

微量碲对 38MnVS 非调质钢切削性能影响研究

刘年富^{1,2}, 李杰¹, 田钱仁¹, 徐翔宇¹, 付建勋^{1*}

(1. 上海大学材料科学与工程学院先进凝固技术中心, 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444; 2. 宝武杰富意特殊钢有限公司, 广东 韶关 512123)

摘要:为探讨碲改质对非调质钢切削性能的影响机制, 对 38MnVS 非调质钢进行了加碲的硫化物改质试验, 并对比加碲对钢中硫化物形态及切削性能的影响。结果表明, 加入微量碲(0.0020%)后钢中硫化物形态显著改善, 硫化物长宽比降低; 由于加碲后硫化物形态的改善, 降低了切削过程中的切削力, 减小了刀具的磨损, 阻止了积屑瘤的产生, 同时改善了工件表面粗糙度, 从而改善非调质钢的切削性能。

关键词:非调质钢; 切削性; 碲; 硫化物

中图分类号: TF76, TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)01-0182-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.01.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effect of micro-content tellurium on cutting performance of 38MnVS non-quenched and tempered steel

Liu Nianfu^{1,2}, Li Jie¹, Tian Qianren¹, Xu Xiangyu¹, Fu Jianxun^{1*}

(1. Shanghai University Center for Advanced Solidification Technology (CAST), State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Baowu JFE Special Steel Co., Ltd, Shaoguan 512123, Guangdong, China)

Abstract: In order to explore the mechanism of effect of tellurium modification on the machinability of non-quenched and tempered steel (NQTS), a sulfide modification test of 38MnVS NQTS with tellurium was carried out, and effect of tellurium modification on morphology of sulfide and machinability of steel was compared. The results show that with tellurium addition, the morphology of sulfide in steel is significantly improved, and the aspect ratio of sulfide decreases. Due to the improvement of sulfide morphology after tellurium modification, the cutting force during cutting process is reduced, therefore tool wear is reduced and the generation of chip buildup is prevented as well. Consequently, the work-piece surface roughness is improved, thus improving the cutting performance of NQTS.

Key words: non-quenched and tempered steel, machinability, tellurium, sulfide

0 引言

切削性是非调质钢材料重要的加工性能之一,

其代表着钢在切削加工后成为合格零件的难易程度, 切削性能通常可以用刀具寿命、切削力和工件表面粗糙度等指标来衡量^[1-4]。切削性能是由三个主要

收稿日期: 2022-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(项目号: No. 51874195)。

作者简介: 刘年富, 1981 年出生, 男, 博士, 主要从事钢铁新材料开发, E-mail: A28285@baosteel.com; *通讯作者: 付建勋, 1969 年出生, 男, 博士, 教授, E-mail: fujianxun@shu.edu.cn。

因素组成, 即材料、工具和切削参数^[5]。

通常钢材本身切削性能的好坏由钢材的化学成分、基体组织以及钢中非金属夹杂物决定。大量研究表明^[6-8], 中碳非调质钢的化学成分如碳含量、硫含量以及强硬度等因素对其切削性有很大影响。

目前, 为了提高非调质钢的切削性, 往往会在钢中加入适量的易切削元素, 如硫、钙、硒、铅、铋、碲等。硫、碲等易切削元素一般与钢中锰元素形成 MnS、MnTe 等化合物, 利用缺口效应、润滑效应来提高钢材的切削性能。易切削元素与钢中硫化物相结合, 通过控制硫化物形态来影响钢材的切削性能^[9], 随着硫化物夹杂长宽比的降低, 钢材的切削性指数逐渐升高, 切削性能更好。

表 1 38MnVS 钢主要化学成分
Table 1 Main chemical compositions of 38MnVS6 steel

试样	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Ni	Ti	Te
AN	0.39	0.56	1.40	0.010	0.054	0.17	0.13	0.03	0.012	—
AM	0.39	0.57	1.42	0.010	0.054	0.17	0.13	0.03	0.013	0.002 3

