

钼使机器运行更丝滑

摩擦是两个表面或物体之间相对运动时所受到的阻力。摩擦常常被人们忽视，而它却是造成能源浪费的一个重要原因。在发电、制造和运输等大规模生产过程中减少摩擦，可以显著地降低能源消耗、成本和排放。钼基润滑剂和钼合金钢有望带来这一改变。

摩擦会直接影响机器和机械系统的效率，通过产生废热导致不可逆转的能量损失。在全球范围内，各类汽车和工厂中无数的齿轮和轴承等运动部件消耗的能量惊人。详细分析显示，因摩擦而损失的能源相当于全球能源总消耗量的 20%–33%。

可大幅减少摩擦的技术已经问世，许多技术都涉及钼。这些技术包括机械设计和冶金设计方面的改进、表面处理和润滑剂配方的改进。减少摩擦的两大主要策略是更好的润滑和零部件性能的提高。钼在这两种解决方案中都发挥着重要作用。

二硫化钼 (MoS_2) 是一种天然形式的固体润滑剂，通常以干膜或悬浮在油中的形式，在各种机械系统中用来减少摩擦和改善润滑性能。有机钼化合物为减少摩擦提供了另一种创新解决方案，其作用机制与 MoS_2 不同。将它们添加到传统的发动机油中可显著降低摩擦系数。

第二种方法是在齿轮等钢制部件中添加钼以改善部件的性能。添加钼可大大提高钢的硬度和强度，从而提高耐磨性能，并改善润滑性能及减少摩擦。

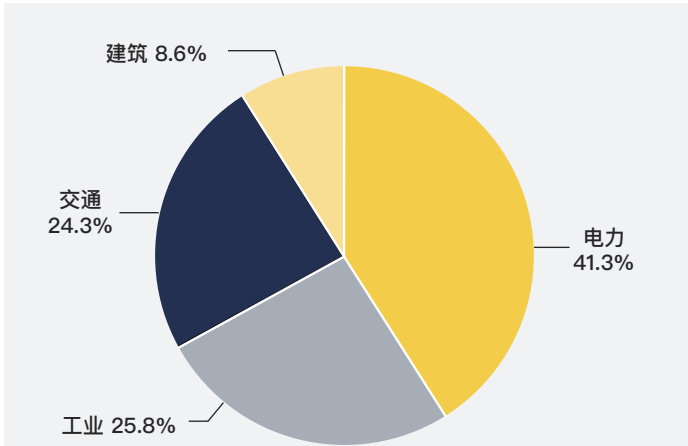
摩擦：环境和经济的难题

据美国能源信息署（EIA）估计，随着全球经济的增长，到2050年，全球能源消耗总量将增长高达50%。在此背景下，迫切需要大幅减少摩擦损失。

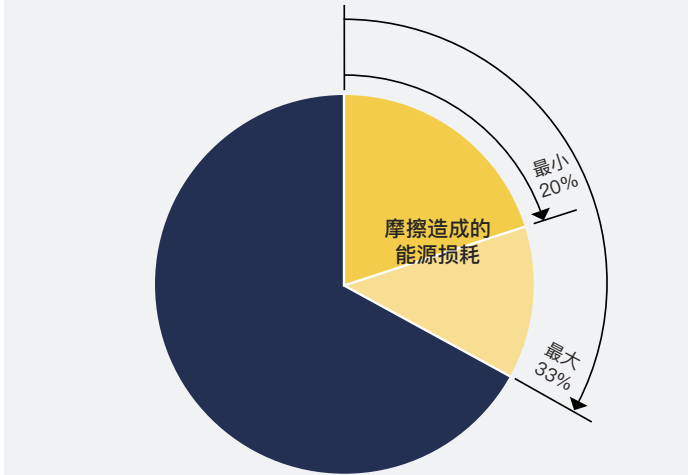
在这种情况下，如果能在各类应用中将摩擦力减少30%至40%，将是非常有益的。据不同的研究估计，最大程度的减少摩擦所带来的绝对节能潜力大约为总能耗的6%–24%。减少摩擦还可以减少零部件的磨损，这意味着减少了维护和零部件的更换，间接地降低能源负担，使全球二氧化碳排放再减少5–8%。在驱动和齿轮部件中更多地使用钼基润滑剂和含钼钢可大大有助于减少摩擦和磨损。

