

钛：潜力巨大的高科技材料



由于钛合金具有良好的强度与比重比，因此通常用于航空领域的轻质结构

定制优质刀具，实现高效加工

最初，钛仅用于军用侦察机的发动机和机身。现在，由于其出色的材料性能，钛早已成为我们日常生活中不可或缺的一部分。当今，钛遍布于高科技产品和昂贵的奢侈品：从民用飞机的组件到智能手机和笔记本电脑外壳、高尔夫球杆、手表和珠宝等体育器材，甚至医疗植入物。然而，历史上，我们对轻金属的加工一波三折，只有同时拥有正确的加工策略和相应的切削刀具，才能实现有效成本效益比的钛加工工艺。

“钛是一种‘超级材料’。钛合金因其良好的强度与比重比，在航空结构部件等轻质结构中特别受欢迎。这种轻金属几乎和调质钢一样坚固，但重量却轻40%以上。此外，钛还具有极高的耐热性和极强的耐腐蚀性。氧化层使钛金属钝化，进而使其对氯化气体、海水、碱性溶液、酒精和冷酸等侵蚀性介质具有极强的抗腐蚀性。钛金属的另一个宝贵优势是它的生物相容性。钛金属植入物通常不会引发人体任何免疫排斥反应。”汉堡工业大学（TUHH）生产管理与技术研究所（IPMT）生产工程教授Jan Dege博士说。

钛还是一种相对年轻的材料。它于1791年由英国人威廉·格雷戈尔发现，从1944年起才开始能够大规模生产。但是，从那时起，它就开始了在世界各地的胜利之旅。20年前，全球约有6万吨金属钛被加工，10年前为14.3万吨，而今天，估计已经消耗了近30万吨。此外，钛并不是一种稀有金属：它在地球

上所占份额为0.565%，是地壳中第九大常见元素。这意味着它通常很容易被获得。



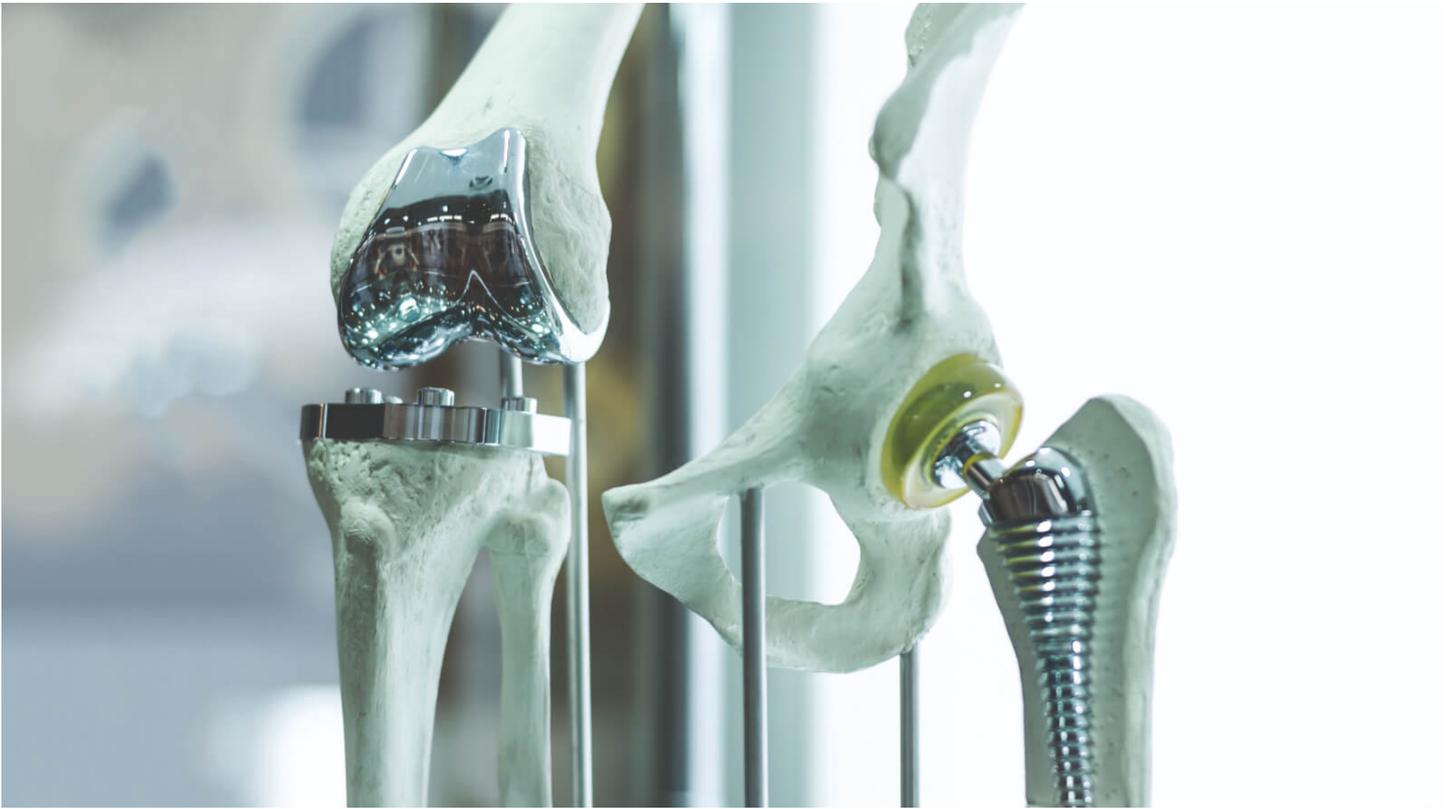
能源密集型生产

那么，为什么它通常只被应用于高科技和奢侈品呢？“钛非常昂贵，这是由于其复杂的制造工艺决定的。”Jan Dege解释道。“这种材料很少以纯金属形式存在。它必须使用高耗能的Kroll工艺才从钛铁矿或金红石中提取出来，并通过反复重熔炼和进一步加工后才能成为技术上可用的金属。这意味着生产每公斤钛合金Ti-6Al-4V需要消耗约108千瓦时的能量，这是生产铝合金所需能量（17千瓦时/公斤）的六倍。不仅原材料价格相应较高，而且钛的二氧化碳排放量也较高。”