1.2 主要生产工艺

非调质钢生产主要工艺: 转炉冶炼(BOF)-钢包精炼(LF)-真空精炼(VD)-连铸(CC 240 mm×240 mm)-连轧(CR)。VD 后添加碲铁包芯线, 其关键工艺控制如下: ①VD 处理结束后, 喂入含纯碲粉的包芯线 100 m, 喂线速度 150 m/min, 碲线喂入钢水深度要求≥200 mm。按碲的收得率的 50% 计算, 目标碲质量分数为 0.002 0%; ②喂完碲线 2 min 后, 喂入 50 m 纯钙线, 随后立即投入碳化稻壳保温和覆盖剂。

2 硫化物及组织性能检测

2.1 硫化物夹杂检测

首先对非调质钢棒材中硫化物的形态进行分析, 光学显微镜的观察结果表明碲改质(AM 样)后, 硫化物尺寸明显减小, 硫化物形态呈椭球状或短簇状, 长宽比降低, 长条状硫化物数量减少。对钢中硫化物面积、等效直径和长宽比进行统计分析, 统计结果如表 2 所示。

采用扫描电镜和能谱仪对 AM 和 AN 试样中夹杂物二维形貌及元素含量进行观察和分析, 结果表明 AN 钢中硫化物均为细长条状。而 AM 钢由于加入的碲固溶在硫化物中, 使硫化物长宽比减小,

笔者采用微量碲改善非调质钢的硫化物, 对碲改质与未改质的非调质钢棒材进行车削对比试验, 对钢材的切削性能进行量化评价, 分析了碲对非调质钢切削性能的影响规律, 为改善非调质钢的切削性能提供了指导。

1 试验材料及生产工艺

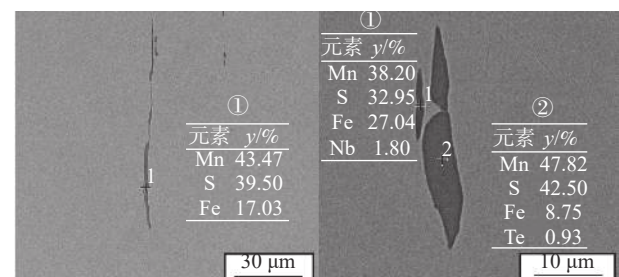
1.1 试验材料成分

试验所用材料为某钢企生产的碲改质处理(A-Modification, AM)和未改质处理(A-Nonmodification, AN)的 38MnVS 非调质钢棒材。两种 38MnVS 棒材的直径为 Ø60 mm, 其主要化学成分如表 1 所示。

且钢中硫化物分布均匀, 有利于提高钢的力学性能和切削性能, 如图 1 所示。

表 2 非调质钢中硫化物评级情况
Table 2 Ratings for sulfide inclusion in NQTS

试样	硫化物级别		平均面积/ μm^2	等效直径/ μm	平均长宽比
	细系	粗系			
AN	3.0	2.0	14.03	4.01	4.92
AM	2.5	1.5	12.89	3.61	2.91



(a) AN 钢中的硫化物 (b) AM 钢中的硫化物

图 1 硫化物形貌及能谱分析

Fig. 1 Morphology and energy spectrum analysis of sulfide inclusions

2.2 基体组织及硬度检测

采用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀两组试样, 并在光学显微镜下观察二者的组织差异, 统计结果表明二者基体组织均为铁素体+珠光体, 其中铁素体含量

