了关于在流体动力装置方面具体应用的研究案例。当前欧盟H2020项目RealTide[96]专注于提高潮汐涡轮机的可靠性,重点是提高对复合叶片材料的了解。基于玄武岩或天然纤维增强的替代复合材料的耐久性也正在研究中,目的是开发出对环境影响更小的材料[57,97]。虽然它们的机械性能不如碳纤维,但使用寿命周期分析可以证明这些材料是合理的。替代生物源和生物可降解聚合物基质材料也受到了关注[98]。

参考文献[99]还强调了在混凝土中埋置钢螺旋壳时,需要确定各种膜材料的机械性能和流变性能。在中国的水力发电厂中,聚氨酯(PU)软木材料正越来越多地取代聚合物泡沫材料。也应对新型抗气蚀材料进行测试和进一步研究,例如,具有更多滑移系统和更大的塑性变形能力的非应变速率敏感材料,如钴和奥氏体不锈钢。最近的研究表明,碳化钨基复合材料,如86WC-10Co-4Cr,具有

更高的抗沉积物侵蚀能力[100]，而HVOF和等离子喷涂技术为泥浆腐蚀提供了一种很有前景的解决方案。Ni-Cr基和WC基涂层及其他材料，如镍铝金属间化合物，具有较高的抗泥浆腐蚀性能。已经对WC-Co-Cr的变体进行了研究；因此，还需要进一步研究采用HVOF和等离子喷涂技术制备的各种复合材料的性能。针对气蚀后涡轮叶片快速修复的新型冷喷工艺也正在研究中[22]。

在水库或大坝表面安装浮动光伏板是一种新兴趋势[101]；因此，光伏行业的创新将有利于水力发电这一行业[102]。

根据参考文献[37]的研究结果，未来的研究应致力于获得新型复合材料结构，如纤维增强复合材料。与易发生分层的单向纤维层增强的复合材料相比，增强复合材料需要具有更高的抗冲击性、刚性和适应能力。例如，正在为航空航天和汽车行业开发的3D针刺和簇绒材料。它们使用全厚度加固，并通过显著改善面外和冲击性能来补偿面内性能的降低[32]。因此，必须对数值模拟理论进行重新阐述和推广，以适应这些新材料。这与大形变、纤维的错位以及制造缺陷一起，将使研究人员更现实地考虑位于同一平面内和平面外的正交纤维之间的相互作用，并为改进纤维增强复合材料的数值模拟提供依据。

值得注意的是，水力发电材料的优化选择需要考虑许多因素，包括机械、电气和物理性能（如耐腐蚀性）以及经济和环境因素，因此多属性决策策略至关重要[103]。最后，随着超导材料的突破，水力发电材料有望在未来有所发展。用于地下挖掘的高容量激光束技术将能够保证快速、安全、廉价地挖掘隧道和洞穴等地下结构[104]。

8. 结论

水力发电这一行业正在开发新技术以提高其可持续性和灵活性，而新材料可以在提高效率、抗力、可靠性，延长寿命以及简化制造、安装和运输过程方面发挥核心作用。例如，值得注意的是：①涡轮机的新型材料包括超疏水涂层和超疏水润滑剂注入复合材料、具有摩擦电性能的涂层、具有纳米和微米WC（碳化钨）颗粒的双峰涂层、13Cr4Ni钢涂层、Ni-Al₂O₃涂层和HVOF喷涂碳化钨涂层（如参考文献[105]）。然而，包括Kevlar™ 49、HDPE和碳钢在内的纤维增强聚合物仅适用于低速应用。②大坝和水工结构的新型材料包括玻璃纤维增强混凝土、岩栓托换系统、堆石混凝土和沥青砾岩。为减少渗漏和缓解混凝土膨胀而在混凝土坝的上游表面铺设土工膜，这一尝试已经取得了重大进展[106]。用于水道的新型材料包含高抗

