

高温合金的切削加工

■ 中车北京南口机械有限公司 (102202) 郑文虎 张明杰

摘要：要顺利、高效和优质地切削高温合金，就必须知道各种高温合金的性能（物理、力学及化学性能）和切削特点，合理选择刀具材料、刀具几何参数、切削用量和切削液，并注意操作技术。

1. 问题来源

高温合金又称耐热合金或热强合金，他是在一定温度下具有耐热性的合金。耐热性包括热稳定性和热强性两种性能。热稳定性是指在高温下抗氧化、抗燃气腐蚀的能力；热强性则是指合金在高温下抵抗塑性变形和断裂的能力。高温合金除含有大量的铁、铬、镍和钴等基本元素外，还含有铝、钛、铌、钽、钒、钨、钼及锰等强化元素。其抗氧化温度可达900℃~1 100℃，能够在高温氧化气氛或燃气条件下工作，目前已广泛应用于各个领域，特别是航空、航天和造船等工业部门。

2. 高温合金的分类与性能

(1) 按生产工艺分类。变形高温合金。其特点是高温塑性好，能进行锻造、热轧以及冷拔等压力加工，常见的牌号有GH2036、GH2132、GH4033、GH4037、GH4049和GH4169等。

铸造高温合金。其特点是除含有较多的Fe、Ni等元素外，还含有较多的W、Mo、Ti以及Al等强化元素及较高的含碳量。他的

热强性高，塑性差，常在铸态下使用。常见的牌号有K214、K401和K417等。

(2) 按基体合金元素分类。铁基高温合金又称耐热钢，此类合金价格低、抗高温氧化性差，硬度为255~321HBW，抗拉强度 σ_b 为883~971MPa，伸长率 δ 为15%~22.1%，热导率 κ 为13.39~17.17W/m·K。常见的牌号有GH2036、GH136、GH2132和K136等。

铁-镍基高温合金。此类合金含镍量为30%~45%，他抗高温氧化性能高于铁基高温合金，应用广泛。其硬度为302~388HBW，抗拉强度 σ_b 为922~1 275MPa，伸长率 δ 为10%~25%，热导率 κ 为10.88~15.49W/m·K。常见的牌号有GH2135、GH1140、K4和K214等。

镍基高温合金。他是以镍为基体，含镍量达45%以上，是目前抗高温氧化性能最好的高温合金。其硬度为255~361HBW，抗拉强度 σ_b 为893~1 236MPa，伸长率 δ 为10%~25%，热导率 κ 为7.95~11.72W/m·K。常见的牌号

有GH4037、GH4049、GH4169、GH4698、K401和K417等。

钴基高温合金。以钴为基体，含钴量达58%，典型代表牌号是K10。他的高温强度高，能耐1 000℃高温，其硬度小于34HRC，抗拉强度 σ_b 为736~1 069MPa，伸长率 δ 为9%~60%，热导率 κ 为13.4~15.07W/m·K。由于钴的价格昂贵，已逐渐采用K211、K214代替，这两个牌号都属于铁-镍高温合金。

此外，还有Mo、Ti及Nb为基体的高温合金。

3. 高温合金的切削特点

由于高温合金的性能，他的切削加工性很差。以45钢的相对切削加工性为1，则高温合金的相对切削加工性只有0.08~0.3。这其中以镍基高温合金和铸造高温合金为最差。所以说，高温合金是各种难切削材料中最难切削的材料。高温合金中的强化相愈多，分散程度愈高，其热强性愈好，热强性越好，则切削加工性越差。其切削特点如下。

(1) 切削力大。由于高温合金大多数具有很高的塑性，

如GH1140在室温下的伸长率达40%。同时合金中许多高熔点的合金元素与其他合金元素构成了纯度高、组织致密的奥氏体固溶体合金，具有晶格滑移系数大，塑性变形大的特点。并且由于高温合金中有众多的高熔点、激活能大的组元，原子组合稳定，切削时欲使其原子脱离平衡位置所需要的能量很大，使变形抗力大大上升。又由于合金中的沉淀硬化相呈弥散分布，不仅增大了塑性变形抗力，而且塑性变形的晶格严重扭曲，使硬度大大提高，又使变形抗力增大。所以，在切削高温合金时，其单位切削力比切削一般钢材大2~3倍。

(2) 切削温度高。由于切削高温合金时，产生巨大的塑性变形，刀具与工件、切屑之间产生强烈的摩擦，而产生大量的切削热。加之高温合金的热导率很低（平均约为12.6W/m·K），传热困难，切削热集中在狭小的切削区内，致使切削温度高达1 000℃左右。一般在相同的条件下，切削高温合金比切削45钢的切削温度高300℃左右，加剧刀具的扩散和氧化磨损。

