

Al₂O₃/ZrO₂(Y₂O₃)复合材料的可靠性、磨损形态及其切削耐用度

马伟民¹, 闻 雷², 管仁国³, 孙旭东³, 李喜坤⁴

- (1. 沈阳大学 材料科学与工程系, 沈阳 110044;
2. 中国科学院 金属研究所 沈阳材料科学国家(联合)实验室, 沈阳 110016;
3. 东北大学 冶金与材料学院, 沈阳 110004; 4. 沈阳理工大学 材料工程学院, 沈阳 110168)

摘 要: 研究了 Al₂O₃ 和 Al₂O₃/ZrO₂(Y₂O₃) 复合刀具材料的 Weibull 分布、磨损形态及其切削耐用度。用一元线性回归方法确定 Al₂O₃/ZrO₂(Y₂O₃) 刀具的耐用度参数, 分析切削条件对 Al₂O₃/ZrO₂(Y₂O₃) 复合刀具材料寿命的影响。结果表明: Al₂O₃ 和含 2%(摩尔分数)及 3%Y₂O₃ 的 ZrO₂/Al₂O₃(Al₂O₃/ZrO₂(2Y)及 Al₂O₃/ZrO₂(3Y))复合刀具材料 Weibull 模数的 m 值分别是 5.6、10.2 和 11.7, 说明 Al₂O₃/ZrO₂(3Y)陶瓷的可靠性最优; Al₂O₃/ZrO₂(3Y)复合刀具切削 40CrMoNiA 合金钢的磨损形态主要来自磨粒磨损和粘结磨损, 耐用度参数 v_c 、 f 、 a_p 的指数值分别为 1.3、1.69 和 0.66, 陶瓷刀具更适合高速切削, 最大影响因素是进给量(f), 在最佳切削条件下($v_c=140$ m/min, $a_p=0.5$ mm 和 $f=0.3$ mm/r)切削耐用度为 3 h。

关键词: Al₂O₃/ZrO₂(Y₂O₃)复合材料; 刀具; 可靠性; 磨损形态; 一元线性回归; 耐用度
中图分类号: TQ 174.75 **文献标识码:** A

Reliability, abrasion modality and cutting lifetime of Al₂O₃/ZrO₂(Y₂O₃) composites

MA Wei-min¹, WEN Lei², GUAN Ren-guo³, SUN Xu-dong³, LI Xi-kun⁴

- (1. Department of Materials Science and Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China;
2. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
3. Institute of Metallurgy and Materials, Northeastern University, Shenyang 110004, China;
4. School of Materials and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

Abstract: The Weibull distribution, abrasion performance and cutting lifetime of Al₂O₃ of Al₂O₃/ZrO₂(Y₂O₃) composites were investigated. The cutting lifetime of Al₂O₃/ZrO₂(Y₂O₃) cutting tool was established using single linearity regression. The effects of different cutting conditions on the cutting lifetime of Al₂O₃/ZrO₂(Y₂O₃) composite cutting tool were completely analyzed. The results show that Weibull modula (m) of Al₂O₃, Al₂O₃/ZrO₂(2Y) and Al₂O₃/ZrO₂(3Y) composites are 5.6, 10.2 and 11.7 respectively, showing that the Al₂O₃/ZrO₂(3Y) composite has the best reliability. The abrasion mechanism during cutting process of 40CrMoNiA alloy steel by Al₂O₃/ZrO₂(Y₂O₃) cutting tool results from grain abrasion and adhesion abrasion. The parameters in the endurance model, v_c , f and a_p are 1.3, 1.69 and 0.66, respectively. The cutting tool material investigated at present is suitable for high-speed cutting. The maximal influence factor is the amount of feed (f). Under the optimum cutting conditions, $v_c=140$ m/min, $a_p=0.5$ mm and $f=0.3$ mm/r, the endurance life of the composite cutting tool is 3 h.

