

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.02.017

FeCoNiCrMo 高熵合金磨削机理及表面粗糙度

温雪龙, 于兴晨, 巩亚东, 孟凡涛

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对 FeCoNiCrMo 高熵合金进行平面磨削实验, 研究其材料去除机理, 分析不同磨削参数对磨削表面粗糙度和表面形貌的影响规律. 研究采用不同砂轮磨削的试件表面形貌, 并探讨干磨和湿磨条件下磨削表面粗糙度的变化规律. 实验结果表明: FeCoNiCrMo 高熵合金磨削过程满足塑性材料去除机理; 随磨削速度增大, 进给速度和磨削深度减小, 磨削表面粗糙度值减小, 表面形貌更加平整; 与采用电镀砂轮磨削的试件相比较, 采用树脂结合剂砂轮磨削的试件表面粗糙度值更低, 表面形貌更好; 与干磨试件相比较, 湿磨的试件表面粗糙度值更低, 表面质量更好.

关 键 词: 高熵合金; 磨削机理; 塑性材料; 表面粗糙度; 表面形貌

中图分类号: TH 161 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2020)02-0246-06

Grinding Mechanism and Surface Roughness of FeCoNiCrMo High-Entropy Alloy

WEN Xue-long, YU Xing-chen, GONG Ya-dong, MENG Fan-tao

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: GONG Ya-dong, E-mail: gongyd@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The surface grinding experiment of FeCoNiCrMo high-entropy alloy was conducted to analyze the grinding mechanism and influence of grinding parameters on the surface roughness and morphology of the alloy. The surface morphology of the specimens ground with different grinding wheels and the surface roughness of the specimens under dry and wet grinding conditions were investigated. The experiment results show that grinding FeCoNiCrMo follows the removal mechanism of plastic material. As the grinding speed increases and the feed rate and grinding depth decrease, the surface roughness of the specimens decreases and their surface morphology is smoother. The surface roughness of the specimens ground with the resin bond grinding wheel is lower and their surface morphology is better, compared with the ones ground with the electroplated grinding wheel. The surface roughness is significantly lower and the surface quality is better under the condition of wet grinding than that under the condition of dry grinding.

Key words: high-entropy alloy; grinding mechanism; plastic material; surface roughness; surface morphology

高熵合金具有高硬度、高强度、高耐磨性、高耐腐蚀性、高抗氧化性等特点^[1-2], 在材料学领域具有极高的学术研究价值. 高熵合金、复合材料与大块非晶被称为未来最具发展潜力的三大材料^[3-4]. 近年来, 国内外专家学者对高熵合金的制备及组织性能等方面进行了大量研究. Hou 等^[5]采用固相渗硼法在 Al_{0.25}CoCrFeNi 高熵合金上制备硼化层, 发现硼化 Al_{0.25}CoCrFeNi 合金的耐磨性比未经硼化的合金高 12 倍. Klimova 等^[6]研究了冷轧对含 Al 和 C 的 CoCrFeNiMn 型高熵合金的组织 and 力学性能的影响, 发现在初始铸态条件下, 合金具有 210 MPa 的屈服强度和 74% 的延伸率, 轧制后的屈服强度接近 1 310 MPa, 而延伸率降至 1.3%. Ocelik 等^[7]用激光熔覆法制备 AlCoCrFeNi 高熵合金并检测冷却速率对其组织与性能的影响, 结果表明高的冷却速率有助于提

高 BCC 相在合金中的含量并且可以提高合金的硬度. Fujieda 等^[8] 用电子束熔炼法制备 AlCoCrFeNi 高熵合金,并将电弧炉与电子束熔炼的合金铸锭的组织 and 性能进行对比,发现电子束熔炼的样品虽然强度略微下降,但是塑性提高近 20%. Liu 等^[9] 研究磨削参数对氮化硅磨削表面质量的影响规律,实验结果表明,氮化硅磨削表面粗糙度值随着磨削速度的减小、磨削深度和工件速度的增大而增大. Yao 等^[10] 研究了磨削参数对超高强度钢 Aermet100 表面粗糙度的影响,实验结果表明,表面粗糙度值随工件速度和磨削速度的增大而减小,随磨削深度增大而增大. 尽管高熵合金的制备与组织性能方面研究已经取得阶段性的成果,但是有关高熵合金的机械加工方面研究还未见报道. 磨削是保证零件加工表面质量的最后一道工序,对提高零件可靠性及使用寿命具有重要作用. 传统合金材料的磨削加工工艺已经十分成熟,但是针对高熵合金的磨削加工工艺尚缺少系统的实验数据支持,所以本文对高熵合金磨削加工工艺相关问题的研究具有一定意义.

