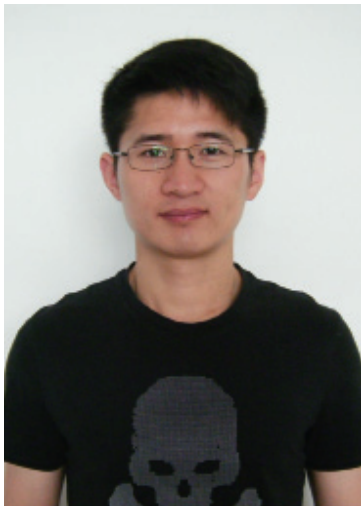


钴基高温合金高速铣削研究*

Research on High Speed Milling of Co-Based Superalloy

南京航空航天大学 杨 斌 耿国盛 徐九华 傅玉灿
西安航空动力公司 何 坚 贺敏岐



杨 斌

硕士,研究方向为难加工材料高性能切削技术。

钴基高温合金在 730~1100℃条件下具有一定的高温强度、良好的抗热腐蚀和抗氧化能力。在工业应用中,钴基高温合金主要用于制作航空喷气发动机的导向叶片和喷嘴导叶以及柴油机喷嘴等。由于高温合金具有较好的热硬性,在切削过程中始终保持着相当高的强度,加工硬化速度较快,使刀具表面产生严重的划痕,容易在切削过程中出现崩刃现象。另外,合金中含有的金属元素同时也是机械加工所用刀

具中含有的金属元素同时也是机械加工所用刀具(如硬质合金)中含有的元素,导致刀具材料元素跟工件材料元素间产生物理、化学作用,使得刀具上不断出现冷焊、粘结、剥落过程,并造成刀具后刀面的剥落而导致刀具失效。

具(如硬质合金)中含有的元素,导致刀具材料元素跟工件材料元素间产生物理、化学作用,使得刀具上不断出现冷焊、粘结、剥落过程,并造成刀具后刀面的剥落而导致刀具失效^[1]。因此,对钴基高温合金的加工一直是制造领域的难题之一。

高速切削不仅大大减少了切削时间,切削效率也得到大幅度提高,与传统切削加工相比具有显著的特点,主要表现在:能获得较高的加工精度和表面完整性;能使加工耗能低、节省制造资源;扩大加工对象种

类等^[2]。本研究试图通过对 GH188 进行高速铣削试验,研究高速铣削钴基高温合金 GH188 时加工用量与铣削力、刀具磨损和刀具耐用度之间的关系与变化规律。

试验材料与试验条件

1 试验材料

试验材料为 GH188,材料的主要化学成分见表 1,物理力学性能见表 2。

2 试验条件

试件尺寸: 300mm × 100mm × 40 mm。

表1 GH188主要化学成分质量分数^[3]

%

C	Cr	Ni	W	La	Si	Co
0.05~0.15	20.0~24.0	20.0~24.0	13.0~16.0	0.03~0.12	0.20~0.50	余

表2 GH188室温下的物理力学性能^[3]

抗拉强度 σ_b	屈服强度 σ_s	延伸率 δ_5	热膨胀系数 α	导热系数 λ	硬度	密度 ρ
860MPa	380MPa	45%	$11.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	12.23 W/(m·°C)	HBS ≤ 293	9.09g/cm ³

* 教育部长江学者和创新团队发展计划 (IRT0837) 资助。

机床: Mikron UCP710 五坐标加工中心。技术参数: 转速 100~18000r/min; 功率 16kW; 最大工作进给速度 20m/min; 快速进给速度 30m/min; 行程(X/Y/Z) 710mm/550mm/500mm。

刀具: 本试验采用 SECO 硬质合金刀具, 刀具直径为 25mm, 齿数为 1, 刀柄型号为 R217.69-2525.3-12-3A, 刀片型号为 XOEX 120408R-M07, F40M, 涂层材料为 PVD TiAlN+TiN, 前角为 20°, 后角为 14°。

测力装置: 采用 Kistler9265B 动态测力仪, 与之配套的放大器为 Kistler5019 电荷放大器。Kistler9265B 测力仪采用压电晶体传感器, 可以同时测量 3 个方向的铣削力, 其主要性能指标见表 3。铣削力的方向定义为: 进给方向为 X, 铣刀径向切深方向为 Y, 刀具轴向为 Z。

表3 Kistler 9265B动态测力仪主要性能指标

测量方向	量程/kN	灵敏度/(pC·N ⁻¹)	固有频率/kHz
F_x, F_y	-15~15	8	1.5
F_z	-10~30	3.7	2.5

刀具磨损测量系统: 体视显微镜、显微摄像系统与图像测量分析软件。

试验结果与分析

根据经验轴向切深并非影响铣削力和刀具耐用度的主要因素, 所以固定轴向切深 a_p 为 6mm, 采用三因素三水平正交法对钴基高温合金 GH188 进行铣削试验。表 4 为试验所使用的因素水平表, 试验采用干切削、顺铣。

