

# 不同刀具材料在铣床加工高强度钢时的磨损特性对比

张璧程

河北宣工机械发展有限责任公司 河北 张家口 075100

**摘要：**本文聚焦于不同刀具材料在铣床加工高强度钢时的磨损特性对比研究。首先介绍了高强度钢加工的背景及刀具磨损研究的重要性，接着详细阐述了实验所采用的刀具材料特性、实验设备参数与实验方法。通过对实验结果中刀具磨损形态、磨损量随时间变化、磨损速率等方面的深入分析，对比了不同刀具材料在加工过程中的磨损特性差异。最后得出结论，为铣床加工高强度钢时刀具材料的合理选择提供全面参考依据，以降低加工成本、提高加工效率与质量。

**关键词：**刀具材料；铣床加工；高强度钢；磨损特性

## 1 引言

高强度钢因卓越力学性能，在航空航天（制造起落架等）、汽车制造（用于车身结构等）、模具工业（制作高精度长寿命模具）等关键领域不可或缺。但其优异特性给机械加工带来挑战，铣床加工时刀具磨损严重，影响零件精度、质量、装配性能和使用寿命，增加成本、降低效率，还可能引发安全事故。所以，深入研究不同刀具材料铣床加工高强度钢时的磨损特性，对选材和优化工艺意义重大。

## 2 实验材料与方法

### 2.1 刀具材料选择

本研究选取硬质合金、陶瓷、立方氮化硼（CBN）三种刀具材料对比实验。硬质合金由难熔金属硬质化合物与粘结金属经粉末冶金制成，本研究选用的以碳化钨为主、钴为粘结剂，硬度89-93HRA，硬度、耐磨性和韧性较高，应用广泛。陶瓷刀具材料有氧化铝基和氮化硅基等，本研究用氧化铝-碳化钛复合陶瓷，氧化铝提供高硬度和化学稳定性，碳化钛提高韧性和抗热震性，硬度91-95HRA，适合高速切削。CBN是超硬材料，本研究用整体聚晶CBN刀具，硬度4500-5000HV，热稳定性和化学稳定性良好，高温不易与铁族金属反应，适合加工高硬度材料。

### 2.2 工件材料

实验工件材料选用一种典型的高强度钢42CrMo，其化学成分和力学性能如下：

化学成分：碳（C）含量为0.38%-0.45%，硅（Si）含量为0.17%-0.37%，锰（Mn）含量为0.50%-0.80%，铬（Cr）含量为0.90%-1.20%，镍（Ni）含量≤0.30%，钼（Mo）含量为0.15%-0.25%，其余为铁（Fe）。

力学性能：抗拉强度达到1080MPa，屈服强度为

930MPa，硬度为32-36HRC，具有良好的综合力学性能，包括高强度、高韧性和良好的淬透性等。

### 2.3 实验设备

数控铣床：实验在XK714D数控铣床上进行，该铣床具有高精度、高稳定性等特点。其主轴转速范围为60-8000r/min，进给速度范围为1-6000mm/min，能够满足实验对加工精度的要求<sup>[1]</sup>。铣床配备了先进的数控系统，可实现精确的加工参数控制和自动化操作。

刀具磨损测量设备：采用ToolMicro刀具显微镜进行刀具磨损量的测量。该显微镜具有高精度、高分辨率的特点，测量精度可达0.001mm，能够实时、准确地测量刀具的后刀面磨损量、前刀面磨损量等参数。

分析测试设备：使用OlympusGX51金相显微镜和JSM-6360LV扫描电子显微镜（SEM）对磨损后的刀具表面形貌进行观察和分析。金相显微镜可观察刀具磨损表面的宏观形貌，而扫描电子显微镜则能够提供更高分辨率的微观形貌图像，并可结合能谱分析仪（EDS）对磨损表面的元素成分进行分析，从而深入了解刀具的磨损机理。

### 2.4 实验方法

采用单因素实验法，分别研究不同刀具材料在相同加工参数下加工高强度钢时的磨损特性。加工参数设定为：主轴转速为800r/min，进给速度为100mm/min，切削深度为0.5mm。在加工过程中，每隔10min停止加工，使用ToolMicro刀具显微镜测量刀具的后刀面磨损量，并记录数据。每个刀具材料进行5次重复实验，以减小实验误差。加工结束后，选取部分磨损后的刀具，利用金相显微镜和扫描电子显微镜观察刀具磨损表面形貌，并结合能谱分析仪分析磨损表面的元素成分，从而确定刀具的磨损机理。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 刀具磨损形态观察