拉强度钢管和超亲水表面，能够减少摩擦损失。③新型PCD、热塑性聚合物（如PTFE）和轴承用软碳石墨以及取代普通润滑油的植物油或水基油的开发正在进行中，尽管它们的价格更高[107]。④环氧树脂和复合材料正被考虑用在海洋环境中，并考虑将三元乙丙橡胶用作海洋环境中抽水水电站水库的衬里。

然而，与传统材料相比，其中一些材料的应用受到了高成本的限制，使用复合材料等新型材料的经验仍然有限；复合材料超过100年的长期表现仍是未知的。例如，复合材料制成的鱼梯的重量比混凝土结构的鱼梯低14.2%，但总材料成本（不包括安装成本）是同尺寸混凝土梯子的5倍[108]。然而，近年来碳纤维的价格逐渐下降，目前大约是不锈钢成本的10倍。在复合材料密度低以及碳纤维填充率低的条件下，使用这两种类型材料制成的水轮机的总材料成本正在变得越来越相近。

使用全新材料开发水电组件是一项复杂的设计工作。这需要调查其耐久性（如在高机械负荷下老化、湿老化、抗气蚀性、疲劳性）或机械性能，以及成本、重量和环境可持续性，以便更好地了解其使用寿命优势和局限性。新材料也应有助于减少二氧化碳排放。未来的研究应该致力于获得新的复合材料结构，如三维增强复合材料。为了促进潮汐轮机的发展，需要进一步研究剩余金属部件的防腐系统（如采用新型石墨烯基涂层）。在未来的研究中，应收集更多关于这些防腐系统性能及其生命周期评估的信息。轴承环保摩擦学是提高可持续性的另一个新兴研究领域。

Acknowledgements

We thank the US Synthetic for sharing its information about the diamond bearings and Helmut Mitterfellner for sharing information about the carbon steel water wheel. We thank Susy Kist (ORPC) and Erwann Nicolas (Sabella) for the photo courtesy, and Maria Vittoria Vignoli of Cooperativa Edile Appennino for the information on bituminous membranes.

