

钟表滴答计时 靠什么？钼！

机械表靠卷紧的钢带即主发条提供动力。如果没有主发条，手表和其他计时设备如节拍器就无法工作。不起眼的主发条在手表内承受着很大的作用力，有必要使用具有卓越抗疲劳性能的独特硬质材料。如今，大多数主发条都由一种特殊的含钼合金制成。

机械表不是利用电池、电路或外部电源来计时，而是给手表上发条，为其主发条加载动力，使齿轮传动系统运转。主发条是手表的支柱。它储存的能量由所谓的擒纵机构以精确的时间间隔释放。擒纵机构可防止主发条一次性释放所有动力，让手表指针像喷气涡轮机一样旋转。而经擒纵轮调节的能量以递增的方式驱动手表的齿轮，准确测量着时间的流逝。自动机械表的工作原理与之类似，不同之处在于，用佩戴者手臂运动时被动产生动力的摆锤运动，代替了上发条。在许多手表中，每个零件都是精心制作的艺术品，其机械精度接近于完美。即使是看似简单的主发条，也是历经几个世纪的冶金奇迹。含钼合金在几乎所有手表主发条和一些其他部件的机械性能方面，起着不可或缺的作用。



➤ 摆轮游丝（左）通过一系列齿轮连接到主发条（右），调节主发条的能量以秒为间隔恒定地释放。

计时的历史

纵观历史，有各种记录时间的工具。从简单到复杂得难以想象的各种日晷、水钟和蜡烛钟，使人类数千年来一直走在正轨上。大约600年前，现代机械钟表首次出现在欧洲。发条的发明对于现代钟表业来说是必不可少的。在主发条出现之前，时钟靠摆锤提供动力。一种缠绕在滑轮上的摆锤线绳，利用重力为时钟提供动力。即便这种设计也直到公元12世纪才出现，也可能更晚。主发条在历史上首次实现了更小型化且便携的设计。而是谁发明了主发条仍然是个谜。已知的最古老的发条驱动时钟可追溯到1430年，这是为勃艮第公爵菲利普古德制作的一件奢华的金制钟表，如今位于德国。尽管现代机械表的起源尚不清楚，但到了16世纪，类似于早期怀表的便携式“钟表”在中欧流行起来。然而，这些早期的钟表非常不准，主要用于好奇尚异的贵族们的齿轮传动珠宝。

1657年，摆轮游丝（也叫游丝）的发明使钟表制造业实现了巨大的飞跃。摆轮游丝是擒纵机构的一部分，是手表机芯中一个特别复杂和优雅的部分。这项发明将手表的误差范围从每天几小时减少到大约10分钟。如今，世界级的手表制造商注意到，游丝宽度一微米的差别就可以使手表相差30分钟。

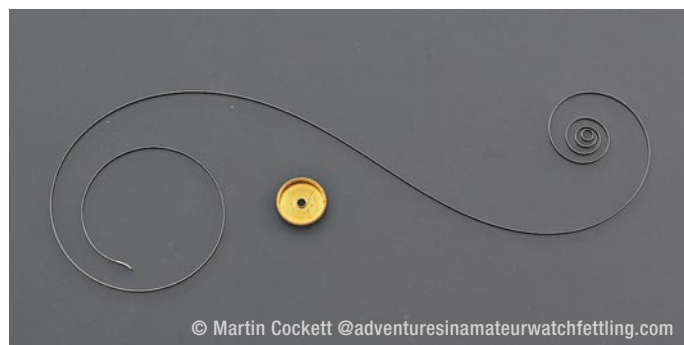
即使在18世纪，钟表制造也已成为一个复杂的冶金工艺。钟表匠威廉布莱克写了许多关于手工制作主发条的厚书。在1780年代，一个高质量的主发条可能需要若干天的精工巧做。手工制作手表既费时又昂贵，因此，能够享受钟表的主要是富人。