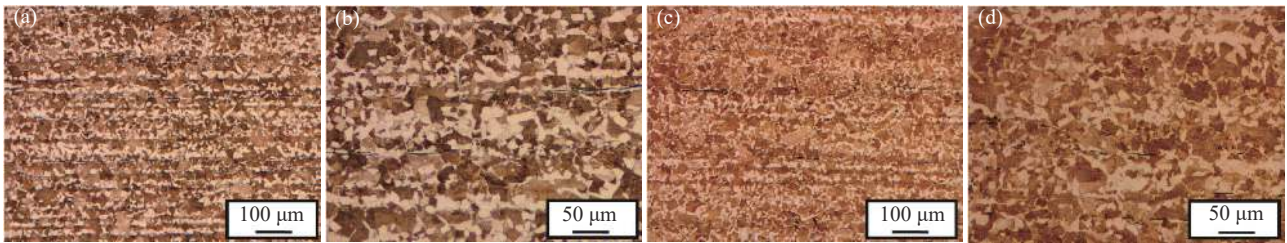
(单位面积占比)如表3所示。AN钢和AM钢的各组织含量接近,AN钢中铁素体明显呈带状分布,AM钢中的铁素体也呈带状分布,但较AN钢不那么明显,如图2所示。

对两组试样进行维氏硬度检测,在试样上每隔200 μm选取一个点,总共测32个点的硬度,维氏硬度计施加载荷500 g,最后取平均值作为试样的硬度。两组试样的硬度检测结果表明两组试样钢中的硬度

相近,分别为268.4(AN)、270.2(AM),这与在基体组织中铁素体单位面积含量的结果是一致的。

表3 两种材料铁素体含量及显微硬度测量结果
Table 3 Measurement results of ferrite fraction and microhardness of the two steels

试样	铁素体含量/%	硬度(HV)
AN	26	268.4
AM	28	270.2



(a)、(b)AN钢; (c)、(d)AM钢

图2 两种材料基体显微组织

Fig. 2 Microstructure of AN and AM steels

3 切削性能测试与分析

3.1 切削试验方案

通过对比分析两种38MnVS非调质钢棒材干式车削加工过程中的切削力、刀具磨损量及材料表面粗糙度来对其切削性能进行评价。

首先选用不同的切削速度(120、150、180 m/min)、进给量(0.2、0.4、0.6 mm/r)和切削量(0.2、0.5、0.8 mm)共27组参数进行切削预试验,选取最佳参数避免切削过程中车刀颤振对试验造成较大的误差^[10]。

预试验后,在其它切削参数保持不变的情况下,以150 m/min的切削速度、0.5 mm的切削量、0.6 mm/r的进给量将两种材料从直径Ø58 mm切削到Ø33 mm,总共进行25次走刀,选取中间走刀平稳的15次连续数据,用Kistler9257B测力计检测每一次切削时产生的切削力。在更换材料的同时更换刀具,保证每种材料在切削时都使用全新的刀具。切削完成后,在扫描电镜下观察刀具磨损情况并测量磨损长度,用表面粗糙度测量仪测量材料表面粗糙度。

3.2 切削性能评价

3.2.1 切削力评价

试验测得的切削力数据如图3所示,切削力由测力计分解为 F_x 、 F_y 和 F_z 。 F_x 是进给方向上的切削力分量,称为进给力; F_y 是径向的切削力分量,称为切深抗力; F_z 是切向方向的切削力分量,称为主切

