



Effects of composite alloying on machinability of austenitic medium manganese steel and fuzzy comprehensive evaluation of machinability

Rui JIN^{1,2}, Zhiying REN^{1,2,3*}, Hongbai BAI^{1,2}, Yangyang YANG^{1,2}, Yujie ZHANG^{1,2}

1. Fuzhou University, School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou, Fujian 350108, China

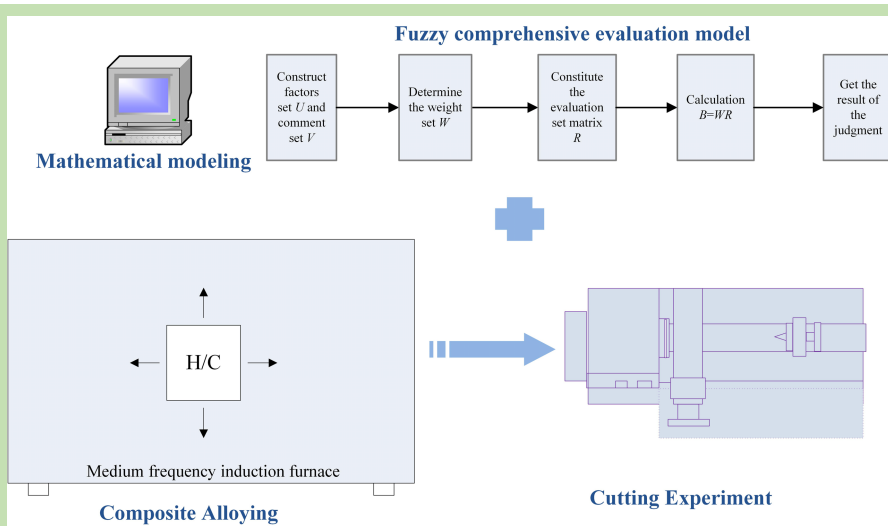
2. Military Engineering Innovation Center for Knitted Wire Mesh of Fujian Province, Fuzhou, Fujian 350108, China

3. Tribology Institute of Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China

Abstract: Austenitic manganese steel has been widely used in various fields as wear-resisting material, but it belongs to the typical difficult-to-machine material with extremely poor cutting performance, which limits the scope of its application to a large extent. The composition of traditional austenite medium manganese steel added with Mo, Cr, Nb and RE to combine alloying treatment was studied. The thermal

conductivity and machinability of prepared manganese alloy in the austenite was tested. The effect of composite alloying on machinability of austenitic manganese steel was explored. A second-level fuzzy comprehensive evaluation model to quantitatively analyze machinability with the austenitic manganese steel hardness, tensile strength, elongation, impact toughness and thermal conductivity as influencing factors was established. The results showed that the composite alloying treatment can improve machinability of austenitic manganese steel to a certain extent when contents of alloying elements Mo, Cr, Nb were 1.87wt%, 2.43wt% and 0.059wt%, the tool flank wear width (VB value) of the sample reduced by 14.3% compared to the non-alloyed ZGMn13. The correlation between the evaluation index obtained by the two-level fuzzy comprehensive evaluation model and the VB value obtained by the tool wear experiment was significant. The linear correlation coefficient was -0.87334 , which indicated a high degree of linear negative correlation, and the result was generally consistent with the VB value. In this way, it is proved that the evaluation model adopted was in line with actual production, and the evaluation result was accurate and effective.

Key words: austenitic manganese steel; composite alloying; machinability; VB value; fuzzy comprehensive evaluation



收稿: 2017-12-19, 修回: 2018-03-11, 网络发表: 2018-07-20, Received: 2017-12-19, Revised: 2018-03-11, Published online: 2018-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51375094); 河南科技大学高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室开放基金资助项目(编号: 201802)

作者简介: 金瑞(1992-), 男, 安徽省霍邱县人, 硕士研究生, 机械设计及理论专业, E-mail: 906889414@qq.com; 任志英, 通讯联系人, E-mail: renzyrose@126.com.

引用格式: 金瑞, 任志英, 白鸿柏, 等. 复合合金化对奥氏体中锰钢切削加工性的影响及切削加工性的模糊综合评判. 过程工程学报, 2018, 18(5): 1037-1044.

Jin R, Ren Z Y, Bai H B, et al. Effects of composite alloying on machinability of austenitic medium manganese steel and fuzzy comprehensive evaluation of machinability (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(5): 1037-1044, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.218108.

