

钛合金的切削加工经验

■ 中车北京南口机械有限公司 (102202) 郑文虎 张明杰

摘要: 钛和钛合金是近几十年才发展起来的一种新材料, 属于有色金属。由于他的性能和切削特点, 其切削加工性比较差。但只要充分认识他的性能, 合理选择切削条件, 就能顺利完成对他的切削加工。

1. 概述

钛合金具有密度小 (约 4.5 g/cm^3)、强度高以及耐腐蚀 (酸、碱、海水和大气等介质) 等一系列优良的力学和物理性能。因此在航空、航天、核能、化工、石油、冶金和医疗器械等工业中得到越来越广泛地应用。

(1) 钛合金的分类。钛是同素异构体, 熔点为 1720°C , 同素异构转变温度为 882°C 。

在低于 882°C 时, 钛呈密排六方晶格结构, 称为 α 钛。在 882°C 以上时, 呈体心立方晶格结构, 称为 β 钛。利用上述两种结构的不同特点, 添加不同的合金元素, 使其相变温度及相分含量逐渐改变, 从而得到不同组织的钛合金。

在室温下, 钛合金有三种基本组织, 可分为以下三类。

① α 钛合金。由 α 固溶体组成的单相合金。耐热性高于纯钛, 组织稳定, 抗氧化能力强, 在 $500 \sim 600^\circ\text{C}$ 下仍保持其强度, 抗蠕变能力强, 但不能进行热处理强化, 牌号有 TA4 ~ TA8。硬度

为 $240 \sim 300\text{HB}$, 抗拉强度 σ_b 为 $340 \sim 981\text{MPa}$, 伸长率 δ 为 $10\% \sim 25\%$, 冲击值 a_k 为 $(29.43 \sim 58.86) \times 104\text{J/m}^2$, 热导率 κ 为 $7.54 \sim 10.47\text{W/m}\cdot\text{K}$ 。② β 钛合金。由 β 相固溶体组成的单相合金。不经热处理就有较高的强度, 淬火时效后, 合金得到进一步强化, 但热稳定性差, 不宜在高温下使用, 牌号有 TB1、TB2。硬度为 $240 \sim 300\text{HB}$, 抗拉强度 σ_b 为 $1\,079 \sim 1\,373\text{MPa}$, 伸长率 δ 为 18% , 冲击值 a_k 为 $29.43 \times 104\text{J/m}^2$, 热导率 κ 为 $6.28\text{W/m}\cdot\text{K}$ 。③ $\alpha + \beta$ 钛合金。由 α 和 β 双向组成, 既有 α 稳定元素, 又有 β 稳定元素, 如 Cr、Co、Fe、Ni 和 Mn 等 β 共析型元素, 稳定了 β 相。Sn、Zr 两种元素在 α 和 β 相中都具有相当大的固溶性, 是有效的强化剂。这类合金组织稳定, 有良好的高温变形性、韧性和塑性, 能进行淬火和时效, 使合金强化。热处理后的强度比退火状态提高 $50\% \sim 100\%$ 。高温强度高, 可在 $400 \sim 500^\circ\text{C}$ 下长期工作, 热稳定性

仅次于 α 钛合金。牌号有 TC1 ~ TC10。硬度为 $210 \sim 365\text{HB}$, 抗拉强 σ_b 为 $589 \sim 1\,059\text{MPa}$, 伸长率 δ 为 $10\% \sim 15\%$, 冲击值 a_k 为 $(29.43 \sim 44.15) \times 104\text{J/m}^2$, 热导率 κ 为 $5.44 \sim 9.63\text{W/m}\cdot\text{K}$ 。

三种钛合金中, α 钛合金的切削加工性相对较好, $\alpha + \beta$ 钛合金次之, β 钛合金最差。其中, 最常用的是 α 钛合金和 $\alpha + \beta$ 钛合金。

(2) 钛合金的性能特点。① 比强度高。钛合金的密度小, 强度高, 所以他的比强度 (σ_b/ρ) 大于超高强度钢。② 热强性高。钛合金的热稳定性好, 高温强度高, 能在 500°C 下长期工作, 而铝合金只能在 200°C 以下工作。钛合金在 $300 \sim 500^\circ\text{C}$ 温度下的强度比铝合金约高 10 倍。③ 抗蚀性好。钛合金在潮湿大气和海水介质中能长期工作, 其抗蚀能力远优于不锈钢。对点蚀、酸蚀和应力腐蚀的抵抗能力很强。对碱、氯化物、氯的有机化合物、硝酸以及硫酸等有优越的抗蚀能力。但钛对具有还原性氧及铬盐介质的抗