1 铣削力分析

铣削力的产生基础是切屑变形,

表4 正交试验的因素水平表

序号	铣削速度 $v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	每齿进给量 $f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	径向切宽 a_e / mm
1	80	0.04	0.4
2	100	0.07	0.7
3	120	0.1	1

同时铣削力直接影响切削热的产生, 并进一步影响刀具的磨损、破损、刀具耐用度、卷屑和断屑以及加工表面质量等^[4]。

在铣削过程中, 由于刀具螺旋角为 0°, 由此产生的轴向力比较

小, 而且在加工过程中 F_z 对

零件变形等影响比较小, 所以这里只考虑铣削参数对 F_x 和 F_y 的影响。图 1 所示为 Kistler 9265B 型测力仪所测得的铣削力信号图。试验取各铣削周期中铣削力峰值的平均值作为 X、Y、Z 方向的铣削分力。

表 5 和表 6 分别为 F_x 和 F_y 的试验安排与结果分析, 其中铣削长度为 200mm。表中 F_1 、 F_2 和 F_3 分别为每种因素在 1、2、3 水平下对应的铣削力之和, m_1 、 m_2 和 m_3 为其平均值, R 为各水平下铣削力平均值的极差, 即在每种因素下:

$$R = \text{Max}\{m_1, m_2, m_3\} - \text{Min}\{m_1, m_2, m_3\}, \quad (1)$$

根据正交试验设计的原理^[5], 式(1)中 R 的大小即反映各因素对铣削力影响的大小。

根据表 5 和表 6 中各因素的 R 值大小, 可以看到每齿进给量 f_z 对铣削力的影响最大, 径向切宽 a_e , 其次铣削速度 v_c 对铣削力的影响最小, 较好的条件组合为铣削速度 $v_c=100\text{m}/\text{min}$, 径向切宽 $a_e=0.4\text{mm}$, 每齿

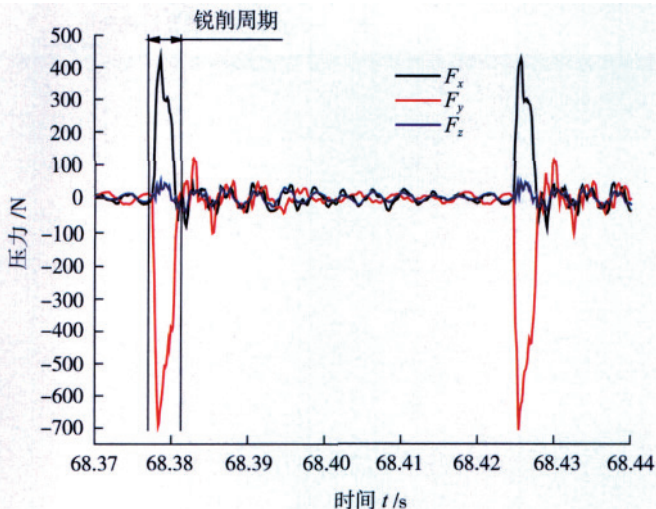


图1 铣削力信号图

进给量 $f_z=0.04\text{mm}/\text{z}$ 。

根据传统切削理论, 铣削力与切削用量的关系可以表示为:

$$F = C v_c^x a_e^y f_z^z, \quad (2)$$

根据式(2), 用 Matlab 将表 5 和表 6 中铣削力结果进行多元线性回归, 即可得到铣削力的经验公式:

$$F_x = 10^{8.22} v_c^{-0.09} a_e^{0.20} f_z^{0.56}, F = 40.87, \quad (3)$$

$$F_y = 10^{7.17} v_c^{0.08} a_e^{0.27} f_z^{0.30}, F = 29.23, \quad (4)$$

式(3)和式(4)中铣削力经验公式 F 统计量值分别为 40.87、29.23 > $F_{0.01}(3,5) = 12.06$, 说明拟合出的经验公式高度显著, 可用于铣削力的预测计算和分析。

由式(3)可以看出, 在铣削加工钴基高温合金 GH188 的过程中, 每齿进给量 f_z 对 F_x 的影响最大(指数为 0.56), 径向切宽 a_e 的影响次之(指数为 0.20), 铣削速度 v_c 的影响最小, 且影响效果与以上两个铣削参数相反(指数为 -0.09)。由式(4)可以看出, 每齿进给量 f_z 和径向切宽 a_e 对 F_y 的影响程度差不多(指数分别为 0.30, 0.27), 铣削速度 v_c 对 F_y 的影响最小(指数为 0.08)。

