

# 不同球磨时间下制备的铜基自润滑复合材料 力学与摩擦磨损性能研究

李佳佳, 王燕, 王福会

(沈阳材料科学国家研究中心 东北大学联合研究分部, 沈阳 110004)

**摘要:** **目的** 研究球磨时间对 Cu-WS<sub>2</sub> 自润滑复合材料界面状态的影响, 同时提高自润滑材料的力学性能和摩擦磨损性能, 提出比较优化的 Cu 和 WS<sub>2</sub> 复合材料制备工艺。**方法** 采用高能球磨与放电等离子体烧结技术, 制备铜基自润滑复合材料。采用 WDW-100 电子万能试验机进行力学实验。采用美国 Rtec 多功能摩擦磨损试验机进行摩擦学实验。采用 XRD 和 SEM 表征不同球磨时间的 Cu/WS<sub>2</sub> 复合粉末和烧结后块状复合材料的物相组成和微观结构, 并结合 EDS 表征弯折断口的形貌和磨损形貌, 分析球磨时间与复合材料界面状态-力学性能-摩擦磨损性能的内在关系。**结果** 当球磨时间为 30 h 时, WS<sub>2</sub> 在铜基体中有较好的结合与分布, 材料的综合性能最佳, WS<sub>2</sub>/Cu 复合材料的力学性能良好, 平均摩擦系数为 0.186, 维持在较低水平, 且磨损率最低, 为  $7.11 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。球磨时间超过 30 h 时, 磨损率不再与力学性能保持一致, 而是随着球磨时间的延长而逐渐提高。球磨时间达到 50 h 时, 基体耐磨性下降, 磨损率显著提高, 达最大值, 为  $10.39 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。**结论** 球磨时间的延长会使 WS<sub>2</sub> 在基体中的弥散程度增强, 且 WS<sub>2</sub> 与 Cu 基体由于机械互锁式的物理结合增强, 使得力学性能随之增强。此外, 摩擦磨损性能也能维持在较好水平。但当球磨时间超过 30 h 时, 界面反应加剧, WS<sub>2</sub> 分解为 Cu<sub>2</sub>S, 大大减弱了 WS<sub>2</sub> 的润滑减摩性能, 使得复合材料的摩擦磨损性能降低。

**关键词:** WS<sub>2</sub>/Cu 复合材料; 球磨时间; 自润滑; 放电等离子烧结; 力学性能; 磨损率; 摩擦系数

**中图分类号:** TG115.5+8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)09-0236-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.09.024

## Study on Mechanical and Tribological Behavior of Copper-based Self-lubricating Composites Prepared at Different Ball Mill Time

LI Jia-jia, WANG Yan, WANG Fu-hui

(Northeastern University Joint Research Branch, Shenyang National Research Center for Materials Science, Shenyang 110004, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effect of ball milling time on the interface state of Cu-WS<sub>2</sub> self-lubricating composites, and at the same time improving the mechanical properties and friction and wear properties of self-lubricating materials, and proposes a more optimized preparation process of Cu and WS<sub>2</sub> composites. The copper-based self-lubricating composite material was prepared by high-energy ball milling and spark plasma sintering technology. The mechanical experiment

收稿日期: 2020-12-04; 修订日期: 2021-03-18

Received: 2020-12-04; Revised: 2021-03-18

通讯作者: 王福会 (1960—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为纳米材料的化学稳定性、先进材料的高温腐蚀与防护、材料的表面改性。

**Corresponding author:** WANG Fu-hui (1960—), Male, Doctor, Professor, Research focus: chemical stability of nano materials, high temperature corrosion and protection of advanced materials, surface modification of materials.

**引文格式:** 李佳佳, 王燕, 王福会. 不同球磨时间下制备的铜基自润滑复合材料力学与摩擦磨损性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 236-243.

LI Jia-jia, WANG Yan, WANG Fu-hui. Study on mechanical and tribological behavior of copper-based self-lubricating composites prepared at different ball mill time[J]. Surface technology, 2021, 50(9): 236-243.