蚀性差。④化学活性大。钛与大气中的O、N、H、CO、CO₂、水蒸气和氮气等产生强烈的化学反应。当含碳量大于0.2%时，会在钛合金中形成硬质TiC。温度较高时，与N作用，也会形成TiN硬质表层。在600℃以上时，钛能吸收氧形成硬度较高的硬化层。氢含量上升，也会形成硬化层。钛吸收气体而产生硬脆表层的深度可达0.1~0.15mm，硬化程度比基体硬度高20%~30%。钛的化学亲和性也大，易与摩擦表面产生粘结现象。⑤热导率低，弹性模量小。钛的热导率很低，为15.24W/m·K，是镍的1/4，铁的1/5，铝的1/4。而各种钛合金的热导率更低，一般为钛的50%。如TC4的 κ 为7.95W/m·K，TC9的 κ 为7.12W/m·K。钛和钛合金的弹性模量E为110 000MPa，约为一般钢材的1/2，故刚度差，易变形。⑥低温性能好。钛合金在低温和超低温（-100~-253℃）条件下，仍保持其力学性能，是一种重要的低温结构材料。

2. 钛合金的切削特点

钛的熔点高（1 720℃），激活能大，晶格原子不易脱离其平衡位置，故在切削加工时，切离成切屑所消耗的能量大。加入的合金元素愈多，则合金的强度、硬度愈高，愈难于切削加工。试验证明，钛合金的硬度大于350HBW时，切削加工越困难。而硬度小于300HBW时，易出现粘刀，也难于切削。钛合金最好的切削加工硬度是300~350HBW。

钛合金难于切削的原因不只是硬度这一项，还因他本身的其他力学性能、物理性能和化学性能等因素的影响。其切削特点如下。

（1）变形系数小。切削钛合金的切屑变形系数略小于1或接近于1，这是切削钛合金时一大显著特点。其塑性变形小和切屑收缩率小，是因为在切削高温时，钛由 α 向 β 转变，而 β 钛的体积增大，引起切屑增长，在高温的作用下，钛屑吸收空气中的O、H和N，使钛屑丧失了塑性，切屑不再收缩。

（2）切削温度高。由于钛合金的热导率低，切削热传出困难，致使切削区温度增高。所以在相同的切削条件下，他的切削温度比切削45钢高将近1倍。还因其塑性变形小，切屑与前刀面接触短，切削热集中于切削刃狭小区域内，不易传出而造成。

（3）单位面积上的切削力大。切削钛合金的主切削力比切削一般钢材小20%左右。但由于刀具与切屑的接触的长度短，使单位面积上的切削大大增加，容易造成刀具崩刃。

（4）刀具易磨损。钛合金毛坯经过锻造、热轧等方法加工后，形成硬而脆的不均匀外皮，极易造成刀具磨损。再由于他的切削温度高，切屑与刀具前刀面接触短，散热条件差，加之其弹性模量小，弹性恢复大（约为切削不锈钢的2~3倍），与刀具后刀面的摩擦面积大，亲和性大，易造成刀具磨料、粘结、扩散和

氧化磨损。

（5）易产生表面变质污染层。由于钛合金的化学活性大，易与各种气体杂质产生强烈的化学反应。如O、N、H、C等侵入钛合金表层，易形成TiC、TiN硬质表层，致使表层的硬度和脆性上升。

3. 切削钛合金加工条件的选择

（1）切削钛合金的刀具材料。切削加工钛合金时，应选用硬度高、耐磨性好、抗弯强度高、热导率高和与钛合金亲和作用小的刀具材料。①高速钢。应首选含铝、含钴超硬高速钢和高钒高速钢，因其常温和高温硬度比普通高速钢高6~8HRC，刀具耐用度可提高4倍以上。牌号有W6Mo5Cr4N2Al、W2Mo9Cr4NCo8以及W12Mo3Cr4N3Co5Si等。②硬质合金。应选用添加TaC或NbC的YG类细晶粒或超细晶粒硬质合金。这类合金不仅硬度高、耐磨性好，而且刀具耐用度也高几倍。牌号有YS2、YG813、YD15和YG6x等。涂层硬质合金不宜选TiN和TiC涂层，应选TiAlN和TiAlSi涂层及金刚石涂层。③超硬刀具材料。如人造聚晶金刚石（PCD）、人造厚膜钎焊金刚石（CND）和立方氮化硼（PCBN）。他们均可高速（ $N_c \geq 200\text{m/min}$ ）切削钛合金，其刀具耐用度是硬质合金的几十倍至几百倍，且加工质量好。

