

精密切削加工 Inconel718 镍基高温合金的涂层硬质合金刀具磨损试验研究

丁怀博, 蔡权, 陈嘉诚

中广核铀业发展有限公司中广核先进燃料工程试验中心

摘要: Inconel718 镍基高温合金适用于高温高压、高频应力应变及腐蚀环境, 被广泛应用于核电、航天、航空等领域。针对核级 Inconel718 镍基高温合金开展精密切削加工试验, 研究不同工艺参数对涂层硬质合金刀具磨损的影响。结果表明: 涂层硬质合金刀具前后刀面极易发生磨损, 出现月牙洼磨损、沟槽磨损以及崩刃; 车削三要素中进给量对后刀面磨损量 VB 的影响最为明显, 随着进给量的增大, 后刀面磨损量 VB 逐渐减小。

关键词: Inconel718; 刀具磨损; 切削参数

中图分类号: TG711; TH161

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j. issn. 1000-7008. 2021. 12. 010

Experimental Study on Tool Wear of Coated Cemented Carbide Tools in Precision Cutting of Nickel-based Superalloy Inconel718

Ding Huaibo, Cai Quan, Chen Jiacheng

Abstract: Nickel-based superalloy Inconel718 is widely used in nuclear power, aerospace, aviation and other fields due to its excellent performance under high temperature, high pressure, high frequency stress and strain and corrosion conditions. In this paper, precision cutting experiments of nuclear grade nickel-based superalloy Inconel718 are carried out to study the influence of different process parameters on the wear of coated carbide tool. The results show that the coated carbide cutting tools are easy to wear on the front and rear surfaces, such as crater wear, grooves and chipped blade. Among the three factors of turning, the feed has the most obvious effect on the VB of the rear cutting surface wear, and the VB gradually decreases with the increase of the feed.

Keywords: Inconel718; tool wear; cutting parameter

1 引言

Inconel718 镍基高温合金强度高, 韧性、塑性好, 抗氧化、抗热腐蚀和抗高温性能优良, 能在高温高压、高频应力应变及腐蚀环境下长期稳定地工作, 广泛应用于核电、航天、航空等领域重要紧固件的制造。镍基高温合金是一种典型的难加工材料, 研究表明, 其难切削性能为铝合金的 16 倍、中碳钢的 6 倍和不锈钢的 4 倍^[1,2]。这类材料的难加工性主要表现为切削力大、切削温度高、刀具磨损严重、加工硬化明显、表面质量差等^[3,4]。

国内外学者针对车削加工镍基高温合金不同类型的刀具展开了大量研究, 主要集中在硬质合金涂层刀具、金属陶瓷刀具以及氮化硼刀具。吴明阳等^[5]研究了立方氮化硼刀具高速切削加工高温合金 GH4169 时工艺参数对切削力和刀具磨损的影响; 徐小磊^[6]研究了陶瓷刀具高速车削 Inconel718 的表面粗糙度与刀具磨损程度。总体来看, 氮化硼

刀具和陶瓷刀具在镍基高温合金高速切削中的表现优于高速钢刀具和一般涂层刀具。

氮化硼刀具和陶瓷刀具车削加工时切削速度要求较高, 核燃料组件中的镍基高温合金零件尺寸往往小于 $\phi 20\text{mm}$, 当切削速度较快时, 材料转速能达到万转级别, 加工过程中极易发生振动而导致刀具破损。因此, 采用涂层硬质合金刀具对核燃料组件中镍基高温合金零件进行精密切削加工, 通过涂层硬质合金刀具对核级 Inconel718 进行切削试验, 研究切削参数对刀具磨损的影响。

2 试验材料与方法

2.1 核级 Inconel718 棒材

原材料选用西安某制造厂生产的核级 Inconel718 固溶态高温镍基合金棒, 外径为 $\phi 19\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$, 室温(25℃)下硬度 HRC14.0, 其具体拉伸性能及各化学元素含量分别见表 1 和表 2。