削力。切削力合力 F 的计算公式如式(1)所示。

$$F_{\text{合}} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

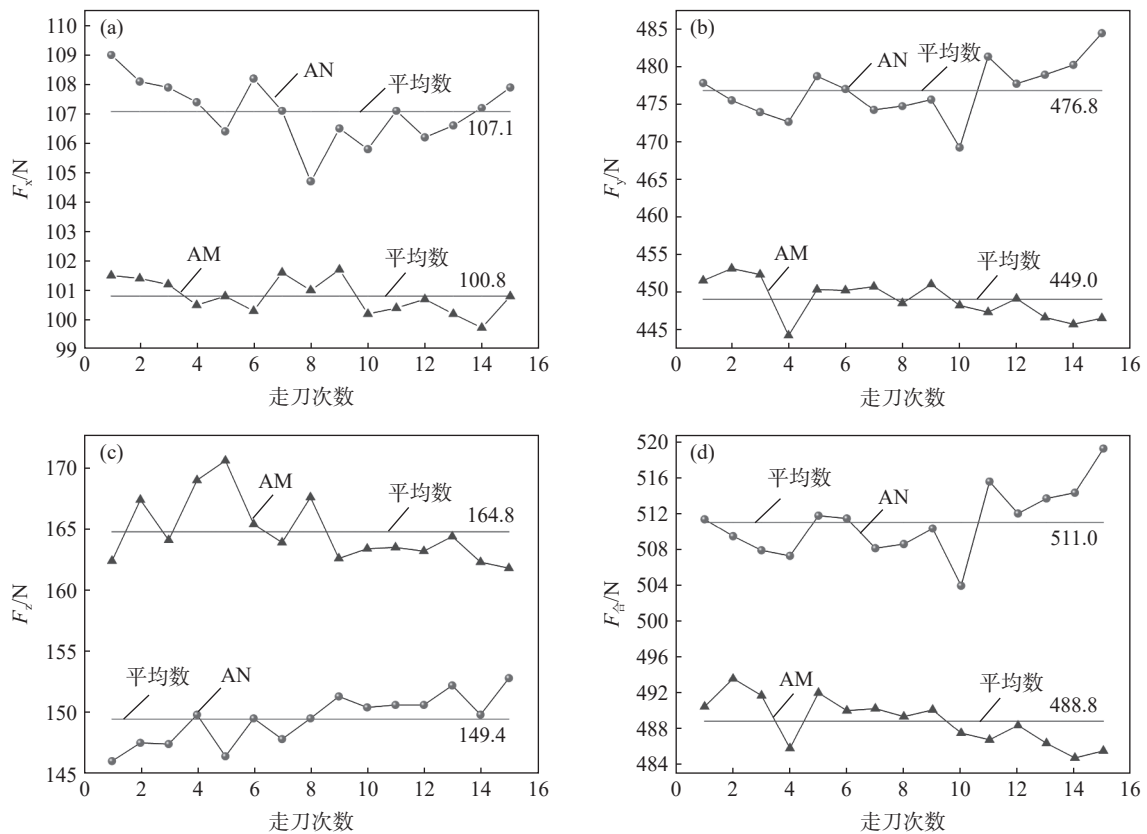
随着切削刀次的增加,两种材料在三个方向上的切削力没有明显变化,切削过程较为平稳,切削力数据可靠,不同方向上的切削力如图3和表4所示。

两种材料的切削力 F_x 和 F_z 差异不明显,在10~20 N;而在 F_y (切深抗力)上有较大的差异,切深抗力对零件加工精度和表面质量有很大影响。磷改质非调质钢AM的切深抗力为449.0 N,未改质非调质钢AN的切深抗力为476.8 N。而从切削合力数据 $F_{\text{合}}$ 不难发现,磷改质非调质钢的切削合力最小,为488.8 N,未改质非调质钢切削合力为511.0 N,降低约4.5%。可见,磷改质后非调质钢的切削合力有一定程度的降低。

3.2.2 刀具磨损分析

为避免颤振现象的发生,试验采用的车削刀片具有圆形连续的切削刃,将切削过后的刀片经超声波清洗干净,用扫描电镜观察分析刀片的磨损位置,从而判断其实际磨损范围。

从SEM观察到AN钢切削后的刀片磨损严重,表面涂层有大面积磨损,且刀具表面黏附着工件材料基体成分;AM钢切削后的刀片涂层磨损面积较小,表面有磨损痕迹,但损坏程度较低,如图4所示。AN钢和AM钢车削刀片磨损长度分别为3.75 mm和1.73 mm(如表5所示),说明磷改质可以降低刀具磨损量,该结果与切削力的测试结果一致。