本文针对 FeCoNiCrMo 高熵合金进行磨削工艺实验研究,研究其材料去除机理及磨削表面粗糙度随磨削参数的变化规律,探讨不同磨削参数对高熵合金表面形貌的影响,研究干磨和湿磨条件下高熵合金的磨削表面质量. 实验结果为高熵合金的磨削加工提供数据参考.

1 实验条件和方法

1.1 实验材料及设备

高熵合金试件的磨削过程如图 1 所示. 实验采用 120#电镀 CBN 砂轮和树脂结合剂 CBN 砂轮,如图 2 所示;砂轮外径 180 mm,内径 32 mm;磨料层宽度 6 mm,厚度 5 mm.

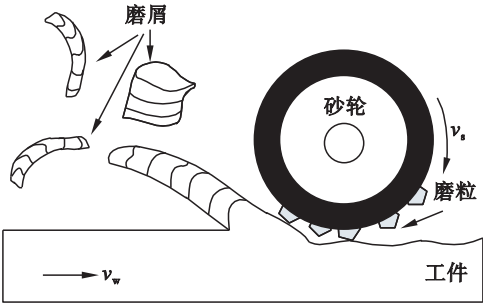


图 1 磨削实验示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the grinding experiment

实验材料为铸造 FeCoNiCrMo 高熵合金,试件如图 3 所示. 通过扫描电镜对试件组分进行检

测,得到试件中 Fe,Co,Ni,Cr,Mo 的质量分数分别为 24.39%, 24.39%, 24.39%, 24.39%, 2.44%.

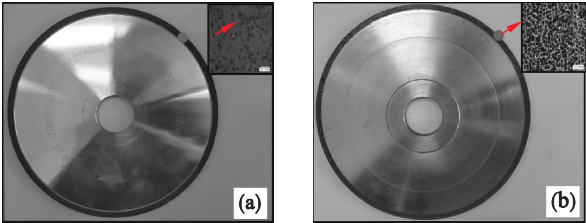


图 2 砂轮表面微观形貌
Fig. 2 Grinding wheel morphology
(a)—树脂结合剂砂轮; (b)—电镀砂轮.

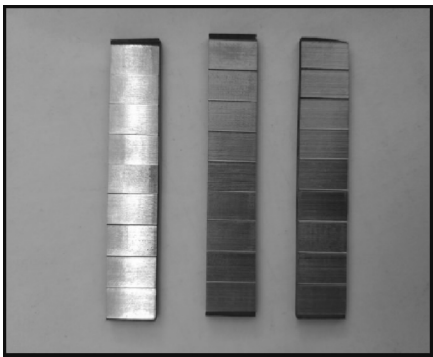


图 3 实验试件
Fig. 3 Experimental specimens

磨削实验在 2M9120 工具磨床上进行,实验后分别用 VHX - 1000E 超景深显微系统和 MICROMEASURE 三维轮廓仪来检测试件表面的三维形貌和表面粗糙度. 超景深显微镜最大放大倍数为 5 000 倍;三维轮廓仪的最小测量步长为 0.078 μm .

1.2 实验方案设计

对 FeCoNiCrMo 高熵合金进行三因素五水平的正交试验,探讨磨削速度 v_s 、进给速度 v_w 和磨削深度 a_p 对表面粗糙度的影响规律. 分别采用电镀砂轮和树脂结合剂砂轮对试件进行磨削,并对磨削后的试件表面形貌进行分析. 通过干磨和湿磨对比实验,研究冷却液对磨削表面质量的影响. 实验参数如表 1 所示.