was carried out by the WDW-100 electronic universal testing machine. The tribological experiment was carried out by the American Rtec multifunction friction and wear tester. The phase composition and microstructure of  $\text{WS}_2/\text{Cu}$  composite powders with different milling time and sintered bulk composites were characterized by XRD and SEM. And combined with EDS, the morphology and wear morphology of the bending fracture were characterized, and the internal relationship between the ball milling time and the interfacial state-mechanical properties-friction and wear properties of the composite material was analyzed. The results indicate that as the ball milling time is 30 h,  $\text{WS}_2$  particles have a better combination and distribution in the copper matrix, and the overall performance of the materials is the best. The mechanical properties of the  $\text{WS}_2/\text{Cu}$  composite are good, and the average friction coefficient is 0.186, which is maintained at a low level. The wear rate is the lowest at  $7.11 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ . Moreover, as the milling time exceeds 30 h, the wear rate is no longer consistent with the mechanical properties, and increases with the prolonging of the milling time. When the ball milling time reaches 50h, the wear resistance of the matrix decreases and the wear rate increases significantly, reaching the maximum value of  $10.39 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ . The extension of the milling time will increase the dispersion of  $\text{WS}_2$  in the matrix, and the mechanical interlocking physical combination of  $\text{WS}_2$  and Cu matrix will enhance the mechanical properties. In addition, the friction and wear performance can also be maintained at a good level. But when the milling time exceeds 30 h, the interfacial reaction intensifies and  $\text{WS}_2$  decomposes into  $\text{Cu}_2\text{S}$ , which greatly weakens the lubrication and antifriction properties of  $\text{WS}_2$ , and reduces the friction and wear properties of the composite material.

**KEY WORDS:**  $\text{WS}_2/\text{Cu}$  composites; ball milling time; self-lubricating; spark plasma sintering; mechanical properties; wear rate; friction coefficient

金属基自润滑复合材料广泛应用于摩擦学中, 是因为其在保留了金属基体的良好力学特性的基础上, 加入了润滑相, 从而具有优良的润滑减摩性能, 表现出良好的综合性能<sup>[1-4]</sup>。如 Al、Fe、Cu、Ag、Ni 等许多金属及其合金被用作金属基体, 加入固体润滑剂(石墨、 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{WS}_2$ 、碳纳米管、石墨烯等<sup>[5-14]</sup>)进行粉末冶金加工。铜基自润滑复合材料在保留了铜基体优良导电导热性能和良好耐腐蚀性等综合性能的基础上, 同时容纳了固体润滑剂特有的润滑性能, 故作为电接触材料、润滑材料等广泛应用于交通、电子、航空航天等多个工程领域<sup>[15-17]</sup>。

二硫化钨( $\text{WS}_2$ )颗粒在高温高负荷条件下, 能较大幅度提升润滑性能, 是一种具有良好摩擦学性能的固体润滑添加剂。 $\text{WS}_2$ 不仅在润滑油和润滑脂中表现出良好的抗磨减摩性能, 而且当其作为固体润滑剂加入铜基自润滑复合材料中时, 也明显提高了复合材料的力学性能和耐磨性<sup>[18-20]</sup>。

放电等离子体烧结(SPS)是在加压过程中烧结, 烧结过程中的加压及脉冲电流产生的等离子体有利于降低粉末的烧结温度, 且使烧结试样内部每个颗粒均匀地自发放热, 并使颗粒表面活化。同时, 低电压、高电流的特征, 能使粉末快速烧结致密。因此, 它广泛应用于金属基复合材料领域<sup>[21]</sup>。然而, 铜与  $\text{WS}_2$  在高温(800℃以上)烧结时, 易发生界面反应, 提高界面强度的同时, 却降低了复合材料的润滑性能。因此, 自润滑复合材料力学性能与润滑性能的矛盾仍未得到解决。

机械合金化(Mechanical alloying, MA)是 20 世纪 70 年代初发展起来的一种制备新材料的重要手

段之一, 它是将金属或合金粉末加入高能球磨机中, 通过粉末与磨球长时间的碰撞、冲击, 最终获得合金化粉末的一种粉末制备技术。球磨法是一种可以让增强体与金属基体均匀混合的方法, 其具有改善增强体颗粒分布的均匀性及增强体与基体之间的界面结合, 从而提高材料性能的优点<sup>[22]</sup>。 $\text{WS}_2$ 通过球磨技术可均匀分散在金属基体中, 但同时球磨时间和球料比对复合材料的影响还有待考究, 时间过长、球料比不合理都有可能对  $\text{WS}_2$  均匀分散造成影响, 从而影响复合材料的性能<sup>[23-24]</sup>。球磨时间延长、球磨速度过快, 会导致  $\text{WS}_2$  团聚, 与铜基体之间的界面结合效果变差, 而采用合适的球磨参数, 可使复合材料的性能提升较为明显。球磨时间对于机械合金化的结果有着关键的影响。球磨时间过短, 机械合金化无法取得良好的效果; 球磨时间过长, 则会引入不必要的污染<sup>[25]</sup>。

本文通过增加球磨时间, 提高自润滑相与铜颗粒之间的界面原子活性, 促进界面扩散, 在较低温度( $\leq 800^\circ\text{C}$ )下烧结制备了致密的 Cu- $\text{WS}_2$  自润滑复合材料。研究了粉体球磨工艺-界面状态-力学性能-摩擦磨损性能的内在关系, 提出了优化的 Cu 和  $\text{WS}_2$  复合材料制备工艺, 探讨了  $\text{WS}_2$  颗粒对铜金属的强化与抗磨减摩机理, 为后续铜基自润滑复合材料的成分与工艺设计提供理论指导。