复合合金化对奥氏体中锰钢切削加工性的影响及切削加工性的模糊综合评判

金 瑞^{1,2}, 任志英^{1,2,3*}, 白鸿柏^{1,2}, 杨洋洋^{1,2}, 张宇杰^{1,2}

1. 福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108
2. 福建省金属橡胶军工创新工程行业技术开发基地, 福建 福州 350108
3. 福州大学摩擦学研究所, 福建 福州 350108

摘 要: 在传统奥氏体中锰钢中添加不同含量的合金元素 Mo, Cr, Nb 和 RE 进行复合合金化处理, 测试了其导热性及切削加工性, 研究了复合合金化对奥氏体中锰钢切削加工性的影响, 建立了二级模糊综合评判模型, 以奥氏体锰钢的硬度、抗拉强度、延伸率、冲击韧性和热导率作为影响因素, 对切削加工性进行定量分析. 结果表明, 复合合金化处理可一定程度上改善奥氏体锰钢的切削加工性, 合金元素 Mo, Cr 和 Nb 含量分别为 1.87wt%, 2.43wt% 和 0.059wt% 时试样的刀具后刀面平均磨损宽度 VB 值比未经合金化处理的 ZGMn13 钢减少了 14.3%. 用二级模糊综合评判模型对奥氏体锰钢的切削加工性进行评价, 通过本模型获得的评价指标与刀具磨损实验获得的 VB 值相关性显著, 相关系数为-0.87334, 存在高度的线性负相关, 评判结果与 VB 值基本一致, 评判模型符合生产实际, 结果准确有效.

关键词: 奥氏体中锰钢, 复合合金化, 切削加工性, VB 值, 模糊综合评判

中图分类号: TQ921 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2018)05-1037-08

1 前 言

奥氏体锰钢作为耐磨材料一直被广泛应用于各种领域^[1,2],但其切削加工性极差,属于典型的难加工材料,使其应用范围受到很大程度的限制. 通过综合分析影响切削加工性的众多因素可知,改善途径可从工件材料和技术条件上考虑^[3,4]. 通过研发新型切削刀具^[5-7]、优化切削参数^[8-10]和采用特殊方法辅助切削^[11-13]等手段提高奥氏体锰钢的切削效率,保证加工精度,还可通过恰当地调整奥氏体锰钢的成分及合理的热处理等手段^[14-16],在保证其它使用性能的前提下提高其切削加工性^[17].

本工作在传统奥氏体中锰钢中添加 Mo, Cr, Nb 和 RE 对其进行合金化处理,制备了综合性能优异的复合合金化奥氏体中锰钢^[18-20],以刀具后刀面平均磨损宽度 (VB 值)作为衡量切削加工性的指标,分析材料力学性能、导热性及加工硬化对切削加工性的影响,将材料的

基本属性作为影响因素,通过建立二级模糊综合评判模型^[21],获得材料的评判等级和评判指标,确定既能保证材料力学性能、耐磨性,又能改善导热性并提高切削加工性的最佳合金化处理方案,建立评判指标与 VB 值之间的换算关系,通过计算材料的评判指标估算 VB 值.

2 实验及模型

2.1 实验材料

用 SPZ-35 型中频感应电炉(深圳市双平电源技术有限公司)炼制 10 个样钢,其化学成分见表 1. 分两批次进行开炉实验,第 1 批 4 个试样(1~4),Nb 含量为 0.04%~0.20%,其它化学成分不变;第 2 批 6 个试样,试样 5~7 根据试样 1~4 的实验结果中综合性能最佳的 1 组,其它成分不变,Cr 含量控制在 2.0%~6.0%;试样 8 和 9 添加 0.03%RE,其中试样 8 不含 Nb;试样 10 为参照组,是未经合金化处理的 ZGMn13 钢.

表 1 奥氏体锰钢试样实际化学成分
Table 1 Actual chemical composition of austenitic manganese steel specimen

Sample	C/wt%	Mn/wt%	Mo/wt%	Cr/wt%	Nb/wt%	RE/wt%	Si/wt%	P/wt%	S/wt%
1	0.85	8.99	1.78	3.80	0.055	—	0.31	0.021	0.005
2	0.88	9.30	1.83	3.76	0.081	—	0.31	0.021	0.005
3	0.87	9.17	1.81	3.59	0.13	—	0.32	0.021	0.005
4	0.89	8.09	1.89	3.66	0.19	—	0.33	0.021	0.005
5	0.86	8.95	1.87	2.43	0.059	—	0.32	0.021	0.005
6	0.89	9.19	1.85	4.90	0.065	—	0.33	0.022	0.005
7	0.92	8.99	1.88	5.88	0.065	—	0.36	0.021	0.005
8	0.86	8.75	1.79	3.94	—	0.019	1.15	0.022	0.003
9	0.89	9.33	1.85	3.61	0.048	0.034	1.25	0.023	0.006
10	1.39	13.91	—	—	—	—	0.37	0.025	0.004

熔炼后的钢水浇注成 Keel 试块, 浇注温度为 1500~1550℃. 对试块切割并进行水韧处理. 用 CA6140 车床对试样进行刀具磨损实验. 针对奥氏体锰钢难切削加工性的特点, 使用具有硬度高、韧性好、热导率大和高温性能好的 YW2 硬质合金刀具^[7]. 采用线切割方法从 Keel 试块上截取直径 30 mm、长 110 mm 的圆棒.

