

不锈钢的切削加工

■ 中车北京南口机械有限公司 (102202) 郑文虎 张明杰

摘要: 本文阐述了不锈钢的分类及性能, 分析了不锈钢的切削特点, 并从不同角度说明了不锈钢切削条件的选择依据。

1. 概述

通常, 人们把含铬量 $>12\%$ 或含镍量 $>8\%$ 的合金钢称为不锈钢。这种钢在大气中或在腐蚀性介质中具有一定的耐腐蚀能力, 并在较高温度($>450^{\circ}\text{C}$)下具有较高的强度。含铬量达 $16\%\sim 18\%$ 的钢, 称为耐酸钢或耐酸不锈钢, 通称为不锈钢。

含铬量达 12% 以上的钢在与氧化性介质接触时, 由于电化学作用, 表面形成一层富铬氧化膜, 可保护金属内部不受腐蚀。但在非氧化性腐蚀介质中, 不能形成坚固的钝化膜。为提高钢的耐腐蚀能力, 通常选择增大铬的比例或添加可促进钝化的合金元素, 如添加Ni、Mo、Mn、Cu、Nb、Ti、W和Co等。这些合金元素不仅提高了钢的抗腐蚀能力, 同时改变了钢的内部组织和物理力学性能。其在钢中的含量不同, 对不锈钢性能产生的影响不同, 有的有磁性, 有的则无磁性, 有的能够进行热处理, 有的则不能进行热处理。

不锈钢被越来越广泛地应用于航空、航天、化工、石油、建筑以及食品机械行业中。其所含

的合金元素对切削加工性能影响较大, 文中主要对不锈钢的切削加工进行了分析。

2. 不锈钢的分类及性能

(1) 按不锈钢主要成分, 分为以铬为主的铬不锈钢和以铬、镍为主的铬镍不锈钢两大类。

(2) 按不锈钢金相组织分类: ①马氏体不锈钢。其含铬量为 $12\%\sim 18\%$, 含碳量为 $0.1\%\sim 0.5\%$ (有时达 1%)。其硬度为 $170\sim 217\text{HBW}$, 抗拉强度 σ_b 为 $540\sim 1\,079\text{MPa}$, 伸长率 δ 为 $10\%\sim 25\%$, 热导率 κ 为 $25.12\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。常见的牌号有1Cr13、2Cr13、3Cr13、4Cr13、1Cr17Ni2、9Cr18、9Cr18MoV和30Cr13Mo等。马氏体不锈钢通过淬火, 可获得较高的硬度、强度和耐磨性。然而, 当钢中含碳量低于 0.3% 时, 组织不均匀, 粘附性强, 切削时易产生积屑瘤, 且断屑困难, 切削加工性较差。当含碳量达 $0.4\%\sim 0.5\%$ 时, 切削加工性较好。②铁素体不锈钢。其含铬量为 $12\%\sim 13\%$ 。硬度为 $177\sim 228\text{HBW}$, 抗拉强度 σ_b 为 $363\sim 451\text{MPa}$, 伸长率 δ 为 $20\%\sim 22\%$, 热导率

κ 为 $16.7\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。加热冷却时组织稳定, 不发生相变, 所以不能进行热处理强化, 只能靠变形强化, 切削加工性相对较好。常见的牌号有0Cr13、0Cr17Ti、0Cr13Si4NbRe、1Cr17、1Cr17Ti、1Cr17Mo2Ti、1Cr28以及1Cr25Ti等。③奥氏体不锈钢。其含铬量为 $12\%\sim 25\%$, 含镍量为 $7\%\sim 20\%$ (或 20% 以上)。硬度为 $187\sim 207\text{HBW}$, 抗拉强度 σ_b 为 $481\sim 520\text{MPa}$, 伸长率 δ 为 40% , 热导率 κ 为 $16.33\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。典型牌号有1Cr18Ni9Ti, 其他还有00Cr18Ni10、0Cr18Ni12Mo2Ti、0Cr18Ni18Mo2Cu2Ti、1Cr14Mn14Ni、2Cr13Mn9Ni4以及1Cr18Mn8Ni5N等。由于奥氏体不锈钢含有较多的镍或锰, 加热时组织不变, 故淬火不能使其强化, 可通过冷加工硬化来大幅度提高强度和硬度, 其硬化程度为基体硬度的 $1.4\sim 2.2$ 倍, 给下一次切削带来很大困难。其具有优良的力学性能和良好的耐腐蚀能力, 无磁性。④奥氏体-铁素体双相不锈钢。与奥氏体不锈钢相似, 仅在组织

