

难磨削材料的磨削加工

■ 中车北京南口机械有限公司 (102202) 郑文虎 张明杰



扫码了解更多

摘要: 根据各种难磨削材料的不同特点找出具体的加工方法, 通过改善砂轮和切削用量等工艺要素, 优化磨削条件, 克服磨削过程中的不良现象, 取得了很好的效果。



机械加工专家、高级技师郑文虎

所谓难磨削材料, 就是在磨削加工时, 磨削加工性差的材料。难磨削材料与难切削材料有许多共同的特点, 也有一些不相同的特点。在难磨削材料中, 有的切削加工性很好, 如有色金属中的铜、铝及其合金。一般淬火钢, 切削很难, 可磨削比较易。

1. 难磨削材料的区分

(1) 按材料含合金元素区分。材料中含有Cr、Ni、W、Mo、Mn、Ti、Al、Co、V等元素, 提高了材料的强度、韧性、塑性和耐热性, 降低了材料的导热性, 磨削就相对困难。

(2) 按磨削比来区分。磨削比 G (磨去材料的体积与砂轮磨耗的体积之比) 大的材料易磨削, 反之难磨削。磨削比 G 小的材料, 在磨削过程中砂轮磨损脱粒快, 磨削力大, 磨削温度高, 易产生振动、烧伤和磨削裂纹, 磨削效率低。

(3) 按材料的物理和力学性能区分。工件材料的塑性和韧性强, 硬度和热导率低, 磨屑容易粘附在砂轮表面上, 堵塞砂轮气孔, 使砂轮失去磨削能力, 造成磨削力大和磨削温度高, 从而产生磨削缺陷。这些不良现象极易在磨削铜、铝、纯铁、高钒高速钢、高温合金、钛合金和不锈钢时发生。

(4) 按磨削后工件表面质量来区分。有的工件材料在磨削时易产生烧伤和裂纹, 工件被脱粒下来的磨粒划伤, 表面粗糙度值大, 难以达到工件质量要求, 这些材料也难于磨削。

2. 难磨削材料的磨削特点

(1) 烧伤。在磨削韧性大、热导率低的材料时, 加之砂轮硬度等特性选择不当、砂轮太

钝和没有及时修整、磨削深度过大和磨削液供给不足或没有浇注在磨削区时, 磨削区的温度高达 $1\ 000^{\circ}\text{C}$ 以上, 不易传出去, 就会产生磨削烧伤。在磨削高温合金和不锈钢时最为突出。

(2) 砂轮堵塞。这种现象在磨削塑性高、硬度低的材料时发生。磨削时, 砂轮气孔和磨粒的切削刃被磨下的磨屑粘糊住, 又不能去除, 砂轮表面上形成一层粘糊状化合物, 使砂轮在很短的时间失去磨削能力, 使磨削条件恶化。在磨削铜、铝、不锈钢、钛合金和高温合金时最为突出。

(3) 砂轮磨损严重。在磨削韧性大、强度高的工件材料时, 切屑不易切离, 磨削力大, 造成砂轮磨损和脱粒严重。如用刚玉类磨料的砂轮磨削高钒高速钢、高温合金、硬质合金和加工硬化严重的材料时, 只见砂轮磨损脱粒, 不见工件材料去除。

