

钼：碳捕集的关键

随着全球致力于实现气候中和，碳捕集、利用与封存（CCUS）技术成为通往可持续未来的重要桥梁。通过从工业流程中捕获二氧化碳（CO₂）并进行封存或再利用，CCUS可阻止有害气体进入大气。该技术的可靠性和耐用性，离不开含钼材料的应用。



应对气候危机并在2050年前实现净零排放，是当今时代面临的重大挑战之一。向可再生能源转型、提升能源效率、发展碳中和技术是关键解决路径。在此过程中，CCUS 技术已成为从源头捕获二氧化碳排放的核心策略。

碳捕集、利用与封存（CCUS）技术是指从工业或发电设施排放的废气中捕获二氧化碳，并将其运输至封存或再利用设施。二氧化碳或安全封存于地下，即碳捕集与封存（CCS），或进行工业再利用来生产化学品、合成燃料及建筑材料。这一双重路径不仅从源头减少了排放，还能降低对原生化石燃料的开采需求，从而进一步削减下游产业链的碳排放。然而，CCUS技术的成功高度依赖于其基础设施的质量与安全性，而钼在其中发挥着关键作用。

脱碳面临的障碍

实现全面脱碳仍面临重重挑战。生活水平提升与数字化发展使全球能源需求持续增长，减排压力随之加剧。钢铁生产等碳密集型和能源密集型行业正在探索用可再生能源制氢气替代焦炭的解决方案。虽然试点项目正在进行中，但可能还需要数年时间才能使这类技术在全球范围内普及。

玻璃制造、乙醇生产、发电、氢气与合成氨、化肥生产、天然气加工和其它化学加工行业，尽管脱碳的努力不断加强，但CO₂排放问题依然严峻。

而在某些情况下，一些工业流程（如水泥生产）的CO₂排放难以避免。石灰石在焦炭炉中需加热至1500°C，虽然焦炭的燃烧会排放CO₂，但大部分（约三分之二）的排放来自于石灰石本身在煅烧过程中所释放的CO₂。

处理二氧化碳面临的挑战

虽然纯净、干燥的CO₂不具有腐蚀性，但CCUS系统捕获的CO₂中通常含有水、氧气和硫化物等杂质。在液化过程中，这些杂质会凝结成硫酸、硝酸、碳酸和盐

酸等腐蚀性酸性溶液，严重损害管道、储存设施和其他CCUS组件。

除腐蚀问题外，流体突然减压会导致液态二氧化碳在膨胀时急速冷却，有时温度可低至-80°C，这种现象称为焦耳-汤姆逊效应。这种快速冷却可能引发脆性断裂，即材料在低温下由于韧性降低而突然发生灾难性失效。运输低温液态含杂质的二氧化碳时，脆性断裂风险同样显著。

为了应对这些挑战，奥氏体和超级奥氏体不锈钢或镍基合金等无韧性-脆性转变的材料可满足要求，它们既具有所需的低温韧性，又具有良好的耐腐蚀性能。双相不锈钢和超级双相不锈钢耐腐蚀性能优异，已成功用于CO₂注入井。尽管它们在零度以下的温度会发生韧性-脆性的转变，但双相不锈钢具有非常高的强度，适合在特定的环境条件下使用。

➤ 选择与环境适配的不锈钢可提升安全性，并有助于确保较长的使用寿命





世界各地都在开发碳捕集项目，图为冰岛的碳捕集项目

碳捕集技术

碳捕集利用化学吸收或类似技术将二氧化碳从工业排放中分离出来。例如，化石燃料发电厂的燃烧后捕集（PCC）装置使用单乙醇胺等胺基溶剂来选择性地吸收烟气中的二氧化碳。PCC 装置包括一个吸收塔（用溶剂捕集二氧化碳）和一个解吸塔（加热将二氧化碳从溶剂中释放出来并收集），再生后的溶剂可循环使用。

与从工业排放中分离出二氧化碳的基于工艺流程的碳捕集不同，直接空气捕集（DAC）可直接从大气中去除二氧化碳。这种技术吸取空气，使其通过液体或固体吸收介质，再利用热和真空技术释放捕获的二氧化碳以备运输和封存。在运输和储存方面，DAC 遵循与其他碳捕集方法相同的原则。