中含有一定量铁素体，常见牌号有0Cr21Ni5Ti、1Cr21Ni5Ti、1Cr18Mn10Ni5Mo3N、0Cr17Mn13Mo2N、1Cr17Mn9Ni3Mo3Cu2N、Cr26Ni17Mo3CuSiN以及1Cr18Ni11Si4AlTi等。这类不锈钢有硬度极高的金属间化合物析出，强度比奥氏体不锈钢高，切削加工性能比奥氏体不锈钢更差。其硬度 $<277\text{HBW}$ ，抗拉强度 σ_b 为589~736MPa，伸长率 δ 为18%~30%。⑤沉淀硬化不锈钢。这类不锈钢因含有较高的铬、镍和极低的碳，还含有能起沉淀硬化作用的铌、铝、钛和钼等合金元素，其在回火时析出，产生沉淀硬化，具有很高的硬度和强度。其硬度为363~388HBW，抗拉强度 σ_b 为1138~1324MPa，伸长率 δ 为5%~10%，这类钢具有良好的耐腐蚀性能。常见牌号有0Cr17Ni4Cu4Nb、0Cr17Ni7Al和0Cr15Ni7Mo2Al等。

3. 不锈钢的切削特点

不锈钢的切削加工性能比45钢差。若以45钢的相对切削加工性 K_r 为1，则奥氏体不锈钢的相对切削加工性 K_r 为0.4，铁素体不锈钢的 K_r 为0.48，马氏体不锈钢的 K_r 为0.55。其中以奥氏体和奥氏体-铁素体双相不锈钢的切削加工性最差，给切削加工带来很大困难，其特点如下：

(1) 切削加工硬化严重。以奥氏体和奥氏体+铁素体不锈钢的加工硬化现象最为严重，硬化层的硬度比基体硬度高1.4~2.2倍，其抗拉强度 σ_b 为1470~1960MPa。这类不锈钢塑性大

($\delta>35\%$)，塑性变形时晶格扭曲，故强化系数大，且奥氏体不稳定，在切削力作用下，部分奥氏体转变为马氏体。

(2) 切削力大。不锈钢的高温强度和硬度高且韧性大，故在切削时所消耗的能量大，即切削抗力大。以奥氏体不锈钢为例，在切削过程中温度高达700℃时，其综合力学性能高于一般结构钢。加之其在切削过程中的塑性变形大、硬化现象严重，增大了切削力，所以不锈钢的单位切削力为45钢单位切削力的1.25倍。

(3) 切削温度高。由于不锈钢在切削时的塑性变形大，切屑与刀具间的摩擦大，加之其热导率仅为45钢热导率的1/3~1/4，散热条件差，大量切削热集中在切削区，在相同切削条件下，切削温度比切削45钢时高200℃。

(4) 切屑不易折断且易产生积屑瘤。由于不锈钢的韧性和塑性较大，车削加工时，切屑连绵不断，不仅影响切削顺利进行，还会拉伤已加工表面。在高温和高压下，不锈钢与其他金属的亲合性强，易产生粘结现象，并形成积屑瘤。既加剧刀具粘结磨损，又使已加工表面发生恶化。