Key words: Al₂O₃/ZrO₂(Y₂O₃) composite; cutting tool; reliability; abrasion modality; single linearity regression; cutting lifetime

新型陶瓷刀具材料的研究对提高切削效率、切削难加工材料及航天航空材料起着重要作用。1970 年以后曾有研究报道高性能陶瓷材料增强、增韧的研究成果^[1-3], 从而推进了陶瓷刀具材料的应用与发展。当今欧美日等国家已经广泛应用氧化物陶瓷、混合陶瓷和塞隆陶瓷 3 大系列刀具材料, 这些刀具在高速、高精度和高效率的数控加工方面具有优异的耐热性、耐磨性及化学稳定性, 因而成为切削加工生产线的首选刀具。文献[4-7]报道了各种陶瓷刀具的切削性能, 认为结构陶瓷材料将成为 21 世纪最有竞争力的刀具材料。陶瓷刀具材料的可靠性是对改进材料制备工艺过程及材料工业化应用进行综合评价的重要因素之一。本文作者对 Al_2O_3 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(2\text{Y})$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(3\text{Y})$ 3 种材料的 Weibull 分布模数进行了强度离散性分析, 并将陶瓷刀具样品进行切削性能实验, 用一元线性回归方法确立了刀具切削耐用度参数, 评价出选择切削用量的优先顺序, 对高速切削加工领域应用 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 陶瓷刀具提供了有价值的参数。

1 实验

采用低成本、高效率的机械球磨法制备出 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 复合粉体^[8], 所得坯体经过 200 MPa 等静压成型后, 在 1 550 °C 下进行真空烧结, 然后分别制备出 3 组复合陶瓷刀具试样: Al_2O_3 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(2\text{Y})$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(3\text{Y})$ 试样, 利用三点弯曲法得到 3 组试样的抗弯强度数据, 用以评价其 Weibull 分布参数的离散性。复合陶瓷刀片尺寸为: 12 mm×12 mm×8 mm; 正方形粗坯刀片在工具磨床上用 240# 金刚石砂轮将其加工精磨, 如图 1 所示。

表 1 所列选用切削刀具的几何角度。 Al_2O_3 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(2\text{Y})$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(3\text{Y})$ 陶瓷刀具的性能参

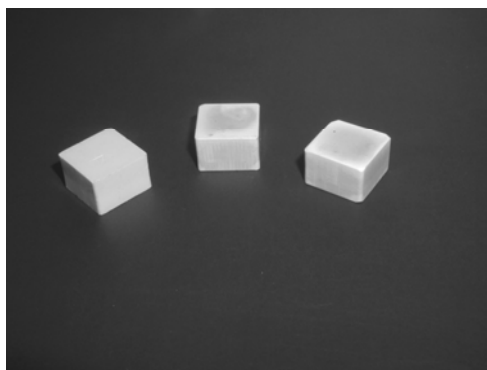


图 1 高性能陶瓷刀片的实物外形

Fig.1 Photos of specimens of ceramic cutting tools with high performance

表 1 实验刀具的几何参数

Table 1 Geometry parameters of cutting tools

γ_0	α	κ	λ	κ'	γ_r	b_r/mm	r/mm
-5°	5°	75°	-5°	15°	-15°	0.5	0.8

数如下:

抗弯强度分别是 361、637 和 779 MPa, 断裂韧性分别是 3.9、6.9 和 7.3 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 硬度均在 HRC 82 以上。在 CA6140 机床上进行连续干切削实验, 工件材料为 40CrMoNiA 合金钢(HRC62)。测量仪器有 X30 型显微镜、卡尺及秒表等。在 X30 显微镜下观察、记录刀具磨损形态和刀具后刀面磨损量对应的切削时间。

2 结果与讨论

2.1 Al_2O_3 及 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 复合材料的 Weibull 可靠性

由于材料中裂纹的长度是随机分布, 所以临界应力具有分散的统计性。Weibull 提出了材料应力分布状况的半经验公式, 即 Weibull 函数^[9]:

$$n(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \quad (1)$$

式中 σ 为作用应力; σ_0 为经验常数; m 是表征材料均一性的常数, 称为 Weibull 模数, m 越大, 材料越均匀, 材料的强度分散性越小。Weibull 模数可根据实际强度数据求得 N 个样品与 σ 断裂强度之间经整理取对数得到:

$$\ln \left(\ln \frac{N+1-n}{N+1} \right) = \ln V + m \ln \sigma - m \ln \sigma_0 \quad (2)$$