碳捕集与封存（CCS）技术最初的设想是将二氧化碳捕集装置与压缩、运输和封存系统直接集成在各个单独的设施（如发电厂）内部，并将它们设置在紧随排放控制系统之后。但是如今更为推崇的方法是采用“集群”式CCS网络。在这些网络中，多个二氧化碳排放源通过管道系统连接，管道系统从不同来源收集二氧化碳，并将其输送到集中化的分离、清洁和液化设施。由于二氧

化碳中含有各种可能具有腐蚀性的杂质，采用铝合金化的耐腐蚀管道和设备至关重要。通过共享基础设施，CCS集群可显著降低单个二氧化碳排放设施的设备成本。

这种直接空气捕集设备可从大气中提取二氧化碳



案例研究：北极光合资企业

北极光合资企业是壳牌、挪威国家石油公司和道达尔能源三方合作的一个碳捕获与封存项目，旨在从多个源头收集、液化并运输二氧化碳。两艘7500立方米的液化二氧化碳运输船将把二氧化碳运送至挪威西部于尔加登的一个接收终端。该技术借鉴了液化天然气（LNG）的运输方式来运输二氧化碳。接收终端部分系统采用316不锈钢制成，二氧化碳在此临时储存，之后通过一条100公里长的海上管道输送至海底2600米深处的咸水层进行安全、永久性的封存。

在注入现场，注入井套管和油管底部200米的部分由两种材料制成：一种是含1%钼的双相不锈钢UNS S82551，另一种是含3%钼的25Cr超级双相不锈钢UNS S39274。这些耐腐蚀不锈钢预计能够承受暂时封井带来的恶劣条件，确保注入井的长期结构完整性以及二氧化碳在地下深处的安全封存。油管和套管的直径可达25厘米。

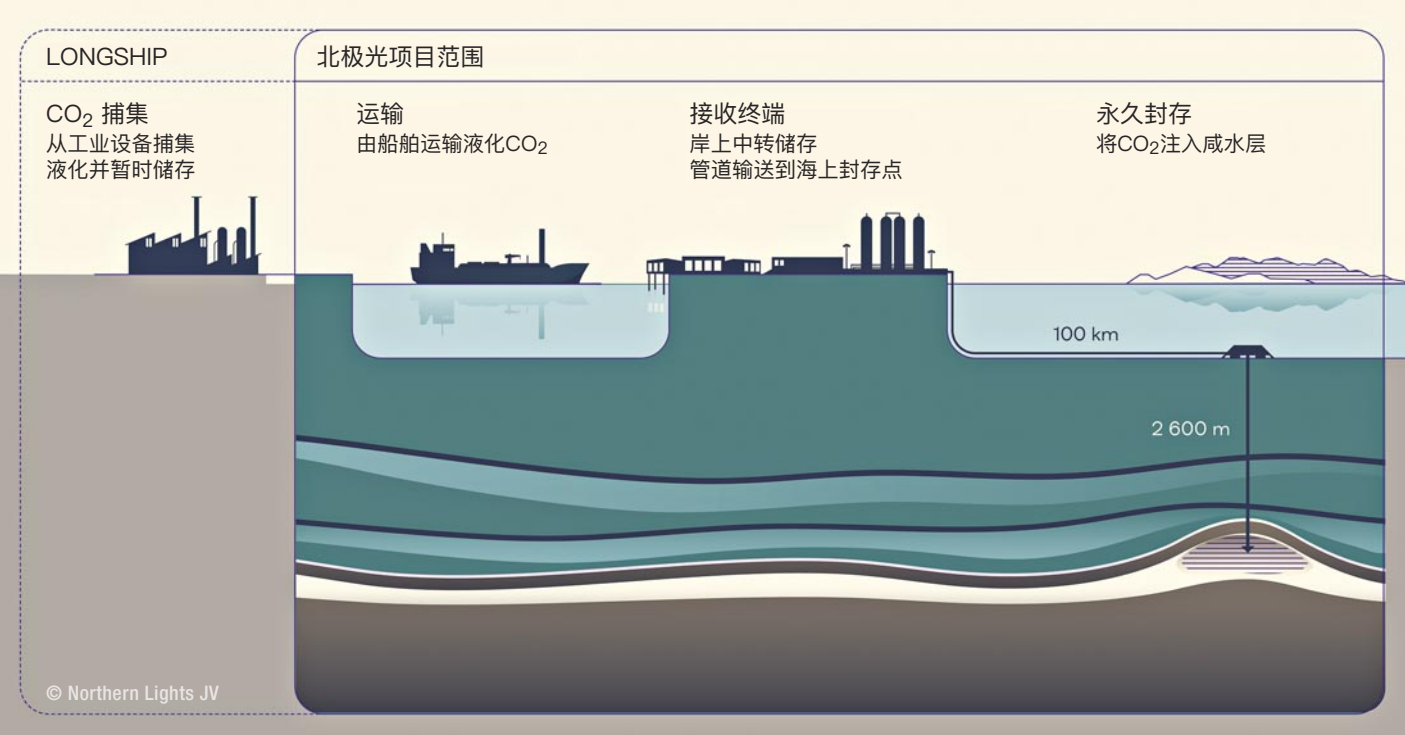
该项目于2024年开始运营，初始年封存能力为150万吨二氧化碳。第一阶段将封存挪威布雷维克一家水泥厂和奥斯陆一家垃圾焚烧发电厂的80万吨二氧化碳。第二阶段封存能力将扩大至500万吨/年以上，包括来