(a) F_x 方向力; (b) F_y 方向力; (c) F_z 方向力; (d) $F_{合}$ 合力

图 3 两种材料不同方向的切削力

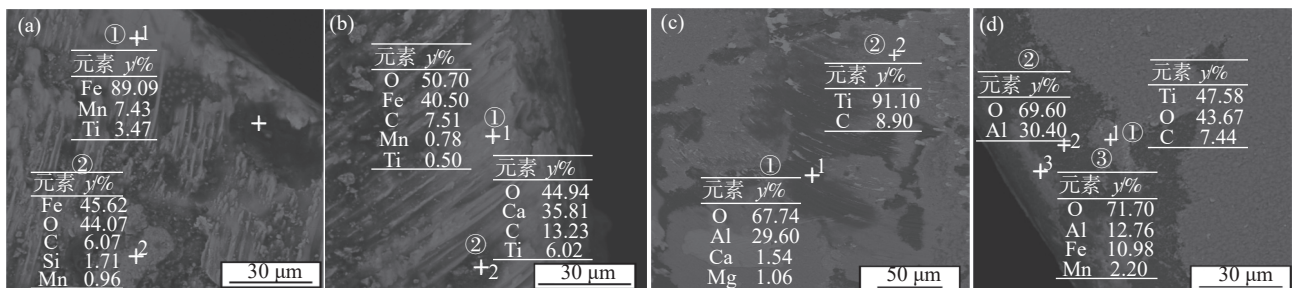
Fig. 3 Cutting forces in different directions for the two steels

表 4 不同材料切削力的平均值

材料	F_x/N	F_y/N	F_z/N	$F_{合}/N$
AN	107.1	476.8	149.4	511.0
AM	100.8	449.0	164.8	488.8

3.2.3 表面粗糙度分析

切削加工表面粗糙度主要由三方面因素产生: ①刀具几何尺寸因素, 影响残留材料的高度来影响表面粗糙度^[11]; ②切削不稳定因素, 如材料塑性变形、系统高频振动、刀具磨损, 切削过程中刀具上的积屑瘤、切削颤振、材料表面缺陷等均会影响工件的表面粗糙度; ③刀具几何参数、切削参数^[12-13]。



(a)AN 钢最外层; (b)AN 钢次外层; (c)AM 钢最外层; (d)AM 钢次外层

图 4 两种材料的刀具磨损位置及 EDS 分析

Fig. 4 Tool wear location and EDS analysis for AN and AM steels

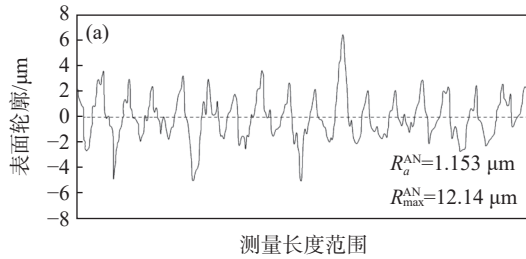
表面粗糙度数值一般是指轮廓的算术平均偏差 R_a , 用表面粗糙度测量仪测量两种材料最终的表

面粗糙度, 表面轮廓如图 5 所示。然后根据轮廓图计算出对应的轮廓最大高度 R_{max} 值。计算得到 AN

钢和 AM 钢加工后的表面粗糙度分别为 $1.153 \mu\text{m}$ 和 $0.587 \mu\text{m}$ 。该结果印证了碲改质能够降低 38MnVS 非调质钢加工后的表面粗糙度,从而改善加工性能。

轮廓最大高度 R_{max} 值可表示为式(2)。

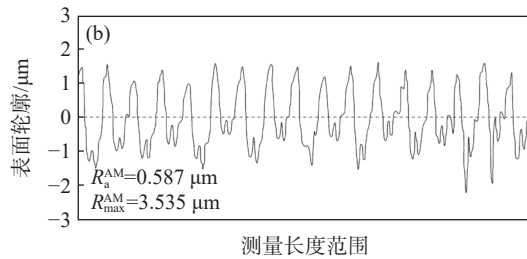
$$R_{\text{max}} = \frac{f^2}{8r} \quad (2)$$