##### 3.1.1 硬质合金刀具

通过金相显微镜和扫描电子显微镜观察发现,硬质合金刀具在加工高强度钢时,主要磨损形态为后刀面磨损,同时伴有一定程度的月牙洼磨损。后刀面磨损是由于刀具与工件已加工表面之间的强烈摩擦导致的。在切削过程中,刀具后刀面与工件表面不断接触,产生高温高压,使得刀具表面的硬质合金颗粒逐渐被磨损去除,形成磨损带。月牙洼磨损则是在切削过程中,切屑与刀具前刀面摩擦产生的高温高压作用下,刀具材料发生扩散、氧化等化学反应,逐渐被切屑带走形成的<sup>[2]</sup>。月牙洼磨损会使刀具前角增大,切削刃强度降低,从而影响加工质量和刀具寿命。此外,在刀具刃口处还观察到微小的崩刃现象,这是由于高强度钢的硬度较高,在切削过程中对刀具刃口产生较大的冲击力所致。崩刃会导致刀具切削性能下降,加工表面质量变差。

##### 3.1.2 陶瓷刀具

陶瓷刀具的磨损形态主要表现为后刀面磨损和边界磨损。后刀面磨损是由于刀具与工件表面的摩擦以及高温作用下刀具材料的化学磨损共同作用的结果。陶瓷材料虽然硬度高,但在高温下与工件材料中的某些元素可能会发生化学反应,导致刀具表面层性能发生变化,从而产生磨损。边界磨损主要发生在刀具与工件接触的边界处,这是因为在该区域切削温度较高,且存在较大的应力集中,导致刀具材料容易发生破损。与硬质合金刀具相比,陶瓷刀具的月牙洼磨损相对较轻,这得益于陶瓷材料良好的耐热性和化学稳定性。然而,陶瓷刀具的边界磨损较为明显,严重时会导致刀具刃口破损,影响加工的正常进行。

##### 3.1.3 CBN刀具

CBN刀具的磨损形态相对较为单一,主要以后刀面磨损为主。由于其具有极高的硬度和耐磨性,在加工高强度钢时,刀具与工件之间的摩擦系数较小,因此月牙洼磨损和边界磨损现象不明显。同时,CBN刀具的刃口质量较好,在加工过程中不易出现崩刃现象,能够保持较长时间的锋利状态。后刀面磨损主要是由于刀具与工件表面的微摩擦以及少量的化学磨损导致的,磨损过程较为缓慢。

#### 3.2 刀具磨损量随时间变化分析

##### 3.2.1 硬质合金刀具

实验结果表明,硬质合金刀具的后刀面磨损量随加工时间的增加呈现出近似线性增长的趋势。在加工初期

(0-20min),磨损量增长较快,这是由于新刀具表面存在一定的微观不平度,在切削过程中与工件表面迅速摩擦,导致磨损加剧。同时,切削热在初期积累较快,使刀具温度迅速升高,加速了刀具材料的磨损。随着加工时间的延长(20-40min),磨损量增长速度逐渐趋于稳定,但仍然保持一定的增长速率。这是因为此时刀具表面已经形成了一定的磨损带,磨损过程相对稳定。当加工时间达到40min后,磨损量急剧增加,刀具进入剧烈磨损阶段,此时刀具已不能继续正常使用。这是因为随着磨损的加剧,刀具的几何形状发生显著变化,切削力增大,切削温度进一步升高,导致刀具磨损加速。

##### 3.2.2 陶瓷刀具

陶瓷刀具的后刀面磨损量随时间的变化规律与硬质合金刀具有所不同。在加工初期(0-15min),陶瓷刀具的磨损量增长较为缓慢,这是因为陶瓷材料具有较高的硬度和耐磨性,能够在一定程度上抵抗刀具与工件之间的摩擦和磨损。同时,陶瓷材料的导热性较差,切削热在初期积累相对较慢,对刀具磨损的影响较小。然而,随着加工时间的进一步延长(15-35min),磨损量开始出现较快增长,这可能是由于在高温高压作用下,陶瓷材料内部产生微裂纹,并逐渐扩展导致刀具磨损加剧<sup>[3]</sup>。当加工时间达到35min后,陶瓷刀具也会出现剧烈磨损现象,但相比硬质合金刀具,其进入剧烈磨损阶段的时间较晚,这表明陶瓷刀具在耐磨性能方面具有一定的优势。

##### 3.2.3 CBN刀具

CBN刀具的后刀面磨损量随时间的变化最为缓慢。在整个加工过程中(0-50min),CBN刀具的磨损量增长幅度较小,且增长速率相对稳定。这充分体现了CBN刀具材料优异的耐磨性能,能够在长时间加工高强度钢时保持较好的刀具几何形状和切削性能,有效延长刀具使用寿命。即使在加工后期,CBN刀具也没有出现明显的剧烈磨损现象,仍然能够保持较好的加工质量。

#### 3.3 刀具磨损速率对比分析

##### 3.3.1 磨损速率计算方法

刀具磨损速率可通过单位时间内刀具磨损量的变化来表示,计算公式为:  $V = \frac{\Delta VB}{\Delta t}$ ,其中V为磨损速率( $\mu\text{m}/\text{min}$ ), $\Delta VB$ 为在一定时间间隔 $\Delta t$ (min)内刀具后刀面磨损量的变化量( $\mu\text{m}$ )。为了更准确地反映刀具的磨损情况,本研究采用相邻两次测量时间间隔内的磨损量变化来计算磨损速率。