2019年，与能源相关的直接二氧化碳排放量达336亿吨。系统性地减少摩擦可在中长期每年减少20–80亿吨二氧化碳排放。提高零部件的耐久性可额外减排17亿–26亿吨二氧化碳当量。总之，这意味着可减排37亿–107亿吨二氧化碳，或相当于2019年能源相关二氧化碳排放量的11%–32%。根据相关数据，2020年全球所有乘用车的二氧化碳排放量约为30亿吨。

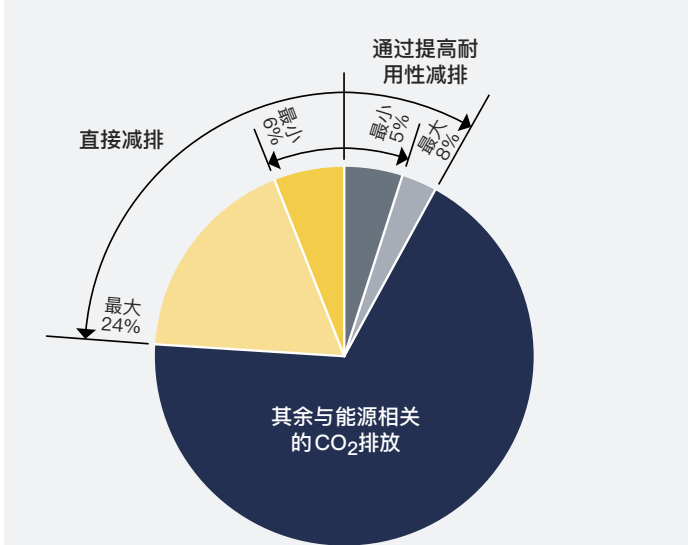
合计减排37亿至107亿吨二氧化碳的潜力将大大有助于实现全球排放目标。消耗更少的能源，减少资产维护和更新的开支，也能节省大量成本。欧盟排放交易体系（ETS）下的碳定价为评估二氧化碳减排战略的成本效益提供了一个框架。然而，德国最近的一项研究发现，在能源或燃料使用过程中减少摩擦的产生，所节省的费用可能比碳配额的价值高出10到20倍。此外，美国证券交易委员会（SEC）等监管机构将范围三排放披露纳入其中，凸显了减少摩擦技术在减少碳排放方面日益重要的作用，尤其是在此类披露成为强制性规定的情况下。



根据国际能源机构（IEA）的数据，2019年全球与能源相关的二氧化碳直接排放量为336亿吨，按主要行业细分



据估计，摩擦造成的能源浪费占全球能源总消费量的20%至33%，相当于67亿至111亿吨二氧化碳排放量。上面的饼图显示，这相当于工业或交通所造成的全部排放量。



在所有与能源相关的二氧化碳排放中，通过最大限度地减少摩擦可减排6%至24%。此外，通过降低磨损提高耐用性，可间接减排5%至8%。全球二氧化碳排放总量的11%–32%实际上是可以避免的。

钼使机器加速转起来

减少摩擦即可产生重大影响的典型例子是在机械设备、汽车、卡车和风力涡轮机中无处不在的动力传动系统。它们的许多部件都涉及滑动滚动接触，需要润滑才能顺利运行。值得注意的是，齿轮也是电动汽车（EV）动力传动系统不可或缺的一部分，减少摩擦能量损失可以延长电动汽车的续航里程。此外，效率的提升还可以使电池体积更小、重量更轻，从而减少对昂贵原材料的需求，减轻车辆重量，提高车辆的整体可持续性。前面已经提到了减少齿轮滑动滚动摩擦的主要策略——改善零部件性能和润滑。