式中, f 的大小为进给量 (mm); r 为刀口圆弧半径, $r=6 \text{ mm}$; R_{max} 为轮廓最大高度 (mm)。

表 5 两种材料的车削刀片磨损情况
Table 5 Wear of turning inserts for AN and AM steels

材料	刀片磨损长度/mm	改善比值/%
AN	3.75	-
AM	1.73	53.87



(a) AN 钢; (b) AM 钢

图 5 两种材料表面粗糙度分析情况

Fig. 5 Surface roughness analysis for AN and AM steels

根据式(2)可以计算出理论 R_{max} 为 $7.5 \mu\text{m}$ 。实际切削过程中, R_{max} 值还会受到加工材料表面的塑性变形、弹性回弹、受热膨胀的影响,当考虑材料特性,实际情况下的 R_{max} 值比理论计算的要小。从实际测量结果可以看出, AM 钢的 R_{max} 值为 $3.530 \mu\text{m}$, 小于理论值,符合实际情况。AN 钢的 R_{max} 值大于理论值,表明 AN 钢的表面粗糙度受到了不利因素的影响,导致其有所增大。除了材料本身塑性、韧性的影响之外,刀具磨损、积屑瘤等情况对表面粗糙度也有很大的影响。故切削 AN 钢的刀具磨损程度比 AM 钢要大,所以 AM 钢的表面粗糙度要低于 AN 钢。

夹杂物的应力集中效果大小受夹杂物类型、形态、尺寸、夹杂物与基体的弹性性质、热膨胀系数等影响^[14-15]。硫化物引起的应力集中增加值平均为 4%,而钙系夹杂物的应力集中增加值仅为 0.05%。同类夹杂物形态不同,应力集中效果也有差异,当 E'/E 比值大于 1 时 (E' 为夹杂物的弹性模量, E 为钢基体的弹性模量),则球状或近似球状夹杂物的应力集中效果远大于长条状夹杂物。碲改质后的非调质钢形成大量均匀分布的椭球状硫化物,在切削过程中由于切削力的作用将产生应力集中,同时硫化物夹杂物阻碍位错运动,使塑性变形困难,将在椭球状硫化物夹杂物端部产生附加应力,导致裂纹的产生。微裂纹容易扩展产生断屑从而减小了切削阻力^[16],切削力测量结果也表明加碲后切削力降低,从而改善了切削性能。

另外,硫化物对材料的内摩擦系数无降低作用,但出于数量多、尺寸较大,在切削时能覆盖在前刀面上,防止刀具与切屑的粘着,从而减轻刀具与切屑的外摩擦,可以使切削过程中形成“滞流层”困难,阻止积屑瘤的产生,改善工件表面粗糙度。在切削过程中,由刀具-工件、刀具-切屑之间的摩擦作用及切屑-工件之间由剪切作用产生热量能使刀具达到的最高温度在 $600 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ 。高温使硫化物分解并在不断摩擦过程中逐渐附着到刀具前刀面和后刀面,在刀具表面形成一层薄膜^[17]。薄膜起到润滑和保护刀具的作用,且可以防止刀具表面形成积屑瘤,从而可以减小切削力,降低摩擦力,减小刀具的磨损,降低工件表面粗糙度,提高切削性能。

4 结论

1) 非调质钢采用碲改质,硫化物形态得到了显著改善,硫化物形态呈椭球状或短簇状,长宽比降低,长宽比均值由 4.92 降为 2.91。

2) 非调质钢加碲与不加碲进行切削试验对比,在相同切削工艺情况下,加碲后试样的切削性能显著改善,其中切削抗力降低了 30.9 N,降幅约 6.5%;切削刀具磨损长度减少了 2 mm,刀具磨损改善值约为 53.87%;表面粗糙度 R_a 降低 $0.566 \mu\text{m}$,降幅约为 49%。

