

难加工材料缓进给磨削加工 表面完整性的试验研究

西北工业大学 王威廉 荆长生

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE SURFACE INTEGRITY CREATED BY CREEP FEED GRINDING OF DIFFICULT-TO-MACHINE MATERIALS

Northwestern Polytechnical University
Wang Weilian and Jing Changsheng

摘要 利用X射线应力仪、显微硬度计、俄歇电子能谱仪、扫描电镜和金相显微镜系统地研究了难加工材料缓进给磨削的表面完整性,讨论了表面粗糙度、冷作硬化、残余应力及其分布、表面层元素的分布以及试件的疲劳性能。

试验表明,缓进给磨削的表面完整性优于铣削和普通磨削。

关键词 表面完整性,磨削,缓进给磨削。

Abstract The surface integrity created by creep feed grindings (CFG) of difficult-to-machine materials was investigated systematically with X-ray instrument, microhardometer, Auger electronic spectroscopy (AES), scanning electronic microscope (SEM) and metalloscope. The surface roughness, strain hardening, residual stress and its distribution, distribution of the chemical elements in surface layer and the fatigue properties of specimens are discussed.

The experiments indicated that the surface integrity created by CFG is better than those by milling and conventional grinding, and gives promise of good application prospects for creep feed grinding.

Key words surface integrity, grinding, creep feed grinding,

1987年12月29日收到

一、前 言

缓进给磨削是一种高效加工方法,其特点是切深大、进给小,自1958年问世以来,经过不断地完善、改进,现已进入了实用阶段。不少学者对这种加工方法的机理作了较多的研究,而本文则对用这种加工方法加工后的零件表面完整性所进行的试验、分析,给以叙述。进一步为此加工方法提供理论依据。

二、试验方法和仪器

试验在B4-002和HM170-1两种平面缓进磨床上进行,被磨材料有高温合金GH33、GH37,镍基铸造高温合金M17,钛合金TC4、TC9以及45号钢等。磨削GH33、GH37材料用GB/GG60CR₃(E=13.5~16)大气孔砂轮;钛合金用TL60(E=25.6)大气孔砂轮, M17材料用GB/GG100(E=13)微气孔砂轮。

磨削GH33、GH37及钛合金时,轮砂采用单颗粒金刚石修整,每次修整量0.02~0.04 mm。磨削时冷却液流量为5 kg/s,冷却压力为0.3 MPa;冲洗流量为1.67 kg/s,冲洗压力为0.3 MPa。磨削M17时采用滚轮挤压修正砂轮,每次修整量0.5 mm,延续时间15 s。磨削时冷却液流量及冲洗流量皆为2.1 kg/s,冷却压力及冲洗压力皆为0.42 MPa。

试验时用自制八角环测力仪测量磨削力;利用半人工热电偶测量磨削温度。

在试验中,利用X射线应力仪、扫描电镜、俄歇电子能谱仪、显微硬度计等仪器,测量了试件表面变质层的残余应力,观察了表面形貌,检查了试件表面层元素的变化以及试件冷作硬化情况,同时还测定了表面粗糙度。