实验中保持切削参数(背吃刀量 a_p 、进给量 f 、切削速度 v 及切削时间 t)不变, 测量不同试样在相同切削条件下刀具后刀面平均磨损宽度(VB 值).

2.2 模糊综合评判模型

模糊综合评判是基于模糊数学的隶属度理论将受

到多种因素制约的事物或对象进行总体评价的方法, 能将定性和定量因素相结合, 较好地解决各种非确定性问题, 还可顾及各评判对象各因素之间的层次性, 可避免由于因素过多造成权重分配不合理的弊端, 能较准确评估各因素对切削加工性的影响程度.

二级模糊综合评判的数学理论模型包括因素集 U 、评论集 V 、权数矩阵 W 和评判矩阵 R 等 4 要素^[22]. 模糊综合评判的逻辑步骤如图 1 所示.

2.2.1 建立因素集 U

奥氏体锰钢的切削加工性很大程度上取决于其力学、物理性能, 二级模糊综合评判的影响因素取硬度、抗拉强度、延伸率、冲击韧性和热导率, 如表 2 所示.

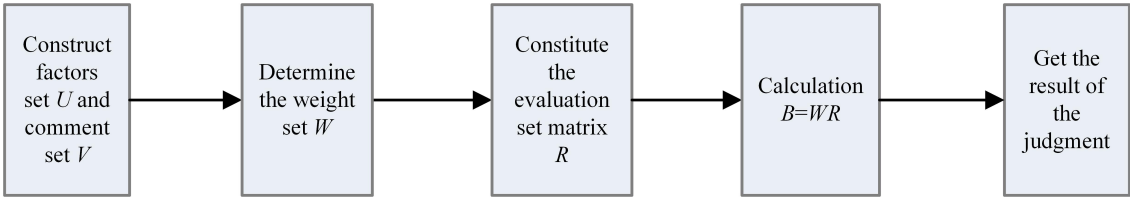


图 1 模糊综合评判逻辑步骤
Fig.1 Logic steps of fuzzy comprehensive evaluation

表 2 试样 1 的力学和物理性能
Table 2 Mechanical and physical properties of sample 1[#]

Hardness, HBS	Tensile strength, σ_b /MPa	Elongation, δ %	Impact toughness, α_{kv} /(J/cm ²)	Thermal conductivity, k /[W/(m·K)]
323	653.9	25.2	147.1	16.61

Note: HBS was hardness by standard GB/T1172-1999.

表 3 工件材料切削加工性分级^[23]
Table 3 Classification of machinability of workpiece materials^[23]

Machinability	Easily cut			Relatively easily cut		Relatively difficult to be cut			Difficult to be cut		
Grade code	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9 _a
Comment set V	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}	v_{11}
Hardness, HBS	≤ 50	>50	>100	>150	>200	>250	>300	>350	>400	>480	>635
Tensile strength, σ_b /MPa	≤ 200	~100	~150	~200	~250	~300	~350	~400	~480	~635	>2000
		>200	>450	>600	>800	>1000	>1200	>1400	>1600	>1800	
Elongation, δ %	≤ 10	~450	~600	~800	~1000	~1200	~140	~1600	~1800	~2000	>2500
		>10	>15	>20	>25	>30	>35	>40	>50	>60	
Impact toughness, α_{kv} /(J/cm ²)	20	~15	~20	~25	~30	~35	~40	~50	~60	~100	>100
		>20	>40	>60	>80	>100	>140	>180	>200	>250	
Thermal conductivity, k /[W/(m·K)]	417	~40	~60	~80	~100	~140	~180	~200	~250	~300	~400
		<292	<167	<83	<63	<42	<33	<25	<17	<8.5	
		~292	~167	~83	~63	~42	~33	~25	~17	~8.5	

将参数分为 3 类, 因素集 U 包含 $m=3$ 个因素子集, 即 $U=\{u_1, u_2, u_3\}$, 各因素子集 $u_i(i=1, 2, 3)$ 又包含若干个次级因素 u_{ij} , 分别为

$$u_1 = \{u_{11}, u_{12}\} = \{\text{Hardness, Tensile strength}\},$$
$$u_2 = \{u_{21}, u_{22}\} = \{\text{Elongation, Impact toughness}\},$$
$$u_3 = \{u_{31}\} = \{\text{Thermal conductivity}\}.$$

2.2.2 建立评论集 V

模糊综合评判中需建立一个统一的评判标准, 使评估结果能统一地反映在评论集中. 评论集 V 是以评判者对评判对象可能作出的各种总评判结果为元素构成的集合, 所以不论因素分为多少类, 自始至终都只存在一个评论集 $V=\{v_k|k=1, 2, 3, \dots, p\}$. 根据对金属材料切削加工性的研究, 可将切削加工性分为 11 个评判等级, 即 $p=11$, 见表 3^[23].