Compliance with ethics guidelines

Emanuele Quaranta and Peter Davies declare that they have no conflicts of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] International Hydropower Association. 2020 hydropower status report sectortrends and insights. Report. London: IHA Central Office; 2020.
- [2] Kougias I, Aggidis G, Avellan F, Deniz S, Lundin U, Moro A, et al. Analysis of emerging technologies in the hydropower sector. *Renew Sustain Energy Rev* 2019;113:109257.
- [3] Frey GW, Linke DM. Hydropower as a renewable and sustainable energy resource meeting global energy challenges in a reasonable way. *Energy Policy* 2002;30(14):1261–5.
- [4] Moran EF, Lopez MC, Moore N, Müller N, Hyndman DW. Sustainable hydropower in the 21st century. *Proc Natl Acad Sci USA* 2018;115(47):11891–8.
- [5] Acreman MC, Ferguson AJD. Environmental flows and the European water framework directive. *Freshw Biol* 2010;55(1):32–48.
- [6] Quaranta E, Bonjean M, Cuvato D, Sarma P, Slachmuylders G, Clementi R, et al. Hydropower case study collection: innovative low head and ecologically improved turbines, hydropower in existing infrastructures, hydropeaking reduction, digitalization and governing systems. *Sustainability* 2020;12:8873.
- [7] Li H, Zhou D, Martinez JJ, Deng ZD, Johnson KI, Westman MP. Design and performance of composite runner blades for ultra low head turbines. *Renew Energy* 2019;132:1280–9.
- [8] Quaranta E, Revelli R. Gravity water wheels as a micro hydropower energy source: a review based on historic data, design methods, efficiencies and modern optimizations. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;97:414–27.
- [9] Tong C. Introduction to materials for advanced energy systems. Cham: Springer International Publishing; 2019.
- [10] Quaranta E. Estimation of the permanent weight load of water wheels for civil engineering and hydropower applications and dataset collection. *Sustain Energy Technol Assess* 2020;40:1–8.
- [11] Muñoz AH, Chiang LE, De la Jara EA. A design tool and fabrication guidelines for small low cost horizontal axis hydrokinetic turbines. *Energy Sustain Dev* 2014;22:21–33.
- [12] Sritram P, Treedet W, Suntivarakorn R. Effect of turbine materials on power generation efficiency from free water vortex hydro power plant. In: Proceedings of the 4th Global Conference on Materials Science and Engineering (CMSE 2015); 2015 Aug 3–6; Macao, China. London: IOPscience; 2015.
- [13] Kumar R, Singal SK. Operation and maintenance problems in hydro turbine material in small hydro power plant. *Mater Today Proc* 2015;2:2323–31.
- [14] Ravens T, Ali M. Abrasion testing of critical components of hydrokinetic devices. Final report. Washington, DC: US Department of Energy; 2013 Dec. Report No.: DE-EE0003631.
- [15] Jiang X, Overman N, Canfield N, Ross K. Friction stir processing of dual certified 304/304L austenitic stainless steel for improved cavitation erosion resistance. *Appl Surf Sci* 2019;471:387–93.
- [16] Whitehead M, Albertini R. How composite materials can be used for small hydro turbines. *Hydro Rev* 2015;34(2):56–63.
- [17] Lee JY, An J, Chua CK. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Appl Mater Today* 2017;7:120–33.
- [18] Darmanin T, Guittard F. Superhydrophobic and superoleophobic properties in nature. *Mater Today* 2015;18(5):273–85.
- [19] Shirtcliffe NJ, McHale G, Atherton S, Newton MI. An introduction to superhydrophobicity. *Adv Colloid Interface Sci* 2010;161(1–2):124–38.
- [20] Haghighi MHS, Mirghavami SM, Ghorani MM, Riasi A, Chini SF. A numerical study on the performance of a superhydrophobic coated very low head (VLH) axial hydraulic turbine using entropy generation method. *Renew Energy* 2020;147:409–22.
- [21] Rico V, Mora J, García P, Agüero A, Borrás A, González-Elipe AR, et al. Robust anti-icing superhydrophobic aluminum alloy surfaces by grafting fluorocarbon molecular chains. *Appl Mater Today* 2020;21:100815.
- [22] Materials science for hydropower—providing innovative technologies to improve hydropower performance [Internet]. Washington, DC: Pacific Northwest National Laboratory; [cited 2021 Oct 28]. Available from: <https://www.pnnl.gov/materials-science-hydropower>.
- [23] Prashar G, Vasudev H, Thakur L. Performance of different coating materials against slurry erosion failure in hydrodynamic turbines: a review. *Eng Fail Anal* 2020;115:104622.
- [24] Roa CV, Valdes JA, Larrahondo F, Rodríguez SA, Coronado JJ. Comparison of the resistance to cavitation erosion and slurry erosion of four kinds of surface modification on 13–4 CAGNM hydro-machinery steel. *J Mater Eng Perform* 2021;6:1–18.