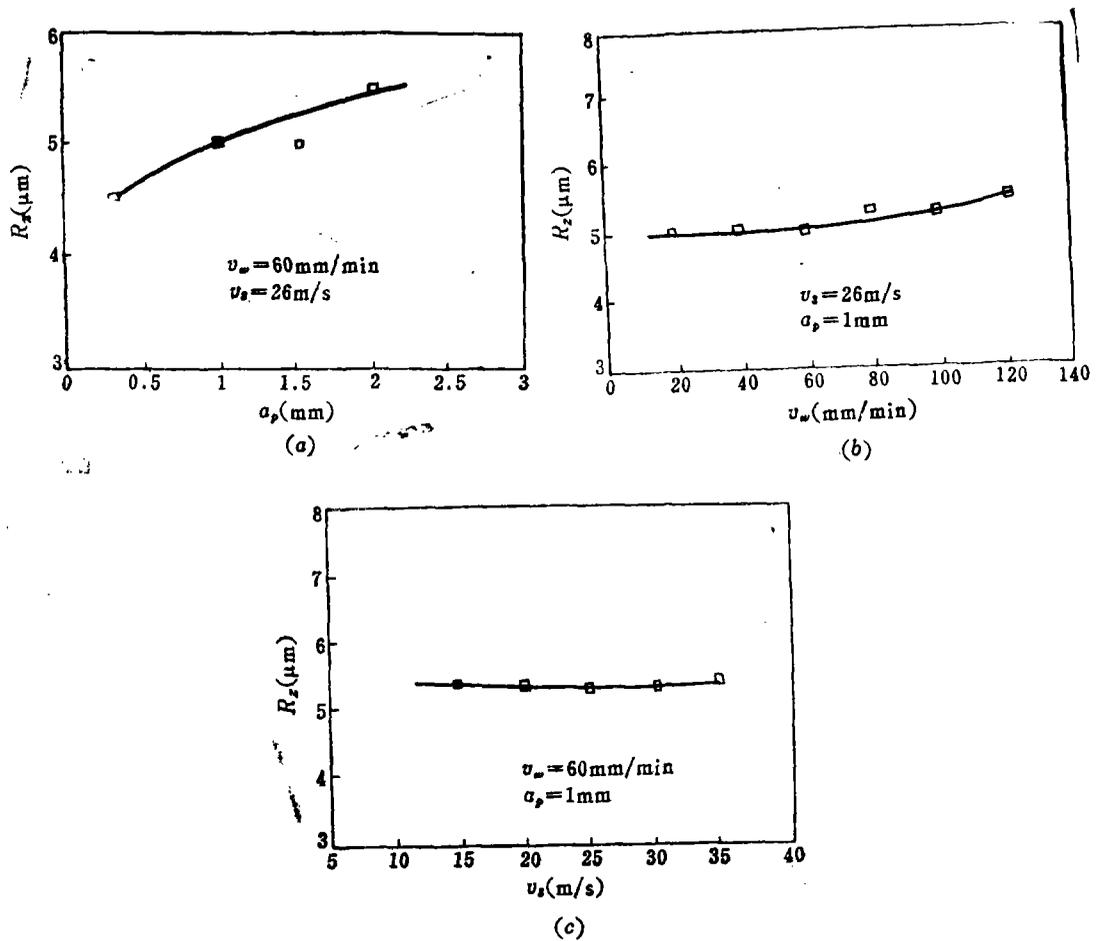
三、表面粗糙度

图1至图3是磨削M17合金时,改变单一参数对表面粗糙度的影响。

从图1(a)、(b)、(c)可以看出,在所试验范围内, R_z 的数值不超过6 μm , a 的影响最大, v_w 次之, v 影响最小。

利用不同冷却液在与磨削M17合金类似的用量范围内磨削钛合金时,表面粗糙度 R_z 在2.2~6.0 μm 内变化;磨削高温合金时, $R_{z,max}$ 与上述结果一样。

可以看出,缓进给磨削表面粗糙度 R_z ,一般不大于6 μm ,选择好砂轮粒度、型号及修正方法之后,改变磨削用量对降低表面粗糙度的潜力不大。

图 1 磨削参数对表面粗糙度 R_z 的影响

- (a) 磨削深度 a_p 对表面粗糙度的影响;
 (b) 工作台进给速度 v_w 对表面粗糙度的影响;
 (c) 砂轮速度 v_s 对表面粗糙度的影响。

四、表面层残余应力

零件加工后表面层的残余应力对疲劳性能将有很大影响,它是表面完整的重要指标。

表1和表2是GH37和TC4缓进给磨削后试件表面的残余应力,图2和图3则是M17合金与钛合金TC4缓进给磨削后残余应力沿表面层深度之分布,表中P冲代表冲洗压力。

表1 GH37缓进给磨削后表面残余应力

件号	a_p mm	v_w mm/min	v_s m/s	σ_x MPa	σ_y MPa
1	0.05	40	30	-299.3	-605.2
2	0.10	40	30	-279.8	-488.0
3	0.20	40	30	-214.7	-540.1
4	0.30	40	30	-305.9	-614.3
5	0.50	40	30	-338.4	-597.5
6	0.80	40	30	-188.7	-468.5
7	1.0	40	30	-260.3	-462.0
8	1.50	40	30	-39.0	-292.8
9	0.5	20	30	-260.3	-436.0
10	0.5	60	30	-279.8	-396.7
11	0.5	80	30	-97.6	-597.5