可减少摩擦的钢材

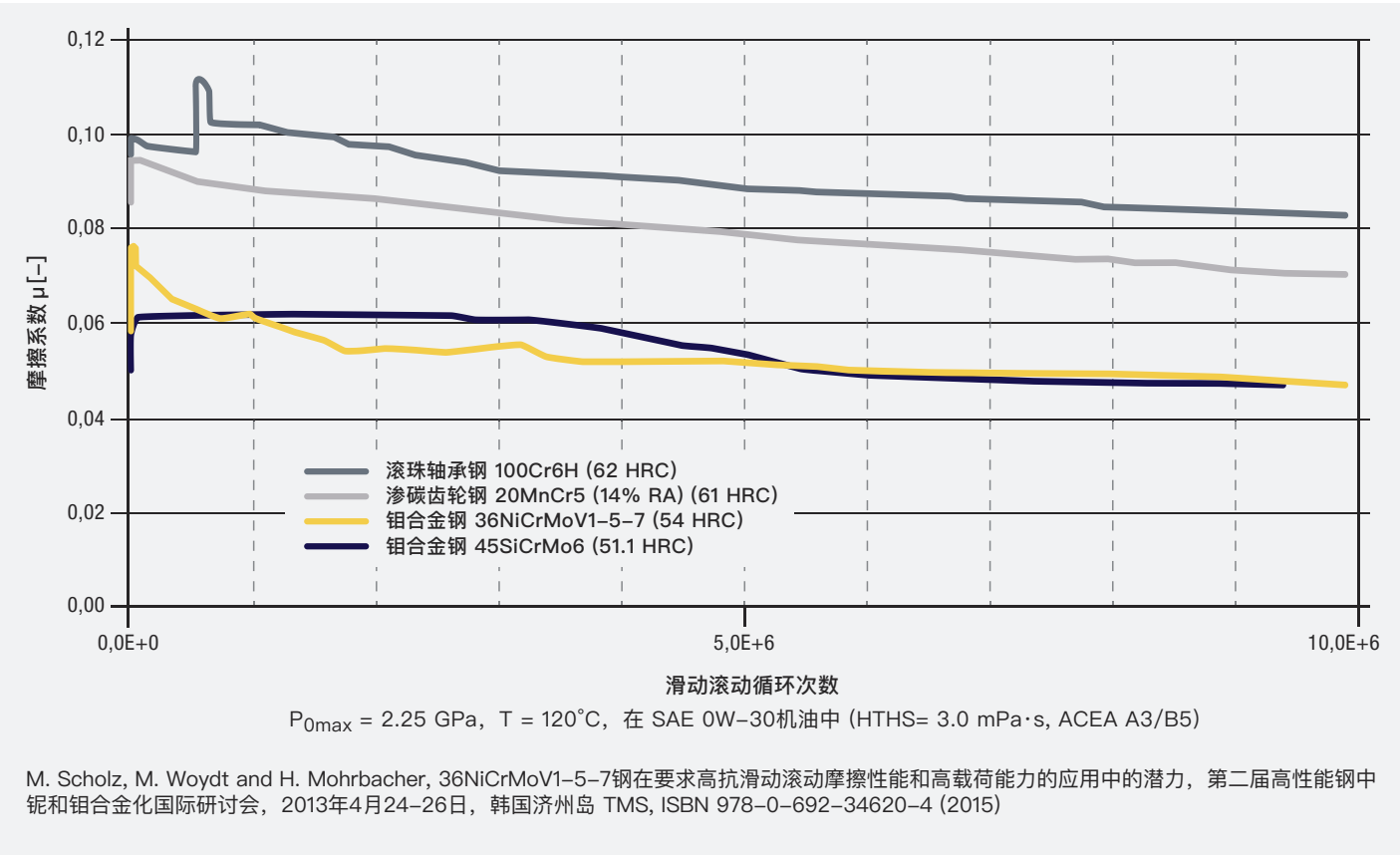
表面硬度对减少摩擦和磨损至关重要。随着硬度的增加，摩擦和磨损都会减少。因此，改善零部件性能的方法之一就是提高其表面硬度，可以采用表面硬度很高

的钢材，也可以采用超硬薄膜涂层技术。由于钼能提高钢的硬度，IMO A 的一个项目表明，在标准化性能基准测试中，含钼0.5%的改进型齿轮钢的性能表现比最成熟的齿轮钢高30% 至 40%。

薄膜涂层如类金刚石(DLC)或四面体非晶碳(ta-C)膜在机械行业已得到广泛应用，可将摩擦降至很低水平。然而，涂层之下的钢材必须具有足够的硬度，以确保涂层在使用过程中不会分层或剥落。钢中添加钼可直接提高硬度。

