

基于不同隶属度函数的金属材料切削加工性模糊综合评价

李香飞

天津职业技术师范大学

摘要: 随着各种高性能工程材料的不断出现,为快速准确地制定这些材料的加工工艺,需要可靠地评估其切削加工性。目前常用且合理的评价方法是模糊综合评价法,确定最佳隶属度函数是其关键。本文分别构建正态型和分段型隶属度函数模型,对8种金属材料的可加工性进行模糊综合评价。结果表明:正态型隶属度函数所含参数较多且计算较复杂,但模糊综合评价结果优于基于分段型隶属度函数的结果;分段型隶属度函数形式简单,所含参数较少且计算较为快捷;当评价因素远离非模糊子集边缘区域时,评价结果与基于正态型隶属度函数的模糊综合评价结果一致。

关键词: 可加工性评价;正态型隶属度函数;分段型隶属度函数;模糊综合评价

中图分类号: TG501;TH162

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.04.016

Fuzzy Comprehensive Evaluation of Machinability for Metal Materials Based on Different Membership Functions

Li Xiangfei

Abstract: With the continuous emergence of high-performance engineering materials, the machinability of materials need to be reliably evaluated in order to obtain rapidly and accurately the processing technologies of these materials. The fuzzy comprehensive evaluation method is recognized as the most common and reasonable approach to this end. In the process of fuzzy evaluation of material processability based on fuzzy theory, it is the key to determine the optimal membership function. The normal membership function and the piecewise membership function model are constructed to evaluate the machinability of eight metal materials using fuzzy comprehensive evaluation. The results show that there are a number of parameters in the membership function of normal form that leads to the complexity of calculation process. However, the result of fuzzy comprehensive evaluation based on the normal membership function is better than that based on piecewise membership function. The piecewise membership function has fewer parameters and is simple in its form that results in the simplicity of computational process. The fuzzy comprehensive evaluation results from these two approaches are consistent when the values of the evaluation factor are far away from the marginal region of non-fuzzy subset.

Keywords: machinability evaluation; normal membership function; piecewise membership function; fuzzy comprehensive evaluation

1 引言

随着各种高性能工程材料的不断出现并得到广泛应用,研究和制订这些材料的合理加工工艺前,需要对其切削加工性进行评估,即评估材料的切削加工难易程度。评估材料可加工性的方法有单一指标评价法、相对切削分级法和综合评价法三类。而综合评价法中常用且合理的评价方法是模糊综合评价法,在基于模糊理论的金属材料可加工性综合评价过程中,应用模糊数学法的关键是建立符合实际的隶属度函数。确定隶属度函数的方法很多,有模糊统计法、指派法、借用已有的“客观”尺度法和二元对比法。

在金属材料可加工性综合评价过程中,常用指

派法确定隶属度函数。指派法是指根据问题的性质套用现成的某些函数,并由相关数据确定函数的中的参数^[1]。吴斌等^[2]在材料切削加工性评价数据库建立中使用正态型分布曲线作为隶属度函数图形,获得材料的模糊隶属度矩阵;杨志强等^[3]用分段型隶属度函数对石油机械常用材料的切削加工性进行了模糊评价;王双华等^[4]在微晶玻璃可加工性模糊评价中使用了中间型正态模糊分布函数作为隶属度函数;吴正星^[5]在对核磁手术机器人本体材料的可加工性中使用高斯隶属度函数进行了模糊评价;康志伯^[6]和李香飞^[7]在对镍基高温合金材料的切削可加工性模糊综合评价过程中同样使用高斯函数作为隶属度函数。

在材料加工性的模糊综合评价中最常用的是正态型隶属度函数。假定材料的物理机械性能符合正

态分布,则该类型函数则为指派法中众多现成函数形式中的一种。在实际评价过程中,如何构建最佳隶属度函数问题至今尚未完全解决,只能在函数构建过程中不断学习并加以修改,使其逐步完善。本文基于指派法建立了正态型和分段型的隶属度函数,对8种常用的金属材料(ZG230-450、1Cr18Ni9、45钢、40Cr、GCr15、Q235、LY11和GH3128)进行切削可加工性模糊综合评价。