正如现在发达国家的许多重要的生活品，只有通过钢材的大规模生产才能实现手表的大规模生产。工业革命是历史上第一次能够生产出性能一致的大批量铁。第一次世界大战之前，怀表或女士挂表一直是主流设计，突出了轻型计时装置的实用性。一战后，手表成为主导设计，其余的成为历史。

尽管几个世纪以来制表业取得了各种惊人的发展，但主发条仍然存在问题。随着时间的推移，最初用于主发条的碳钢，其弹性和强度明显丧失。因此，主发条往往比手表的其他部件更早出现故障。修理主发条一直是手表维修的首要原因，直到1960年代，当含钼合金及其特殊性能广泛成为碳钢的替代品。

采用钼节省时间

近几十年来，已专门开发出几种合金来生产在两次上发条之间运行时间更长的手表。手表的运行时间取决于其动力储备，或存储在主发条中的可用机械能。采用这些合金（其中最受欢迎的合金含有钼），手表的动力储备时间越来越长。主发条的材料必须非常坚固、弹性好、韧性好，还需要卓越的抗疲劳性能以承受多年的循环载荷。如果主发条出现故障，不是一个简单的更换：损坏的主发条会损害或破坏手表的整个



发条盒中的主发条（左），动力释放后进行清洁的发条（右）。由于主发条上紧后受力特别大，因此必须使用特殊工具将其拆下，以免伤及制表师！

齿轮系统，这就是为什么它们现在要被安全地封装在发条盒中的原因。与传统碳钢相比，含钼合金具有更大的弹性极限，不易发生断裂和永久变形，从而使这些发条的使用寿命更长。主发条的制造由于其复杂性，仍然是一种高度专业化的工艺——手表制造商几乎总是从全球为数不多的几家生产商之一订购它们。

主发条材料含有多达10种合金元素，所有元素都会影响发条的最终性能。钼特别有助于提高淬透性和强度，以及高负载微小零件所必要的延展性。钼还提高了合金的耐腐蚀性能。最受欢迎的主发条合金是NIVAFLEX®，一种钼含量为4%的钴镍铬合金。其3000MPa的极高抗拉强度使其具有令人难以置信的抗疲劳性能。SPRON 510的钼含量高达10%，Bioflex®的钼含量为2.5%–4%，也是受欢迎的主发条材料。

磁场的影响也会对手表的准确度产生负面和实质性的影响。因此，手表零件必须是非磁性的。钼合金化有助于使Nivaflex合金在手表常用温度下保持非磁性。所以，有时其他的精密手表零件如发条轴，也需要使用含钼合金。

传统上，摆轮游丝也由碳钢制成，与主发条存在类似的问题。与主发条一样，摆轮游丝必须非常坚硬，能够抗疲劳，同时还具有延展性并且能够做到加工的公差极小。最著名的游丝材料是NIVAROX® CT，它含有多达七种不同的合金元素，所有这些元素对于材料特性（主要是低的温度系数）具有决定性的作用。尤其使手表的摆轮能够更好地计时。尽管Nivarox不含钼，但最近至少有一项专利申请涉及含钼游丝，利用

了该元素的独特性能。钼还以化学品的形式助力手表制造：一些机械手表品牌在齿轮和主发条盒中使用二硫化钼润滑剂来保持手表平稳顺畅地运行。

机械表体现了几个世纪以来人类的创造性、手工艺和求知欲。尽管许多人担心这些艺术作品会随着电池驱动的石英手表以及当今智能手机的盛行而消失，但机械手表行业仍然充满活力。例如，在YouTube上有华丽手表的爱好者社区，精心制作的机芯不断吸引着全球一代又一代的手表迷为之陶醉。钟表的滴答声和表针的转动唤起人们对时光流逝的关注，而智能手机无法做到这一点。特别是机械表把人们带回了那个时间似乎过得更慢的时代。在机械手表最重要的零件中，钼有助于在数字化时代，保持怀旧、传统和对机械完美的追求。(Karlee Williston)

感谢Alberto Bracchi, Vacuumschmelze GmbH 和 Alberto Sicco, Generale Ressorts的宝贵分享。