(5) 刀具易磨损。不锈钢中碳化物(TiC)的硬质点，使刀具产生剧烈的磨料磨损。在切削过程中，受高温、高压作用下的亲和作用，使切屑与刀具间产生粘结、扩散和月牙洼磨损及氧化磨损。由于切削加工硬化现象严重，还会在刀具后刀面上产生沟纹和边界磨损。

(6) 工件易产生热变形。

由于不锈钢的线膨胀系数($15.5\sim16.6\times10^{-6}$)是碳钢线膨胀系数($10.98\sim12.18\times10^{-6}$)的1.5倍，这样在切削温度作用下，工件易产生热变形，尺寸精度难以保证。

4. 不锈钢切削条件的选择

(1) 刀具材料。应选用耐热性高、耐磨性好且与不锈钢亲和作用小的刀具材料，主要有以下两类：①高速钢。普通高速钢的刀具寿命低，应选用高性能高速钢。如高碳、钼系、含铝、含钴和高钒高速钢，这些高速钢的常温 and 高温硬度高于普通高速钢，其刀具寿命是W18Cr4V的4倍以上。如95W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2Al、W2Mo9Cr4VCo8和W12Cr4V4Mo等。②硬质合金。应首先选用添加TaC或NbC的钨钴类超细晶粒硬质合金，如YG813、YS2、YD15、YG640、YG643和YW4等。涂层硬质合金应首选TiAlN和TiAlSi涂层，这两种材料涂层硬度高(3500~4000HV)，可减小切削过程中的粘结，且刀具寿命高。

(2) 切削不锈钢刀具的几何参数。①前角。不锈钢具有硬度、强度较低，但塑性高、韧性好以及热强性高的特点。为减小塑性变形、切削力、切削温度及加工硬化现象，在保证切削刃强度的前提下，应尽量采用较大的刀具前角，以使切削刃锋利。切削各种不锈钢的刀具前角 $\gamma_0=15^\circ\sim30^\circ$ 。对于马氏体不锈钢应取大值。对于奥氏体和奥氏体+铁素体不锈钢前角应取小值。高速

钢铣刀 $\gamma_0=10^\circ \sim 20^\circ$ ；硬质合金铣刀 $\gamma_0=5^\circ \sim 10^\circ$ ；铰刀 $\gamma_0=8^\circ \sim 12^\circ$ ；丝锥 $\gamma_0=10^\circ \sim 15^\circ$ 。②后角。为了减小刀具后刀面与工件的摩擦和加工硬化， $\alpha_0=8^\circ \sim 12^\circ$ 。高速钢端铣刀和立铣刀， $\alpha_0=12^\circ \sim 15^\circ$ ；硬质合金端铣刀 $\alpha_0=8^\circ \sim 10^\circ$ ，立铣刀 $\alpha_0=10^\circ \sim 15^\circ$ 。③主偏角、副偏角和刀尖圆弧半径。减小主、副偏角可以增大刀尖强度，有利于散热，但会使切削过程的径向力增大，容易引起振动。一般 $\kappa_r=45^\circ \sim 75^\circ$ ， $\kappa_r'=8^\circ \sim 15^\circ$ 。刀尖圆弧半径 $r_\epsilon=0.4 \sim 1.2\text{mm}$ 。④刃倾角。在粗加工时，为了增大刀尖强度，刀具刃倾角 $\lambda_s=-3^\circ \sim -8^\circ$ 。精加工时， $\lambda_s=0^\circ \sim 3^\circ$ 。⑤车削不锈钢车刀的断屑槽型。由于不锈钢的可塑性高、韧性大，应合理选择车刀的断屑槽型，以防止切屑连绵不断。通常采用全圆弧形或直线圆弧形的断屑槽。断屑槽的宽度 $B_n=3 \sim 5\text{mm}$ ，断屑槽底的圆弧半径 $R_n=2 \sim 6\text{mm}$ ，槽深 $C_{Bn}=0.5 \sim 1.3\text{mm}$ ，如图1所示。粗车时 a_p 和 f 较大，断屑槽应宽而浅；精车时 a_p 和 f 较小，断屑槽应窄而深。