2 隶属度函数构建方法

工件材料的切削加工性主要取决于材料的力学性能和物理性能(如硬度、强度、塑性、韧性和导热系数等),材料的化学成分和金相组织是影响力学性能和物理性能的主要因素^[8]。材料的加工性能事实上并不是其自身单一属性的体现,而是材料多个属性的综合反映。根据材料的硬度、抗拉强度、延伸率、冲击韧度和导热系数5个因素,将材料的可加工性分成几个模糊区域(易切削、较易切削等模糊区域),再进行等级细化。这种方法具有使用方便和简单的优点(见表1^[9])。

评价材料的可加工性时,可根据不同的情况选用不同类型的参数指标(刀具耐用度、切削力、切削温度、表面加工质量、断屑难易程度等)。采用切削力作为材料可加工性衡量指标时,材料的5个基本属性(硬度、抗拉强度、延伸率、冲击韧度和导热系数)对切削力的影响程度可基于灰色绝对关联度得到各因素的权重,即 $A = [0.22 \ 0.18 \ 0.18 \ 0.15 \ 0.26]$ ^[7]。

在材料的可加工性模糊综合评价方法中,以硬度、抗拉强度、延伸率、冲击韧度和导热系数作为评判因素集 $F, F = \{f_1, f_2, \dots, f_4, f_5\}$, f_j 为单因素集;以材料切削加工性分级表(0-9a)作为评语集 $C, C = \{c_0, c_1, c_2, \dots, c_9, c_{9a}\}$, c_i 为模糊子集;隶属度函数作为模糊特征函数表征评判因素属于模糊子集 c_i 的程度或等级。

2.1 正态型隶属度函数构建

采用隶属度函数指派方法并结合材料切削加工性分级表中各等级区间的特点,选择正态型

隶属度函数中偏小型、中间型和偏大型相结合的分布函数形式。正态型隶属度函数既能够捕捉到更多隶属度高的信息,又能过滤掉隶属度低的信息。

隶属度函数的具体确定方法:根据各因素变化对材料加工难易程度的影响,模糊表1中可加工性等级区间,即以 c_i 作为模糊子集 c_i' 的弹性边界,各等级区间边界处的隶属度值为0.5。对中间型正态隶属度函数进行变形。与表1相匹配的隶属度函数的一般形式为

偏小型

$$c'_{0j}(x_i) = \begin{cases} 1 & (x_i \leq a) \\ e^{-\left(\frac{x_i-a}{\sigma}\right)^2} & (x_i > a) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, 8, 9, 9a; j = 1, 2, 3, 4, 5$ 。

中间型

$$c'_{ij}(x_i) = \begin{cases} 0 & (|x_i - \bar{x}_i| > \sqrt{k}\sigma_i) \\ 1 - k\left(\frac{x_i - \bar{x}_i}{\sigma_i}\right)^2 & (|x_i - \bar{x}_i| \leq \sqrt{k}\sigma_i) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, 8, 9, 9a; j = 1, 2, 3, 4, 5; k > 0, k$ 为可调整参数; \bar{x}_i 为表1中某评判因素第 i 等级区间的均值; σ_i 为等级区间边界至等级区间均值的距离。

偏大型

$$c'_{ij}(x_i) = \begin{cases} 0 & (x_i \leq a) \\ 1 - e^{-\left(\frac{x_i-a}{\sigma}\right)^2} & (x_i > a) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, 8, 9, 9a; j = 1, 2, 3, 4, 5$ 。

根据隶属度函数的特点,切削加工性等级表中的最小级别和最大级别分别采用偏小型和偏大型隶属度函数,其余级别采用中间型隶属度函数。对各等级区间模糊化后,根据各等级区间边界处的隶属度值为0.5这一边界条件,能够确定中间型隶属度函数($k=2$)以及偏大型隶属度函数的其余参数值。以单一因素硬度(HB)为例,其隶属度函数如图1所示。