2 刀具磨损与耐用度分析

金属切削过程中, 刀具在切削力和切削温度的作用下, 由于摩擦、粘结、扩散、崩刃和塑性变形等作用而

表5 F_x 的试验正交表及结果分析

序号	铣削速度 $v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	径向切宽 a_e / mm	每齿进给量 $f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	F_x / N
1	80	0.4	0.04	357.09
2	80	0.7	0.07	476.41
3	80	1.0	0.10	697.53
4	100	0.4	0.07	443.26
5	100	0.7	0.10	673.65
6	100	1.0	0.04	403.66
7	120	0.4	0.10	544.52
8	120	0.7	0.04	368.89
9	120	1.0	0.07	524.53
F1	1531.03	1344.87	1129.64	4489.54
F2	1520.57	1518.95	1444.2	
F3	1437.94	1625.72	1915.7	
m1	510.34	448.29	376.55	498.84
m2	506.86	506.32	481.40	
m3	479.31	541.91	638.57	
R	31.03	93.62	262.02	

表6 F_y 的试验正交表及结果分析

序号	铣削速度 $v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	径向切宽 a_e / mm	每齿进给量 $f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	F_y / N
1	80	0.4	0.04	594.85
2	80	0.7	0.07	764.17
3	80	1	0.1	926.51
4	100	0.4	0.07	638.16
5	100	0.7	0.1	889.8
6	100	1	0.04	710.1
7	120	0.4	0.1	768.35
8	120	0.7	0.04	659.01
9	120	1	0.07	926.22
F1	2285.53	2001.36	1963.96	6877.17
F2	2238.06	2312.98	2328.55	
F3	2353.58	2562.83	2584.66	
m1	761.84	667.12	654.65	764.13
m2	746.02	770.99	776.18	
m3	784.53	854.28	861.55	
R	38.51	187.16	206.90	

引起磨损和破损。当刀具磨损发展到一定程度时,会影响加工质量,直至失去切削能力。刀具磨损是制约难加工材料实现高效切削的主要因素之一。

2.1 刀具磨损形态的宏观分析

铣削 GH188 时有如下规律:在相对较低的径向切宽和每齿进给量的用量下,最大切深位置附近的沟槽磨损比较严重,其磨损带宽度和发展速度均超过其他部位。如铣削用量 $v_c=80\text{m/min}$, $a_e=0.4\text{mm}$, $f_z=0.04\text{mm/z}$ 时沟槽部位的磨损量为 0.41mm ,而其余部分的平均后刀面磨损仅为 0.10mm ;当铣削用量增大后,刀具磨损主要发生在 $1/2$ 轴向切深附近,形态为后刀面出现大块的崩刃、破碎。这可能是因为在使用较低的径向切宽和每齿进给量铣削 GH188 时,刀具主要发生粘结磨损和磨料磨损,此时切屑毛边的高频冲击使得沟槽磨损发展速度大于其他位置的磨损,沟槽磨损不断扩大使得刀具失效,而刀具其他部位的磨损还较小;当以较大的径向切宽和每齿进给量进行断续铣削时,切削刃承受较大的冲击载荷,同时因为铣削过程中温度最高的位置往往位于切削刃的 $1/2$ 轴向切深附近,此处的热应力会使刀具表面产生裂纹,所以在冲击载荷和热应力的综合作用下,切削刃上 $1/2$ 轴向切深附近发生大块的崩刃、破碎而使刀具失效。

另外,铣削 GH188 的过程中,除在后刀面产生磨损带外,切削刃附近的刀具材料会因摩擦和粘结等原因而受到损失,使切削刃在整体上产生“后退”现象,并且不能保持原来比较锐利的形状,从而使铣削力和铣削温度进一步升高,使磨损过程加剧。

2.2 各铣削参数对刀具耐用度的影响

试验过程中选取切削刃中磨损较为均匀的区域,对磨损带宽度测量 3 次后取其平均值作为刀具后刀面磨损 VB 。

图 2 为正交试验的刀具磨损曲

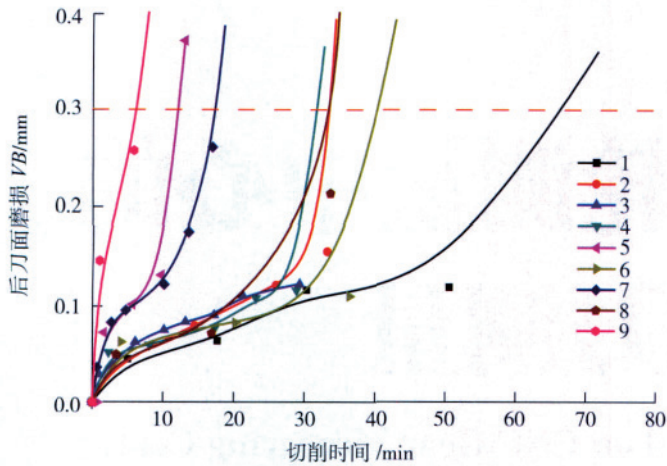


图2 正交试验的刀具磨损曲线

线,各条曲线序号分别对应表7中相应序号的试验。在磨损曲线中磨钝标准 $VB=0.3\text{mm}$ 处做直线(如图中虚线所示),则其与磨损曲线交点处的横坐标即为此组铣削用量下的刀具耐用度,表7为刀具耐用度的试验结果与分析。

