

两种刀具铣削淬硬不锈钢的切削力分析

阴磊

山西煤矿机械制造股份有限公司 山西太原 030031

摘要：采用金属陶瓷刀具和硬质合金刀具铣削淬硬不锈钢时，分析切削过程中的切削力，利用回归分析获得刀具初始切削、同一切削距离和后刀面磨损3种情况下的切削力经验公式，并分析经验公式在刀具磨损情况下参数的变化，为分析刀具磨损后切削参数对切削力的影响提供了参考。

关键词：淬硬不锈钢；切削力；陶瓷刀具；硬质合金刀具

1 序言

不锈钢在工业中应用广泛，随着工业技术的发展，其性能要求越来越高。3Cr13Cu是一种马氏体不锈钢，其化学成分中含碳量高且经热处理后具有很高的硬度，主要用于制造高硬度耐磨弹簧、量具、刀具、医疗器械及餐具等。马氏体不锈钢切削过程中切削力大、切削温度高且刀具磨损严重，是一种典型的难加工材料。

不锈钢的切削加工过程中切削力和锯齿形切屑对刀具寿命和已加工表面质量有很大的影响。对于易形成锯齿形切屑的材料，由于热塑性失稳导致的切屑变形集中、切屑呈节状和应变率强化等因素，速度对切削力的影响不会太明显。高速下切削力随着切削速度的增加会因材料的热软化而呈现下降的趋势。利用经验公式对金属切削加工过程中的切削力进行预测，式中的参数大小和正负代表了不同的物理意义。但考虑刀具磨损的切削力经验公式很少研究，且刀具磨损时切削参数对切削力的影响同样很少在文献中公布。

2 实验设计

实验材料为硬度44HRC的马氏体不锈钢3Cr13Cu，工件尺寸为50mm×70mm×150mm，热处理工艺为淬火（950~1000℃保温后油中冷却）后经430~480℃回火。实验刀具采用通用方肩面铣刀CoroMill 290（R290-100Q32-12L），铣刀盘的直径为100 mm，刀片安装后的切削刃角Kr为90°，刃倾角12°。选用了2种类型的刀片，分别是金属陶瓷刀

具（R290-12T308M-PM 530）和硬质合金PVD涂层刀具（R290-12T308M-PM 1030，以下称为硬质合金刀）。工件刀具的装夹如图1所示。

加工参数的具体设置见表1，加工过程不使用切削液，每个加工参数使用一个新的刃口，并铣削一个长度150mm工件后测量刀具的磨损。采用Kistler 9253B23测力仪，5070A型电荷放大器及相关的设备采集加工过程中的切削力。



图1 工件刀具装夹

表1 加工参数

切削速度 $v/(\text{m}/\text{min})$	进给量 $f/(\text{mm}/\text{z})$	切削深度 a_p/mm
80	0.1	0.3
110	0.1	0.3
140	0.1	0.3
170	0.1	0.3
200	0.1	0.3
230	0.1	0.3
80	0.2	0.3
140	0.2	0.3
200	0.2	0.3
80	0.1	0.2
140	0.1	0.2
200	0.1	0.2
260	0.1	0.3
290	0.1	0.3
260	0.2	0.3
260	0.1	0.2

3 结果及分析

3.1 切削力分析

如图2所示为铣削示意，图中A、B所处位置分

别为刚切入工件的区域和即将切出工件的区域。对A、B两个区域的切削力进行统计分析。

2种刀具在A、B 2个区域的切削力对比如图3所示。2种刀具的切削力随切削速度的变化规律相似，随切削速度的增加先增加后减少，最后再增加。金属陶瓷刀片在切削速度140m/min时切削力达到一个波峰值，在切削速度为230~260m/min时达到一个波谷值。硬质合金刀片在切削速度170m/min时切削力达到一个波峰值，在切削速度为230~260m/min时达到一个波谷值。经分析，切削速度<140m/min时，切削温度较低，工件材料保持足够的硬度，切削速度增加使得单位时间去除的材料增加，导致切削力增加；切削速度为170~260m/min时，切削速度的增加使得切削温度增加明显，软化工件切削区材料，导致切削力降低；当切削速度>260m/min时，金属陶瓷刀具在高频断续切削过程中，容易产生微裂纹然后扩展成崩刃，造成切削力增大。同样硬质合金刀具在高速切削下因切削区的高温，容易造成刀具磨损，导致切削力增大。