(3) 加工硬化现象严重。在金属产生塑性变形的同时，存在着强化和软化（又称恢复）的过程。由于高温合金的软化温度高，软化速度低，故而强化系数大。同时，在切削过程的高温作用下，合金中的强化相从固溶体中分解出来，并呈极细的弥散相分布，使强化能力增加，加大了冷硬程度。所以在切削高温合金时，已加工表面和切削表面的硬度要比基体硬度高1倍以上。

(4) 刀具易磨损。由于高温合金中的各种强化相，特别是含有许多碳化物、氮化物、硼化物及金属间化合物，构成细微的硬质点。加之硬化现象严重，切削温度高，刀具材料与工件材料的粘结和亲和作用，刀具材料某些合金元素（W、Co、Ti或Nb）向工件材料和切屑中扩散，致使刀具产生严重的磨料、粘结、扩散、氧化、沟纹和边界磨损，甚至使切削刃崩落。

4. 切削高温合金的切削条件合理选择

(1) 刀具材料。切削高温合金时，要求刀具材料具有高的硬度和耐磨性、高的抗弯强度、良好的导热性以及良好的抗粘结、抗扩散和抗氧化等性能。

高速钢：主要用于制造铣刀、钻头、铰刀、丝锥、拉刀和齿轮等低速复杂刀具。为了提高刀具寿命，应首选含铝和钴超硬高速钢，他不仅耐热性高，其常温和高温硬度比W18Cr4V高4~6HRC。牌号有W6Mo5Cr4V2Al、W2Mo9Cr4VCo8、W10Mo4Cr4V3Co10、W12Mo3Cr4V3Co5Si、W10Mo4Cr4V3Al和W6Mo5Cr4V5SiNbAl等。

硬质合金：应选用抗粘结、抗扩散、与高温合金亲和性差的，并含TaC或NbC的超细晶粒YG或YW类硬质合金。牌号有YS2、YS8、YD15、YG813、YG643及YW4等。涂层硬质合金，应选Al₂O₃、TiAlSi及TiAlN涂层。

陶瓷：陶瓷有Al₂O₃基和Si₃N₄

基两大类。由于陶瓷的抗粘结性能和耐热性及硬度高于硬质合金，非常有利于高温合金的切削。牌号有SM、HS73、HS80、F85、TP4、ST4和SC3等。特别是用于铸造高温合金的铣削，效果很好。

立方氮化硼（CBN）：由于CBN的硬度很高（8 000~9 000HV），耐热性为1 400~1 500℃，具有很好的化学稳定性。除用他高速地对高温合金进行精加工外，特别适合镍基高温合金的切削加工。

(2) 切削高温合金刀具几何参数。由于高温合金的热强性、塑性和韧性都比较高，而且切屑不易卷曲和折断。所以在选择刀具几何参数时，要根据工件和刀具材料的性能、切削特点和他的种类综合考虑。

前角和前刀面形式。刀具前角的大小，取决于高温合金的种类和工件毛坯的状态。切削变形高温合金时，高速钢刀具， $\gamma_0=12^\circ \sim 15^\circ$ ；硬质合金刀具， $\gamma_0=10^\circ$ 。这两种材料的刀具，切削铸造高温合金时， $\gamma_0=0^\circ \sim 5^\circ$ 。陶瓷和立方氮化硼复合片（PCBN）刀具， $\gamma_0=0^\circ \sim -5^\circ$ 。

刀具前刀面形式，高速钢和硬质合金刀具为直线圆弧形或全圆弧形的断（卷）屑槽，有利于排屑和断屑。由于加工硬化现象严重，刀具要尽量锋利，一般不磨出负倒棱（陶瓷和PCBN刀具除外），若要磨出，其宽度 b_r 一定要小一些。陶瓷和PCBN刀具为平前刀面。

后角：为了减小刀具后刀面与工件的摩擦，应取较大一些

的刀具后角。一般为 $\alpha_0=10^\circ \sim 15^\circ$ ，精加工时取最大值。

主、副偏角：在工艺系统刚度允许的情况下，应选取较小的主、副偏角，有利于增大刀尖强度和改善散热条件，提高刀具寿命。一般 $\kappa_r=45^\circ \sim 75^\circ$ ， $\kappa_r'=8^\circ \sim 15^\circ$ 。