3. 解决难磨削材料磨削问题的主要途径

(1) 合理选择砂轮。选择砂轮就是选择砂轮特性, 包括砂轮的磨料、硬度、结合剂、粒度

和组织, 及高硬度磨料(人造金刚砂和立方氮化硼)的浓度, 这是解决难磨削材料磨削问题的主要途径。①选择合适的磨料。磨削难磨削材料的磨料包括白刚玉(WA)、锆刚玉(ZA)、单晶刚玉(SA)、微晶刚玉(MA)、绿碳化硅(GC)、立方氮化硼(CBN)和人造金刚砂(D)。采用锆刚玉磨削奥氏体不锈钢, 不仅效率高, 也不易产生烧伤。采用单晶刚玉磨削普通和高钒高速钢、不锈钢和高温合金, 其效果也较好。采用CBN磨料的砂轮磨高钒高速钢的效果最好。采用绿碳化硅磨钛合金效果也很好。采用几种磨料按不同比例混合制成的砂轮, 比单一磨料的砂轮都好。②合理选择砂轮粒度。砂轮粒度不仅与磨削后工件表面粗糙度值有直接关系, 也和磨削效率、磨削后工件的缺陷可能性有关系。磨削难磨削材料时, 在保证工件质量的前提下, 应尽量选用粗粒度的砂轮。③合理选择砂轮硬度和组织。磨削难磨削材料时, 应选用砂轮硬度偏低和组织疏松一些的砂轮, 有利于磨钝的磨粒脱落, 使锋利的磨粒参加切削, 从而避免烧伤、堵塞和粘附。

(2) 合理选择磨削用量。 $v_c \leq 35\text{m/s}$, $a_p = 0.01 \sim 0.02\text{mm}$, 应采用较高的工件速度, 以避免产生烧伤现象。

(3) 合理选用磨削液。针对不同的难磨削材料, 选用不同的磨削液, 也是改善材料磨削加工性的重要途径之一。如磨削铁、镍、铬基的高温合金和钛合金

时, 不管用什么磨料的砂轮, 磨削比 $G < 2$ 。但用硫化油磨削时, 磨削比 $G > 10$ 。

(4) 合理选择磨削方法。当普通磨料和一般方法难以解决难磨削材料的磨削问题时, 可采用人造金刚石和立方氮化硼砂轮, 进行电解、电火花、电解砂轮和深切缓进给磨削。

4. 铜、铝及其合金的磨削

铜、铝及其合金的硬度低(25~160HB), 纯铜和纯铝的硬度只有25~45HB。纯铜的熔点为1 083℃, 铝合金的熔点为660~780℃, 而磨削区的温度可高达1 000℃以上。磨削时, 在磨削热的作用下, 由于工件表面一层金属熔化并灌入砂轮孔隙或涂抹在砂轮表面上, 而产生热熔粘附, 使砂轮严重堵塞, 很快失去磨削能力, 使磨削特别困难。因此, 长期以来, 对于铜、铝及其合金工件高质量的表面, 都是采用精密机床, 用金刚石刀具进行精密或超精密切削, 使工件表面达到镜面。磨削这类材料时, 还会出现表面划伤, 有一道道约0.5~17 μm的沟状凹痕, 用手摸有粗糙感。这是由于砂轮脱落下来的磨粒落入磨削区划伤工件表面所致。为了克服在磨削铜、铝及其合金时上述现象的发生, 应采取以下措施:

(1) 砂轮。磨料应采用性脆而锋利、有良好导热性和自锐性的黑碳化硅(C)和绿碳化硅(GC), 可以有效地防止砂轮堵塞。选用白刚玉(WA)也可以。粗磨时, 应选用F36和F46的粒度, 因为粒度粗可以容纳

磨屑和减少堵塞。精磨时, 可采用F60粒度; 超精磨削时, 选用更细的W1粒度。对于磨削铜、铝软金属的砂轮硬度, 应选用J和H砂轮硬度, 否则砂轮硬度高了, 会造成砂轮严重堵塞。为了容纳磨屑, 把磨削液和空气带入磨削区, 有利于散热, 应选用11~12号疏松组织的大气孔砂轮。为了防止刻入性划伤, 应选用树脂结合剂或石墨结合剂的砂轮。砂轮修整时, 应采用70°~80°的金刚石笔, 精修时, 在 $f = 0.001\text{mm/r}$ 的进给量下, 工作台往返一次, 再空行程一次, 以达到微刃性和微刃等高性, 这时的工件表面粗糙度值可达 $Ra = 0.025 \sim 0.05 \mu\text{m}$ 。