如图3所示，切削一个工件长度后，在切削速度<140m/min区域，切削力增加相对较少；切削速度为140m/min时，金属陶瓷刀片3个分力平均增加幅度为22%，硬质合金刀片3个分力平均增加幅度为27.5%；切削速度>140m/min后，切削力增加明显，且增大的幅度越来越大；切削速度为290m/min时，金属陶瓷刀片3个分力平均增加幅度为138.7%，硬质合金刀片3个分力平均增加幅度为72.3%。

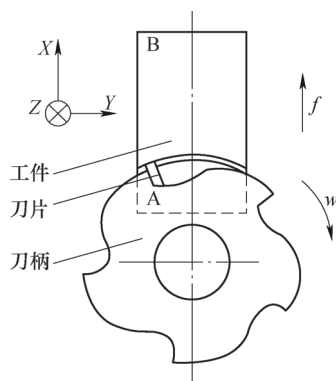
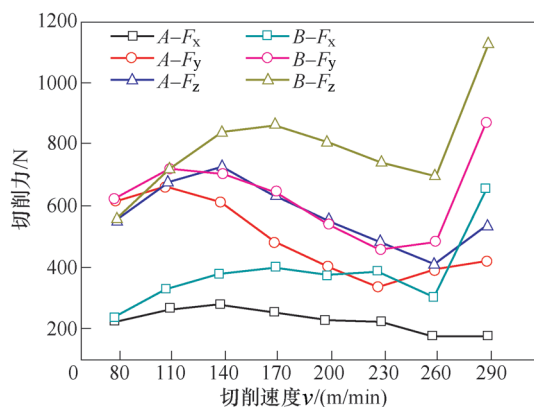
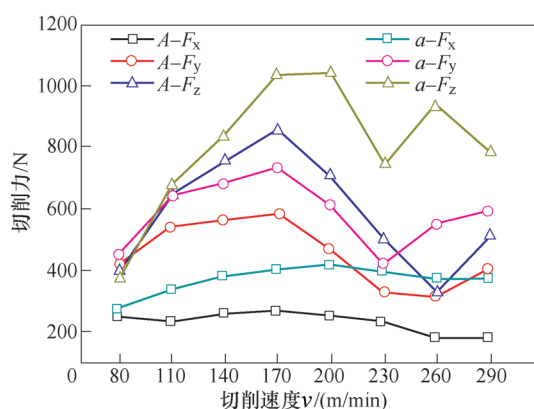


图2 铣削示意

2种刀具不同区域的切削力对比，如图4所示。由图4a可知，切削速度在140~230m/min时，2种刀具在A区域切削时硬质合金刀具的切削力较大。



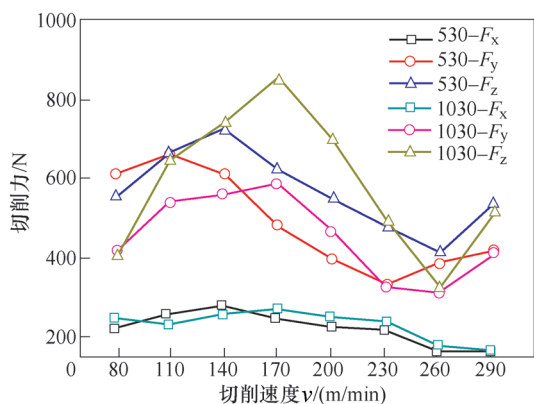
a) 金属陶瓷刀片



b) 硬质合金刀片

图3 A、B两区域的切削力对比

由图4b可知，在B区域切削时，金属陶瓷刀具的切削力较大。原因是切削速度在140~230m/min时，切削温度对硬质合金刀具影响更大，使得其磨损更大，导致切削力较大。而在断续切削加工时切削相同距离后，金属陶瓷刀具的崩刃或磨损更加严重，使得切削力较大。