挪威西部Øygarden市的二氧化碳接收终端

自荷兰雅苒国际氨生产厂的80万吨/年以及来自丹麦Ørsted发电厂的43万吨/年二氧化碳，预计未来还将增加封存量。

北极光项目Longship碳捕集与封存价值链



二氧化碳的利用

碳捕集与利用（CCU）技术是对碳捕集与封存（CCS）技术的补充，它将二氧化碳重新用作原料来生产化学品、合成燃料和聚合物，利用捕获的二氧化碳替代天然气或石油等碳氢化合物进行化学合成，从而减少了开采和加工原始化石能源的需求。典型应用包括尿素、水杨酸和聚碳酸酯的生产。

二氧化碳还可助力混凝土生产，它能矿化形成碳酸盐，提升材料的机械强度。此外，二氧化碳在饮料行业中也广泛用于制作碳酸饮料。

CCS与CCUS的设备和材料

除了通常由埋弧焊（SAW）碳钢制成的长距离二氧化碳输送管道外，碳捕集与封存（CCS）以及碳捕集、

➤ 超级双相不锈钢井下管的安装



利用与封存（CCUS）设施还依赖一系列工业加工设备。采用含钼不锈钢制造的部件对于解决腐蚀问题至关重要，尤其是在二氧化碳处于超临界或液化状态时。

根据《AMPP指南21532》，316不锈钢可用于压缩机和冷却装置，这些设备对于二氧化碳的增密或液化至关重要。该指南还提到，316不锈钢可用于输送-80°C的密相或液相二氧化碳的陆上管道。对于更多暴露于氯化物环境的海上和沿海管道，采用含6%钼的不锈钢或涂层316不锈钢更为适宜。

其他设备如阀门、流量计以及吸附塔或解吸塔等，也需要采用不锈钢。合金625是一种含9%钼的镍基合金，可用于井口和采油树，因为在这些地方，回流水和酸性冷凝物会增加腐蚀风险。同时，套管可能会采用低合金钢，通常是含钼钢，如L80碳钢、F22钢或AISI 4130钢。最后，注入井管可采用含3.5%钼的25Cr超级双相不锈钢，它具有优异的强度和耐腐蚀性。

行业现状

全球碳捕集与封存（CCS）研究机构报告显示，全球CCS项目增长迅速，截至2024年中，共有628个设施处于规划或建设中，较上一年增长60%。这些项目的累计二氧化碳捕集能力达4.16亿吨/年，反映出过去七年的复合年增长率为32%。

在已投入运营的50个设施中，美国在CCS部署方面处于领先地位，有19个设施在运营，其次是中国14个，加拿大7个，挪威和冰岛各2个。澳大利亚、巴西、匈牙利、卡塔尔、沙特阿拉伯和阿拉伯联合酋长国各有1个。

欧洲发展迅猛，过去一年中，正在开发的二氧化碳运输与封存设施数量翻倍，达到77个，这一扩张态势凸显了CCS技术在工业化国家中的日益普及。

尽管消除二氧化碳排放仍是终极目标，但部分行业目前仍面临无法避免的排放问题。碳捕集、利用与封存（CCUS）为捕获碳并将其安全封存于地下，或再利用转化为有益用途提供了关键路径。其成功离不开强大坚实的基础设施，而钼对于应对未来挑战所需的韧性和耐久性而言不可或缺。（Iris Rommerskirchen, Nicole Kinsman）