2.2.3 一级模糊综合评判

(1) 建立因素 u_i 的单因素评判矩阵 R_i

$$R_i = \begin{pmatrix} R_{i1} \\ R_{i2} \\ \vdots \\ R_{in} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \cdots & r_{i1p} \\ r_{i21} & r_{i22} & \cdots & r_{i2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{in1} & r_{in2} & \cdots & r_{inp} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中, $R_{ij}(j=1, 2, 3, \cdots, n)$ 为对次级因素 $u_{ij}(j=1, 2, 3, \cdots, n)$ 的单因素评判结果, $r_{ijk}(k=1, 2, 3, \cdots, p)$ 是由次级因素 u_{ij} 对备择集 V 的元素 $v_k(k=1, 2, 3, \cdots, p)$ 的隶属度 L_{ijk} 经归一化处理后的结果^[24].

$$R_{ij} = \frac{r_{ij1}}{(u_{ij}, v_1)} + \frac{r_{ij2}}{(u_{ij}, v_2)} + \cdots + \frac{r_{ijp}}{(u_{ij}, v_p)}, \quad (2)$$

简记为

$$R_{ij} = (r_{ij1}, r_{ij2}, \cdots, r_{ijp}). \quad (3)$$

(2) 建立因素 u_i 的权重集 W_i

根据各次级因素 u_{ij} 对因素 u_i 的重要程度而确定其权重 $w_{ij}(j=1, 2, 3, \cdots, n)$, 权重集 W_i 为

$$W_i = (w_{i1}, w_{i2}, \cdots, w_{in}), \quad (4)$$

式中, 各权重 w_{ij} 须满足归一化的条件, 即 $\sum_{j=1}^n w_{ij} = 1$. 为

充分反映材料各项基本属性对切削加工性的影响程度, 采取可变权重, 通过该方法着重强调主要因素对切削加工性的影响, 从而使评判结果更符合实际情况.

(3) 因素 u_i 的模糊综合评判

因素 $u_i(i=1, 2, 3, \cdots, m)$ 的模糊评判结果为模糊集 A_i :

$$A_i = W_i R_i = (w_{i1}, w_{i2}, \cdots, w_{in}) \begin{pmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \cdots & r_{i1p} \\ r_{i21} & r_{i22} & \cdots & r_{i2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{in1} & r_{in2} & \cdots & r_{inp} \end{pmatrix} = (a_{i1}, a_{i2}, \cdots, a_{ip}) \quad (i=1, 2, 3, \cdots, m), \quad (5)$$

式中, $a_{ik} = \sum_{j=1}^n w_{ij} r_{ijk} (k=1, 2, 3, \cdots, p)$.

2.2.4 二级模糊综合评判

(1) 建立因素 U 的单因素评判矩阵 R

由模糊集 A_i 既可组成一级模糊综合评判矩阵 A , 也是二级模糊综合评判的单因素评判矩阵 R :

$$R = A = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1p} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mp} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

(2) 建立因素 U 的权重集 W

根据因素 u_i 对评判对象的重要程度, 可确定其权重 $w_i(i=1, 2, 3, \cdots, m)$, 权重集 W 为

$$W = (w_1, w_2, \cdots, w_m), \quad (7)$$

式中各权重 w_i 也同样需要满足归一化条件, 即 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$.

此处仍强调主要因素对切削加工性的影响, 所以权重集 W 同样采用可变权重.

(3) 因素 U 的模糊综合评判

在一级模糊综合评判的基础上建立二级模糊综合评判, 评判结果可表示为

$$B = WR = (w_1, w_2, \cdots, w_m) \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1p} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mp} \end{pmatrix} = (b_1, b_2, \cdots, b_p), \quad (8)$$

式中,

$$b_k = \sum_{i=1}^m w_i a_{ik} \quad (k=1, 2, 3, \cdots, p). \quad (9)$$

2.2.5 二级模糊综合评判的结果及分析

根据二级模糊综合评判的结果, 通过最大隶属原则, 可得到切削加工性的评判等级. 为更细致划分切削加工性, 从而更清晰地区分其优劣程度, 评判指标可表示为

$$P = BC^T, \quad (10)$$

其中, C^T 为由评论集 V 得出的等级矩阵.

3 结果与讨论

3.1 复合合金化处理对中锰钢切削加工性的影响

奥氏体锰钢切削加工后的刀具后刀面平均磨损宽度(VB 值)见表 4. 由表 1 和 4 可知, 试样 1~4 随 Nb 含量增加逐渐增加, VB 值不断减小, 表明材料切削加工性得到一定程度的改善; 试样 1, 5~7 随 Cr 含量增加, VB 值先大幅提升再迅速降低, 其中试样 5 和 7 的 VB 值比未经合金化处理的试样 10 分别减少 14.3% 和 7.1%, 表明这两组试样切削加工性较优异.