由式(2), $\ln \left(\ln \frac{N+1-n}{N+1} \right)$ 与 $\ln \sigma$ 成线性关系, 直

线的斜率为材料的 Weibull 模数 m 值。

实验数据列于表 2, 每种试样取 20 个强度数据为一组, 3 种陶瓷试样的三点弯曲强度测试结果也列于表 2。由表 2 可知: 实验中 Al_2O_3 陶瓷最大和最小强度值分别为 388 和 286 MPa, 相差 1.37 倍。 $\text{Al}_2\text{O}_3/15\%$ (体积分数) $\text{ZrO}_2(2\text{Y})$ 陶瓷各试样的断裂强度值在 581 MPa 至 738 MPa 之间, 最大值是最小值的 1.27 倍; 而 $\text{Al}_2\text{O}_3/15\% \text{ZrO}_2(3\text{Y})$ 陶瓷试样的断裂强度值在 752 MPa 至 884 MPa 之间, 最大值是最小值的 1.18 倍。显然 Al_2O_3 陶瓷和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(2\text{Y})$ 陶瓷的强度分散性大于 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(3\text{Y})$ 陶瓷的。

表 2 Al₂O₃、Al₂O₃/ZrO₂(2Y)和 Al₂O₃/ZrO₂(3Y)陶瓷试样的抗弯强度

Table 2 Bending strength of Al₂O₃, Al₂O₃/ZrO₂(2Y) and Al₂O₃/ ZrO₂(3Y) composites

Sample No.	Bending strength/MPa		
	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ /ZrO ₂ (2Y)	Al ₂ O ₃ /ZrO ₂ (3Y)
1	286	581	752
2	297	591	763
3	349	598	766
4	350	599	781
5	356	618	789
6	357	639	791
7	358	682	793
8	363	683	795
9	364	685	803
10	364	685	819
11	364	689	824
12	367	693	825
13	370	693	827
14	371	696	696
15	374	698	847
16	375	717	857
17	377	718	857
18	378	721	872
19	387	726	880
20	388	738	884
Average value	361	637	779

以 3 种材料的实验数据做 $\ln\left(\ln\frac{N+1-n}{N+1}\right)$ 与 $\ln\sigma$ 对数图,得到 Al₂O₃、Al₂O₃/ZrO₂(2Y)和 Al₂O₃/ZrO₂(3Y) 3 种陶瓷试样的 Weibull 模数 m 值分别为 5.6、10.2 和 11.7,含 ZrO₂(3Y)陶瓷试样的 m 值大于含 ZrO₂(2Y)陶瓷试样的,说明 Al₂O₃/ZrO₂(3Y)陶瓷的强度均匀性优于前者。Al₂O₃ 和 Al₂O₃/ZrO₂(2Y)、Al₂O₃/ ZrO₂(3Y)陶瓷试样的断裂几率与断裂应力的对数关系如图 2、3 和 4 所示。随断裂应力的提高,材料的断裂几率增大。在相同的断裂几率下,Al₂O₃/ ZrO₂(3Y)陶瓷试样的断裂应力明显高于 Al₂O₃/ ZrO₂(2Y)陶瓷的断裂应力。Al₂O₃/ ZrO₂(3Y)复合材料的 Weibull 模数 m 值为 11.7,是相同条件下 Al₂O₃/ ZrO₂(2Y)陶瓷的 1.2 倍,是 Al₂O₃ 陶瓷的 2.1 倍,可见 Al₂O₃/ ZrO₂(3Y)材料的可靠性比前两者有很大的提高。