这使得钛的回收再利用在经济和生态上都非常合算。然而，这里还存在一些问题：如今，许多钛部件都是从板材或模锻半成品中铣削出来的，特别是在航空航天工业中更是如此。在加工过程中，氧化、冷却润滑剂残留物、外来金属和刀具颗粒严重污染了钛屑，这使得回收变得困难。这就是为什么这些碎片经常被用作钢铁生产中的添加剂，而不能被回收利用到高标准钛合金中的原因。另一方面，纯钛则可以完全回到材料循环中。回收是通过重熔进行的，通常与Kroll工艺中的原始钛一起进行。

精密加工

限制钛应用的另一个原因在于其极具挑战性的加工要求：钛是最难加工的材料之一。加工中遇到的第一个障碍是：钛金属同时兼具高抗拉强度和低导热性。前者导致刀具切削刃上产生高机械应力，后者导致刀具上出现明显热负荷。与钢加工不同，钛加工时通过工件和切屑散发的热量很少。在相同的切削速度下，加工钛时的温度有时能达到加工钢的两倍。Jan Dege说：“为了减少切割刃上的热负荷，切削速度通常需要降低到 $v_c=60-90\text{m/min}$ 。此外，相对较低的弹性模量还会导致侧面回弹，从而产生额外的摩擦热。这大大限制了切削过程中的生产率。”



如今，钛成为我们日常生活中不可或缺的一部分，例如广泛应用于医疗和牙科技术中。然而，钛加工绝非易事，需要高端个性化定制刀具。

CemeCon杆刀产品部经理Manfred Weigand补充道：“钛金属还具有粘附倾向。特别是在高温下，这使得机加工变得更加困难。冷却的钛屑会粘附在刀具的切削刃上。如果与下一个切屑一起撕裂，不仅结合会变差，而且涂层和基材也可能一块脱落。这会导致切削刃上出现微崩缺，在最坏的情况下会导致刀具故障，至少也意味着磨损的增加。”

此外，并非所有钛都完全一样：除了广泛使用的 α - β 合金Ti-6Al-4V外，Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr或Ti-10V-2Fe-3Al等近 β 合金也越来越多地用于航空航天工业。由于其高强度和高热硬度，与Ti-6Al-4V相比，这些材料会导致更高的刀具磨损，并导致切削速度和进给率进一步降低。例如，还有用于医疗技术和植入术的其他钛合金，同样需要与之相应的特殊加工刀具。

所有参数步调一致



„总的来说，乍听起来加工钛所涉及的挑战很艰巨。然而，那些了解所有加工参数的人在这个领域却拥有巨大的优势。根据所使用的合金和加工设备，通过对硬质合金基材、刀具几何形状、涂层和数控工艺设计进行调整，能够确保实现经济性加工。”

Jan Dege教授，博士，TUHH IPMT生产工程系教授

“总的来说，乍听起来加工钛所涉及的挑战很艰巨。然而，那些了解所有加工参数的人在这个领域却拥有巨大的优势。根据所使用的合金和加工设备，通过对硬质合金基材、刀具几何形状、涂层和数控工艺设计进行调整，能够确保实现经济性加工。”Jan Dege说。

在这里，作为切削刀具“保护层”的涂层特别关键。在加工钛时，含硅涂层的表现尤其亮眼，特别是基于HiPIMS工艺的SteelCon®涂层。Manfred Weigand解释说：“SteelCon®具有出色的隔热性能，几乎不会让任何热量进入刀具。这对于钛等本身导热性很差的材料尤其有利。如果没有SteelCon®，加工硬质材料时会不可避免地出现高温，从而导致硬质合金脆化，损坏刀具。”



未来：优化生产

为了减少钛部件生产中的二氧化碳排放，节约资源，实现更经济地生产。近年来，航空航天工业越来越多地使用准净形半成品产品--既是精密锻造零件，也是半成品。

汉堡理工大学生产管理与技术研究所

汉堡理工大学生产管理与技术研究所 (IPMT) 致力于解决基础的生产挑战，并为工业应用开发模型、寻找方法和优化流程。该研究所的两个部门密切合作，以大型工件的加工能力闻名于世：生产管理部门特别关注生产过程的组织，生产技术部门则致力于研究CFRP和钛等现代工业材料的加工创新工艺。

Jan Dege教授自2022年以来一直担任生产工程系主任职务。此前，他曾在Premium AEROTEC 公司担任多个管理职位，主要负责开发和设计用于航空结构部件加工的高性能刀具、工艺和设备，并负责大学研究和工业应用之间的接口工作。他目前的研究领域为机械加工生产工艺，特别是在航空航天工业。致力于复合材料（如：CFRP、铝、钛）的手动和半自动钻孔、纤维增强塑料部件的修整和研磨、以及铝和钛合金的高性能铣削研发。他同时也是制造业创新网络（MIN）董事会成员、德国研究基金会（DFG）和工业集体研究（IGF）专家。

<https://www.tuhh.de/ipmt/das-ipmt>

SteelCon®

钛

HiPIMS

SteelCon®

Premium tools

difficult-to-machine materials

医疗技术

飞机制造业

轻型制造

航空

Smartphone and laptop case

IPMT of TUHH

Dr Jan Dege

Watchmaking Industry