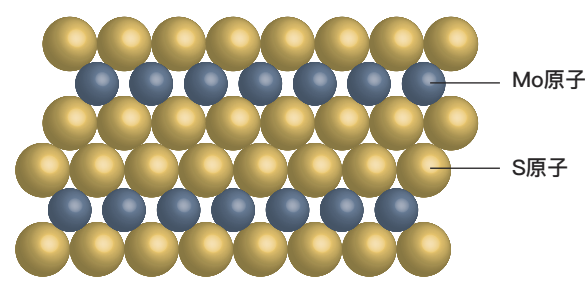
即使没有薄膜涂层，含钼钢也能减少摩擦。使用发动机油对商用钢种进行了1000万次循环的滑动滚动摩擦基准测试。结果表明，含钼钢的摩擦系数非常低，在0.04–0.06 之间，约为常用滚珠轴承钢和渗碳齿轮钢的一半。看来钼合金化从本质上改善了润滑性，具有低摩擦特性。如果用含钼钢取代市场上的主流钢材，由摩擦导致的能量损耗可减少约50%。还可以省略薄膜涂层，避免施加涂层的额外步骤以及在使用过程中涂层分层剥脱和疲劳的风险。

相同牌号的无涂层钢在1000万次滑动滚动循环中摩擦系数的变化。含钼钢的摩擦系数约为普通滚珠轴承钢和普通渗碳齿轮钢的一半。



钼用于多种润滑剂

二硫化钼（ MoS_2 ）化合物因其结构中硫化物离子层之间夹着一层钼原子而具有润滑特性。硫化物层之间的范德华力很弱，因此在施加剪切应力时，这些硫化物层可以比较容易地相对滑动，因而具有较低的摩擦系数。 MoS_2 是一种出色的高温润滑剂，在高达 350°C 的空气中 and 高达 1200°C 的真空或惰性气氛中都能保持稳定。它被广泛应用于润滑脂、分散剂、摩擦材料和粘合涂层中。作为添加剂的 MoS_2 可提高机油的性能。赛车爱好者可能会认出“LiquiMoly”或“Molygraphite”等著名商标。



具有层状原子结构的二硫化钼。在侧向力的作用下，S-S 层在 S-Mo 层断裂或滑动之前滑动，大大降低了摩擦力。

改善润滑性能的另一个重要方法是在标准润滑油中添加有机或金属有机摩擦改进剂。一些有机钼化合物可将摩擦系数大大降低至 0.04，超过了其他有机化合物或金属有机化合物所能达到的水平。与作为固体润滑剂的 MoS_2 不同，有机钼化合物可与表面和润滑剂发生化学作用，从而提高整体的润滑性能并提供抗磨损保护。二烷基二硫代氨基甲酸钼如二正丁基二硫代氨基甲酸钼（ $\text{C}_{36}\text{H}_{72}\text{MoN}_4\text{S}_8$ ）或二（2-乙基己基）二硫代磷酸氧硫化钼（ $\text{C}_{64}\text{H}_{136}\text{MoO}_8\text{P}_4\text{S}_8$ ）等名称拗口的化合物加入标准的 SAE0W-30 发动机机油后，就会产生这种效果。经过短暂的磨合期后，添加剂会形成一层薄膜，将摩擦力降低到 0.04 左右的低而稳定的数值。不过，这种膜的使用寿命有限，需要定期更换或添加润滑油来保持减少摩擦的效果。有趣的是，在润滑油中的添加比例通常为总重量的 0.3% 至 0.7%，与钢中添加合金元素钼类似。

虽然完全消除摩擦是不可能的，但以钼为基础的减摩方法可将摩擦系数显著降低至 0.04，几乎是目前水平的一半。全球高达三分之一的能源因摩擦而浪费，广泛



MoS_2 和有机钼化合物都可以添加到发动机机油中以改善润滑性能。

采用合金元素钼含量较高的钢材并加强润滑，有望加快我们实现到 2050 年温室气体净零排放这一全球气候承诺目标的进程。（Mathias Woydt, Hardy Mohrbacher）

MoS_2 是一种黑色粉末，可作为固体润滑剂减少摩擦。