2.2 Al₂O₃、Al₂O₃/ZrO₂(Y₂O₃)陶瓷刀具的耐磨性能
切削用量(切削速度 v_c 、切削深度 a_p 、进给量 f) 是影响切削加工的重要因素之一,参数选择由不同材

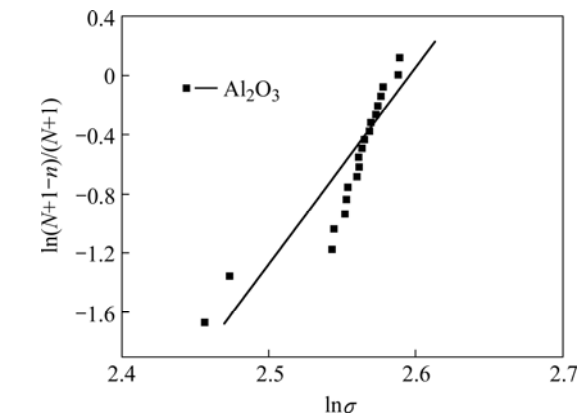


图 2 Al₂O₃ 的 Weibull 断裂几率图

Fig.2 Fracture probability curve of Al₂O₃

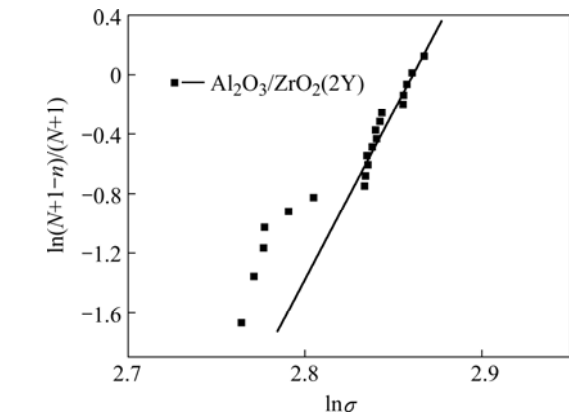


图 3 Al₂O₃/ZrO₂(2Y)复合材料的 Weibull 断裂几率图

Fig.3 Fracture probability curve of Al₂O₃/ZrO₂(2Y) composite

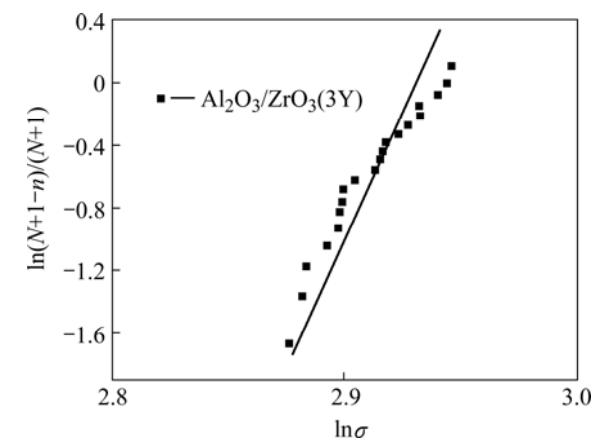


图 4 Al₂O₃/ZrO₂(3Y)复合材料的 Weibull 断裂几率图

Fig.4 Fracture probability curve of Al₂O₃/ZrO₂(3Y) composite

料及加工设备的差异所决定。在相同切削条件下本研究分别选择 3 种不同的陶瓷刀具材料切削 40CrMoNiA 合金钢(HRC62), 陶瓷刀后刀面磨损遵循 ISO3685—1977(E)国际标准评定, 在工具显微镜上测量其后刀面磨损带宽度, 取刀具的磨钝标准为 0.3 mm, 其耐磨性能曲线如图 5 所示。

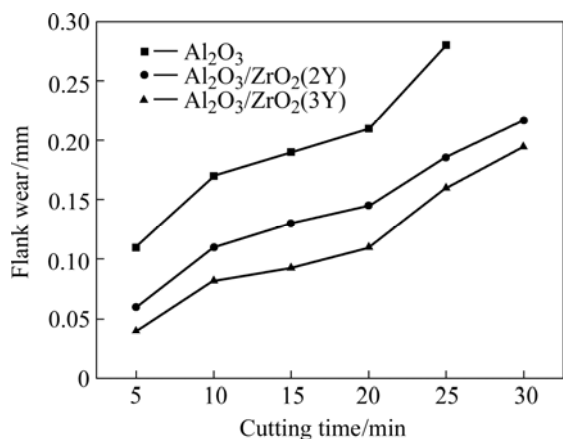


图 5 3 种陶瓷刀具材料磨损性能的比较

Fig.5 Wearing comparison of three kinds of ceramic cutting tools at $v_c=290$ r/min, $a_p=0.5$ mm and $f=0.1$ mm/r)

图 5 所示为相同切削条件下 3 种陶瓷刀具材料的后刀面磨损曲线, 3 种刀具的磨损性能差异甚大。随切削时间的延长, 刀具磨损增加, 3 种曲线分别反映出刀具磨损过程 3 个阶段的趋势(初级磨损、正常磨损和急剧磨损)^[9]。 Al_2O_3 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(2\text{Y})$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(3\text{Y})$ 刀具材料的耐磨性主要与材料力学性能的差异有关^[10-11]。 Al_2O_3 刀具与后两种刀具相比在较短时间内后刀面进入磨钝状态, 主要原因是其力学性能和热性能较差, 尽管其硬度较高, 但显微结构中存在的晶粒在切削过程中加快了磨损, 继续切削出现因剧烈的磨损产生崩刃而失效。

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(2\text{Y})$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(3\text{Y})$ 刀具材料磨损性能均高于 Al_2O_3 刀具材料, 这是因为 Al_2O_3 基体添加 ZrO_2 使显微组织得到明显细化(图 6), 材料性能也相应提高。