表2 TC4缓进给磨削后表面残余应力

序号	a_p mm	v_w mm/min	v_s m/s	$P_{\text{冲}}$ MPa	σ_x MPa	σ_y MPa
1	1.0	30	0.95	27.8	-260.7	-409.6
2	1.0	50	0.65	27.8	-288.6	-372.4
3	1.0	70	0.35	27.8	-279.3	-465.5
4	1.5	30	0.35	27.8	-372.4	-428.3
5	1.5	50	0.95	27.8	-104.9	-419.0
6	1.5	70	0.65	27.8	-37.24	-149
7	2.0	30	0.65	27.8	-270	-391.02
8	2.0	50	0.35	27.8	-232.8	-465.5
9	2.0	70	0.95	27.8	-446.9	-521.4

由上述图表中可以看出,缓进给磨削后工件极表层基本上都是压应力,而且一般与磨削方向垂直的横向残余应力 σ_y 总是大于与磨削方向一致的纵向残余应力 σ_x ,即 $|\sigma_y| > |\sigma_x|$ 。

大量试验表明,在不发生烧伤的情况下,缓进给磨削的表面温速很低,一般在200℃以下,因此热应力极小,而由于塑性变形造成的比容增大效应、磨粒的挤压效应和三元切削的压粗效应占主导地位。前二者在工件表层两个方向上形成压应力,而后者则在表层磨削方向上形成拉应力,垂直于磨削方向上形成拉应力。三者综合作用的结果,造成缓进给磨削后工件表层两个方向上皆为压应力,且横向残余应力值大于纵向残余应力值。这种残余应力的分

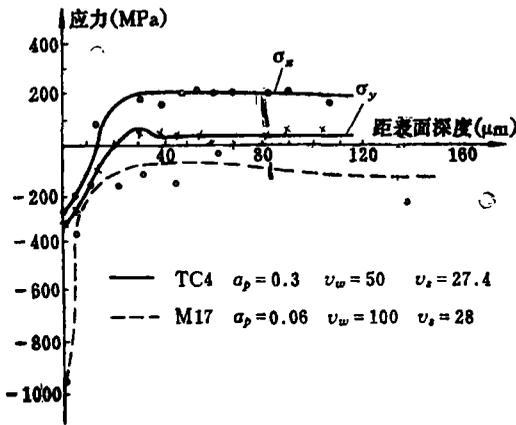


图 2 残余应力沿表面层深度之分布

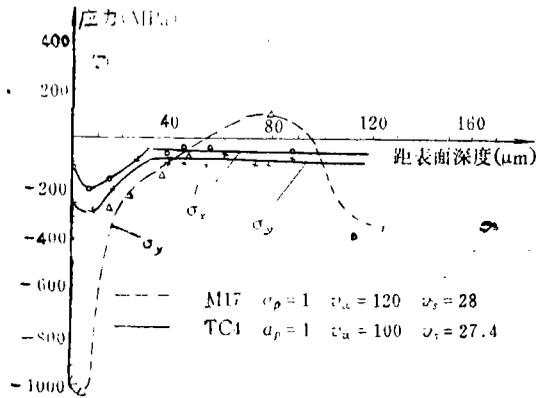


图 3 残余应力沿表面层深度之分布

布对于用缓进给磨削加工的航空发动机涡轮叶片榫齿无疑具有重要的实际意义，因为横向正好是工作时的受力方向，较大的横向残余压应力，将会使叶片具有较高的疲劳强度。

普通平面磨削，由于磨削温度高，热态塑性变形造成的表面残余拉应力占主导地位，这对疲劳强度是不利的。

从图 2 和图 3 可以看出，在磨削深度较小时，最大残余压应力出现在表面，磨削深度增大时，最大残余压应力出现在表层以下，而且随 a_p 之增大，最大残余压应力距表面距离有增大的趋势。这是由于摩擦力的影响造成的，根据赫兹弹性接触理论，切向力与法向力的比值大小，决定了塑性变形首先出现的位置，即最大残余应力的位置，当比值为0.4时，最大剪应力出现在表面。缓进给磨削当切深小时，切向力与法向力比值较大，说明滑擦、耕犁作用占的比重大，即摩擦力大，表面出现最大残余压应力。随着切深的增大，切向力与法向力的比值逐渐减小，法向力将占主导地位，因此最大残余压应力出现在表面以下。