表 1 正交试验参数 Table 1 Parameters for the orthogonal test					
磨削参数	水平				
$v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	10	15	20	25	30
$v_w / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	0.45	0.60	0.75	0.90	1.05
$a_p / \mu\text{m}$	5	10	20	40	80

2 实验结果及讨论

2.1 材料去除机理

图 4 是 FeCoNiCrMo 高熵合金的磨屑形貌,磨屑基本呈块状和条状两种形态,连续性较好.在磨屑的自由表面可以明显看到由于磨削过程中的挤压剪切而形成的层状物堆叠,磨屑的接触表面比较光滑且有均匀磨痕,磨屑的侧面呈现均匀的锯齿状.通过对磨屑的分析可知,FeCoNiCrMo 高熵合金满足塑性材料去除机理.

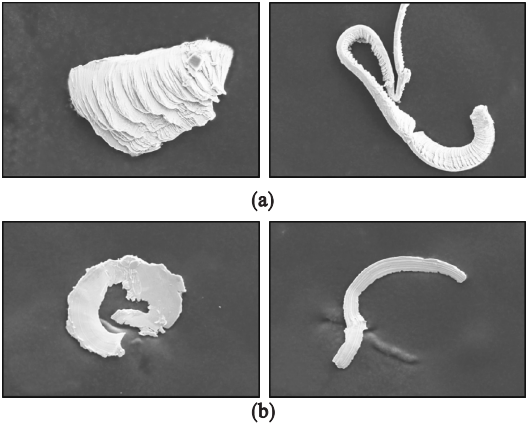


图 4 高熵合金的磨屑形貌

Fig. 4 Wear debris morphology of high entropy alloy
(a)—自由表面; (b)—接触表面.

图 5 为 FeCoNiCrMo 高熵合金的截面微观形貌,可以明显看出,亚表面层结构与基体结构明显不同,并且在接近磨削表面的位置形成了致密的加工硬化层,说明高熵合金的磨削过程中存在加工硬化现象.

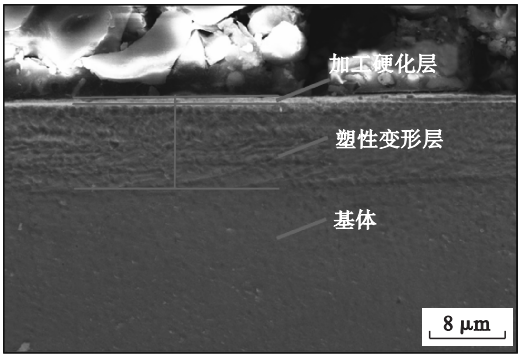


图 5 高熵合金的微观形貌 ($v_s=25\text{ m/s}$,
 $v_w=0.45\text{ m/min}$, $a_p=80\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 5 Microscopic morphology of high-entropy alloy

图 6 是在扫描电镜下观察的 FeCoNiCrMo 高熵合金变形层的微观形貌以及变形层位置的局部放大图,从图 6a 中可以看到高熵合金的显微组织为树枝晶结构,由枝晶结构和枝晶间结构两部分

组成.从图 6b 中可以看出,在磨削表面下约 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的范围内,其组织沿晶界发生了严重的扭曲,这是因为在磨削力的作用下,高熵合金的组织发生了塑性剪切滑移.再结合前面对磨屑形貌的观察与分析,可以说明在此磨削条件下高熵合金的去除机理为塑性去除.

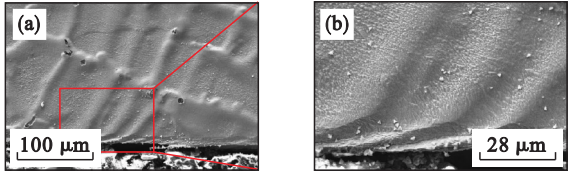


图 6 高熵合金的塑性变形 ($v_s=25\text{ m/s}$,
 $v_w=0.45\text{ m/min}$, $a_p=80\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 6 Plastic deformation of high-entropy alloy
(a)—显微组织; (b)—变形层局部放大图.

2.2 磨削参数对表面粗糙度的影响

图 7 为采用两种砂轮磨削后的试件表面粗糙度与磨削参数的关系.