刀倾角：粗加工和断续切削时， $\lambda_s=-3^\circ \sim -10^\circ$ ；精加工时， $\lambda_s=0^\circ \sim 3^\circ$ 。

(3) 切削高温合金的切削用量。切削速度：切削高温合金时，切削速度主要受刀具寿命和高温合金种类的影响与限制。在不同的切削温度下，刀具的磨损情况也不同。在最佳切削温度下，刀具相对磨损最小，刀具寿命就高。用高速钢刀具切削高温合金时，最佳切削温度为 $450 \sim 540^\circ\text{C}$ 。用硬质合金刀具切削时，最佳切削温度为 $750 \sim 900^\circ\text{C}$ 。低于或高于这一温度区域，刀具磨损都会加剧。所以，应尽量使刀具在最佳切削温度相对应的切削速度下工作。高速钢刀具， $v_c=3 \sim 6\text{m/min}$ ；硬质合金刀具， $v_c=10 \sim 40\text{m/min}$ 。铸造和镍基高温合金取小值，变形高温合金取中到大值。陶瓷刀具， $v_c=20 \sim 80\text{m/min}$ 。PCBN刀具， $v_c=80 \sim 120\text{m/min}$ 。

切削深度：由于高温合金加工硬化现象严重，因而切削深度不宜太小。粗加工时， $a_p=3 \sim 5\text{mm}$ ；精加工时， $a_p=0.2 \sim 0.5\text{mm}$ 。

进给量：为了防止刀具在硬化层上切削， $f/(f_z)=0.15 \sim 0.3\text{mm/r (mm/z)}$ 。

(4) 切削高温合金的切削

液。切削高温合金时，为了降低切削温度和减小粘结，一定要使用切削液。使用切削液比干切可提高切削速度25%，这样既提高了生产效率，又提高工件加工表面质量。用高速钢刀具切削时，使用以冷却为主的水溶液，以降低切削温度。用硬质合金刀具切削时，应使用含S、P以及Cl为添加剂的极压切削油或极压乳化液，不仅可降低切削温度、减小摩擦和防止粘结，还可使刀具寿命提高4倍左右。对PCBN刀具只能用切削油，千万不可用水基切削液，否则会加剧PCBN刀具磨损。对镍基高温合金，应避免使用含硫的切削液，以免对工件造成应力腐蚀，降低零件的疲劳强度。

(5) 切削高温合金应注意的问题。为了使刀具锋利和减轻加工硬化现象，刀具的磨损限度应为切削一般钢材的1/2。

钻削时，一般采用低速大进给。停止进给时，要使钻头迅速脱离切削表面，以免加剧硬化，给下一次进刀钻削带来困难。如发生此情况，就应适当降低切削速度，用力进刀钻削，就可消除钻不动的现象。钻孔时，应尽量采用硬质合金钻头（镶片、焊头和整体），对于大孔（ $\phi 28\text{mm} \sim \phi 76\text{mm}$ ）应采用可转刀片的浅孔钻头。钻铸造高温合金孔时，一定要把钻头的刃带（ $\alpha_0'=0^\circ$ ）改磨成 $\alpha_0'=4^\circ \sim 6^\circ$ ，以减小与孔壁的摩擦、粘结和防钻头的折断。

铰孔时，对铸造高温合金，应采用YG类硬质合金铰刀。对各类高温合金的铰孔，除采用低速外，应采用润滑性能好的切削液，如极压切削油、硫化油以及

二硫化钼油膏等。

在高温合金上攻螺纹，特别是在铸造高温合金上攻螺纹特别困难，往往因转矩大，丝锥咬死和折断在孔中。这时应适当加大底孔直径，一般为标准牙高的80%~90%，采用煤油稀释氯化石蜡、硫化油加15%~20%的CCl₄、石墨粉用植物油调成糊状和用MoS₂油膏等作润滑剂。

在铣削时，应尽可能采用顺铣，不仅可以提高刀具寿命，而且可防止切屑粘刀。

5. 结语

虽然高温合金的切削加工性极差，是塑性难切削材料中最难切削的。但只要充分认识他们各自的性能和切削特点，合理选择切削条件和掌握应注意的问题，是可以顺利完成切削加工的。

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] 陈云，杜齐明，董万福. 现代金属切削刀具实用技术[M]. 北京：化学工业出版社，2008.

MW (收稿日期：20170410)

更正

本刊2017年第10期《柴油机曲轴曲柄销过渡圆角铣削加工技术》一文，第一作者田永维单位应为：海军驻兴平地区军事代表室，特此更正。

本刊编辑部