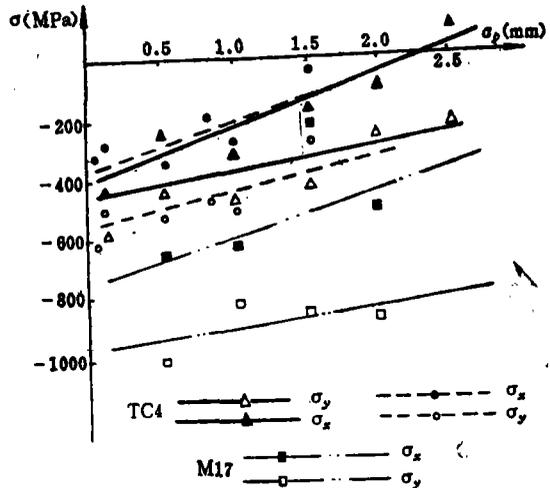


图 4 表面残余应力与磨削深度的关系

磨削深度 a_p 或工作台进给速度 v_w 增大，导致磨削温度升高，从而使 σ_x 和 σ_y 减小；另外由于 a_p 或 v_w 的增大，导致单颗磨粒切削厚度增大，压粗效应增强， σ_x 减小较 σ_y 为快。当热效应和压粗效应的作用达到一定程度时，就会使 σ_x 由压应力变为残余拉应力，如图 4 所示。

由于 a_r 对磨削温度的影响比 v_w 的影响要大,所以在恒去除率的情况下,选取大的 a_r 和小的 v_w 得到的表面残余压应力数值要小于小的 a_r 和大的 v_w 时的残余压应力值。

五、冷作硬化

加工表面及表面层由于塑性变形而产生冷作硬化,试验表明,钛合金缓进磨削的硬化深度一般在 $20\sim 50\mu\text{m}$ 之间,硬化程度为 $8\sim 27\%$ 。而普通平面磨削钛合金,硬化深度为 $40\mu\text{m}$,但硬化程度却高达 130% ,这是由于磨削温度高,变形表面层吸入空气中的氧、氮而形成浸入性固溶体,晶格参数不成比例增大,晶格畸变,塑性降低使表层硬度显著增高。

M17合金缓进给磨削时硬化深度在试验范围内不超过 $30\mu\text{m}$,硬化程度小于 15% ;普通平面磨削时,硬化深度约为 $18\mu\text{m}$,硬化程度为 4.1% 。但铣削时,硬化程度为 16% ,硬化深度却达 $90\mu\text{m}$,这是由于材料加工性很差,铣削速度低,变形速度也较低,特别是铣刀在已加工面的挤压效果,导致表面硬化严重。

六、表面层元素的变化

磨削过程中,工件表面与砂轮及其粘附物、冷却液和空气中的化学元素发生作用,从而在工件表面形成氧化层、扩散层,降低零件寿命。

图 5 至图 7 是 M17 合金三种加工方法加工后,工件表面层元素的变化。由图可知,表面碳(来自冷却液中的有机物)和氧(来自空气)相对浓度百分比较大,而合金的主要元素镍相对浓度百分比到较低,在溅蚀 24s 后,各元素相对浓度百分比趋于稳定,这说明吸附层(氧化层与扩散层)厚度大约是 $1\sim 20\text{nm}$,对零件使用性能没有影响。但是由于普通平面磨削时磨削温度高,氧化能力强,所以表面氧原子浓度大于缓进给磨削和铣削。