图 2 为奥氏体锰钢 VB 值与热导率的关系, 表 5 为各试样经水韧处理后的热导率. 由图表可知, 所制奥氏体锰钢材料的热导率与刀具磨损实验获得的 VB 值总体上呈中度的线性负相关关系, 相关系数 $R_1 = -0.54117$. 由于奥氏体锰钢的导热性极差, 对切削加工性的影响尤为

明显, 导热性略微改善会较大幅度地提高材料的切削加工性. 恰当的合金化处理可在一定程度上改善奥氏体中锰钢的导热性, 使切削加工过程中切屑带走的热量更多, 进而提高其切削加工性.

表 4 刀具后刀面的平均磨损宽度
Table 4 Average wear width of tool flank

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Wear width of tool flank, VB/mm	0.19	0.19	0.16	0.17	0.12	0.21	0.13	0.18	0.19	0.14

Note: $v=20\text{ m/min}$, $f=0.16\text{ mm}$, $a_p=0.3\text{ mm}$, $t=30\text{ min}$.

影响奥氏体锰钢切削加工性的因素复杂多样, 除力学等物理性能外, 还有硬度、强度、塑性、韧性和导热性等内因. 奥氏体锰钢切削加工性很大程度上取决于基体中的硬质点. 添加合金元素及热处理使奥氏体基体中析出不同特性、形态、数量及分布的高硬度碳化物、氮化物等第二相质点. 这些第二相质点对奥氏体锰钢切削加工性的影响可概括为两个方面: 一方面, 第二相质点的硬度极高, 切削加工过程中会对刀具产生强烈的擦伤作用, 其硬度越高、形状越尖锐、数量越庞大、分布越弥散, 对刀具的磨损越严重; 另一方面, 第二相质点能增加材料的硬度及强度, 提高切削加工时材料抵抗剪切变形的抗力提高, 造成奥氏体锰钢试样变差.

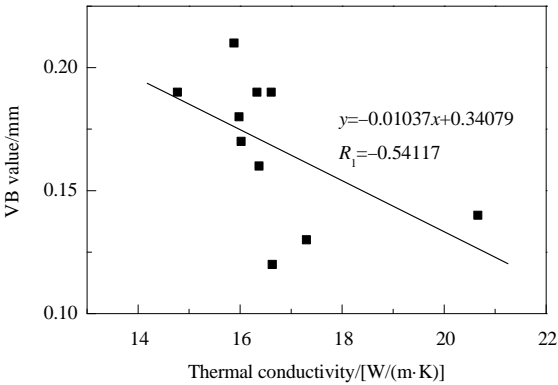


图 2 奥氏体锰钢 VB 值与导热率的关系
Fig.2 Relationship between the VB value of austenitic manganese steel and thermal conductivity

表 5 奥氏体锰钢经水韧处理后的热导率
Table 5 Thermal conductivity of austenitic manganese steel treated by water toughening

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Thermal conductivity/[W/(m·K)]	16.61	16.33	16.37	16.02	16.63	15.88	17.30	15.98	14.77	20.66

3.2 奥氏体锰钢切削加工性的二级模糊综合评判

以锰钢试样 1 为例, 用二级模糊综合评判对其切削性进行分析, 同样获得其它试样的切削加工性能评价等级和评价指标.

3.2.1 一级模糊综合评判

(1) 因素 u_i 的单因素评判矩阵 R_i

采用隶属度函数获得次级因素 u_{ij} 对评论集 V 中各元素 $v_k(k=1, 2, 3, \cdots, p)$ 的隶属度 L_{ijk} , 参考表 3(试样 1 的硬度项, 其中 $x=323$, $x_2=50$, $x_3=100$). 隶属度函数的种类繁多, 通过分析对比最终选用下式计算隶属度^[25]:

$$L_{ijk}(x, \mu_k, \sigma) = e^{-\left(\frac{x - \mu_k}{\sigma}\right)^2 \ln 2} \quad (k = 1, 2, 3, \cdots, p), \quad (11)$$

式中,

$$R_1 = \begin{pmatrix} R_{11} \\ R_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.069 & 0.887 & 0.044 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.002 & 0.18 & 0.804 & 0.014 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$
$$R_2 = \begin{pmatrix} R_{21} \\ R_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.001 & 0.443 & 0.553 & 0.003 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.27 & 0.722 & 0.008 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$
$$R_3 = (R_{31}) = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.002 \quad 0.435 \quad 0.56 \quad 0.003 \quad 0).$$

$$\sigma = \frac{1}{2}(x_{g+1} - x_g) \quad \begin{cases} x \in [x_g, x_{g+1}] \\ g \in (1, 2, 3, \cdots, p) \end{cases}, \quad (12)$$

$$\mu_k = \begin{cases} x_{k+1} - \frac{1}{2}(x_{g+1} - x_g) & (k < g) \\ \frac{1}{2}(x_k + x_{k+1}) & (k = g) \\ x_k + \frac{1}{2}(x_{g+1} - x_g) & (k > g) \end{cases}. \quad (13)$$