- [25] Fan FR, Tian ZQ, Wang ZL. Flexible triboelectric generator. *Nano Energy* 2012;1(2):328–34.
- [26] Wang B, Wu Y, Liu Y, Zheng Y, Liu Y, Xu C, et al. New hydrophobic organic coating based triboelectric nanogenerator for efficient and stable hydropower harvesting. *ACS Appl Mater Interfaces* 2020;12(28):31351–9.
- [27] Wang ZL, Wang AC. On the origin of contact-electrification. *Mater Today* 2019;30:34–51.
- [28] Jiang D, Guo F, Xu M, Cai J, Cong S, Jia M, et al. Conformal fluorine coated carbon paper for an energy harvesting water wheel. *Nano Energy* 2019;58:842–51.
- [29] Singh P, Singh S, Vardhan S, Patnaik A. Sustainability of maintenance management practices in hydropower plant: a conceptual framework. *Mater Today Proc* 2020;28(3):1659–74.
- [30] Khabirul Islam AKM, Bhuyan S, Chowdhury FA. Advanced composite Pelton wheel design and study its performance for pico/micro hydro power plant application. *Eng Innovative Technol* 2013;2(11):126–32.
- [31] Weber AZ. How cells for energy storage. Workshop summary report. In: Proceedings of 2012 Flow Cell Workshop. 2012 Mar 7–8; Washington, DC, USA. Washington, DC: US Department of Energy; 2012.
- [32] Mouritz AP. Mechanics of 3D fiber reinforced polymer composites. In: Altenbach H, Öchsner A, editors. *Encyclopedia of continuum mechanics*. Berlin: Springer; 2020.
- [33] Das S, Warren J, West D, Schexnayder SM. Global carbon fiber composites supply chain competitiveness analysis. Technical report. Washington, DC: USDOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy; 2016. Report No.: NREL/TP-650-66071. Contract No.: DE-AC36-08GQ28308.
- [34] Davies P, Rajapakse YDS, editors. *Durability of composites in a marine environment*. Dordrecht: Springer; 2014.
- [35] Davies P, Rajapakse YDS, editors. *Durability of composites in a marine environment 2*. Dordrecht: Springer; 2018.
- [36] Kang TJ, Kim C. Energy-absorption mechanisms in Kevlar multiaxial warp knit fabric composites under impact loading. *Compos Sci Technol* 2000;60:773–84.
- [37] Aramayo SAO, Nallim LG, Oller S, Martínez X. A river bed hydrokinetic turbine: a laminated composite material rotor design. Barcelona: International Center for Numerical Methods in Engineering; 2017.
- [38] Wikander Ö. *Handbook of ancient water technology*. Brill: Leiden; 2000.
- [39] Güllüoğlu AMM, Bendes O, Yilmaz B, Yildiz A. Investigation of manufacturing of a Pelton turbine runner of composite material on a 3D printer. *Gazi Univ J Sci Part A Eng Innovation* 2021;8(1):24–34.
- [40] Quaranta E, Revelli R. Performance optimization of overshot water wheels at high rotational speeds for hydropower applications. *J Hydraul Eng* 2020;146(9):06020011.
- [41] Dutta AK, Shrestha B, Shahi J, Chaudhary VK, Shrestha PL. Re-design and optimization of traditional undershot wheel using high density polyethylene (HDPE) blades. In: Proceedings of the International Symposium on Current Research in Hydraulic Turbines; 2016 Mar 14; Dhulikhel, Nepal. Kathmandu: Kathmandu University; 2016.
- [42] Quaranta E. Stream water wheels as renewable energy supply in flowing water: theoretical considerations, performance assessment and design recommendations. *Energy Sustain Dev* 2018;45:96–109.
- [43] Straalsund JL, Harding SF, Nuernberg DM, Rorres C. Experimental evaluation of advanced Archimedes hydrodynamic screw geometries. *J Hydraul Eng* 2018;144(8):04018052.
- [44] Marsh G. Wave and tidal power—an emerging new market for composites. *Reinf Plast* 2009;53(5):20–4.
- [45] Yaseen ZM, Ameen AMS, Aldlemy MS, Ali M, Abdulmohsin Afan H, Zhu S, et al. State-of-the-art—powerhouse, dam structure, and turbine operation and vibrations. *Sustainability* 2020;12(4):1676.
- [46] Schleiss A, Pougatsch H. *Les barrages—Du projet à la mise en service*. Lausanne: EPFL Press; 2020. French.
- [47] Baeza FJ, Galao O, Zornoza E, Garcés P. Multifunctional cement composites strain and damage sensors applied on reinforced concrete (RC) structural elements. *Materials* 2013;6(3):841–55.
- [48] Peng Y, Hu C, Chen R. Study on cemented-rockfill dam in hydropower station construction. In: Proceedings of the 2010 Asia–Pacific Power and Energy Engineering Conference; 2010 Mar 28–31; Chengdu, China. New York: IEEE; 2010.
- [49] Chen SH, Yang ZM, Wang WM, Shahrour I. Study on rock bolt reinforcement for a gravity dam foundation. *Rock Mech Rock Eng* 2012;45:75–87.
- [50] Helligren R, Malm R, Ansell A. Progressive failure analysis of a concrete dam anchored with passive rock bolts. *Infrastructures* 2020;5(3):28.