a) A区域

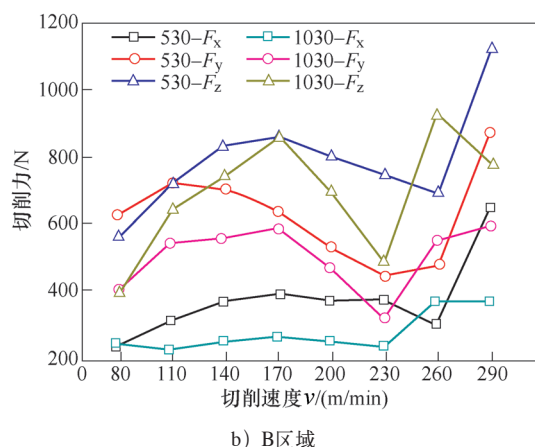


图4 2种刀具不同区域的切削力对比

3.2 切削力经验公式参数分析

在不考虑刀具磨损的情况下，切削力的经验公式见式（1），考虑刀具后刀面平均磨损时，切削力的经验公式见式（2）。

$$F(x/y/z) = av^b f^c a_p^d \quad (1)$$

式中， F 切削力（N）； a 是修正系数； b 是常数； c 是常数； d 是常数； v 是切削速度（m/min）； a_p 是切削深度（mm）； f 是进给量（mm/z）。

$$F(x/y/z) = av^b f^c a_p^d VB^e \quad (2)$$

式中， F 切削力（N）； a 是修正系数； b 是常数； c 是常数； d 是常数； e 是常数； v 是切削速度； a_p 是切削深度（mm）； f 是进给量（mm/z）； VB 是刀具后刀面磨损量（mm）。

采用线性回归的方法，获得2种刀具的A、B区域和考虑VB即刀具磨损的切削力计算公式，金属陶瓷刀具和硬质合金刀具的切削力经验公式参数见表2和表3。根据参数项的变化分析各因素对切削力的影响，金属陶瓷刀具切削力经验公式参数的变化如图5所示。由图5a可知 F_y 的常数 a 最大，且刀具磨损较大时，常数 a 也越大。考虑刀具磨损后，公式中的常数 a 与B区域中的相似。

硬质合金刀具的切削力经验公式参数如图6所示，由图6可知，B区域和考虑刀具磨损的切削力经验公式参数，趋势非常相似，且 F_x 和 F_y 的 b 、 c 和 d 的数值变化都较小，但常数 a 的数值减少明显。由图5和图6可知，刀具未磨损时，随着切削速度的增加切削力整体的趋势是减少；刀具磨损后，切削速度增加导致切削力增加。

综上所述，刀具磨损初期，切削速度增加使切

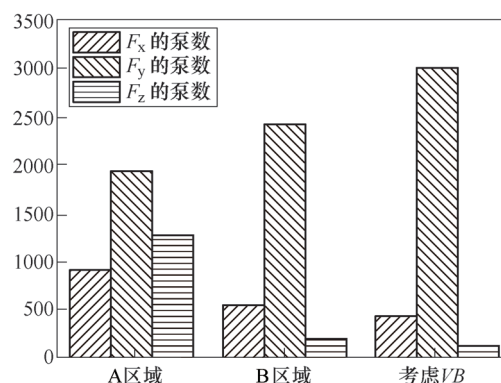
削力从整体上减少；刀具磨损后，切削速度增加使切削力从整体上增加。因此，在切削速度较高时，切削一定距离后，刀具磨损急剧增加。