表1 材料切削加工性分级

切削加工性 等级代号	易切削		较易切削		较难切削				难切削		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9a
硬度(HB)	≤50	50~100	100~150	150~200	200~250	250~300	300~350	350~400	400~480	480~635	>635
抗拉强度(MPa)	≤169	169~440	440~589	589~785	785~981	981~1180	1180~1370	1370~1570	1570~1770	1770~1960	1960~2450
延伸率δ(%)	≤10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35	35~40	40~50	50~60	60~100	>100
冲击韧度(kJ/m ²)	≤196	196~392	392~589	589~785	589~785	981~1390	1390~1770	1390~1770	1960~2450	2450~2940	2940~3920
导热系数(W/(m·K))	419~293	293~167	167~83.7	83.7~62.8	62.8~41.9	41.9~33.5	41.9~33.5	25.1~16	16~8.37	<8.37	—

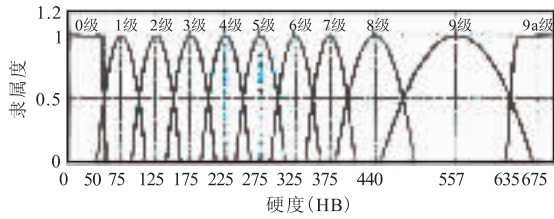


图 1 硬度隶属度函数

2.2 分段型隶属度函数构建

模糊分布中的分段型分布隶属度函数的一般形式^[1]为

偏小型

$$c'_{ij}(x) = \begin{cases} 1 & (x \leq a) \\ 0 & (x > a) \end{cases} \quad (4)$$

中间型

$$c'_{ij}(x) = \begin{cases} 0 & (x < a \text{ 或 } x > b) \\ 1 & (a \leq x \leq b) \end{cases} \quad (5)$$

偏大型

$$c'_{ij}(x) = \begin{cases} 0 & (x < a) \\ 1 & (x \geq a) \end{cases} \quad (6)$$

式中, c'_{ij} 为第 j 因素属于第 i 个等级的程度, 即隶属度值; a, b 为某一切削等级的上下边界。

根据各等级区间边界处的隶属度值为 0.5, 这一边界条件对上述隶属度函数形式进行调整。对单因素 j 隶属于模糊子集 c_i' 的程度大小分为不属于、边界处和完全属于三种类型。其中“不属于”的隶属度值为 0, “完全属于”的隶属度值为 1, 若 j 与边界值 a 或 b 相等时, 则认为 j 隶属于两相邻模糊子集 c^{i-1} 和 c_i' 的隶属度值为 0.5。根据该方法调整后的隶属度函数形式为

偏小型

$$c'_{ij}(x) = \begin{cases} 1 & (x \leq a) \\ 0.5 & (x = a) \\ 0 & (x > a) \end{cases} \quad (7)$$

中间型

$$c'_{ij}(x) = \begin{cases} 0 & (x < a \text{ 或 } x > b) \\ 0.5 & (x = a \text{ 或 } x = b) \\ 1 & (a < x < b) \end{cases} \quad (8)$$

偏大型

$$c'_{ij}(x) = \begin{cases} 0 & (x < a) \\ 0.5 & (x = a) \\ 1 & (x \geq a) \end{cases} \quad (9)$$

在对切削加工性评价时仍然采用偏小、中间和偏大相组合的形式。

3 案例分析

选取常用的 8 种金属材料, 其 5 个主要因素数

据见表 2^[7, 10]。

表 2 金属材料物理机械性能

材料名称	f_1 硬度 (HB)	f_2 抗拉强度 (MPa)	f_3 延伸率 δ (%)	f_4 冲击初度 (kJ/m ²)	f_5 导热系数 (W/(m·K))
ZG230-450	150	450	22	441	50.7
1Cr18Ni9	187	205	40	31	16.2
45	229	600	16	390	50.2
40Cr	207	980	9	470	32.5
GCr15	196	686	20	441	40.028
Q235	130	441	26	600	57.781
LY11	100	411.6	15	300	117.236
GH3128	418	735	40	700	11.3

3.1 基于正态型隶属度函数的模糊综合评价

利用 2.1 节所述的方法, 以 ZG230-450 为例, 对其可加工性进行模糊综合评价。通过计算其单一因素隶属度并得出隶属度矩阵 $R_{ZG230-450}$, 有

$$R_{ZG230-450} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.42 & 0.63 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.98 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.87 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