将隶属度 L_{ijk} 进行归一化处理得到 r_{ijk} :

$$r_{ijk} = \frac{L_{ijk}}{\sum_{k=1}^p L_{ijk}} \quad (k = 1, 2, 3, \cdots, p). \quad (14)$$

由式(1), (3)和(11)~(14), 并结合表 2, 能获得单因素评判矩阵:

(2) 因素 u_i 的权重集 W_i

$W_1=(w_{11},w_{12})=(0.6,0.4),$
 $W_2=(w_{21},w_{22})=(0.4,0.6).$

因素子集 u_1 中包含 2 个次级因素 u_{11} 和 u_{12} , 将最大隶属度对应于评论集 V 中较高等级的权重取为 0.6, 另一个取为 0.4, 以突出主要因素. 同样确定因素子集 u_2 的次级因素 u_{21} 和 u_{22} 的权重 W_1 和 W_2 :

(3) 因素 u_i 的模糊综合评判

$$A_1=W_1R_1=(0\ 0.001\ 0.072\ 0.322\ 0.006\ 0.041\ 0.532\ 0.026\ 0\ 0\ 0),$$
$$A_2=W_2R_2=(0\ 0\ 0\ 0.177\ 0.221\ 0.163\ 0.433\ 0.005\ 0\ 0\ 0).$$

3.2.2 二级模糊综合评判

由模糊集 $A_i(i=1, 2, 3)$ 组成的一级模糊综合评判矩阵 A , 也是二级模糊综合评判的单因素评判矩阵 R :

(1) 因素 U 的单因素评判矩阵 R

$$R=A=\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 0 & 0.001 & 0.072 & 0.322 & 0.006 & 0.041 & 0.532 & 0.026 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.177 & 0.221 & 0.163 & 0.433 & 0.005 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.002 & 0.435 & 0.56 & 0.003 & 0 \end{pmatrix}.$$

(2) 因素 U 的权重集 W

$W=(w_1,w_2,w_3)=(0.3,0.1,0.6).$

根据奥氏体锰钢切削加工性的影响因素, 一般情况下将因素集 U 的权重集 W 取为

(3) 因素 U 的模糊综合评判

$$B=WR=(0\ 0\ 0.02\ 0.114\ 0.024\ 0.029\ 0.204\ 0.269\ 0.336\ 0.002\ 0).$$

3.2.3 二级模糊综合评判的结果及分析

$P=BC^T=-1.446.$

由于试样 1 的切削加工性对评论集 V 的元素 v_9 的隶属度最大(其值为 0.336), 因此依据最大隶属度原则可判断试样 1 的切削加工性属于难切削的 8 级.

为计算奥氏体锰钢切削加工性的综合评判指标 $P=BC^T$, 将评论集 V 的等级矩阵设为

采用相同的二级模糊综合评判模型获得其余试样的切削加工性, 结果如表 6 和 7 所示. 由表可知, 所制奥氏体锰钢的切削加工性根据最大隶属度原则判断均属于较难切削和难切削的范围. 评判指标可更细致区分切削加工性, 且能直接反映材料切削加工性的优劣, 评判指标值越大切削加工性越好, 将评判指标排序即可知材料切削加工性的优劣.

$$C^T=(5,4,3,2,1,0,-1,-2,-3,-4,-5).$$

试样 1#的切削加工性综合评判指标为

表 6 奥氏体锰钢的模糊综合评判

Table 6 Fuzzy comprehensive evaluation of austenitic manganese steel

Machinability	Easily cut		Relatively easily cut		Relatively difficult to be cut			Difficult to be cut		
Grade code	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9 _a
Comment set, V	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}
1	—	—	0.020	0.114	0.024	0.029	0.204	0.269	0.336	0.002
2	—	—	0.016	0.139	0.006	0.120	0.090	0.264	0.363	0.002
3	—	—	0.048	0.226	0.015	0.050	0.076	0.401	0.184	0.001
4	—	0.002	0.089	0.245	0.004	—	0.038	0.415	0.206	0.002
5	—	0.005	0.278	0.077	—	—	0.042	0.498	0.100	—
6	—	0.002	0.106	0.052	—	0.034	0.121	0.277	0.400	0.008
7	—	—	0.140	0.194	0.006	0.003	0.269	0.254	0.134	—
8	—	—	0.008	0.251	0.081	0.001	0.005	0.383	0.271	0.002
9	—	0.004	0.139	0.195	0.002	—	0.074	0.338	0.244	0.004
10	0.030	0.013	0.193	0.045	—	0.031	0.098	0.564	0.027	—

表 7 奥氏体锰钢切削加工性的评判等级及评判指标

Table 7 Evaluation grade and evaluation index of machinability of austenitic manganese steel

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Evaluation grade	8	8	7	7	7	8	6	7	7	7
Evaluation index	-1.446	-1.393	-0.823	-0.725	-0.330	-1.477	-0.365	-0.985	-0.673	-0.436

奥氏体锰钢 VB 值与评判指标的关系如图 3 所示, 由图可知, 采用二级模糊综合评判模型获得的评价指标与刀具磨损实验获得的 VB 值相关性显著, 其线性相关系数为 $R_2 = -0.87334$, 表明二者高度线性负相关, 评判结果与实际情况符合良好. 总体变化规律为随评判指标减小, VB 值降低, 表明材料的切削加工性越来越优异. 线性相关系数 R_2 远大于 R_1 , 原因可能是 R_1 未考虑力学性能对材料切削加工性的影响, 综合材料的力学性能和导热性对切削加工性进行评判, 结果才更可靠.