由图 7 可知,随着磨削速度的增大,表面粗糙度值均呈减小的趋势;这是因为在磨削深度与进给速度不变的情况下,磨削速度增大,参与磨削过程的磨粒数增加,单位时间内磨削表面被磨粒磨过的次数增加,因此表面变得更平整,表面粗糙度值减小.当磨削深度逐渐增加时,表面粗糙度值均逐渐增大;这是因为在磨削速度与进给速度不变的情况下,磨削深度增加,砂轮与工件的接触面积增大,单颗磨粒的最大未变形切屑厚度增大,磨削表面上的磨痕逐渐加深,导致表面粗糙度值越来越大.随着工件进给速度的增大,表面粗糙度值呈增大趋势;这是由于在磨削深度与磨削速度不变的情况下,进给速度增大,参与磨削过程的磨粒数减少,使得单颗磨粒的磨削厚度增大,磨削表面的平整度下降,因此表面粗糙度值逐渐增大.

由图 7 还可以看出,用不同砂轮磨削的试件表面粗糙度随磨削参数变化的趋势一致,但用电镀砂轮磨削的试件表面粗糙度值大于用树脂结合剂砂轮磨削的试件表面粗糙度值.这是因为树脂结合剂砂轮的弹性较好,耐冲击,有抛光的作用,并且树脂结合剂砂轮自锐性较好,不容易发生堵塞的现象;另外,树脂结合剂砂轮的磨削温度也比电镀砂轮低,从而降低了磨削烧伤的影响.所以采用树脂结合剂砂轮进行高熵合金的磨削加工,在提高磨削表面质量方面具有一定优势.

对比分析采用树脂结合剂砂轮和电镀砂轮磨削 FeCoNiCrMo 高熵合金的正交试验数据,发现对表面粗糙度影响最大的磨削参数是磨削速度

v_s , 然后依次为磨削深度 a_p 和进给速度 v_w . 两种砂轮磨削 FeCoNiCrMo 高熵合金时, 不同磨削参数对磨削表面粗糙度影响的极差图和方差图如图 8 所示.

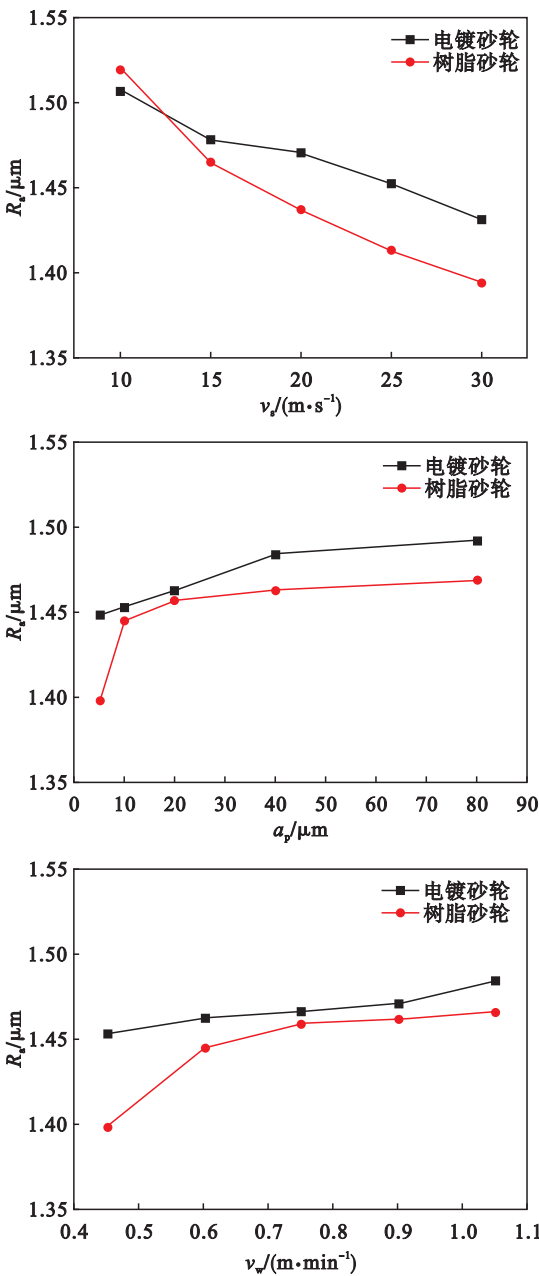


图 7 磨削参数对表面粗糙度的影响
Fig. 7 Effects of grinding parameters on surface roughness

为了进一步验证上述结论, 进行了一组磨削速度对磨削表面粗糙度影响的单因素实验, 设定磨削深度为 $20\text{ }\mu\text{m}$, 进给速度为 0.75 m/min . 如图 9 所示, 可以明显看出当磨削速度从 13 m/s 增大到 35 m/s 时, 磨削表面粗糙度值 R_a 从 $1.47\text{ }\mu\text{m}$ 下降到 $1.23\text{ }\mu\text{m}$, 即随着磨削速度的增大, 磨削表面粗糙度值降低, 与正交试验结果一致.