(2) 磨削用量。磨削时工件速度 $v_w = 20 \sim 30\text{m/min}$, 工作台速度为0.5~3m/min, 磨削深度 $a_p = 0.003 \sim 0.015\text{mm}$, 精磨时取小值。

(3) 磨削液。磨削铜、铝的磨削液, 要求有良好的清洗和冷却作用。如10%~20%的乳化液、煤油和煤油与矿物油的混合油。在这三种中, 煤油的效果最好, 并应特别注意磨削液的过滤。

5. 高钒高速钢的磨削

含钒量3%或以上的高速钢称为高钒高速钢, 牌号为W12Cr4V4Mo、W6Mo5Cr4V3、W9Cr4V5、W12Cr4V5Co5、W9Cr4V5Co5和W12Mo3Cr4V3N等。由于这种钢中难熔的高硬度碳化物占30%~35%, 其中碳化钒占7%~8%, VC的硬度高达2 800HV, 其显微硬度比刚玉磨

料的硬度 (2 000~2 400HV) 还高许多, 磨削温度可达1 400~1 500℃, 比磨削普通高速钢高出近一倍, 所以造成砂轮快速磨损和脱粒及磨削烧伤, 磨削极为困难。

磨削高钒高速钢砂轮的磨料, 可用单晶刚玉 (SA), 其砂轮的寿命为白刚玉 (WA) 的6~7倍, 但磨削比还是很低。最好采用立方氮化硼 (CBN) 为磨料的砂轮, 其砂轮的寿命是SA的几百倍, 磨削单位功率比刚玉类砂轮小2/3~5/6, 而且不会修整, 还不会产生磨削烧伤。CBN砂轮的结合剂为树脂结合剂 (B), 粒度为F150~F240, 砂轮浓度为100%~150%。砂轮速度 $v_c=30\sim50\text{m/s}$, 工件速度 $v_w=8\sim20\text{m/min}$, 磨削深度 $a_p=0.01\sim0.03\text{mm/dst}$, 磨削液必须用矿物油 (煤油), 千万不能用水基磨削液, 否则会加速CBN砂轮磨损。

6. 不锈钢的磨削

通常人们把含铬量>12%或含镍量>8%的合金钢称为不锈钢。这种钢在大气中或腐蚀介质中具有一定的耐蚀能力, 并在>450℃高温下具有较高的强度。含铬量为16%~18%的钢称为耐酸不锈钢。在不锈钢中加入Mo、Mn、Cu、Nb、W、Co等合金元素, 不仅提高了钢的耐蚀能力, 同时也改变了钢的物理、力学性能和内部组织。合金元素在钢中含量不同, 对不锈钢的性能影响很大, 有的有磁性, 有的则无磁性, 有的能热处理强化, 有的则不能热处理强化。

不锈钢按金相组织分, 有马氏体、铁素体、奥氏体、奥氏体-铁素体和沉淀硬化等五类。

(1) 不锈钢的磨削特点。磨屑易粘附在砂轮表面, 填满磨粒间的孔隙, 使砂轮失去磨削能力。这种现象在耐浓酸不锈钢严重, 奥氏体不锈钢次之, 马氏体不锈钢较轻。由于它的韧性强, 磨屑不易被切离, 砂轮磨粒易变钝, 使磨削恶化, 造成必须勤修整砂轮。单位面积磨削力大, 可达68 600MPa, 磨削温度可达1 000~1 500℃, 易出现烧伤; 磨削表面硬化严重, 为基体硬度的1.4~2.2倍, 硬化深度达0.1~0.2mm; 由于不锈钢的线膨胀系数比一般钢材大50%, 造成工件易变形; 奥氏体不锈钢无磁性, 平磨时装夹困难。

(2) 砂轮特性选择。磨料一般采用白刚玉 (WA), 内圆磨削时, 采用微晶刚玉 (MA) 或单晶刚玉 (SA), 也可采用硬度高、耐用度高、磨削力和磨削热小的CBN磨料。粗磨时采用粒度F36和F46, 精磨时采用F60。结合剂一般采用陶瓷结合剂 (V), 磨耐浓酸不锈钢内孔时, 采用树脂结合剂 (B)。砂轮硬度为J~H。砂轮组织为5~8号中等和疏松的组织。