表2 金属陶瓷刀具的切削力经验公式参数

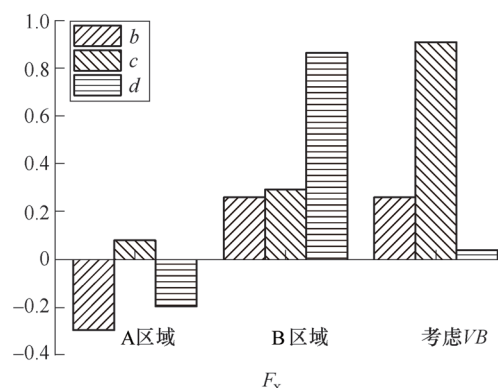
	参数	a	b	c	d
A区域	F_x	930.76	-0.2973	0.0810	-0.2030
	F_y	1938.8	-0.3773	-0.1863	-0.0788
	F_z	1262.6	-0.2116	-0.1122	-0.0084
B区域	F_x	523.17	0.2586	0.2869	0.8673
	F_y	2421.4	0.0049	0.3108	0.5393
	F_z	195.39	0.3296	0.0017	0.2594
考虑VB项	F_x	444.03	0.2561	0.9056	0.0355
	F_y	3001.0	0.0081	0.3448	0.4891
	F_z	133.57	0.3239	-0.0585	0.0824

表3 硬质合金刀具的切削力经验公式参数

	系数	a	b	c	d
A区域	F_x	452.60	-0.1722	0.1556	-0.4436
	F_y	843.11	-0.2853	-0.0134	-0.6457
	F_z	424.62	-0.1063	0.0717	-0.8193
B区域	F_x	440.50	0.2645	0.2987	0.7259
	F_y	1492.3	0.1337	0.5042	0.4053
	F_z	37.39	0.7240	0.3279	-0.0442
考虑VB项	F_x	138.59	0.2817	0.2792	0.7023
	F_y	126.57	0.1704	0.4626	0.3549
	F_z	1.98	0.7677	0.2784	-0.1042