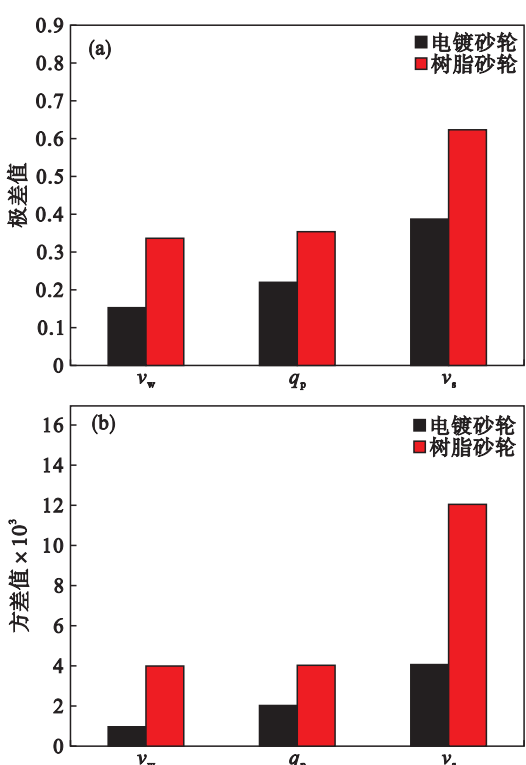


图 8 粗糙度极差图和方差图
Fig. 8 Roughness diagram and variance diagram
(a)—极差图; (b)—方差图.

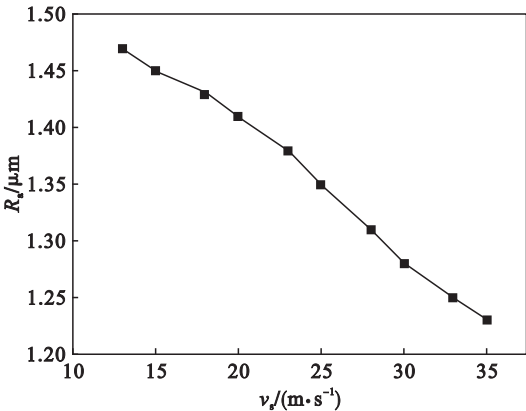


图 9 磨削速度对表面粗糙度的影响
Fig. 9 Effect of grinding speed on surface roughness

2.3 不同砂轮磨削的试件表面形貌分析

图 10 为分别采用两种砂轮在不同磨削速度下磨削的试件表面形貌. 当磨削速度为 10 m/s 时, 两种砂轮磨削表面的磨痕均较深, 有的地方产生凹坑. 随着磨削速度的增大, 试件表面的磨痕都明显变浅, 凹坑数目明显减少, 表面质量更好. 这是因为磨削速度增大, 单位时间磨过表面的磨粒数增加, 使得磨削表面更加平整; 同时, 磨削速度增大导致单颗磨粒的磨削厚度减小, 磨痕变浅, 从而磨削表面质量提高. 因此磨削过程中, 提高磨削速度有助于改善磨削表面质量. 另外, 通过两种砂轮磨削表面的对比可以看出, 树脂结合剂砂轮磨

削表面比电镀砂轮磨削表面更加平整.