(3) 磨削用量。陶瓷结合剂砂轮速度 $v_c=30\sim35\text{m/s}$, 树脂结合剂砂轮速度 $v_c=30\sim50\text{m/s}$ 。工件速度 $v_w=(1/100\sim1/60)v_c$ (m/min), 平磨工作台速度15~20m/min。磨削深度: 粗磨时 $a_p=0.04\sim0.08\text{mm}$, 精磨时 $a_p=0.01\sim0.03\text{mm}$ 。进给量 (双行程) $f_a=(0.2\sim0.6)B$ (B为砂轮

宽度)。

(4) 磨削余量。由于不锈钢磨削困难, 磨削余量应小一些。一般余量为0.15~0.30mm, 平磨时余量为0.2mm左右。

(5) 磨削液。磨削液为乳化液或极压乳化液, 流量为20~40L/min。

7. 高温合金的磨削

高温合金又称耐热合金或热强合金, 它是多组元的复杂合金, 能在600~1 000℃的高温氧化气氛及燃气腐蚀条件下工作, 具有优良的热强性、热稳定性和热疲劳性能。因而广泛应用于航空、航天和造船等领域。

高温合金按生产工艺分, 有变形高温合金和铸造高温合金两类; 若按高温合金基体合金元素分, 可分为铁基高温合金、铁-镍基高温合金、镍基高温合金和钴基高温合金。

(1) 高温合金的磨削特点。由于钢中强化相很多, 高温强度高, 切屑不易切离, 造成单位磨削力比磨削一般钢材大2倍, 而且切深切削力大于主切削力; 由于砂轮粘附、堵塞和摩擦加剧, 致使磨削区的温度高达1 500℃, 比磨削一般钢材高200℃以上; 由于加工硬化严重, 磨削力大, 磨削温度高, 砂轮粘附和堵塞, 造成砂轮磨损严重; 由于其热导率很低, $\kappa=10\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 左右, 加上磨削温度高, 易产生烧伤。

(2) 砂轮特性的选择。磨料一般采用白刚玉 (WA)、单晶刚玉 (SA) 效果好, 锃钹刚玉 (NA) 的自锐性好, 最好是CBN; 粒度一般为F46, 在磨削

薄片、内孔和端面时应粗一点；硬度常用K和L；结合剂为陶瓷（V）；砂轮组织为5~8号较疏松的组织。

（3）磨削用量。一般砂轮速度 $v_c=20\sim25\text{m/s}$ ，CBN砂轮速度 $v_c=30\sim35\text{m/s}$ 。工件速度：外、内圆磨削 $v_w=30\text{m/min}$ 左右，平磨 $v_w=25\sim28\text{m/min}$ 。磨削深度 $a_p=0.01\sim0.05\text{mm}$ ，精磨取小值。进给量：外圆磨削时， $f=(0.05\sim0.5)B/r$ ，内圆磨削 $f=(0.1\sim0.3)B/r$ ，平磨横向进给量为 $(0.4\sim0.6)B(\text{mm/dst})$ ；磨削余量应小一些。

（4）磨削液。由于磨削高温合金的磨削温度高，一般应选用冷却效果好的水基磨削液。浇注量要大，以便带走大量的热量以及冲洗工件和砂轮表面。

（5）砂轮的修整。磨削高温合金时，砂轮的修整十分重要。如果砂轮修整得好，不仅可以提高砂轮寿命，而且也可提高磨削效果。一般采用 $0.07\sim0.1\text{mm/st}$ 较深的修整量、工作台纵向进给速度为 $1.1\sim1.5\text{m/min}$ 的大深度大走刀的修整法。