2.3 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 刀具材料的磨损形态

众所周知, ZrO_2 是 Al_2O_3 基复合材料增韧因素之一^[12-14]。刀具寿命的提高归结于多种增韧机制叠加及制备工艺等综合因素。 ZrO_2 能提高 Al_2O_3 基刀具耐用度的本质与 MgO 的作用一致, 均有助于形成微细的组织结构, 从而提高复合材料的力学性能。且高温下 ZrO_2 在铁中的溶解度较 Al_2O_3 要低, 因而 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$

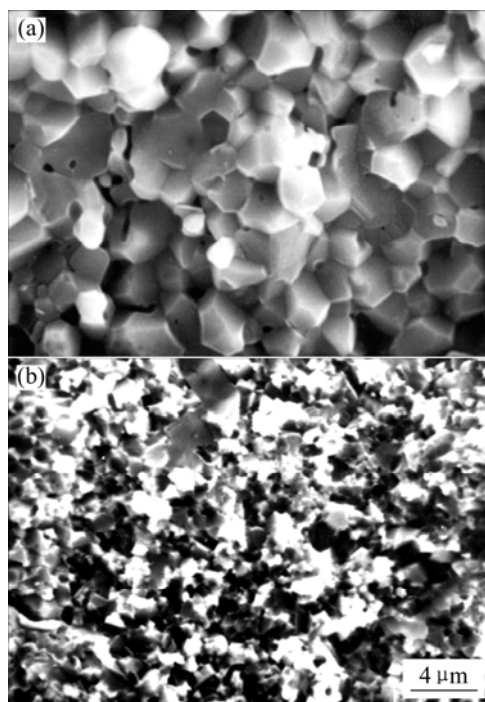


图 6 Al_2O_3 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 复合材料的断口形貌(SEM)

Fig.6 Fractural surfaces of Al_2O_3 (a) and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ (b) specimens

(Y_2O_3) 刀具的化学磨损较轻。

对刀具切削区的显微分析结果表明, 在各种切削速度下正常磨损后的形貌基本相同^[15-16]。图 7 所示为 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 陶瓷刀具达到磨钝标准时主切削刃和前刀面的形貌, 由图可以看出, 两者都在不同程度上存在后刀面塑性流动的迹象(图 7(a)标识 1)和弹坑痕迹(图 7(b)标识 2), 表现出磨粒磨损和粘结磨损的特征。 Al_2O_3 基复合刀具材料后刀面磨损的主要原因是高速切削下的塑性流动。在高温、高机械应力下 Al_2O_3 的蠕变导致裂纹的生成和扩展, 从而使后刀面棱边磨损(图 7(a)标识 3)。前刀面上的月牙洼磨损抗扩展缓慢, 刀尖和刃口形成的棱带逐渐变窄, 最后与月牙洼接通(图 7(a)标识 4), 使刀尖和刃口结构强度显著降低, 应力状态发生变化, 造成刀刃磨钝后期的破损失效, 而此时后刀面尚未进入(或尚未完成)正常的磨损阶段, 这是陶瓷刀具干切削合金钢的一个主要特点。在高速切削中靠近切削刃的部分区域被粘到陶瓷刀上的金属屑覆盖, 这些金属颗粒中存在许多裂缝, 裂缝产生的原因是切削结束时, 薄层切屑的高速冷却及金属与陶瓷的热胀系数不同, 因而在刀具层上产生拉应力而导致裂纹^[17]。当连续切削时, 刀具材料的质点或微粒被存在于裂纹间的切屑(工件)逐渐粘结并带走后, 刀具表面发生磨损(图 7(b)中的部分区域弹坑痕

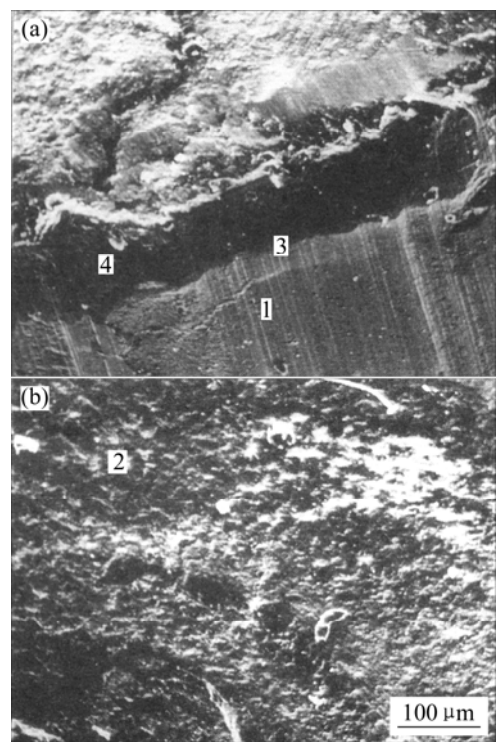


图7 陶瓷刀具磨损的形貌

Fig.7 Morphologies of wear pattern of ceramic cutting tools: (a) Primary cutting edge and back face; (b) Front face (crater region)