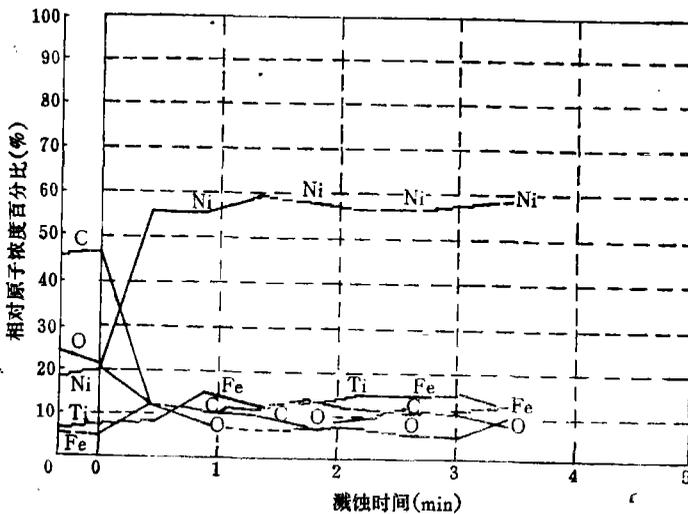


图 5 M17合金缓进磨削后表面层元素变化

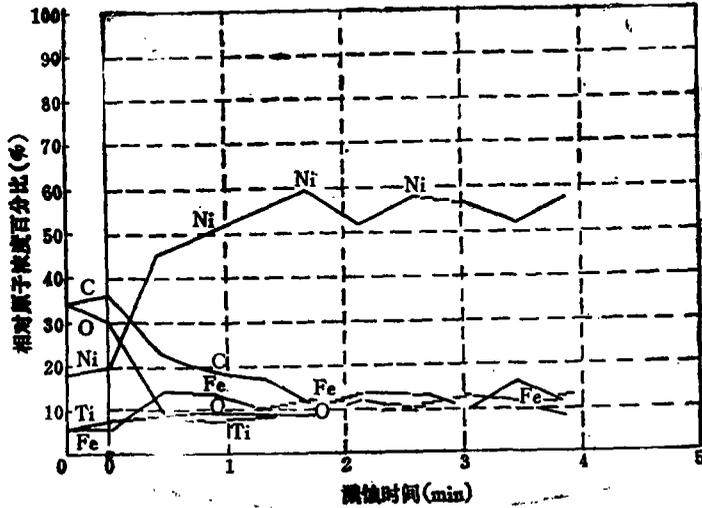


图 6 M17合金普通平面磨削表面层元素变化

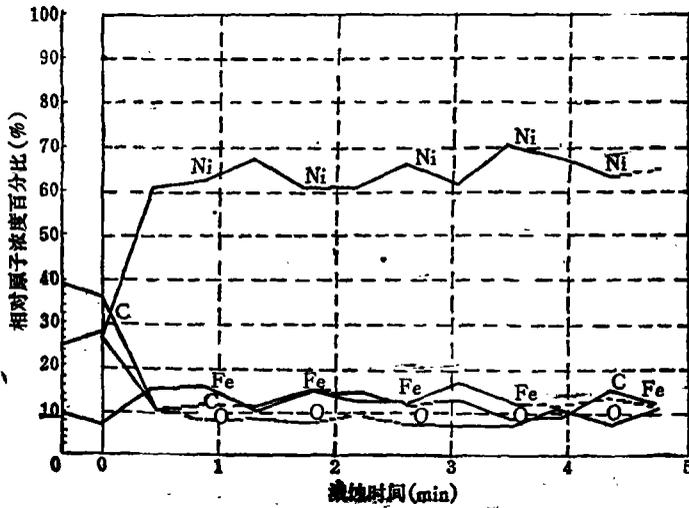


图 7 M17合金铣削表面层元素变化

钛合金由于钛的化学亲和力强，容易与氢、氧、氮化合，所以缓进给磨削后，表层氧和碳的含量较高，而钛下降，铝与钒基本不变，其氧化层与扩散层之厚度约为 5~20nm，与未经加工的钛合金表面层元素变化深度（只有氧化层）基本一样，所以缓进给磨削钛合金由于磨削温度低而使得表面污染与扩散现象极小。但是普通平面磨削时，由于温度高，所以其

氧化层与扩散层之厚度（溅蚀时间16min各元素浓度始趋于稳定）远远大于缓进给磨削，这是钛合金与M17合金不同之处。

七、疲劳强度

表面完整性的研究，其最终的归宿是要考核表面粗糙度、表面层残余应力、冷作硬化等因素综合对疲劳性能的影响，由于缓进给磨削的磨削温度低，不会发生金相组织变化，所以不考虑相变的影响。