根据表7中 R 值的大小,可以看到铣削速度 v_c 和每齿进给量 f_z 是影响刀具耐用度 T 的主要因素,两者

经验公式原理相同,对表7中的数据进行多元线性回归,可得到如下刀具耐用度经验公式:

$$T = 10^{11.33} v_c^{-2.41} a_e^{-0.53} f_z^{-1.01}, F = 5.76, \quad (5)$$

式(5)中刀具耐用度经验公式的 F 统计量值为 $5.76 > F_{0.05}(3,5)=5.41$,说明拟合出的经验公式显著性很好,可用于刀具耐用度的预测计算和分析。

由式(5)可以看出,铣削速度 v_c

对刀具耐用度 T 的影响最大(指数为2.41),每齿进给量 f_z 的影响次之(指数为1.01),径向切宽 a_e 的影响最小(指数为0.53)。

与铣削力经验公式原理相同,对表7中的数据进行多元线性回归,可得到如下刀具耐用度经验公式:

$$T = 10^{11.33} v_c^{-2.41} a_e^{-0.53} f_z^{-1.01}, F = 5.76, \quad (5)$$

式(5)中刀具耐用度经验公式的 F 统计量值为 $5.76 > F_{0.05}(3,5)=5.41$,说明拟合出的经验公式显著性很好,可用于刀具耐用度的预测计算和分析。

由式(5)可以看出,铣削速度 v_c

对刀具耐用度 T 的影响最大(指数为2.41),每齿进给量 f_z 的影响次之(指数为1.01),径向切宽 a_e 的影响最小(指数为0.53)。

结束语

通过对钴基高温合金 GH188 的高速铣削研究,可以得到以下结论。

(1) 每齿进给量 f_z 和径向切宽 a_e 是影响铣削力的主要因素,铣削速度对铣削力的影响比较小。

(2) 在相对较小的径向切宽和每齿进给量下,刀具的主要磨损为后刀面最大切深位置附近的沟槽磨损,其磨损带宽度和发展速度均超过其他部位。当铣削用量增大后,刀具的失效形式主要为在切削刃上 1/2 轴向切深位置附近发生大块的破碎。

(3) 铣削速度 v_c 是影响刀具耐用度的主要因素,每齿进给量 f_z 其次,径向切宽 a_e 的影响最小。

(4) 在实际精加工铣削 GH188 时,可使用铣削速度 $v_c=80\text{m/min}$,径向切宽 $a_e=0.4\text{mm}$,每齿进给量 $f_z=0.04\text{mm/z}$ 的铣削用量组合,这样既能保证有比较高的刀具耐用度(66.3min),也能保证较小的铣削力(F_y 小于 600N)。

此外,工件表面质量和切削温度也是精加工过程中需要考虑的因素,后期需要对这两方面进一步进行研究。

参考文献

- [1] Choudhury I A. The machinability of nickel-based alloys: a general review. *Materials Processing Technology*, 1998 (77): 278-284.
- [2] 张伯霖. 高速切削技术及应用. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册(第2版)第2卷, 变形高温合金铸造高温合金. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [4] Schulz H, Abele E, 何宁. 高速加工理论与应用. 北京: 科学出版社, 2010.
- [5] 邱轶兵. 试验设计与数据处理. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.

(责编 小城)

表7 刀具耐用度 T 的试验正交表及结果分析

序号	铣削速度 $v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	径向切宽 a_e / mm	每齿进给量 $f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	T / min
1	80	0.4	0.04	66.3
2	80	0.7	0.07	34.1
3	80	1.0	0.10	32.3
4	100	0.4	0.07	31.9
5	100	0.7	0.10	12.0
6	100	1.0	0.04	40.9
7	120	0.4	0.10	17.2
8	120	0.7	0.04	34.5
9	120	1.0	0.07	6.50
T_1	132.74	115.40	141.70	
T_2	84.80	80.60	72.50	275.7
T_3	58.20	79.74	61.54	
m_1	44.25	38.47	47.23	
m_2	28.27	26.87	24.17	30.6
m_3	19.40	26.58	20.51	
R	24.85	11.89	26.72	