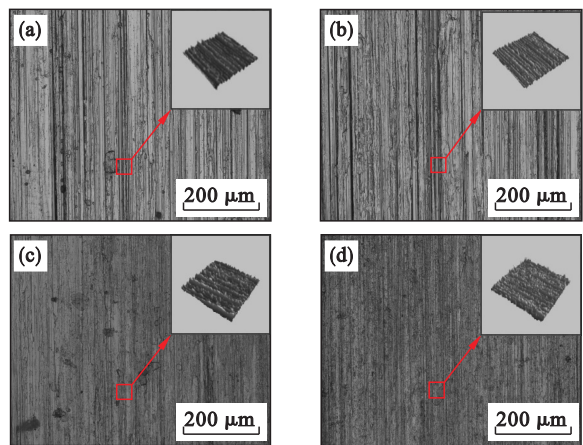


图 10 不同磨削速度下的磨削表面形貌

Fig. 10 Surface morphology under the condition of different grinding speeds

- (a) —电镀砂轮, $v_s = 10$ m/s; (b) —电镀砂轮, $v_s = 30$ m/s;
(c) —树脂结合剂砂轮, $v_s = 10$ m/s;
(d) —树脂结合剂砂轮, $v_s = 30$ m/s.

图 11 为分别采用两种砂轮在不同磨削深度下磨削的试件表面形貌. 当磨削深度为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时, 磨削表面磨痕分布比较均匀, 深度也较浅, 表面相对比较平整. 随着磨削深度的增加, 磨痕深度明显增加, 分布明显不均匀, 出现多处明显的凹坑. 这是因为磨削深度增加, 砂轮与工件的接触弧长增大, 单位时间去除的材料更多, 使得磨削表面的平整度下降. 磨削深度的增加还会导致单颗磨粒的磨削厚度增大, 使得磨削表面磨痕变深, 进而导致磨削表面的质量变差. 另外, 在相同的磨削参数下比较两种砂轮的磨削表面形貌可以看出, 电镀砂轮磨削表面比较粗糙, 磨痕较深, 树脂结合剂砂轮的磨削表面形貌优于电镀砂轮, 平整度较好.

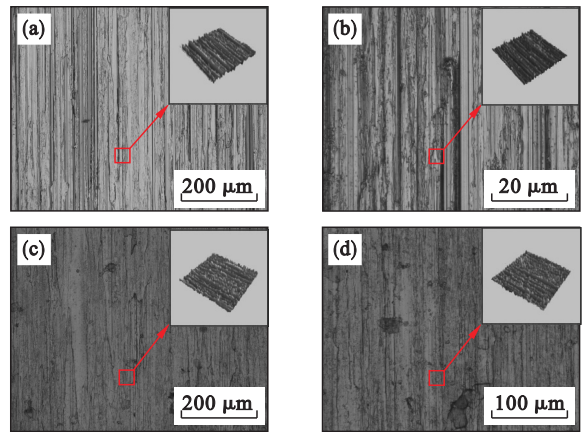


图 11 不同磨削深度下的磨削表面形貌

Fig. 11 Surface morphology under the condition of different grinding depths

- (a) —电镀砂轮, $a_p = 5\text{ }\mu\text{m}$; (b) —电镀砂轮, $a_p = 80\text{ }\mu\text{m}$;
(c) —树脂结合剂砂轮, $a_p = 5\text{ }\mu\text{m}$;
(d) —树脂结合剂砂轮, $a_p = 80\text{ }\mu\text{m}$.

图 12 为分别采用两种砂轮在不同进给速度下磨削的试件表面形貌. 当进给速度为 0.45 m/min 时, 磨削表面的磨痕较浅, 比较平整. 随着进给速度的增加, 磨削表面变得粗糙, 并且出现了较深的磨痕及少许的凹坑. 这主要是因为随着进给速度的增加, 参与磨削过程的磨粒数减少, 单个磨粒的磨削厚度增大, 使得磨削表面的磨痕变深, 磨削表面质量变差. 与电镀砂轮磨削表面相比, 树脂结合剂砂轮的磨削表面磨痕更浅, 有更好的平整度.