经过若干组缓精磨、缓粗磨、铣削和平面磨削的对比疲劳试验。试验按HB5277-84“材料振动疲劳试验方法”进行，对考核面做脉动循环。加工用量及有关数据如表3所示。

表3 试样加工用量及表面完整性指标

试样	加工用量	硬化深度/ μm	硬化程度%	残余应力		表面粗糙度 R_z / μm
				σ_x MPa	σ_y MPa	
缓精磨	$a_p=1.2, 0.3, 0.06\text{mm}$ $v_w=150\text{mm/min}$	18	1.8	-784	-980	4.5
缓粗磨	$a_p=1.5\text{mm}$ $v_w=100\text{mm/min}$	27	11	-313.6	-862	5.5
铣削	$a_p=0.4\text{mm}$ $v_w=30\text{mm/min}$ $n=60\text{r/min}$	90	16	-240	-650	13
普通平磨	$a_p=0.03\sim 0.05\text{mm}$ $v_w=300\text{mm/s}$	18	4.1	705.6	313.6	5

表4 疲劳试验的振幅和应力

试验种类	试验温度/ $^{\circ}\text{C}$	试验振幅/mm	试验应力/MPa
常温试验	20	12	760
高温试验	900	10	470

试验时的振幅和应力如表4所示，常温试验结果如表5所示。

表5 常温疲劳寿命 $\log N$ 试验结果

组别	缓精磨	缓粗磨	铣削	普通平面磨削
1	5.199	5.1126	5.0927	5.039
2	5.1836	5.0928	5.721	4.989
3	5.041	5.614	4.9645	4.977
$\log \bar{N}$	5.1467	5.0894	5.0466	5.0025

从表 5 可以看出, 常温下缓进给精磨疲劳寿命最高, 往下依次为缓进给粗磨、铣削、普通平面磨削。缓进给精磨比普通平面磨削疲劳寿命可提高 39%, 比铣削提高约 25% (按 $(N-N')/N'$ 计算), 所以用缓进给磨削来代替铣削和普通平面磨削有利于疲劳寿命的提高。目前用缓进给磨削代替铣削加工叶片榫齿已得到了应用。

表面粗糙度的减小, 一般说有利于疲劳寿命的提高, 但粗糙度的影响会被表面层其他变化所抵消。一些试验表明, 当零件表面层为残余压应力或者残余拉应力比较大时, 表面粗糙度对疲劳强度没有影响。表 3 和表 5 表明, 铣削粗糙最大, 但由于表面层是残余压应力, 同时由于 M17 合金全无缺口敏感性, 所以由它产生的硬化层改变了缺口顶端附近的表面状态, 虽然铣削粗糙度大, 但其疲劳寿命仍然高于粗糙度比它小, 而呈拉伸残余应力的普通平面磨削的疲劳寿命。

从表 3 可知, 铣削的冷硬层大于缓进给精磨, 但后者残余压应力值最大, 疲劳寿命最长。表面层的冷作硬化在当零件受重负荷作用时会阻止位错向表面伸出, 推迟疲劳裂纹源的产生, 从而提高疲劳寿命, 但它对常温疲劳的影响仍居第二位。从表 3 和表 5 可以看出, 残余应力的大小和性质是影响常温疲劳的主要因素, 残余压应力越大, 疲劳寿命越长; 普通平面磨削为拉应力, 它可以使疲劳寿命降低, 所以常温疲劳要特别注意残余应力的大小和性质。

由于 M17 合金高温下材料本身强度分散性很大。同时在高温下表面层冷作硬化和残余应力会产生恢复和松弛, 因此试验结果发现高温下疲劳寿命分散度很大。试验表明, 有冷作硬化的试件在 900℃ 作用下保温 3h, 硬化层完全消失, 甚至出现软化现象, 反而造成疲劳寿命下降。所以高温下工作的零件应尽量扩大冷作硬化程度和深度, 因而缓进给磨削较之铣削更适合于涡轮叶片榫齿加工。

缓进给磨削对某些航空重要零件生产无疑有着良好的表面完整性指标, 在民品生产方面, 对型面、深槽加工也将有应用价值。

参 考 文 献

- 1 王威廉, 荆长生, 武智慧. 缓进磨削的磨削温度、磨削烧伤及表面层元素变化. 磨料磨具与磨削, 1987, (1) 15~25
- 2 荆长生, 王威廉, 武智慧. 钛合金蠕虫磨削表面完整性的一些试验研究. 西北工业大学 ZHZ8513