## 1 实验

### 1.1 复合材料制备过程

复合粉末制备实验中, 选择粒度 200 目的电解铜粉作为基体材料, 平均粒径为 5  $\mu\text{m}$  的商用  $\text{WS}_2$  粉作

为固体润滑剂。Wang 等<sup>[26]</sup>通过火花等离子烧结和热压制备掺有不同含量  $\text{WS}_2$  的铜基自润滑复合材料, 对比研究了其力学性能和磨损性能, 表明  $\text{WS}_2$  的含量极大地影响了复合材料的力学性能和摩擦学性能。参考前人的研究经验, 本实验确定  $\text{WS}_2$  的质量分数为 20%。按 80%Cu+20% $\text{WS}_2$  的配比称取两种粉体, 用行星式球磨机 (型号为 YDXQM-4) 球磨, 球料比为 10:1。由于大球的冲击能量大, 可快速升高体系能量, 而小球与粉的接触增多, 细化粉末的效果好<sup>[23,27-29]</sup>。故选择不同直径的球来进行配比, 可使体系能量快速升高的同时, 较好地细化粉末<sup>[30]</sup>。本实验选择 16、8、6、4 mm 等 4 种直径的球来进行搭配, 它们的质量比为 1:3:3:3。球磨机转速为 300 r/min, 正反向交替旋转, 球磨时间分别为 0、6、30、40、50 h。

将混合粉末倒入  $\phi 40$  mm 的石墨模具中, 在第三代 SPS 快速压力烧结炉中进行烧结, 其中真空度 <10 Pa。烧结过程为: 15 min 由室温达到 650 °C, 5 min 升温至 690 °C, 然后 1 min 快速升温至最终烧结温度 800 °C, 并保温 10 min, 压力为 40 MPa。

## 1.2 测试及分析方法

烧结后, 对复合材料进行切样、研磨和抛光, 以测量弯折强度、压缩强度、摩擦系数和磨损率。力学实验中, 使用 WDW-100 电子万能试验机测试样品的抗弯强度, 采集压缩强度数据。摩擦学实验使用美国 Rtec 多功能摩擦磨损试验机进行。对磨副为直径 6 mm 的 GCr15 钢球, 实验采用往复式运动模式, 载荷为 10 N, 滑动速度为 5 mm/s, 往复距离为 5 mm, 总滑动距离设置为 18 m, 持续时间为 60 min。

采用 XRD (SmartLab) 对不同球磨时间 Cu/ $\text{WS}_2$  复合粉末和烧结后的块状复合材料进行物相组成分

析。用日产 JSM-7001F 型热场发射扫描电子显微镜观察 Cu/ $\text{WS}_2$  复合粉末的形貌和 Cu/ $\text{WS}_2$  复合材料的组织形貌, 观察弯折断口的形貌和磨损形貌, 分析球磨时间对复合材料力学性能和摩擦磨损性能的影响。

## 2 结果和讨论

### 2.1 Cu-20% $\text{WS}_2$ 混合粉末的微观结构

据图 1, 未进行高能球磨的试样的物相图谱中, 只有  $\text{WS}_2$  和 Cu 的特征峰。随着球磨时间的延长,  $\text{WS}_2$  和 Cu 的衍射峰强度逐渐降低。这是因为粉体发生塑性变形, 导致粉体晶粒的细化。在球磨 30 h 以上的试样的物相图谱中, 在 32°和 46°处出现了微弱的  $\text{Cu}_2\text{S}$  衍射峰, 且一部分  $\text{WS}_2$  衍射峰消失。这是因为随着球磨时间的延长, 混合粉末中一部分  $\text{WS}_2$  分解生成  $\text{Cu}_2\text{S}$ 。

由图 2a 可知, 未球磨时, 球状 Cu 颗粒和片层状

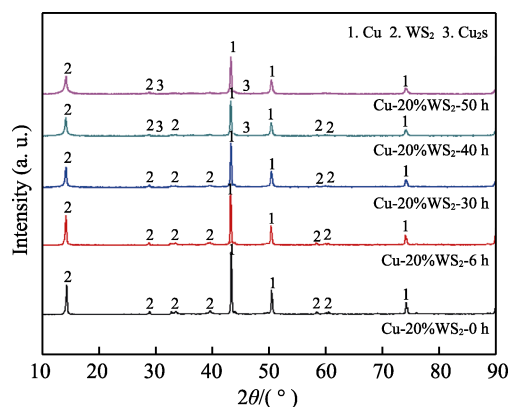


图 1 不同球磨时间的复合粉末的 XRD 图谱  
Fig.1 XRD patterns of powders milled for different time