迹),随着高速切削流冲击刀具表面上的颗粒并将其带走,刀具表面磨损率随即增加。这就充分表明 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 刀具材料有高的力学强度、前刀面良好的抗热扩散性和抗氧化能力,有利于保持刀尖及刃口强度。在切削过程中 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 陶瓷刀具失效形态主要来自刀具材料的正常磨粒磨损和粘结磨损。

2.4 一元线性回归对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(3\text{Y})$ 刀具材料耐用度的评价

评价陶瓷刀具耐用度是刀具材料正常磨损时,刀具切削用量与耐用度的关系式满足 Taylor 公式^[18]:

$$T = \frac{C_T}{v_c^{1/m} f^{1/m_1} a_p^{1/m_2}} \tag{3}$$

式中 C_T 表示使用刀具寿命系数,与工作材料,刀具材料有关。 $1/m$ 、 $1/m_1$ 、 $1/m_2$, 分别表示各切削用量对刀具耐用度的影响程度。当分别讨论时, $v_c T^m = C_1$, $f T^{m_1} = C_2$, $a_p T^{m_2} = C_3$, 其中 C_1 、 C_2 、 C_3 为常数, T 为刀具耐用度,各式取对数分别得到 3 个关系式: $\lg v_c = -m \lg T + \lg C_1$, $\lg f = -m_1 \lg T + \lg C_2$, $\lg a_p = -m_2 \lg T + \lg C_3$ 。令这 3 个对数式分别为: $y = a + bx$, $y_1 = a_1 + b_1 x_1$, $y_2 = a_2 + b_2 x_2$, 用一元线性回归方法可求得 m 、 m_1 、 m_2 的数值分别是 (a, b) 、 (a_1, b_1) 、 (a_2, b_2) 估计值中的 b 、 b_1 、 b_2 值。其中系数 b 的最小二乘解为:

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, (i = 1, 2, \dots, n) \tag{4}$$

设有 n 对 (x_i, y_i) 分别对应为表 3 中的数据, 计算 b_1 、 b_2 系数的解法同上。经计算得 $m=b$, $m_1=b_1$, $m_2=b_2$ 值转化后分别为: $1/m=1.3$, $1/m_1=1.69$, $1/m_2=0.66$ 。由此得到 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 陶瓷刀具切削合金钢的刀具耐用度模型:

$$T = \frac{C_T}{v_c^{1.3} f^{1.69} a_p^{0.66}} \tag{5}$$

YT15 硬质合金刀具切削合金钢的耐用度模型^[15]:

$$T = \frac{C_T}{v_c^{4.7} f^{2.02} a_p^{0.71}} \tag{6}$$

在相同切削加工条件下,比较式(5)和(6)可知,它们的各项指数明显不同,根据 Taylor 公式定义, v_c 、 a_p 、 f 中切削参数最大指数值的项对降低刀具耐用度的影响最大。由此可见, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 陶瓷刀具车削

表 3 不同切削速度 v_c 、进给量 f 、切削深度 a_p 时的刀具耐用度

Table 3 Endurance live of cutting tools under different cutting speeds, amounts of feed and cutting depth

$f=0.1 \text{ mm/r}, a_p=0.5 \text{ mm}$		$a_p=0.5 \text{ mm}, v_c=140 \text{ m/min}$		$v_c=140 \text{ m/min}, f=0.1 \text{ mm/r}$	
$v_c/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	T/min	$f/(\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	T/min	a_p/mm	T/min
140	300	0.1	300	0.5	300
190	247	0.2	200	1.0	280
240	195	0.3	180	1.5	310
290	120	0.5	30	2.0	220

40CrMoNiA 时进给量 f 对刀具耐用度的影响最大,其次是切削速度 v_c , 切削深度 a_p 影响最小。而 YT15 硬质合金刀具受切削速度影响很大, 其次是进给量, 切削深度影响最小。这说明陶瓷刀具在高速下切削明显优于硬质合金刀具, 并且较适合精加工和半精加工, 最大优势是高速切削。