- [51] Kodymovz J, Thomas A, Will M. Life cycle analysis of rock bolts. *AdvTunneling Tech* 2017;47–9.
- [52] Jin F, Zhou H, Huang D. Research on rock-filled concrete dams: a review. *DamEng* 2018;29:101–12.
- [53] Jia J, Lino M, Jin F, Zheng C. The cemented material dam: a new, environmentally friendly type of dam. *Engineering* 2016;2(4):490–7.
- [54] Aniskin N, Trong CN. The thermal stress of roller-compacted concrete dams during construction. *MATEC Web Conf* 2018;196:04059.
- [55] Mafra JMQ, Mello J, Eldridge T, Breul B. Two case histories of dams waterproofing with bituminous geomembrane. Proceedings of the First PanAmerican Geosynthetics Conference & Exhibition; 2008 Mar 2–5. Cancun, Mexico. Austin: International Geosynthetics Society; 2008.
- [56] Marchi M, Vignoli MV, Picariello F. La nuova tecnica di impermeabilizzazione con membrane bituminose. *Strade e Autostrade* 2017;1:98–101. Italian.
- [57] Verpoest I. Flax and hemp fiber composites: a market reality. Paris: JEC Publications; 2018.
- [58] Lee JW, Park CG, Kim JO, Lee SK, Kim PS. Durability characteristics of glass fiber reinforced polymer composite clapping plates for application of rubber dam. *J Korean Soc Agric Eng* 2011;53(5):17–23.
- [59] Nogueira HIS, Pfister M, Schleiss AJ. Approaches to reduce friction losses in headrace waterways of hydropower plants. *J Hydraul Eng* 2016;142(5):02516001.
- [60] Aoki K, Minami M. Construction of steel penstocks using HT100 at Kannagawa Hydropower Plant. In: Horikawa K, editor. Proceedings of the Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants; 2009 Jul 20–22; Takasaki, Japan. Tokyo: Japan Electric Power Civil Engineering Association; 2009.
- [61] Hachem FE, Schleiss AJ. The design of steel-lined pressure tunnels and shafts. *Int J Hydropower Dams* 2009;16(3):142–51.
- [62] Saravanan P, Emami N. Sustainable tribology: processing and characterization of multiscale thermoplastic composites within hydropower applications. In: Sanjay MR, Siengchin S, Parameswarapillai J, Friedrich K, editors. Tribology of polymer composites. Amsterdam: Elsevier. p. 241–77.
- [63] Ganjoo Haghighi H. Guide vane bearings and guide vane seals of pump turbine [dissertation]. Vienna: Vienna University of Technology; 2011.
- [64] St-Germain F. Addressing pressure loss and oil leakage in Kaplan Bulb turbines and the impact on efficiency [Internet]. 2018 Dec 12 [cited 2021 Oct 28]. BBA blog; Available online: <https://www.bba.ca/publication/addressing-pressure-loss-issues-for-the-kaplan-turbine-runner-blade-and-impact-on-efficiency/>.
- [65] Sasaki S. Environmentally friendly tribology (Eco-tribology). *J Mech Sci Technol* 2010;24(1):67–71.
- [66] Smith S, Ort T. Utilization of environmentally acceptable lubricants. Voith Hydro.
- [67] Wenke S. Changing your risk profile with vegetable oil. *Hydro Rev* 2017;36(5):50–5.
- [68] Somberg J, Saravanan P, Shankar Vadivel H, Berglund K, Shi Y, Ukonsaari J, et al. Tribological characterisation of polymer composites for hydropower bearings: experimentally developed versus commercial materials. *Tribol Int* 2021;162:107101.
- [69] Ingram EA, Ray WR. Bearings & seals: examples of innovations and good ideas. *Power Eng* 2010;114(9):50–5.
- [70] Oguma T, Nakagawa N, Mikami M, Thantrong L, Kizaki Y, Takimoto F. Water lubricated guide bearing with self-aligning segments. *Int J Fluid Mach Syst* 2013;6(2):49–55.