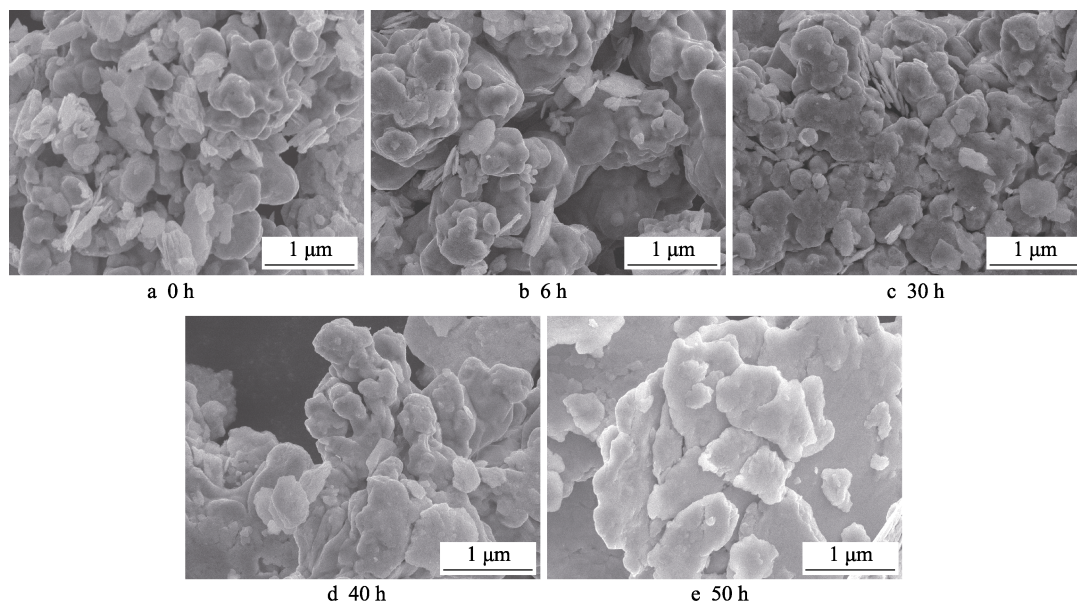


图 2 不同球磨时间混合粉末的 SEM 照片  
Fig.2 SEM images of mixed powders milled for different time



WS<sub>2</sub> 粉末没有变形, 结合效果差。当球磨 6 h 后, Cu 粉发生了轻微的塑性变形, 粉末形态开始由球状转变为片状, 见图 2b。当球磨时间达到 30 h 时, 由于铜粉颗粒在球磨过程中反复剪切、焊合、断裂和重焊, 产生了较大塑性变形, 从而形成了大面积的片层状, 同时 WS<sub>2</sub> 片层状粉末破碎, 与基体混合均匀, 见图 2c。当球磨时间继续增加时, 由于粉末细化, 使得粉末表面活化能较大, 片状粉末得以继续聚集长大, 见图 2e、d。当球磨时间达到 50 h 时, 复合粉末完全变成片状, 且片状颗粒厚度变薄。

## 2.2 Cu-20%WS<sub>2</sub> 复合材料的微观结构

由图 3 可知, 在 800 °C 下放电等离子烧结制备铜基自润滑复合材料过程中, 一小部分 WS<sub>2</sub> 会被氧化生成 WO<sub>2</sub>。球磨 30 h 以下的物相图谱中, 仅存在 Cu、WS<sub>2</sub> 和 WO<sub>2</sub> 的特征峰。球磨 30 h 以上, 随着球磨时间的增长, WO<sub>2</sub> 的峰强明显增强, WS<sub>2</sub> 的峰强显著减弱。球磨 40、50 h 时, 在 46° 处出现微弱的 Cu<sub>2</sub>S 衍射峰。与图 1 相比可知, 球磨时间的延长, 导致复合粉末细化, 表面活化能会增加。当球磨时间超过 30 h 时, 表面活化能增加到了一定程度, 激发复合粉末在烧结过程中发生界面反应, 消耗 WS<sub>2</sub>。

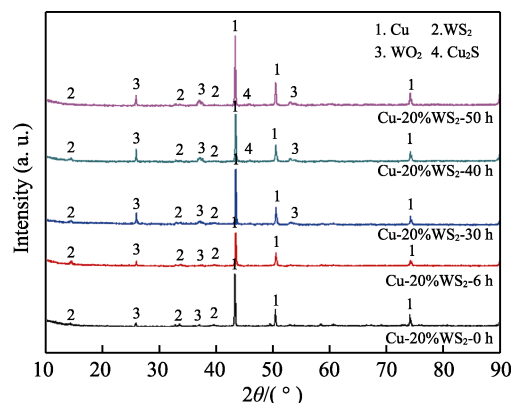


图 3 不同球磨时间下块体的 XRD 图谱  
Fig.3 XRD patterns of mass milled for different time

观察图 4 可以发现, 不同球磨时间下, 白色条状的 WS<sub>2</sub> 颗粒间相互联结、缠绕, 在基体中均呈现出网状分布特征。随着球磨时间的增长, 条状的 WS<sub>2</sub> 更加细化, 在基体中弥散更均匀。从图 4c—e 中的插图可知, 球磨 30 h 时, WS<sub>2</sub> 开始粉化; 当球磨时间为 40、50 h 时, 有微量的黑色 Cu<sub>2</sub>S 相在 WS<sub>2</sub> 和 Cu 基体接触的界面处生成。这是因为球磨时间过长, 部分 WS<sub>2</sub> 分解生成了 Cu<sub>2</sub>S。