8. 钛合金的磨削

钛合金的密度小（ 4.5g/cm^3 ），强度高（ $\sigma_b=422\sim834\text{MPa}$ ），热导率低[$\kappa=5.44\sim15\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]，弹性模量小（ $E=107\sim800\text{GPa}$ ），能耐各种酸、碱、海水和大气等介质的腐蚀，具有优良的力学和物理性能，因而在航空、航天、核能、船舶、化工、石油、冶金和医疗器械等工业领域中得到了广泛的应用。

钛合金可分为 α 钛合金（TA1~TA8）、 β 钛合金

（TB1、TB2）和 $\alpha+\beta$ 钛合金（TC1~TC10）三种。它具有高的比强度（ σ_b/ρ ）、比弹性模量（ E/ρ ），化学活性大（能与O、H、N等产生强烈的化学反应而生成硬脆层）。

（1）钛合金的磨削特点。磨削温度高，是磨削45钢的1.5~2倍；磨削力大，比磨削45钢大30%；磨削比低，在同样的磨削条件下，磨削TC4钛合金的磨削比只有1:1.53，而磨削45钢就高达1:71.5，两者相差47倍，造成砂轮易变钝，磨削效率低；在磨削过程中，砂轮除粘附、扩散磨损外，钛合金与磨粒之间会起化学反应，加速砂轮磨损而失去磨削能力。

（2）砂轮特性的选择。磨削钛合金的砂轮磨料，应采用绿碳化硅（GC）和铈碳化硅（CC），使砂轮粘附减轻、不易堵塞气孔，铈碳化硅尤其好。如采用混合磨料（以GC、CC为主磨料，SA和ZA或MA为辅磨料）的砂轮，可使磨削效果有很大提高，使磨削温度降到 600°C 以下，磨削比可达1:12。采用人造金刚石（JR）和立方氮化硼（CBN）超硬磨料，效果最好。实践证明，砂轮粒度为F60~F80，既可减小磨削力，又可提高磨削力。砂轮硬度为K~M；砂轮结合剂一般选用陶瓷结合剂（V），也可选用树脂结合剂（B），可减小磨削力和降低磨削温度；砂轮组织为5~8号为宜。为了减小砂轮粘附、堵塞，可采用砂轮浸渗固体润滑剂（ MoS_2 、石墨、硫磺和硬脂酸）。浸渗的方法是将 MoS_2 粉和乙醇混合成液体，浸泡

14h，取出自然干燥后即可使用。

（3）磨削用量。外圆磨削时，砂轮速度 $v_c=15\sim20\text{m/s}$ ，工件速度 $v_w=15\sim30\text{m/min}$ ， $a_p=0.01\sim0.025\text{mm}$ ，纵向进给量 $B/10\sim B/5$ ；内圆磨削时， $v_c=20\sim25\text{m/s}$ ， $v_w=15\sim45\text{m/min}$ ， $a_p=0.005\sim0.01\text{mm}$ ，纵向进给量为 $B/6\sim B/3$ ；平面磨削时， $v_c=15\sim20\text{m/s}$ ， $v_w=15\sim18\text{m/min}$ ，横向进给量为 $B/10$ 。

（4）磨削液。要求磨削液具有冷却、润滑和清洗作用。更重要的是抑制钛与磨料的粘附和化学作用。目前用的较多的是水溶性磨削液，有亚硝酸钾溶液、亚硝酸钾+甲酸钠溶液、亚硝酸钠溶液，亚硝酸钠+甲酸钠溶液和亚硝酸胺溶液。但使用含S、P、Cl极压添加剂的极压乳化液，效果更好。使用时，砂轮每毫米宽度不小于 $0.5L$ 。

9. 结语

在机械加工中，难磨削材料不只上述几种，还有很多。但只要根据材料的性能和磨削特点，尽力优选磨削条件，就会顺利克服材料在磨削过程中的不良现象，从而获得好的磨削效果。

参考文献：

- [1] 朱祖根，杭根新．磨工与磨削[M]．北京：机械工业出版社，1988.
- [2] 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.
- [3] 郑文虎．机械加工技术经验[M]．北京：国防工业出版社，2015.

MW（收稿日期：20180621）