采用二级模糊综合评判模型计算的材料切削加工性的评判结论与刀具磨损实验获得的 VB 值对所制奥氏体锰钢材料进行切削加工性分析结果基本一致, 表明二级模糊综合评判模型可对奥氏体锰钢的切削加工性进行准确评判, 结果可信度较高.

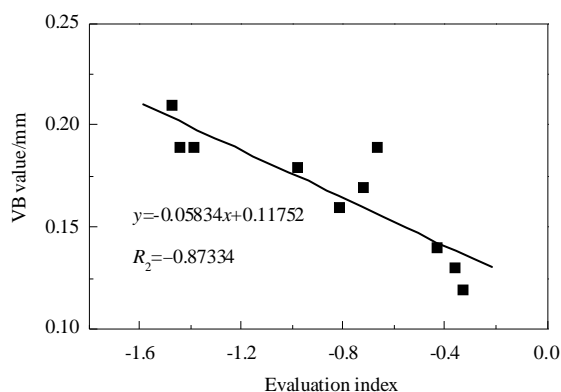


图3 奥氏体锰钢 VB 值与评判指标的相关性

Fig. 3 The correlation between the VB value of austenitic manganese steel and the evaluation index

复合合金化处理的试样 5 和 7 评判指标比未经合金化处理的 ZGMn13 钢提高, 这主要得益于热导率提高, 且试样 5 的力学性能和耐磨性较大程度上得到提高, 综合性能表现最优.

4 结 论

对奥氏体中锰钢进行复合合金化处理, 分析对其切削加工性能的影响, 并建立二级模糊综合评判模型对切削加工性进行定量分析, 得到以下结论:

(1) 奥氏体锰钢的热导率与刀具后刀面的平均磨损宽度(VB 值)的线性相关系数为 -0.54117 , 表明导热性是影响奥氏体锰钢切削加工性的重要因素之一. 导热性较好的试样 5、7 和 10 的切削加工性较优异, 经复合合金化处理的试样 5 VB 值最小, 比未经合金化处理的试样 10(ZGMn13 锰钢)降低了 14.3%.

(2) 二级模糊综合评判模型将奥氏体锰钢的硬度、抗拉强度、延伸率、冲击韧性和热导率作为影响因素,

对切削加工性进行评价, 得到材料的指评判标与 VB 值基本一致, 线性相关系数 -0.87334 . 所建二级模糊综合评判模型用于奥氏体锰钢切削加工性的评定符合生产实际.

参考文献

- [1] 杨芳, 丁志敏. 耐磨高锰钢的发展现状 [J]. 机车车辆工艺, 2006, (6): 6-9.
Yang F, Ding Z M. Wear resistance of high manganese steel [J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2006, (6): 6-9.
- [2] Dastur Y N, Leslie W C. Mechanism of work hardening in Hadfield manganese steel [J]. Metall. Mater. Trans. A, 1981, 12(5): 749-759.
- [3] 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.
Li Q F, Guo Z Y, Guan Z L. Analyzing the influencing factors of material machinability [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2011, (2): 209-211.
- [4] 杨普国, 孙余一, 周遐, 等. 影响材料切削加工性的各种因素探析 [J]. 有色金属设计, 2010, 37(4): 49-52.
Yang P G, Sun Y Y, Zhou X, et al. Analysis on various influencing factors of material cutting processability [J]. Nonferrous Metals Design, 2010, 37(4): 49-52.
- [5] Han G Q, Zhou P, Li J W. Study on cutting experiments of austenitic manganese steel riding wheel in coal mine [J]. Transactions of Materials & Heat Treatment, 2005, 26(4): 87-90.
- [6] 韩桂泉, 胡喜兰. TiN 涂层硬质合金刀具切削高锰钢的磨损破坏研究 [J]. 硬质合金, 2005, 22(2): 100-103.
Han G Q, Hu X L. Wear and fracture mechanism of TiN coated carbide tool for austenitic manganese steel cutting [J]. Cemented Carbide, 2005, 22(2): 100-103.
- [7] 张增志, 张利梅, 白兵占, 等. 聚晶立方氮化硼刀具切削高锰钢的磨损机制 [J]. 摩擦学学报, 2004, 24(3): 202-206.
Zhang Z Z, Zhang L M, Bai B Z, et al. Wear mechanism of cubic boron nitride tool in cutting austenitic manganese steel [J]. Tribology, 2004, 24(3): 202-206.
- [8] Han G Q, Zhang Z Z. Experimental research on cutting temperature of cemented carbide tools during cutting austenitic manganese steel [J]. Advanced Materials Research, 2012, 413(16): 347-350.
- [9] 宋时兰. 高锰钢切削刀具的设计 [J]. 机械设计与制造, 2006, (6): 173-174.
Song S L. Design of high manganese steel machining cutting tool [J]. Machinery Design & Manufacture, 2006, (6): 173-174.
- [10] Speedie J A, Black I, Ritchie J M. Finding the optimum cutting conditions for face milling 13% manganese steel using the taguchi design method and predictive equations [J]. Advanced Materials Research, 2010, 89/91: 527-532.
- [11] 陈文戈, 叶邦彦. 导电加热切削技术综述 [J]. 电加工与模具, 1999, (2): 28-31.
Chen W G, Ye B Y. Overview of electric hot machining technique [J]. Electromachining & Mould, 1999, (2): 28-31.
- [12] 彭立新. 等离子电弧加热切削加工工艺 [J]. 机械制造, 1999, (8): 23-24.
Peng L X. Plasma arc heating cutting process [J]. Manufacturing Techniques, 1999, (8): 23-24.
- [13] 李伟. 高锰钢超声振动车削的切削力研究 [D]. 大连: 大连交通大学, 2011: 17-23.
Li W. Research on cutting force in ultrasonic vibration turning of