通过模糊算子计算出的 ZG230-450 模糊综合评价结果矢量 B 可表示为

$$B_{ZG230-450} = A \circ R_{ZG230-450} = [0 \quad 0.08 \quad 0.36 \quad 0.55 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (10)$$

由模糊合成算子 $M(\cdot, \oplus)$ 及最大隶属度原则, 在模糊矩阵 $B_{ZG230-450}$ 中 b_4 最大。根据表 1 可得出 ZG230-450 的可加工性在该表中的切削加工性等级为 3 级, 属于较易切削范围。采用同样的方法对余下的金属材料进行切削可加工性评价, 有

1Cr18Ni9 材料

$$B_{1Cr18Ni9} = A \circ R_{1Cr18Ni9} = [0.15 \quad 0.13 \quad 0 \quad 0.2 \quad 0 \quad 0 \quad 0.09 \quad 0.23 \quad 0.12 \quad 0 \quad 0] \\ \text{Max}(b_8) = 0.23$$

45 钢材料

$$B_{45} = A \circ R_{45} = [0 \quad 0.08 \quad 0.28 \quad 0.11 \quad 0.48 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \\ \text{Max}(b_5) = 0.48$$

40Cr 材料

$$B_{40Cr} = A \circ R_{40Cr} = [0.18 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.32 \quad 0.48 \quad 0.16 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \\ \text{Max}(b_6) = 0.48$$

GCr15 材料

$$B_{GCr15} = A \circ R_{GCr15} = [0 \quad 0 \quad 0.22 \quad 0.41 \quad 0.18 \quad 0.18 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \\ \text{Max}(b_4) = 0.41$$

Q235 材料

$$B_{Q235} = A \circ R_{Q235}$$

$$= [0 \quad 0.09 \quad 0.37 \quad 0.1 \quad 0.36 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$\text{Max}(b_3) = 0.37$$

LY11 材料

$$B_{LY11} = A \circ R_{LY11}$$

$$= [0 \quad 0.48 \quad 0.46 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$\text{Max}(b_2) = 0.48$$

GH3128 材料

$$B_{GH3128} = A \circ R_{GH3128}$$

$$= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.31 \quad 0 \quad 0 \quad 0.09 \quad 0.09 \quad 0.44 \quad 0 \quad 0]$$

$$\text{Max}(b_9) = 0.44$$

从各金属材料的切削加工性模糊综合评价结果可以看出, 不锈钢 1Cr18Ni9 属于 7 级; 从模糊角度看处于较难和难加工材料两大类之间, 总的来说其加工难度较大, 与实际加工经验相符; 45 钢属于 4 级, 对应于较易切削范围; 40Cr 可加工性模糊评价结果为 5 级, 在实际加工领域中常认为 40Cr 与 45 钢的切削加工性能较为接近, 模糊评结果也验证了这一点; 轴承钢 GCr15 的可加工性模糊评价结果为 3 级, 属于较易切削材料范围, 与 45 钢处于同一个模糊大类中, 根据其应用场合要求需有较高的耐磨性和较高的硬度; GCr15 在淬火后其硬度为 62 - 66HRC, 而在实际加工过程中经过普通退火后其硬度为 170 - 207HB, 能够获得很好的切削加工性能, 因此经过退火后, 其切削加工性进入了较易切削材料范围; 普通碳素结构钢 Q235 可加工性模糊评价结果为 2 级, 标准硬铝 LY11 可加工性模糊评价结果为 1 级, 均属于易切削材料; 镍基高温合金 GH3128 可加工性模糊评价结果为 8 级, 具有良好的焊接性能, 常用作航空发动机材料, 在高温下仍能保持较高的硬度, 属于较难加工的金属材料。

采用正态型隶属度函数对上述 8 种材料进行了切削加工性能的模糊综合评价, 经验证, 其评价结果与实际的加工经验基本相符合, 这样能够缩短金属材料切削加工性能的研究周期, 也为材料切削参数制定提供了理论指导。