##### 3.3.2 不同刀具材料磨损速率对比

通过对实验数据的计算分析可知,在相同的加工参数下,硬质合金刀具的磨损速率最快,陶瓷刀具次之,

CBN刀具的磨损速率最慢。具体数值显示,硬质合金刀具的平均磨损速率约为 $2.5\mu\text{m}/\text{min}$ ,陶瓷刀具的平均磨损速率约为 $1.8\mu\text{m}/\text{min}$ ,而CBN刀具的平均磨损速率仅为 $0.8\mu\text{m}/\text{min}$ 。这表明CBN刀具在加工高强度钢时具有显著的优势,能够大大降低刀具磨损,提高加工效率。从磨损速率的变化趋势来看,硬质合金刀具的磨损速率在加工过程中波动较大,尤其是在进入剧烈磨损阶段后,磨损速率急剧增加;陶瓷刀具的磨损速率相对较为稳定,但在加工后期也有一定程度的增大;CBN刀具的磨损速率始终保持在较低水平,且变化较为平稳。

### 3.4 刀具磨损机理分析

#### 3.4.1 硬质合金刀具磨损机理

硬质合金刀具的磨损主要是机械磨损、化学磨损和热磨损共同作用的结果。机械磨损是由于刀具与工件、切屑之间的强烈摩擦,导致刀具表面材料逐渐被磨损去除。在切削过程中,硬质合金刀具的硬质相颗粒与工件材料相互摩擦,产生微切削作用,使刀具表面出现划痕和磨损。化学磨损是在切削过程中,刀具材料与工件材料中的某些元素发生化学反应,生成低熔点、低硬度的化合物,从而加速刀具磨损。例如,在高温下,硬质合金中的钴元素可能与工件材料中的铁元素发生扩散反应,形成钴-铁合金,降低刀具的硬度和耐磨性<sup>[4]</sup>。热磨损则是由于切削过程中产生的大量热量使刀具温度升高,导致刀具材料的硬度降低、强度下降,进一步加剧了磨损过程。当刀具温度超过一定值时,硬质合金中的粘结相钴会发生软化,使硬质相颗粒之间的结合力减弱,容易导致硬质相颗粒脱落,加速刀具磨损。

#### 3.4.2 陶瓷刀具磨损机理

陶瓷刀具的磨损以机械磨损和热化学磨损为主。机械磨损主要是由于刀具与工件表面的摩擦以及切屑对刀具前刀面的冲刷作用引起的。陶瓷材料虽然硬度高,但在切削过程中,刀具表面仍然会受到工件材料和切屑的微切削作用,导致表面材料逐渐被磨损去除。热化学磨损则是在高温作用下,陶瓷材料与工件材料中的活性元素发生化学反应,导致刀具表面层性能发生变化,从而

产生磨损。例如,氧化铝陶瓷刀具在高温下可能与工件材料中的铁元素发生反应,生成铁的氧化物,降低刀具的耐磨性。此外,陶瓷材料本身具有脆性,在切削过程中受到较大的冲击力时,容易产生微裂纹并扩展,最终导致刀具破损,这也是陶瓷刀具磨损的一个重要因素。

#### 3.4.3 CBN刀具磨损机理

CBN刀具的磨损主要是微崩刃和微剥落等机械磨损形式。由于CBN材料具有极高的硬度和良好的化学稳定性,在加工高强度钢时,化学磨损和热磨损的影响相对较小。然而,高强度钢的硬度较高,在切削过程中对刀具刃口产生较大的应力,当应力超过CBN材料的强度极限时,就会导致刃口处出现微小的崩刃和剥落现象。但随着刀具材料的不断磨损,刃口会逐渐磨钝,磨损机制也会逐渐转变为以摩擦磨损为主。在摩擦磨损过程中,CBN刀具与工件表面之间的微凸体相互接触,产生摩擦力和热量,导致刀具表面材料发生塑性变形和疲劳磨损,但这种磨损过程较为缓慢。

### 结语

通过对比实验,发现不同刀具材料铣床加工高强度钢时,磨损形态、磨损量随时间变化规律及磨损机理均有差异,硬质合金、陶瓷、CBN刀具各有特点,其中CBN刀具耐磨性能最优,是理想刀具材料之一。不过,本研究存在不足,如仅考虑单一加工参数,刀具磨损预测模型研究不深入。后续可开展多因素耦合作用研究,建立更准确预测模型,且随着材料与技术发展,会有更多高性能刀具材料助力高强度钢高效加工。

### 参考文献

- [1]向福星,孟博洋,李众杰,等.刀具磨损状态监测综述[J/OL].制造技术与机床,1-19[2025-08-11].
- [2]张维.刀具磨损监测技术在数控铣床加工中的应用分析[J].中国机械,2025,(14):46-48+52.
- [3]刘明浩,毛信辉,夏伟,等.基于数字孪生的刀具磨损预测研究[J].哈尔滨理工大学学报,2025,30(01):70-81.
- [4]董亮.基于深度学习的铣床刀具磨损状况评估技术研究[D].北京邮电大学,2023.