- high manganese steel [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2011: 17–23.
- [14] 张美, 刘霞. 固溶时效热处理对高锰钢组织与性能的影响 [J]. 铸造技术, 2017, 38(3): 569–572.
- Zhang M, Liu X. Effect of solution and aging heat treatment on microstructure and properties of high manganese steel [J]. Foundry Technology, 2017, 38(3): 569–572.
- [15] 高波, 杨攀, 王剑. 时效处理对高锰钢组织及耐磨性的影响 [J]. 热加工工艺, 2016, 45(2): 193–195.
- Gao B, Yang P, Wang J. Effect of aging treatment on microstructure and wear resistant property of high manganese steel [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(2): 193–195.
- [16] 肖平安, 李晨坤, 轩翠华, 等. 水韧处理对 TiC 基高锰钢结合金组织与性能的影响 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(12): 1–6.
- Xiao P A, Li C K, Xuan C H, et al. Effect of water toughening treatment on microstructure and properties of high manganese steel bonded TiC [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(12): 1–6.
- [17] 武文革, 辛志杰. 金属切削原理及刀具 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 124.
- Wu W G, Xin Z J. Principles of metal cutting and cutters [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 124.
- [18] 陈绍春, 林新强, 朱康正, 等. 合金化和稀土变质处理对奥氏体中锰钢热导率及耐磨性的影响 [J]. 过程工程学报, 2017, 17(1): 144–150.
- Chen S C, Lin X Q, Zhu K Z, et al. Effect of alloying and rare earth modification on thermal conductivity and wear resistance of austenitic medium manganese steel [J]. Chin. J. Process Eng., 2017, 17(1): 144–150.
- [19] Chen S C, Ye H X, Lin X Q. Effect of rare earth and alloying elements on the thermal conductivity of austenitic medium manganese steel [J]. Int. J. Miner. Metall. Mater., 2017, 24(6): 670–674.
- [20] 傅定发, 蔡家财, 高文理. 多元合金化处理对高锰钢组织和性能的影响 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(7): 30–34.
- Fu D F, Cai J C, Gao W L. Effect of multi-elements alloying on the microstructure and properties of hadfield steel [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(7): 30–34.
- [21] Zadeh L A. Fuzzy sets [J]. Information and Control, 1965, (8): 338–358.
- [22] 黄景德, 王兴贵, 王祖光. 基于模糊评判的故障预测系统研究 [J]. 电子机械工程, 2000, 88(6): 42–55.
- Huang J D, Wang X G, Wang Z G. The study of fault estimation system based on fuzzy evaluation [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2000, 88(6): 42–55.
- [23] 北京市《金属切削理论与实践》编委会. 金属切削理论与实践 [M]. 北京: 北京出版社, 1985: 125.
- Beijing Metal Cutting Theory and Practice Editorial Board. Metal cutting theory and practice [M]. Beijing: Beijing Publishing House, 1985: 125.
- [24] 林树兴. 材料切削加工性的二级模糊综合评判 [J]. 机械, 1996, 23(5): 11–25.
- Lin S X. Two-level fuzzy comprehensive evaluation of the machinability of material [J]. Machinery, 1996, 23(5): 11–25.
- [25] 徐旬. 材料切削加工性的多算子二阶综合评判模型 [J]. 沈阳建筑工程学院学报, 1991, 7(3): 255–262.
- Xu X. A Model of multi-operator, two-level machinability multi-factorial evaluation [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 1991, 7(3): 255–262.