3.2 基于分段型隶属度函数的模糊综合评价

通过表 1 可以得出 ZG230-450 的隶属度矩阵为

$$R'_{ZG230-450} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

通过式(10)计算出的模糊综合评价结果矢量

B 为

$$B'_{ZG230-450} = A \circ R'_{ZG230-450}$$

$$= [0 \quad 0 \quad 0.45 \quad 0.29 \quad 0.26 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

根据模糊合成算子 $M(\cdot, \oplus)$ 及最大隶属度原则, 由上可知金属材料 ZG230 - 450 在模糊集合 $B'_{ZG230-450}$ 中的最大隶属度值 $\text{Max}(b_3) = 0.45$, ZG230 - 450 模糊评价结果为表 1 中 2 级。采用同样的方法分别计算其余 7 种材料的可加工性等级。

1Cr18Ni9 材料

$$B'_{1Cr18Ni9} = A \circ R'_{1Cr18Ni9}$$

$$= [0.15 \quad 0.18 \quad 0 \quad 0.22 \quad 0 \quad 0 \quad 0.09 \quad 0.09 \quad 0.26 \quad 0 \quad 0]$$

$$\text{Max}(b_9) = 0.23$$

材料切削可加工性模糊综合评价结果为 8 级, 属于难切削材料。

45 钢材料

$$B'_{45} = A \circ R'_{45}$$

$$= [0 \quad 0.15 \quad 0.18 \quad 0.19 \quad 0.48 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$\text{Max}(b_5) = 0.48$$

材料切削可加工性模糊综合评价结果为 4 级, 属于较易切削材料。

40Cr 材料

$$B'_{40Cr} = A \circ R'_{40Cr}$$

$$= [0.18 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.33 \quad 0.22 \quad 0.26 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$\text{Max}(b_5) = 0.33$$

材料切削可加工性模糊综合评价结果为 4 级, 属于较易切削材料。

GCr15 材料

$$B'_{GCr15} = A \circ R'_{GCr15}$$

$$= [0 \quad 0 \quad 0.24 \quad 0.49 \quad 0 \quad 0.26 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$\text{Max}(b_4) = 0.49$$

材料切削可加工性模糊综合评价结果为 3 级, 属于较易切削材料。

Q235 材料

$$B'_{Q235} = A \circ R'_{Q235}$$

$$= [0 \quad 0 \quad 0.4 \quad 0.15 \quad 0.44 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$\text{Max}(b_5) = 0.37$$

材料切削可加工性模糊综合评价结果为 4 级, 属于较易切削材料。

LY11 材料

$$B'_{LY11} = A \circ R'_{LY11}$$

$$= [0 \quad 0.53 \quad 0.46 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$\text{Max}(b_2) = 0.53$$

材料切削可加工性模糊综合评价结果为 1 级, 属于易切削材料。

GH3128 材料

$$B'_{GH3128} = A \circ R'_{GH3128}$$

$$= [0 \ 0 \ 0 \ 0.33 \ 0 \ 0 \ 0.09 \ 0.09 \ 0.48 \ 0 \ 0]$$

$$\text{Max}(b'_g) = 0.48$$

材料切削可加工性模糊综合评价结果为 8 级,属于难切削材料。

3.3 正态型与分段型函数的结果比较

基于正态型与分段型两种隶属度函数的模糊综合评价结果见表 3。

表 3 正态型与分段型隶属度函数模糊综合评价结果

材料	材料切削可加工性等级	
	正态型	分段型
ZG230-450	2 级	2 级
1Cr18Ni9	7 级	8 级
45 钢	4 级	4 级
40Cr	4 级	4 级
GCr15	3 级	3 级
Q235	2 级	4 级
LY11	1 级	1 级
GH3128	8 级	8 级

由表 3 可以看出,基于两种隶属度函数的模糊综合评价方法计算的结果并不完全一致。金属材料 ZG230-450、45 钢、40Cr、GCr15、LY11 和 GH3128 评价结果一致,比较这 5 种材料的 5 个评价因素,发现该 5 个评价因素值均远离模糊子集边界区域。1Cr18Ni9 的两评价结果相近,Q235 的两评价结果相差较大。