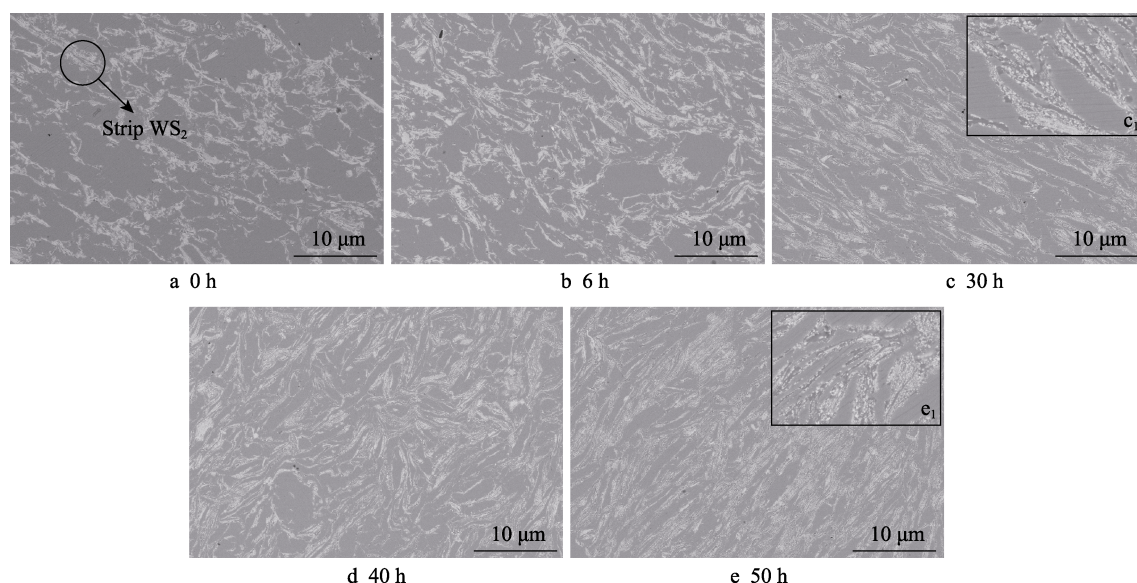


图 4 不同球磨时间下块体的 SEM 照片  
Fig.4 SEM images of mass milled for different time

## 2.3 Cu-20%WS<sub>2</sub> 复合材料的力学性能分析

Cu-20%WS<sub>2</sub> 复合材料的弯折强度和压缩强度随球磨时间的变化情况如图 5 所示。通过粉末 SEM 的分析比较可知, 随球磨时间的延长, WS<sub>2</sub>/Cu 材料中的 Cu 基体组织及 WS<sub>2</sub> 逐渐细化。当球磨时间较长时, 粉末的塑性变形大, 粉末表面活化能高, 形成的片状颗粒使得 WS<sub>2</sub> 在铜基体中弥散而均匀分布。晶界处位错的滑移被大量的位错和位错墙阻碍, 产生加工硬

化, 从而致使 WS<sub>2</sub>/Cu 强度提高。当球磨时间不够充分时, WS<sub>2</sub>/Cu 粉末所烧结的复合材料的晶粒和相组织细化不充足, 相结合不紧密, 存在缺陷, 因此强度提高相对较小。由图 5a 可知, 当球磨时间为 6、30 h 时, 弯折强度分别为 209、213 MPa。与未球磨相比, 强度提升不大。当球磨时间为 40、50 h 时, 抗弯强度有了明显的提高, 达 257、278 MPa。因为球磨充分, Cu 与 WS<sub>2</sub> 粉末为片状, 机械合金化程度高, 界面结合紧密, 从而提高了材料的致密化程度。



依据图 5b 分析,材料的压缩强度随时间的变化同弯折强度变化趋势一样,整体随着球磨时间的延长而增大。在球磨时间 30 h 以下,压缩强度缓慢增大,增强不明显;球磨时间超过 30 h 以上,压缩强度显著增大。

由图 6 所示的弯曲断口形貌可知,未球磨的复合材料,弯曲断口存在大量的孔洞和界面开裂,说明 Cu 与  $WS_2$  没有机械合金化,界面结合不紧密。球磨时间为 6、30 h 时,断口仍有孔洞和界面开裂,其数