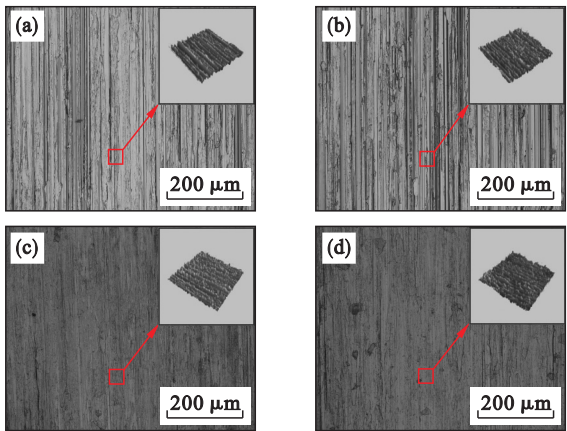


图 12 不同进给速度下的磨削表面形貌

Fig. 12 Surface morphology under the condition of different feed rates

- (a) —电镀砂轮, $v_w = 0.45$ m/min;
(b) —电镀砂轮, $v_w = 1.05$ m/min;
(c) —树脂结合剂砂轮, $v_w = 0.45$ m/min;
(d) —树脂结合剂砂轮, $v_w = 1.05$ m/min.

2.4 冷却液对磨削表面粗糙度的影响

采用树脂结合剂砂轮在相同的磨削参数下进行的干磨和湿磨实验, 结果如图 13 所示. 可以看出, 无论干磨还是湿磨, FeCoNiCrMo 高熵合金磨削表面粗糙度随磨削参数的变化趋势是一致的, 但湿磨的表面粗糙度明显小于干磨.

图 14 是采用树脂结合剂砂轮在磨削速度 v_s 为 15 m/s , 进给速度 v_w 为 0.45 m/min , 磨削深度 a_p 为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 时干磨和湿磨的磨削表面形貌. 可以明显看出, 干磨表面的磨痕较深, 表面较粗糙, 湿磨表面的磨痕均匀且较浅, 表面质量更好; 这是由于冷却液有利于减少积屑瘤、鳞刺的影响, 可以冲洗掉脱落的磨粒, 减少磨粒对磨削表面的划伤, 从而减小磨削表面粗糙度. 同时, 磨削过程中会产生大量的热量, 冷却液可以起到降温的作用, 减少工件表面的磨削烧伤, 提高磨削表面质量.

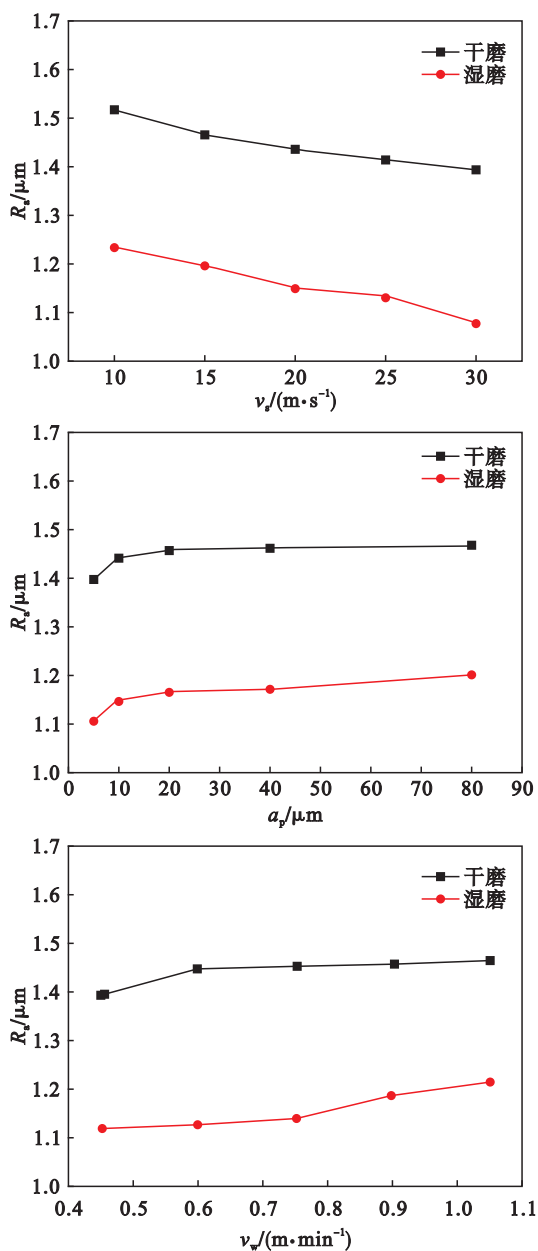


图 13 不同磨削参数下干磨与湿磨的试件表面粗糙度
Fig. 13 Surface roughness under the condition of dry and wet grinding with different parameters