经过对比材料特性发现,材料的某评价因素越接近模糊子集边界,通过正态型隶属度函数计算此评价因素在该边界两侧相邻模糊子集的隶属度值越接近。而分段型函数由于其自身的特性,不会随某评价因素接近模糊子集边界的程度大小而隶属度值发生变化,隶属度值始终为 1。只有在边界上隶属度值发生阶跃性变化为 0.5,如不锈钢材料 1Cr18Ni9 的导热系数为 16.2,表 1 中导热系数的 7 级和 8 级的边界值为 16。通过正态型隶属度函数计算 1Cr18Ni9 在 7 级和 8 级的隶属度值分别为 0.54 和 0.45,通过分段型隶属度函数计算出在 7 级和 8 级的隶属度值分别为 1 和 0。因此,通过模糊合成算子计算出的材料可加工性等级模糊评价结果会有差异,并且若材料的 5 种物理机械性能参数中接近模糊子集边界的参数越多,通过正态型隶属度函数和分段型隶属度函数得到的材料可加工性模糊综合评价结果差异越大。材料 Q235 抗拉强度接近切削等级 1 级和 2 级边界,其延伸率接近切削等级 3 级和 4 级边界,两者计算结果分别是可加工性等

级 2 级和 4 级。

通过正态型隶属度函数获得模糊评价结果更可靠,因为当以切削力作为衡量材料的可加工性能评价指标时,材料的切削力大小是随材料某评价因素而连续变化,而不是阶跃性变化。所以在处理模糊子集边界附近的隶属程度时,正态型隶属度函数优于分段型隶属度函数。而在模糊子集边界附近以外区域时,两者计算结果一致。但分段型隶属度函数因其函数形式简单,计算较正态型隶属度函数更加方便快捷。

4 结语

采用正态型和分段型两种隶属度函数对 8 种金属材料的可加工性能进行了模糊综合评价,两种方法计算出的结果存在一定的差异,其结论为:

(1) 正态型隶属度函数在处理模糊子集边界附近评价因素的隶属程度性能较好,函数特性能够反应出衡量指标与评价因素的关系,但参数较多且计算过程较为复杂;

(2) 分段型隶属度函数在处理非模糊子集边界附近区域的隶属度性能较好,因其参数较少,计算准确度高且方便快捷,但在模糊子集边界附近区域不能真实反应出衡量指标与评价因素的之间的真实关系;

(3) 使用模糊综合评价方法评估某金属材料的可加工性能时,可以观察待评价材料的 5 种主要影响因素值是否处于切削加工等级分界处,若无,可以选择分段型隶属度函数进行评价,若是,则选择正态型隶属度函数来获得较为准确的模糊评价结果。

参考文献

- [1] 谢季坚. 模糊数学方法及其应用(第四版)[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2013.
- [2] 吴斌,夏伟. 基于模糊理论和数据库技术的材料切削加工性评价[J]. 机械设计与制造工程,2000(2):12-15.
- [3] 杨志强,孔庆华. 石油机械常用材料切削加工性的模糊综合评判[J]. 精密制造与自动化,2006(4):35-36.
- [4] 王双华,张恒. 机械功能微晶玻璃可加工性能的模糊综合评价[J]. 材料导报,2009,23(20):115-117.
- [5] 吴正星. 核磁手术机器人本体材料的核磁兼容性和切削加工性研究[D]. 天津:天津大学,2016.
- [6] 康志伯. 镍基高温合金的切削性能及切削参数优化[D]. 北京:北方工业大学,2009.
- [7] 李香飞. GH3128 镍基高温合金切削性能研究[D]. 天津:天津职业技术师范大学,2016.

超精密切削 SiC_p/Al 复合材料力学性能仿真

王业甫¹, 李莉², 杨凯³

¹南京理工大学; ²南京军区南京总医院博士后科研工作站; ³中国人民解放军陆军航空兵学院

摘要: 研究了超精密切削加工 SiC_p/Al 复合材料的力学性能, 运用 ABAQUS 有限元软件建立三维有限元模型, 分析刀具前角和切削速度对切削力的影响。仿真和数据分析表明: 平均主切削力随切削速度的增大而增大, 随刀具前角的增大而减小; 由于 SiC 颗粒的存在, 切削时应力过大容易加快刀具磨损。