量和尺寸随球磨时间的延长而减小,球磨不充分,弥散强化不明显,故弯折强度没有明显提升。当球磨时间为 40、50 h 时,弯曲断口形貌较为平直,发生了明显转变,有很多放射花纹和结晶状小平面,为解离断口,是脆性断裂。这是因为脆性颗粒  $WS_2$  经过充分的球磨后,在 Cu 基体中弥散程度大,同时由于  $WS_2$  与 Cu 基体机械互锁式的物理结合以及 Cu 的塑性变形破坏了 Cu 粉颗粒的塑性,使得烧结后的复合材料转变为脆性断裂。

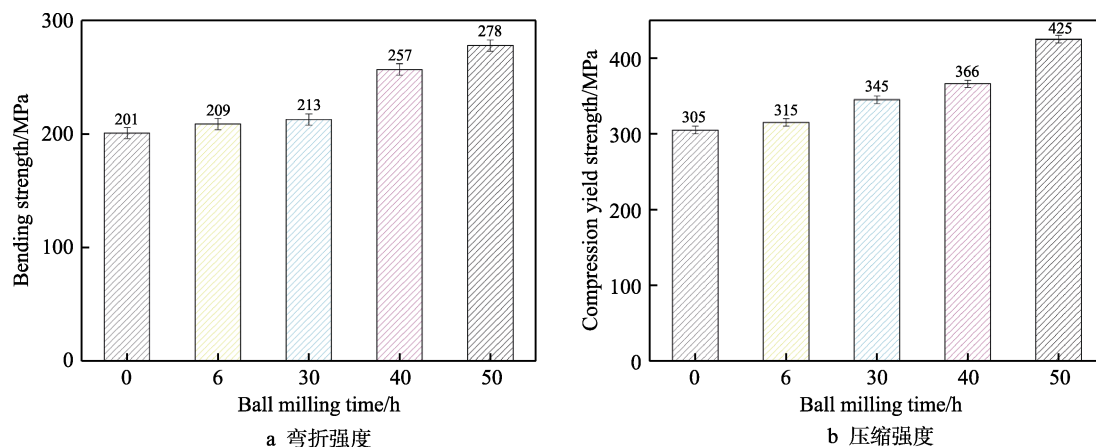


图 5 复合材料的弯折强度和压缩强度

Fig.5 Mechanical properties of composite materials: a) bending strength; b) compression yield strength