- [71] Jones JA, Palylyk RA, Willis P, Weber RA. Greaseless bushings for hydropower applications: program, testing, and results. Technical Report. Champaign: Construction Engineering Research Lab (Army); 1999.
- [72] Rodiouchkina M, Berglund K, Mouzon J, Forsberg F, Ullah Shah F, Rodushkin I, et al. Material characterization and influence of sliding speed and pressure on friction and wear behavior of self-lubricating bearing materials for hydropower applications. *Lubricants* 2018;6(2):39.
- [73] McCarthy D. Sliding bearings for hydropower applications: novel materials, surface texture and EALs [dissertation]. Luleå: Luleå tekniska University; 2008.
- [74] Bromaghin A, Ali M, Ravens T, Petersen T, Hoffman J. Experimental study of abrasion characteristics for critical sliding components for use in hydrokinetic devices. *Renew Energy* 2014;66:205–14.
- [75] Ren G, Oge K. Hydro-turbine main shaft axial seals of elastic polymer principle and practice. In: Proceedings of Waterpower XVI Conference; 2009 Jul 27–30; Spokane, WA, USA. Tulsa: Pennwell Corporation; 2009.
- [76] Evans WA, Sousa J. Advances in sealing systems for water turbines. *Hydro Rev* 2014;5(22):20222426.
- [77] Ingram E. Bearings and seals: applying the latest technologies. *Hydro Rev* 2011;30(4):22–36.
- [78] Proven designs and the next generation-turbine seals [Internet]. Pointe-Claire: Fugesco Inc.; 2021 [cited 2021 Oct 28]. Available online: https://www.fugesco.com/upload/blocchi/X168allegatoALLEGATO_DOWNLOAD1-2X_Hydropower_EN_WEB.pdf.
- [79] Waters S, Aggidis G. Tidal range technologies and state of the art in review. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;59:514–29.
- [80] Calvário M, Sutherland LS, Guedes Soares C. A review of the applications of composite materials in wave and tidal energy devices. In: Proceedings of the 17th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM 2017); 2017 Oct 9–11; Lisbon, Portugal. Los Angeles: CRC Press; 2017.
- [81] Wang SQ, Zhang Y, Xie YY, Xu G, Liu K, Zheng Y. Hydrodynamic analysis of horizontal axis tidal current turbine under the wave-current condition. *J MarSci Eng* 2020;8(8):562.
- [82] Boisseau A, Davies P, Thiebaud F. Sea water ageing of composites for ocean energy conversion systems: influence of glass fiber type on static behaviour. *Appl Compos Mater* 2012;19(3–4):459–73.
- [83] Arhant M, Davies P. Thermoplastic matrix composites for marine applications. In: Pemberton R, Summerscales J, Graham-Jones J, editors. Marine composites: design and performance. Cambridge: Woodhead; 2019. p. 31–54.
- [84] Shiekh Elsouk MN, Santa Cruz A, Guillou SS. Review on the characterization and selection of the advanced materials for tidal turbine blades. In: Proceedings of the 7th International Conference on Ocean Energy; 2018 Jun 12–14; Cherbourg, France. Paris: Ocean Energy Systems; 2018.
- [85] Tidal stream projects-MEYGEN [Internet]. Edinburgh: SIMEC Atlantis Energy; c2021 [cited 2020 Oct 28]. Available from: <https://simecatlantis.com/projects/meygen/>.
- [86] Humeau C, Davies P, Jacquemin F. An experimental study of water diffusion in carbon/epoxy composites under static tensile stress. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2018;107:94–104.
- [87] Alam P, Robert C, Brádaigh CMO. Tidal turbine blade composites—a review on the effects of hygrothermal aging on the properties of CFRP. *Compos Part B Eng* 2018;149(15):248–59.
- [88] Tual N, Carrere N, Davies P, Bonnemains T, Lolive E. Characterization of sea water ageing effects on mechanical properties of carbon/epoxy composites for tidal turbine blades. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2015;78:380–9.