2.2 试验方法

车削加工试验设备为津上 BO206-Ⅲ 精密数控走心机, 车削刀具采用日本京瓷新型 PVD 涂层硬质

合金刀具(见表3),切削冷却液为北杉化学C-1179F。

表1 拉伸性能

| 项目 | 抗拉强度 R_m (MPa) | 屈服强度 $R_{p0.2}$ (MPa) | 延伸率 A_{40} (%) | 面积收缩率 Z (%) |
|----|---------------------|--------------------------|---------------------|------------------|
| 性能 | 1363 | 1138 | 27.0 | 49 |

表2 各化学元素含量 (wt. %)

| 元素 | B | Al | Si | P | Ti | Cr | Mn | Fe |
|----|--------|-------|--------|-------|------|--------|-------|--------|
| 含量 | 0.006 | 0.56 | <0.050 | 0.007 | 1.02 | 18.89 | 0.011 | 余量 |
| 元素 | Co | Ni | Cu | Nb | Mo | Ta | C | S |
| 含量 | <0.010 | 52.76 | 0.033 | 5.35 | 3.28 | <0.010 | 0.031 | <0.001 |

表3 刀具规格

| 形状 | 后角(°) | 刀尖(°) | 刀长(mm) | 厚度(mm) | 涂层成分 |
|-------|-------|-------|--------|--------|---------------|
| 55°菱形 | 7 | 0.2 | 11 | 3.97 | AlTiN + AlCrN |

表4为刀具磨损试验切削参数组合,选择 $L_9(3^4)$ 正交试验表。不同切削参数组合车削加工Inconel718棒材不同长度后,采用显微镜观测刀具前后刀面形貌和测量后刀面磨损量VB。表4中因素A,B,C分别表示车削参数中的切削速度 v_c (m/min)、进给量 f (mm/r)以及切削深度 a_p (mm)。

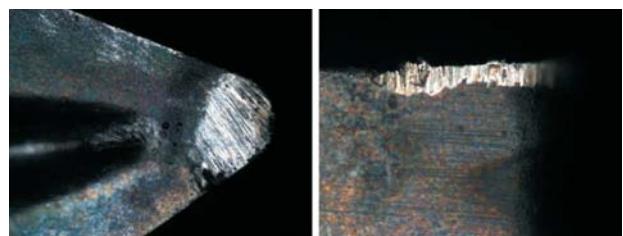
表4 正交试验水平表

| 因素 | 水平 | | |
|----|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| A | 40 | 60 | 80 |
| B | 0.03 | 0.05 | 0.07 |
| C | 0.2 | 0.3 | 0.4 |

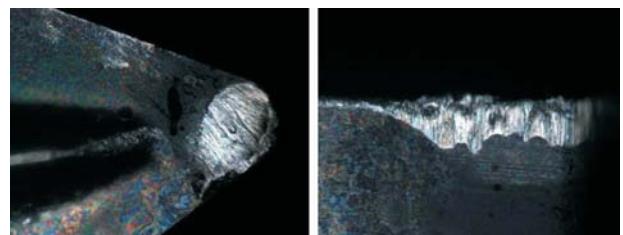
3 试验结果与分析

3.1 刀具磨损形貌特征

图1为采用60m/min,0.07mm/r和0.3mm参数车削加工Inconel718不同距离后的刀具磨损形貌。涂层硬质合金刀具切削加工Inconel718镍基高温合金时,刀具磨损十分严重。当切削加工至500mm时,刀具已经出现大面积磨损。刀具磨损程度随切削距离的增加而增加,出现了后刀面磨损、前刀面的月牙洼磨损、积屑瘤、沟槽磨损以及崩刃。当硬质合金刀具切削加工50mm时,主切削刃有微小崩刃且有积屑瘤,后刀面出现了明显的磨料磨损;当切削加工至200mm时,刀具积屑瘤现象十分严重,前刀面开始出现月牙洼磨损,刀具崩刃现象也更加剧烈。随着切削加工的进行,刀具积屑瘤逐渐增加,刀具从磨料磨损向黏结磨损转变。当切削距离达到500mm时,前刀面出现大面积的崩刃和月牙洼磨损,黏结磨损十分严重,主切削刃出现锯齿状,后刀面有明显的沟槽磨损。