3) 非调质钢碲改质后,硫化物形态得到改善,切削过程中产生应力集中,减小了切削阻力,同时降低刀具的摩擦力,减小刀具的磨损;另外,在切削过程中形成“滞流层”困难,阻止积屑瘤的产生,改善工件表面粗糙度,进而改善非调质钢的切削性能。

参考文献

- [1] Koplev A, Lystrup A, Vorm T. The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP[J]. *Composites*, 1983, 14(4): 371–376.
- [2] Zheng Guangming, Cheng Xiang, Li Li, *et al.* Experimental investigation of cutting force, surface roughness and tool wear in high-speed dry milling of AISI 4340 steel[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33(1): 341–349.
- [3] Li Yi. Experimental study on the cutting performance of alloy steel [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2020.
(李毅. 合金钢切削加工性能的实验研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.)
- [4] Sonawane G D, Sargade V G. Machinability study of duplex stainless steel 2205 during dry turning[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2020, 21(5): 969–981.
- [5] Anmark N, Karasev A, Jonsson P G. The effect of different non-metallic inclusions on the machinability of steels[J]. *Materials (Basel)*, 2015, 8(2): 751–783.
- [6] Shen Jingxia, Zheng Yan, Zhang Haixia, *et al.* Influence of sulfide on cutting properties in sulfur-containing gear steel 20CrMnTiH[J]. *Special Steel*, 2012, 33(3): 47–49.
(申景霞, 郑艳, 张海霞, 等. 含硫齿轮钢20CrMnTiH中硫化物对切削性能的影响[J]. *特殊钢*, 2012, 33(3): 47–49.)
- [7] Yaguchi H. Effect of MnS inclusion size on machinability of low-carbon, leaded, resulfurized free-machining steel[J]. *Journal of Applied Metalworking*, 1986, 4(3): 214–225.
- [8] Qiu Bingli, Sui Hui, Che Dehui, *et al.* Effect of oxygen content and forging ratio on sulfide morphology and cutting performance in free-cutting stainless steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2021, 33(5): 418–425.
(仇兵利, 随晖, 车德会, 等. 易切削不锈钢中氧含量和锻造比对硫化物形态及切削性能的影响[J]. *钢铁研究学报*, 2021, 33(5): 418–425.)
- [9] Dogra M, Sharma V S, Sachdeva A, *et al.* Tool wear, chip formation and workpiece surface issues in CBN hard turning: a review[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2010, 11(2): 341–358.
- [10] Ning Guichun. Research on the detection of cutting chatter in machine tools[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.
(宁贵春. 机床切削颤振的检测研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.)
- [11] Zhang Zongyang. Research on the characteristics of tool wear and machined surface layer based on minimum surface wear rate [D]. Jinan: Shandong University, 2012.
(张宗阳. 基于最小表面磨损率的刀具磨损及加工表面层特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.)
- [12] Kuntoğlu M, Sağlam H. Investigation of progressive tool wear for determining of optimized machining parameters in turning[J]. *Measurement*, 2019, 140: 427–436.
- [13] Lalwani D I, Mehta N K, Jain P K. Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 206(1-3): 167–179.
- [14] Xu T D. A kinetic model of non-equilibrium segregation[J]. *Journal of Materials Science*, 1987, 22(2): 337–339.
- [15] Jiang L Z, Cui K. Fractal geometry study of correlation between impact toughness of steel and parameters of free cutting phase[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 1992, (4): 250–255.
- [16] Atwal K S, Reeder A, Pike T J. The product characteristics and machinability of bloom cast free-cutting steels[J]. *Revue De Metallurgie-Cahiers D Informations Techniques*, 1989, 86(6): 531–542.
- [17] Zaslavskii A Y, Gol'dshtein Y E, Shenk R I. Metallography of steel with selenium, tellurium, and lead[J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 1967, 9(9): 694–696.