（2）切削钛合金的刀具几

何参数。①前角。钛合金在切削时，切屑与刀具前刀面接触很短，前角小时，可增大切屑与前刀面的接触面积，使切削力和切削热不致过分集中在刀具刃口上，改善散热条件的同时保护刀刃，减少了崩刃的可能性。一般 $\gamma_0=5^\circ \sim 15^\circ$ 。高速钢刀具， $\gamma_0=10^\circ \sim 15^\circ$ 。超硬刀具材料的刀具， $\gamma_0=0^\circ \sim 5^\circ$ 。②后角。由于钛合金的弹性模量小，为一般钢材的1/2，所以在切削时，切削表面和已加工表面的弹性恢复大，为了减小刀具后刀面和工件的摩擦和磨损，一般 $\alpha_0 \geq 15^\circ$ 。③主、副偏角。钛合金在切削时，切削温度高，刀屑接触短，为增大刀尖强度、改善散热条件并减小刀刃单位长度负荷，在粗加工时， $\kappa_r \leq 45^\circ$ ， $\kappa_r'=10^\circ \sim 15^\circ$ ；精加工时， $\kappa_r > 75^\circ$ 。④刃倾角。由于毛坯表皮组织不均匀和硬皮，为了增大刀尖强度，粗加工时， $\lambda_s=-5^\circ \sim -3^\circ$ ；精加工时， $\lambda_s=0^\circ \sim 3^\circ$ 。⑤刀尖圆弧半径。一般取 $r_\epsilon=0.8 \sim 1.2\text{mm}$ 。

(3) 切削钛合金的切削用量。由于钛合金的性能和切削特点，影响刀具耐用度的主要因素为切削温度。因此，力求选用最佳切削温度下相对应的切削速度。高速钢刀具的最佳切削温度为 $480 \sim 540^\circ\text{C}$ ，相对应的切削速度为 $v_c=8 \sim 12\text{m/min}$ ；硬质合金刀具的最佳切削温度为 $650 \sim 750^\circ\text{C}$ ，相对应的切削速度为 $N_c=25 \sim 54\text{m/min}$ 。但进给量对钛合金的切削温度也影响比较大， f 大切削温度高，所以一般 f 不宜大

于 0.3mm/r 。PCD、CND刀具的 $N_c=100 \sim 200\text{m/min}$ ，但一般干切取小值，湿切取中偏大值。切削钛合金时，应避免高速微量干切削，以免微小的钛屑在空气中发生自燃。

(4) 切削钛合金的切削液。为了降低切削温度，应在切削区浇注大量以冷却为主的切削液。对切削液的热导率、比热、热容量、汽化热、汽化速度、流量和流速要求较高。一般是水比油的热导率高3~5倍，比热大1倍，汽化热大约10倍，故水溶性冷却性能最好。在车削、铣削和钻削时，常采用乳化液或采用添加极压添加剂（含S、P和Cl）的水溶液。

极压水溶液的配方是：氯化脂肪酸、聚氯乙烯0.5%~0.8%，磷酸三钠0.5%，三乙醇胺1%~2%，亚硝酸钠1.2%，其余为水。

在扩孔、铰孔、拉削和攻丝时，应采用润滑性能好的极压切削油、蓖麻油、油酸、硫化油和氯化油等。

(5) 切削钛合金应注意的问题。①切削钛合金时应避免微量切削，以避免自燃现象发生。一旦着火，应采用滑石粉、石灰粉和干砂灭火。严禁使用四氯化碳、二氧化碳灭火器，不能浇水，以免加速燃烧，导致氢爆炸。②在铣削时，应尽量采用顺铣和不对称铣，这样在切离时切屑很薄，不易粘在刀刃上，避免在切入时损坏刀刃。不对称铣的偏心距 $e=(0.04 \sim 0.1)d_0$ ， d_0 为铣刀直径。③由于钛合金的弹性模量为钢材的1/2，在夹紧时易产

生变形，直接影响加工精度。所以在安装工件时，夹紧力要适当而不宜过大，必要时增加辅助支撑。④采用高速钢钻头钻孔时，钻型尽可能采用三尖七刃的群钻，锋角 $2\phi=135^\circ \sim 140^\circ$ ，横刃宽度 $b=(0.05 \sim 0.1)d_0$ ，有利于排屑和减小轴向力及改善散热条件。 $N_c \leq 12\text{m/min}$ ， N_c 偏高会加快钻头磨损。⑤攻丝是切削钛合金最困难的工序，特别是小直径螺纹。因其弹性模量小，回弹大，丝锥与工件接触面积大，造成摩擦扭矩增大，一般约为攻45钢的1倍，造成丝锥磨损过快，甚至被咬死折断在螺孔中。为了改变这种不良现象，应在攻丝前把丝锥的后角用金刚石什锦锉加大到约 15° ，且适当加大螺纹底孔直，使牙高率为70%左右。

4. 结语

虽然钛合金属于难切削材料，但只要熟知他的性能和切削特点，合理选择刀具材料、刀具几何参数、切削用量、切削液和注意在切削中的问题，就一定能顺利完成对他的各种切削加工。

参考文献：

- [1] 韩荣第，于启勋.难加工材料切削加工[M].北京：机械工业出版社，1996.
- [2] 郑文虎.难切削材料加工技术[M].北京：国防工业出版社，2008.
- [3] 张春江.钛合金切削加工技术[M].西安：西北工业大学出版社，1986.

MW (收稿日期：20170412)