(a) 切削50mm时



(b) 切削200mm时



(c) 切削500mm时

图1 切削不同距离时的刀具磨损形貌

后刀面磨损是最常见的刀片磨损,切削期间,与工件材料表面的摩擦导致后刀面的刀具材料损耗。磨损通常最初在刃线出现,并逐渐向下发展。即使不出现其他形式的磨损,刀具也将最终以这种方式磨损。后刀面磨损可以分为三个区域(见图2):靠近刀尖位置的为C区,靠近工件待加工位置的为N区,参与切削的切削刃中部的为B区。通常以B区高度VB(平均磨损量)来表示后刀面的磨损量,当VB增大时,切削力将增加,切削温度也随之增加,加工过程中产生振动,加工质量降低,因此通常以VB的数值来衡量刀具的磨损程度。

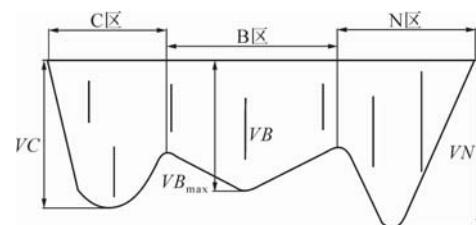


图2 后刀面磨损特征

3.2 切削参数对刀具后刀面磨损量的影响

在不同切削参数条件下,切削加工Inconel718镍基高温合金不同长度(50mm,200mm)后,测量刀具后刀面磨损量VB,统计结果见表5。试验结果表明:当车削长度为50mm时,三个因素对后刀面磨损

量 VB 影响的极差 R_A, R_B, R_C 分别为 17.8, 34.0, 5.1, 即 $R_B > R_A > R_C$; 当车削长度为 200mm 时, 极差分别为 4.3, 77.7, 11.3, 即 $R_B > R_C > R_A$ 。由此可知, 在精密切削 Inconel718 时, 车削三要素中进给量对硬质合金涂层刀具后刀面磨损量 VB 影响最为明显。随着车削距离的增加, 切削深度对后刀面磨损量 VB 的影响逐渐增大, 切削速度则与之相反。

表 5 试验结果及直观分析表

| 因素 | A | B | C | VB_{50} (μm) | VB_{200} (μm) |
|----------|------------|-------------|------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 40 | 0.03 | 0.2 | 100.1 | 131.2 |
| 2 | 40 | 0.05 | 0.3 | 81.2 | 110.2 |
| 3 | 40 | 0.07 | 0.4 | 64.6 | 105.8 |
| 4 | 60 | 0.05 | 0.2 | 76.1 | 167.5 |
| 5 | 60 | 0.07 | 0.3 | 68.1 | 110.7 |
| 6 | 60 | 0.03 | 0.4 | 120.2 | 220.2 |
| 7 | 80 | 0.07 | 0.2 | 67.4 | 120.2 |
| 8 | 80 | 0.03 | 0.3 | 81.8 | 218.3 |
| 9 | 80 | 0.05 | 0.4 | 61.7 | 147.1 |
| 均值 k_1 | 81.9/115.7 | 100.7/189.9 | 81.2/139.6 | | |
| 均值 k_2 | 88.1/166.1 | 73.0/141.6 | 77.0/146.4 | | |
| 均值 k_3 | 70.3/161.8 | 66.7/112.2 | 82.1/157.7 | | |
| 极差 R | 17.8/4.3 | 34.0/77.7 | 5.1/11.3 | | |