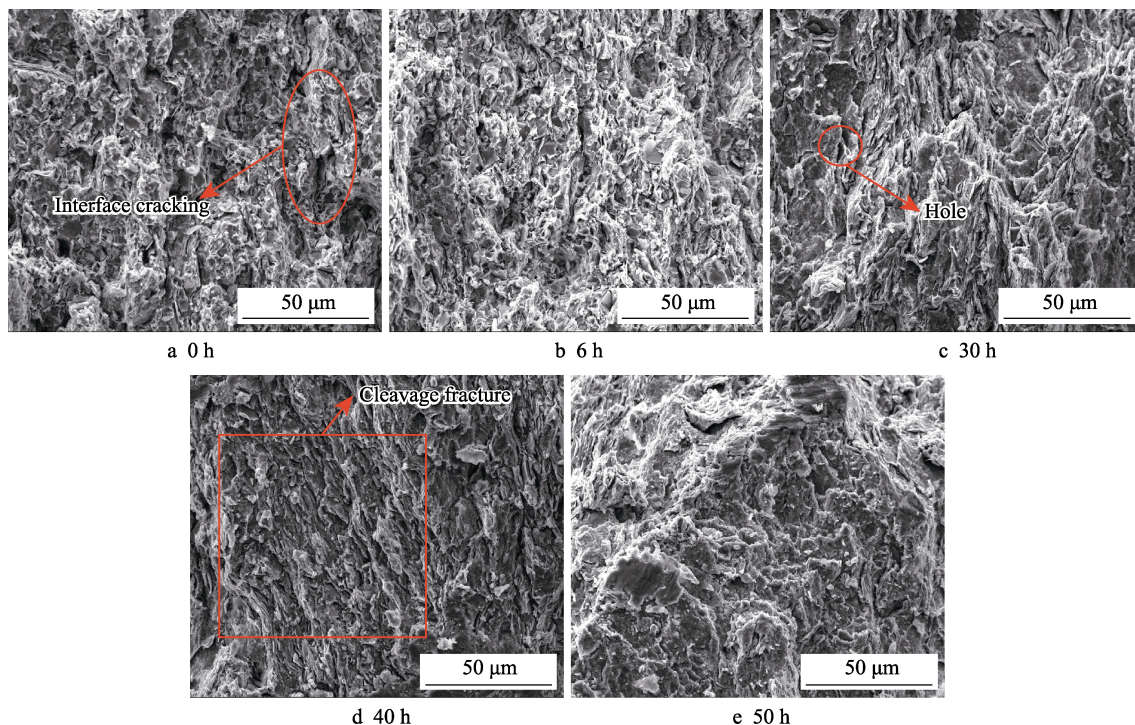


图 6 不同球磨时间下复合材料试样断口的 SEM 形貌

Fig.6 Fracture micrographs of the composite with different ball milling time

## 2.4 Cu-20% $WS_2$ 复合材料的摩擦磨损性能分析

不同球磨时间下制备出的铜基自润滑复合材料

的摩擦系数和磨损率如图 7 所示。摩擦学实验均做了 5 次重复试验,取平均值。由图 7b 可知,与未球磨的摩擦系数相比,球磨 6、30 h 的摩擦系数相近,均维持在较低水平,为 0.18~0.21。球磨 40、50 h 时的

摩擦系数明显变大。由此推断，球磨 30 h 以上，由于粉末表面活化能的增大，导致一部分  $\text{WS}_2$  被分解，无法提供充足的润滑作用，摩擦系数增大。由图 7c 可知，当球磨时间低于 40 h 时，力学性能随球磨时间的延长而增强，磨损率随之下降。其中在球磨时间为 30 h 时，磨损率最低。然而随着球磨时间的进一步延长，磨损率却随之增大。当球磨时间达到 50 h

时，磨损率最高，甚至超过未球磨的磨损率。这是因为  $\text{WS}_2$  的分解和  $\text{Cu}_2\text{S}$  的生成减少了润滑相的生成，缺少润滑膜，导致基体耐磨性下降。与断裂缺口形貌分析一致，球磨 50 h 的复合材料韧性下降，使得摩擦系数提高和磨损率增加。

不同球磨时间下制备的 Cu-20% $\text{WS}_2$  复合材料的磨损形貌和 30~50 h 试样磨损面的能谱见图 8。由图

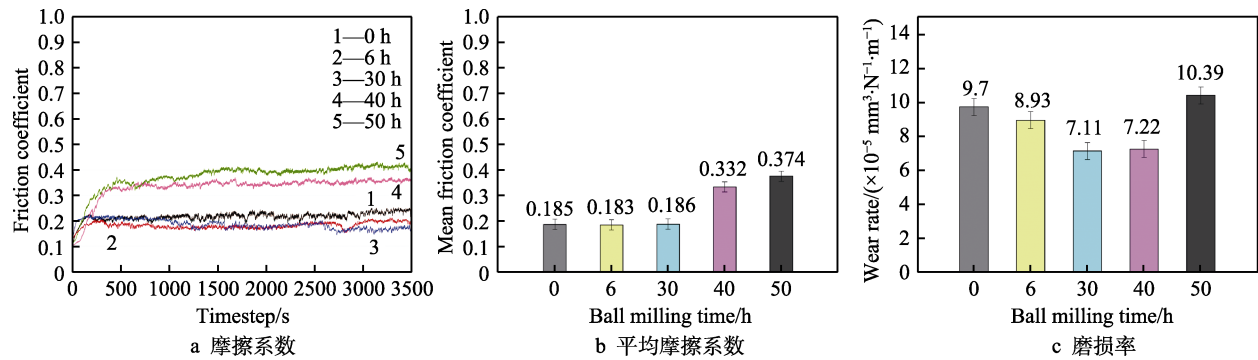


图 7 复合材料的摩擦系数和磨损率

Fig.7 Tribological properties of composite materials: a) friction coefficient; b) mean friction coefficient; c) wear rate