关键词: SiC_p/Al 复合材料; 有限元; 切削力

中图分类号: TG501.1; TH140.7; TB33

文献标志码: A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.04.017

Mechanical Properties Simulation of Ultra-precision Cutting on SiC_p/Al Composites

Wang Yefu, Li Li, Yang Kai

Abstract: This paper studies the mechanical properties of ultra-precision cutting SiC_p/Al composites, and establishes a three-dimensional finite element simulation model by using the finite element software ABAQUS to analyze the effects of tool rake, cutting speed on the cutting force. The results indicate that the cutting force increases with the increasing of cutting speed and decreases with the increasing of tool rake. Through analysing the stress cloud, the results show that the tool are worn easily for the large stress during cutting.

Keywords: SiC_p/Al composite; finite element; cutting force

1 引言

金属基复合材料 SiC_p/Al 具有良好的物理化学性能, 广泛应用于航空、航天、船舶、军事、电子封装等领域^[1]。很多学者研究 SiC_p/Al 复合材料的切削加工性能和表面形貌^[2,3], 由于试验研究切削加工性能的成本高, 对设备精密度的要求也比较高, 而通过计算机仿真来辅助研究能够系统分析影响切削的各种因素, 可以缩短研究周期, 节约试验设备和材料成本^[4]。

Ceretti E. 等^[5]早期进行切削模拟研究, 结果显示了 DEFORM 2D 在预测切削参数和锯齿状切屑形成方面的潜力; Zhang D. G. 等^[6]运用 ABAQUS 有限元软件研究了切削参数对 SiC_p/Al 复合材料的铣削表面残余应力的影响; 张华^[7]对切削过程中工件的应力场和应变场变化、切削力和切屑成形进行了分

析; 王景磊^[8]利用仿真和试验的方法分析不同切削参数对 SiC_p/Al 复合材料切削加工性能的影响; 王进峰等^[9]发现高硬度 SiC 颗粒会在加工表面形成微裂纹和空洞, 微裂纹的扩展是形成切屑的主要原因。

由于切削速度和刀具角度等是影响切削质量的重要因素, 本文运用 ABAQUS 有限元软件研究切削速度和刀具前角对切削力的影响, 分析影响刀具磨损的主要因素。

2 切削有限元模型建立

(1) SiC_p/Al 复合材料有限元模型

SiC_p/Al 复合材料由 SiC 颗粒和铝合金基体组成。在建立三维有限元微观模型过程中, 将 SiC 颗粒和 Al 基材料分开定义材料属性, Al 基定义为热弹塑性模型, SiC 颗粒定义为线弹性模型, 刀具定义为刚体。复合材料尺寸为 0.48mm × 0.9mm × 0.24mm, 工件下表面及四个侧面下半部分自由度施

收稿日期: 2018 年 4 月

[8] 李其钊, 郭在云, 关兆麟. 影响工件材料切削加工性的因素分析[J]. 机械工程与自动化, 2011(2): 209-211.

[9] 郑文虎, 张玉林, 詹明荣. 难切削材料加工技术问答[M]. 北京: 北京出版社, 2001.

[10] 陈垚, 于爱兵, 王敏. 用灰关联分析法确定性能参数对金属材料切削加工性的影响[J]. 制造技术与机床, 2006(9): 1-64.

2006(9): 1-64.

作者: 李香飞, 硕士研究生, 天津职业技术师范大学工程实训中心, 300222 天津市

Author: Li Xiangfei, Postgraduate, Engineering Training Center, Tianjin University of Technology Education, Tianjin 300222, China

加全约束,仿真力学模型如图1所示。

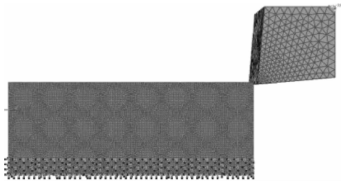


图1 有限元仿真模型

(2) SiC_p/Al 复合材料特性和刀具特性

为了研究 SiC_p/Al 复合材料的切削性能,建立 SiC 颗粒体积分数为 15% 的 SiC_p/Al 复合材料有限元模型。SiC 颗粒直径为 40 μ m,选用 PCB 刀具,仿真试验选取剪切破坏为材料的失效准则。工件和刀具的参数指标见表1。刀具的几何参数和切削参数见表2。切削时选择 Johnson-Cook 本构关系模型,参数见表3。