a) 常数 a



b) F_x 的参数

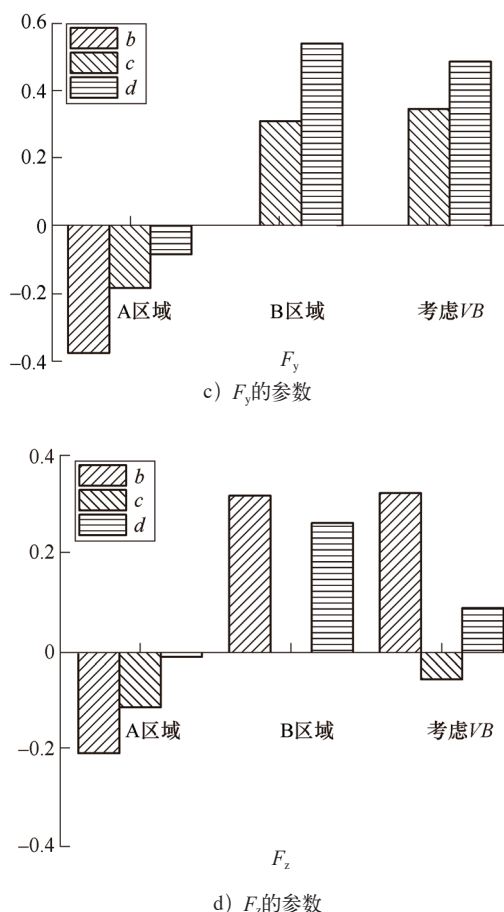


图5 金属陶瓷刀具切削力经验公式参数的变化

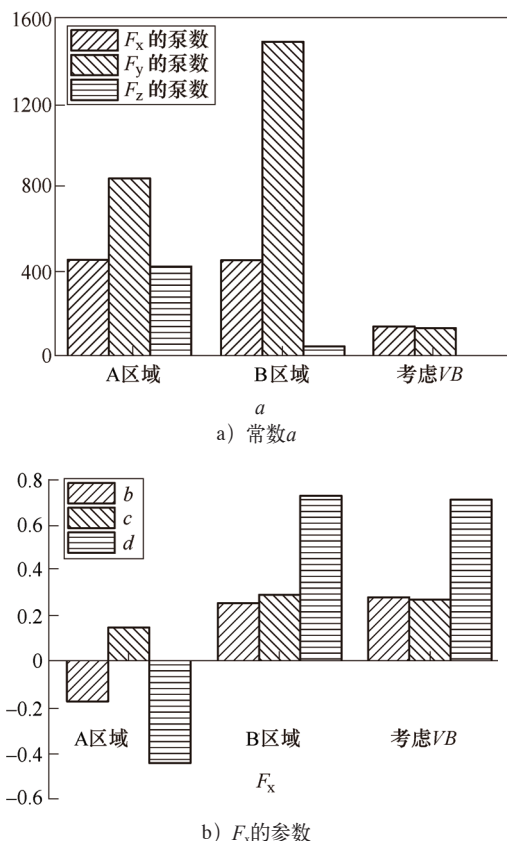
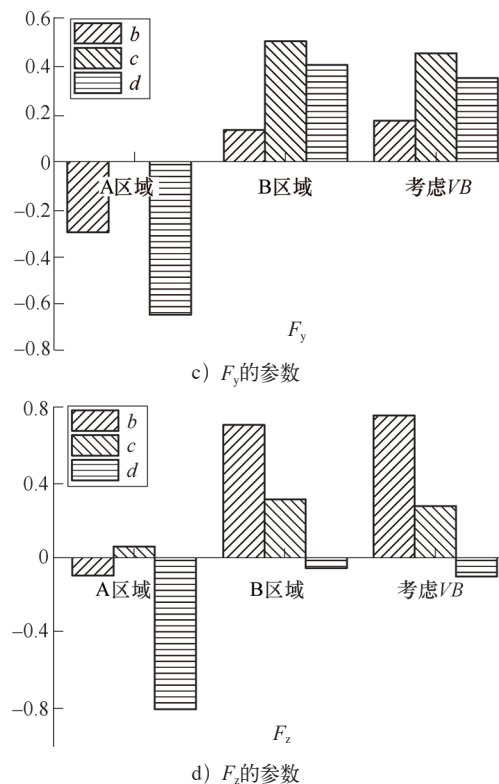


图6 硬质合金刀具的切削力经验公式参数

4 结束语

通过实验及结果分析可知,在切削一个工件长度150mm后,金属陶瓷刀具的切削力较大,原因是断续切削加工时,相同切削距离下金属陶瓷刀具的磨损更加严重。刀具磨损初期,切削速度增加使切削力从整体上减少;刀具磨损后,切削速度增加使切削力从整体上增加。从切削力的角度判定,2种刀具适合在切削速度230m/min左右使用,金属陶瓷刀具不适合在高速断续切削中使用。

参考文献:

- [1] Lo KH, Cheng FT, Kwok CT, et al. Effects of laser treatments on cavitation erosion and corrosion of AISI 440C martensitic stainless steel[J]. Materials Letters, 2004, 58(1-2): 0-93.
- [2] 袁森, 何林, 占岗, 等. 硬质合金微坑车刀切削304不锈钢时的表面粗糙度研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54 (15) : 232-240.
- [3] 邱新义, 李鹏南, 唐思文, 等. 切削速度和刀具磨损对锯齿形切屑形成的影响[J]. 机械设计, 2015 (12) : 64-67.
- [4] 孙剑飞, 何雪, 刘月萍, 等. 涂层刀具切削马氏体不锈钢的磨损机理研究[J]. 工具技术, 2019, 53 (2) : 31-34.