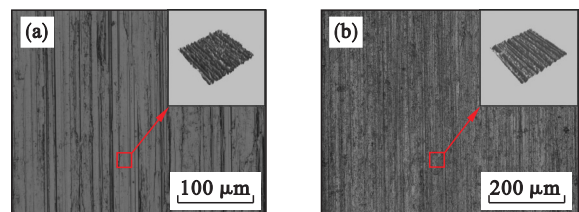


图 14 干磨和湿磨的试件表面形貌
Fig. 14 Surface morphology under the condition of dry and wet grinding
(a)—干磨；(b)—湿磨。

3 结 论

1) FeCoNiCrMo 高熵合金在磨削过程中,其组织会沿晶界发生剪切滑移,在磨削表面下形成

明显的塑性变形层,所以高熵合金的磨削加工满足塑性材料去除机理。

2) FeCoNiCrMo 高熵合金在磨削过程中,随着磨削速度增大,进给速度和磨削深度减小,磨削表面粗糙度值呈减小趋势。树脂结合剂砂轮磨削表面粗糙度值要低于电镀砂轮磨削表面粗糙度值。磨削速度是对磨削表面粗糙度影响最大的磨削参数。

3) 采用树脂结合剂砂轮磨削 FeCoNiCrMo 高熵合金获得的表面形貌好于电镀砂轮。随着磨削速度的增加,磨削表面的磨痕明显变细,凹坑也越来越少,表面平整。随着磨削深度和进给速度的增大,磨削表面的磨痕深度明显增大且分布不均匀,表面逐渐变得粗糙,凹坑数量增多。

4) 干磨和湿磨不同条件下 FeCoNiCrMo 高熵合金磨削表面粗糙度随磨削参数的变化趋势一致,湿磨表面粗糙度值小于干磨,湿磨的表面质量更好。

参考文献：

[1] Yeh J W, Lin S J, Chin T S, et al. Formation of simple crystal structures in Cu-Co-Ni-Cr-Al-Fe-Ti-V alloys with multiprincipal metallic elements [J]. *Metallurgical and Materials Transaction A*, 2004, 35(8): 2533 – 2536.

[2] Senkov O N, Wilks G B, Miracle D B, et al. Refractory high-entropy alloys [J]. *Intermetallics*, 2010, 18(9): 1758 – 1765.

[3] Yeh J W. Recent progress in high-entropy alloys [J]. *Annales de Chimie: Science des Matériaux*, 2006, 31(6): 633 – 648.

[4] 唐群华,程虎,戴品强. 轧制及退火后 $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金的组织 and 力学性能 [J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(12): 72 – 77.

(Tang Qun-hua, Cheng Hu, Dai Pin-qiang. Microstructure and mechanical properties of $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ high-entropy alloy processed by rolling and subsequent annealing [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2015, 36(12): 72 – 77.)

[5] Hou J X, Zhang M, Yang H J, et al. Surface strengthening in $\text{Al}_{0.25}\text{CoCrFeNi}$ high-entropy alloy by boronizing [J]. *Materials Letters*, 2019, 238: 258 – 260.

[6] Klimova M, Stepanov N, Shaysultanov D, et al. Microstructure and mechanical properties evolution of the Al, C-containing CoCrFeNiMn -type high-entropy alloy during cold rolling [J]. *Materials*, 2018, 11(1): 53 – 62.

[7] Ocelík V, Janssen N, Smith S N, et al. Additive manufacturing of high-entropy alloys by laser processing [J]. *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*, 2016, 68(7): 1810 – 1818.

[8] Fujieda T, Shiratori H, Kuwabara K, et al. First demonstration of promising selective electron beam melting method for utilizing high-entropy alloys as engineering materials [J]. *Materials Letters*, 2015, 159: 12 – 15.

[9] Liu W, Deng Z H, Shang Y Y, et al. Effects of grinding parameters on surface quality in silicon nitride grinding [J]. *Ceramics International B*, 2017, 43(1): 1571 – 1577.

[10] Yao C F, Wang T, Xiao W. Experimental research on surface roughness and topography of grinding ultra-high strength steel aermet100 with CBN wheel [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 526: 28 – 32.