(3) 切削不锈钢的切削用量。切削用量对加工不锈钢时的加工硬化、切削力、切削热和刀

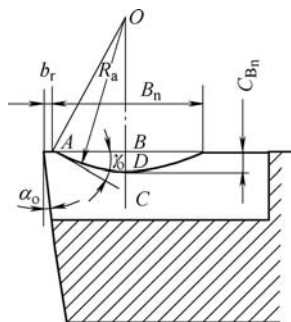


图1 车削不锈钢的断屑槽

具寿命产生直接影响，同时也会影响切削效果。①切削速度。切削加工不锈钢的切削速度为切削一般钢材的切削速度的40%~60%。如高速钢刀具的切削速度 v_c 为12~18m/min；硬质合金刀具的切削速度 v_c 为40~60m/min。不锈钢热导率较低，切削区温度升高会造成刀具瞬间磨损，因此 v_c 选择不可过高。②切削深度。由于不锈钢在切削加工时硬化现象严重，为避免在硬化层上切削和造成刀具快速磨损，切削深度应大于硬化层厚度。粗加工时， $a_p=2 \sim 5\text{mm}$ ；精加工时， $a_p=0.2 \sim 0.5\text{mm}$ 。车螺纹与车削普通钢材不同，不吃刀光一刀的方式不但车不下切屑，反而会造成刀具在硬化表面上产生摩擦，拉毛牙形表面，增大其表面粗糙度值。③进给量。为避免刀刃在切削表面硬化层上切削和加剧刀具磨损，进给量 f 和每齿进给量 f_z 需大于硬化层厚度，不得小于0.1mm/r(z)，一般为 $f/(f_z)=0.15 \sim 0.4\text{mm/r(z)}$ （ f_z 为每齿进给量）。

(4) 切削不锈钢的切削液。由于不锈钢的切削加工性较差，在切削过程中存在切削温度高、刀具粘结、氧化和扩散磨损严重等问题。所以对切削液的冷却、润滑以及渗透等性能有更高的要求。在切削时，应选用含S、P及Cl极压添加剂的极压乳化液或极压切削油。①硫化油。是以硫为极压添加剂的切削油。其在切削过程中能在刀具表面形成一层高熔点的硫化物润滑膜，在高温（600°~1 000°）、高压（1 470~1 960MPa）下不被破

坏，具有良好的润滑作用，并具有一定冷却效果，适用于车削、铣削、钻孔、铰孔和攻螺纹。直接硫化油的配方：矿物油98%以及硫2%；间接硫化油的配方：矿物油70%~80%、植物油或猪油18%~20%以及硫1.7%。②混合油。在硫化油中添加10%~20%的 CCl_4 ，或在猪油中添加20%~30%的 CCl_4 ，对降低不锈钢铰孔后的表面粗糙度值有显著效果。也可用含硫化油85%~90%、煤油10%~15%的混合油进行铰孔。③植物油。如菜籽油、豆油等，其润滑性能好，适用于车螺纹、铰孔和攻螺纹。④乳化液。含S、P及Cl的极压乳化液，具有良好的冷却、润滑和清洗作用，适用于不锈钢的粗加工和钻孔。⑤专用润滑剂。不锈钢上攻丝可采用 MoS_2 油膏，或用石墨粉加植物油调成糊状，或用猪油与植物油混合进行攻螺纹，效果较好。

(5) 切削不锈钢时应注意的问题。①铣削不锈钢时，由于硬化现象严重，应尽量采用顺铣法，以免在切入时在硬化层滑移后再切入，加剧刀具磨损。在端铣时，采用不对称顺铣法，以保证刀具切削刃平稳地从工件中脱离，切屑粘结接触面积较小，并在高速离心力作用下把切屑甩掉，以避免刀齿在重新切入时，冲击工件而损坏刀具。②切削不锈钢时，刀具不要在切削表面停留，入刀退刀要迅速果断，以免加剧切削表面硬化，给下一次入刀切削带来困难。③根据不锈钢的性能和切削特点，在钻孔时，应尽量选用超硬高速钢（M2Al、M42）钻头，采用低速、大进