从图 8(a)可以看到切削速度对耐用度的影响呈缓慢线性关系, 当 $v_c=300 \text{ m/min}$ 时仍保持较高的耐用度。图 8(b)表示在加工中进给量的增加导致耐用度快

速下降, 但在 f 值在 $0.2\sim 0.3 \text{ mm/r}$ 之间时曲线变得平缓, 这段参数有利于提高加工切削率, 保持最佳耐用度。图 8(c)表示切削深度对耐用度的影响, a_p 在 $0.5\sim 1.5 \text{ mm}$ 范围对刀具耐用度影响不大, 在满足机床主轴刚度的条件下, 增加 f 值有利于提高生产效率。由此得到最佳切削条件为 $v_c=140 \text{ m/min}$, $a_p=0.5 \text{ mm}$, $f=0.3 \text{ mm/r}$, 此时 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 陶瓷刀具耐用度为 3 h 。

3 结论

1) Al_2O_3 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(2\text{Y})$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(3\text{Y})$ 复合材料的 Weibull 模数 m 值分别是 5.6、10.2 和 11.7。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(3\text{Y})$ 材料强度分散性和可靠性优于其它两种材料。

2) 在 $v_c=290 \text{ m/min}$, $a_p=0.5 \text{ mm}$ 和 $f=0.1 \text{ mm/r}$ 切削条件下, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 刀具材料耐磨性能明显优于 Al_2O_3 材料, 而 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(3\text{Y})$ 材料的耐磨性更优于 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(2\text{Y})$ 。

3) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 刀具材料的磨损形态主要来自切削过程中的磨粒磨损和粘结磨损。

4) 用一元线性回归方法对陶瓷刀具耐用度进行了评价, 计算出耐用度模型中 v_c 、 f 和 a_p 切削参数的指数值, 分别为 1.3、1.69 和 0.66, 影响 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 陶瓷刀具切削的最大因素是 f 进给量。

REFERENCES

- [1] Claussen N. Fracture toughenss of Al_2O_3 with an unstabilized ZrO_2 dispersed phase[J]. J Am Ceram Soc, 1976, 59(1): 49-51.
- [2] Becher P F. Slow crack growth behavior in transformation-toughened $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ ceramics[J]. J Amer Ceram Soc, 1983, 66: 485-488.
- [3] Tsukuma K, Ueda K, Matsushite K. High temperature strength and fracture toughness of Y_2O_3 Partially stabilized $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ composites[J]. J Am Ceram Soc, 1985, 689(60): C56-C57.
- [4] 苗赫濯. 新型陶瓷刀具的发展与应用[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(S1): 237-242.
- MIAO He-zhai. Development and applications of new types of cermic cutting tools[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(S1): 237-242.
- [5] 石增敏, 郑 勇, 刘文俊, 等. Ti(CN)基金属陶瓷刀具的切削性能[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(5): 805-810.
- SHI Zeng-min, ZHENG Yong, LIU Wen-jun, YUAN Quan.