图 3 为车削三要素正交试验效应曲线。由图可知, 当车削距离为 50mm 时, 后刀面磨损量 VB 随着切削速度的增大先增大后减小, 随着进给量的增大逐渐减小, 切削深度变化对 VB 影响不明显; 当车削距离增至 200mm 时, 后刀面磨损量 VB 随着切削速度的增大依旧是先增大后减小, 随着进给量的增大逐渐减小, 随着切削深度的增大而增大。

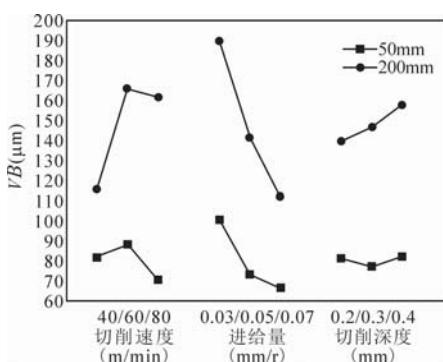


图 3 正交试验效应曲线

当切削速度增大时, 产生的切削热增加, 温度升高, 极易产生积屑瘤导致黏结磨损。同时由于切削速度的增加, 刀具与工件作用时间和摩擦时间缩短, 因此后刀面磨损量 VB 随着切削速度的增大先增大

后减小。试验结果表明, 选择较小时切削速度能减轻后刀面磨损程度。当切削速度一定时, 进给量越大, 刀具与工件作用的时间越短, 切屑与刀具的摩擦越少, 积屑瘤越少, 因此后刀面磨损量 VB 越小。切削深度直接影响切屑的形态以及切削力的大小, 当车削距离较小时, 切屑与后刀面的磨损不明显, 因此对后刀面磨损量 VB 的影响不大。当车削距离逐渐增加时, 切屑与后刀面、主切削刃的摩擦持续增加, 导致后刀面磨损量 VB 增大。

在正交试验中, 车削距离为 200mm 时, 后刀面磨损量 VB 在因素 A 和因素 C 第一水平最小, 在因素 B 第三水平最小。由此可推断: 当车削三要素为 $A_1B_3C_1$ 时, 后刀面磨损量 VB 最小。

4 结语

(1) 涂层硬质合金刀具精密切削加工核级 Inconel718 时, 刀具极易出现前后刀面的磨损, 主要表现为月牙洼磨损、沟槽磨损和崩刃。

(2) 车削三要素中, 进给量对刀具后刀面磨损量 VB 的影响最为明显, VB 随着进给量的增大而减小。要使刀具寿命最长, 应选择较小的切削速度、较大的进给量和较小的切削深度。

参考文献

- [1] Ezugwu E. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45 (12): 1353 – 1367.
 - [2] 庄可佳. 镍基高温合金 Inconel718 高效加工切削机理与试验研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2015.
 - [3] 李刘合, 杨海健, 陈五一. 用于加工 Inconel718 的切削刀具发展现状 [J]. 工具技术, 2010, 44(5): 3 – 10.
 - [4] 储继影. 高温合金加工刀具选择与工艺参数优化研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
 - [5] 吴明阳, 陈勇, 赵旭. PCBN 刀具高速切削镍基高温合金切削力及刀具磨损试验研究 [J]. 工具技术, 2017, 51 (4): 14 – 17.
 - [6] 徐小磊. 陶瓷刀具高速车削 Inconel718 表面粗糙度与刀具磨损研究 [D]. 济南:山东大学, 2012.
- 第一作者: 丁怀博, 高级工程师, 中广核铀业发展有限公司中广核先进燃料工程试验中心, 529500 广东省阳江市
First Author: Ding Huibo, Senior Engineer, CGNPC Uranium Resources Co., Ltd., CGN Advanced Fuel Engineering Test Center, Yangjiang, Guangdong 529500, China