NPT圆锥内螺纹的数控铣削加工

■ 中车大连机车车辆有限公司 (辽宁 116021) 万传广

摘要: 由于目前数控系统没有单独的圆锥螺纹铣削循环程序, 在加工NPT圆锥内螺纹时, 因材料软、使用成形丝锥作用力大等原因, 使产品质量无法得到保证, 且对机床造成损伤。使用参数化编程编制程序, 解决了油底壳的加工难题。

油底壳是曲轴箱的一部分, 具有储存和汇流机油的作用, 在使用锥铰刀和丝锥加工控制端放油孔时, 由于材料比较软, 容易造成粘屑, 经常会产生丝锥断裂、螺纹烂牙现象, 造成工件返修。为保证质量, 提高效率, 需对该孔的加工方法进行改进。

1. 加工方案分析

油底壳控制端左下部设有放油孔, 规格为美制2 NPT圆锥内螺纹(见图1)。

试制加工时加工工艺为: 先用麻花钻头钻螺纹底孔, 然后

用大直径锥铰刀铰底孔, 最后用成形丝锥攻制而成。该螺纹基面上的外径达60.09mm, 由于此工艺设计了专用丝锥, 因此采用攻螺纹的方法加工。而在现场执行中, 无论是机攻还是用加长了的套管手攻, 均无法加工出符合要求的内圆锥螺纹。

分析其原因: ①现场用锥铰刀加工底孔不能完全保证螺

基面上的外径尺寸, 使攻螺纹总余量不确定。②在加工过程中由于材料较软, 容易造成粘屑, 锥管丝锥是全成形刀具, 切削速度低, 全螺纹与加工表面作用, 切入工件全长均要参加切削, 且螺纹直径及所需切削力矩很大, 所以, 丝锥在切入工件过程中, 抗力增大, 导致伤牙、乱扣以及断丝锥等现象, 严重影响产品质量

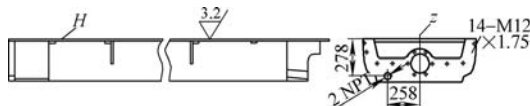


图1 油底壳简图

给。普通钻头需修磨小钻头的横刃 b ($b \approx 0.04d_0$, d_0 为钻头直径), 以减小钻削时的轴向力。大直径($d_0 \geq 13\text{mm}$)的钻头, 应尽量磨成如图2所示的不锈钢群钻。其中, $L \approx 0.32d_0$, $L_1 > L/3$, $R \approx 0.2d_0$, $h \approx 0.04d_0$, $b \approx 0.04d_0$ 。这种钻型排、断屑好, 尽量采用机动进给。④由于不锈钢的可塑性高, 切削加工时硬化现象严重, 为减小切削时的摩擦、挤压和硬化现象, 须使刀具保持锋利。为此, 刀具的磨损限度, 应

是切削一般钢材磨损限度(精加工为 $0.1 \sim 0.3\text{mm}$, 粗加工为 $0.4 \sim 1.5\text{mm}$)的一半。

5. 结语

虽然不锈钢属于难切削材料之一, 但只要充分了解其性能和

切削特点, 合理选择切削条件并注意切削中的问题, 就一定能把这种难切削材料工件的加工顺利完成。

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. 难切削材料加工计算[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

MW (收稿日期: 20170615)

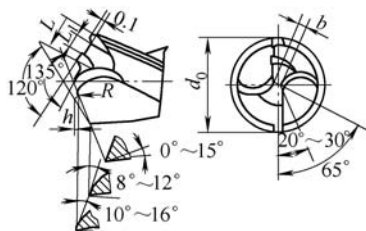


图2 不锈钢群钻