- [89] Davies P. Towards more representative accelerated aging of marine composites. In: Lee SW, editor. Advances in thick section composite and sandwich structures. An anthology of ONR-sponsored research. Berlin: Springer; 2020. p. 507–27.
- [90] Katsaprakakis DA, Christakis DG, Stefanakis I, Spanos P, Stefanakis N. Technical details regarding the design, the construction and the operation of seawater pumped storage systems. *Energy* 2013;55:619–30.
- [91] Klimenko VV, Ratner SV, Tereshin AG. Constraints imposed by key-material resources on renewable energy development. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;144:111011.
- [92] Robb D. Hydro's fish-friendly turbines. *Renewable Energy Focus* 2011;12(2):16–7.
- [93] Quaranta E, Aggidis G, Boes RM, Comoglio C, De Michele C, Patro ER, et al. Assessing the energy potential of modernizing the European hydropower fleet. *Energy Conversion and Management* 2021;246:114655.
- [94] Forrest K, Tarroja B, Chiang F, Agha Kouchak A, Samuelsen S. Assessing climate change impacts on California hydropower generation and ancillary services provision. *Clim Change* 2018;151(3):395–412.
- [95] Alias MN, Brown R. Corrosion behavior of carbon fiber composites in the marine environment. *Corros Sci* 1993;35(1–4):395–402.
- [96] Realtide [Internet]. Edinburgh: The University of Edinburgh; c2021 [cited 2021 Oct 28]. Available from: <https://www.realtide.eu/>.
- [97] Davies P, Verbooue W. Evaluation of basalt fiber composites for marine applications. *Appl Compos Mater* 2018;25(2):299–308.
- [98] Mukherjee T, Kao N. PLA based biopolymer reinforced with natural fiber: a review. *J Polym Environ* 2011;19:714.
- [99] Zhang QL, Wu HG. Embedment of steel spiral cases in concrete: China's experience. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;72:1271–81.
- [100] Dorji U, Ghomashchi R. Hydro turbine failure mechanisms: an overview. *Eng Fail Anal* 2014;44:136–47.
- [101] Lee N, Grunwald U, Rosenlieb E, Mirlitz H, Aznar A, Spencer R, et al. Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: benefits and global assessment of technical potential. *Renew Energy* 2020;162:1415–27.
- [102] Choudhary P, Srivastava RK. Sustainability perspectives—a review for solar photovoltaic trends and growth opportunities. *J Clean Prod* 2019;227:589

- 612.
- [103] Kumar R, Singal SK. Penstock material selection in small hydropower plants using MADM methods. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;52:240–55.
- [104] Schleiss AJ. Hydropower in the Swiss Alps in the next century. In: *Proceedings of the Hydropower into the Next Century*; 1999 Oct 18 – 19; Gmunden, Austria; 1999.
- [105] Felix D. Experimental investigation on suspended sediment, hydro-abrasive erosion and efficiency reductions of coated Pelton turbines [dissertation]. Zurich: ETH Zurich; 2017.
- [106] Scuero A, Vaschetti G. Geomembrane sealing systems for dams: ICOLD Bulletin 135. *Innovative Infrastruct Solutions* 2017;2(1):1–17.
- [107] Gonzalez-Reyes GA, Bayo-Besteiro S, Vich Llobet J, Anel JA. Environmental and economic constraints on the use of lubricant oils for wind and hydropower generation: the case of NATURGY. *Sustainability* 2020;12(10):4242.
- [108] Whitehead M. Design and manufacturing study of hydroelectric turbines using recycled and natural fiber composites [dissertation]. Corvallis: Oregon State University; 2013.