表1 工件和刀具参数

材料参数	PCB 刀具	Al	SiC
密度(kg/m ³)	4250	2820	3120
杨氏模量(GPa)	1147	70.6	420
泊松比	0.08	0.34	0.14
热膨胀系数(ppm/K)	4.0	23.6	4.9
导热率(W/(m·K))	2100	180	81
比热容(J/(kg·K))	525	880	427

表2 刀具几何参数和切削参数

参数	刀具前角(°)	刀具后角(°)	切削深度(μ m)	切削速度(mm/s)
数值	0,5,10	5	2	837,1256,1635,2093,2512

表3 Al 基体 Johnson-Cook 参数

材料	A(MPa)	B(MPa)	n	M	熔点(K)	变态温度(K)
Al	224	426	0.2	0.859	900	290

3 仿真结果分析

3.1 切削应力

在切削过程中,刀具前角 γ_0 为 5°、切削速度为 1635mm/s 时,应力场变化如图2所示。

由图2a可知,切削刃与铝基体作用时,铝基体受拉应力和压应力的作用,SiC 颗粒主要受沿切削刃径向方向的压应力,应力集中在 SiC 颗粒上,最大应力值约 6826MPa。为提取与切削刃相互作用的铝基材上的最大应力,给出应力范围为 0 - 710MPa 的应力云图。

如图2b所示,铝基材上的最大应力约 710MPa,超过其屈服应力 176.45MPa,发生剪切滑移。

图2c为刀具与 SiC 颗粒作用时的应力云图,此时 SiC 颗粒受沿切削刃径向方向的压应力和平行于加工表面的拉应力。由于 SiC 颗粒硬度大,最大应力集中在 SiC 颗粒上,约为 3.5×10^4 MPa,比切削刃与铝基材作用时铝基材上的最大应力大 50 倍左右,是导致刀具磨损速度快和易破损的主要原因之一。

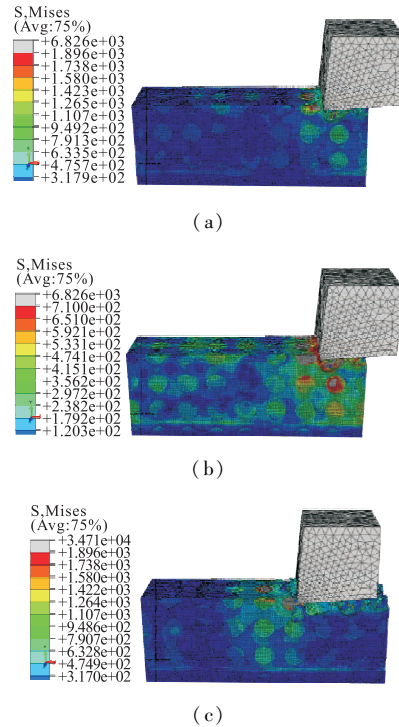


图2 切削应力云图

3.2 主切削力

切削速度 v_c 为 2093mm/s 时,不同刀具前角主切削力输出曲线见图3。从图3可知,主切削力呈现周期性波动。这是由于模型中 SiC 颗粒在铝基体中均匀分布。当切削铝基体时切削较平稳,切削力波动较小,而切削到 SiC 颗粒时,由于 SiC 颗粒硬度大,出现明显的应力集中,所以切削力迅速增大;随后 SiC 颗粒破裂从工件上脱落形成切屑,应力得到释放,切削力又迅速下降,进入下一个切削周期,所以切削力呈现周期性波动。

对比图3可知,随着刀具前角的增大,主切削力减小,且波动幅度降低。由于形成切屑时刀具前角越小,刀具前刀面与切屑之间的接触面积越大,摩擦力和挤压力越大,剪切作用越小,切削抗力和切削力就越大。

为进一步分析主切削力的变化规律,计算出不同刀具前角、切削速度下的平均主切削力。不同刀具前角时,平均主切削力随切削速度的变化曲线见图4。