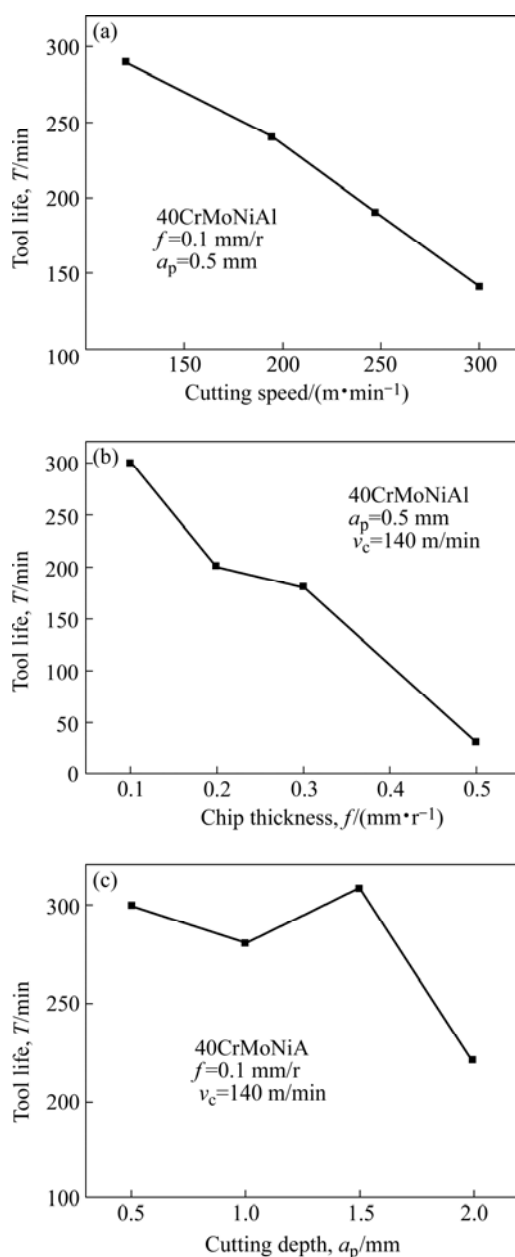


图 8 陶瓷刀具耐用度与切削速度(a)、进给量(b)、切削深度(c)的关系

Fig.8 Relationships among endurance and cutting speed (a), amount of feed (b) and cutting depth (c) for pattern of ceramic cutting tools

- Cutting performance of Ti(C, N)-based cermet tools[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(5): 805–810.
- [6] Kopač J. Influence of cutting material and coating on tool quality and tool life[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 78: 95–103.
- [7] 黄传真, 孙 静, 刘大志, 刘含莲, 邹 斌. 陶瓷刀具材料的研究现状[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004, 1: 1–6.
HUANG Chuan-zhen, SUN Jing, LIU Da-zhi, LIU Han-lian, ZOU Bin. Research status of ceramic tool materials [J]. CAM & AUTO Process Technol, 2004, 4: 1–6.
- [8] Green D J. 陶瓷材料力学性能导论[M]. 龚江宏, 译. 北京: 清华大学出版社, 2003: 264.
Green D J. An Introduction to the Mechanical Properties of Cermics [M]. GONG Jiang-hong, transl. Beijing: Tsinghua University, 2003: 264.
- [9] MA Wei-min, XIU Zhi-meng, WEN Lei, et al. Sintering densification and properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PSZ}(3\text{Y})$ ceramic composites [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2004, 14(2): 260–265.
- [10] 马伟民, 修稚萌, 毕孝国, 等. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 复合材料断裂过程中的相变及力学性能[J]. 金属学报, 2005, 41(1): 93–98.
MA Wei-min, XIU Zhi-meng, BI Xiao-guo, et al. Phase transformation and mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ composites during fracturing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2005, 14(1): 93–98.
- [11] 马伟民, 修稚萌, 闻 雷, 孙旭东. 含不同 Y_2O_3 的 ZrO_2 对 Al_2O_3 基陶瓷抗热震稳定性的影响[J]. 中国稀土学报, 2004, 22(2): 229–233.
MA Wei-min, XIU Zhi-meng, WEN Lei, SUN Xu-dong. Effect of Y_2O_3 contents in ZrO_2 on thermal shock resistance of Al_2O_3 composites[J]. Journal of The Chinese Rare Earth Society, 2004, 22(2): 229–233.
- [12] Rao P G, Iwasa M, Tannaka T, Kondoh I, Inoue T. Preparation and mechanical properties of Al_2O_3 -15wt.% ZrO_2 composites [J]. Scripta Materialia, 2003, 48: 437–441.
- [13] Abdullah D, Muammer N. Finite element analysis of bending occurring while cutting with high speed steel lathe cutting tools [J]. Materials & Design, 2005, 26: 549–553.
- [14] Tuan W H, Chen R Z, Wang T C. Mechanical properties $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ composites[J]. J Eur Ceram Sci, 2002, 22: 2827–2833.
- [15] Dow W E. Ceramic Cutting Tools(Material, Development And Performance) [M]. New Jersey: Park Ridge, 1994: 184–190.
- [16] Kim S Y. Flank Wear Studies on Alumina Tools in Steel Cutting [D]. USA : The University of Vermont and State Agricultural college, 1990: 28–35.
- [17] Narojczyk J, Werner Z, Piekosezewski J. Effects of nitrogen implantation on lifetime of cutting tools made of SK5M tool steel [J]. Surface Engineering & Vacuum Technology, 2005, 78: 229–233.
- [18] 陈日耀. 金属切削原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993: 107.
CHEN Ri-yao. Theories of Metal Cutting [M]. Beijing: China Machine Press, 1993: 107.

(编辑 龙怀中)