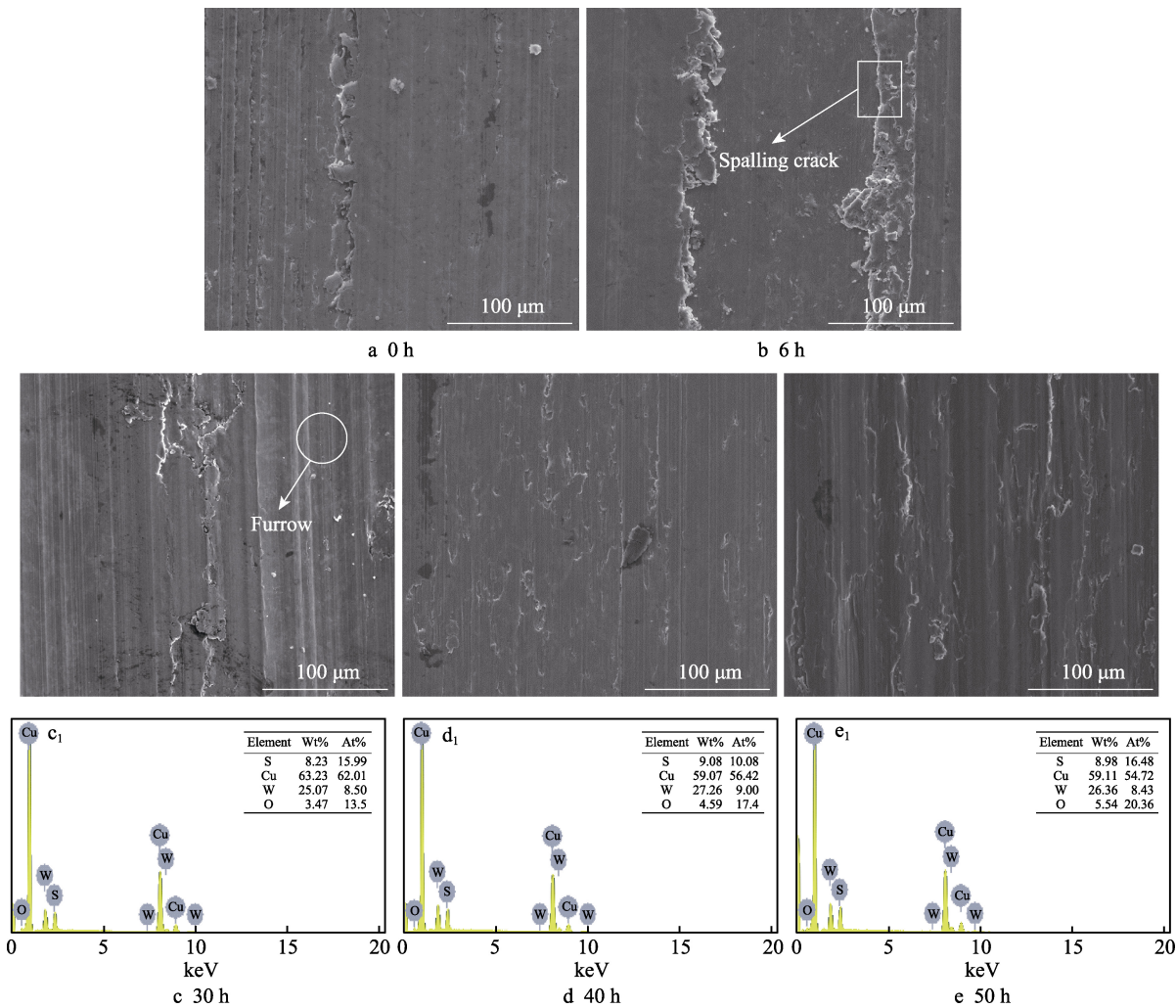


图 8 复合材料磨损形貌及 EDS 能谱

Fig.8 Composite materials and corresponding EDS results

8 可知,当球磨时间为 0、6 h 时,在磨损面边缘能够观察到连续的剥落裂纹,有大量的磨屑附着在磨损面。这是由于摩擦副与铜基材料颗粒在摩擦过程中接触,在接触面边缘产生较大的剪切应力,导致材料整体断裂和剥落,从而形成剥落的裂纹。部分剥落的磨屑在剪切和载荷作用下发生塑性变形,被挤压成片层状附着于磨损面上,从而形成粘着磨损。因此,球磨 0、6 h 时的磨损机制为剥层磨损和粘着磨损。球磨时间达到 30 h 时,观察到在磨损面上分布着平行于滑移方向的犁沟,没有大面积的剥落坑和磨屑。因为球磨 30 h 时,材料的力学性能比球磨 0、6 h 时明显提升,在摩擦剪切应力作用下,磨损面并没有发生整体断裂和剥落。而部分剥落的硬质颗粒又为磨粒磨损提供磨料,致使磨损面上出现犁沟。另外,在磨损表面均可观察到明显的粘着磨损形貌。故,球磨 30 h 时的磨损机制为磨粒磨损和粘着磨损。当球磨时间为 40、50 h 时,磨损形貌发生了明显的变化,在磨损表面均可以观察到明显的粘着磨损形貌,且发现局部有黑色区域出现。结合 EDS 分析可知,球磨 40 h 时,氧含量明显提高,说明黑色区域的磨损机制主要是粘着磨损和氧化磨损。

### 3 结论

制备了  $\text{WS}_2$  含量为 20% 的 Cu- $\text{WS}_2$  复合材料,研究了 800 °C 烧结温度下球磨时间对结构、力学性能和摩擦学性能的影响,得出如下结论:

1) 球磨时间为 0~30 h 时, Cu 与  $\text{WS}_2$  粉末机械合金化程度逐渐提高,界面结合紧密,从而提高了材料的致密化程度,复合材料力学性能提高显著。

2) 球磨 40 h 以下,  $\text{WS}_2$  未分解, Cu 与  $\text{WS}_2$  未发生界面反应, 20% 的  $\text{WS}_2$  提供了充足的润滑作用,故球磨 30 h 的平均摩擦系数维持在较低的水平。同时,由于球磨 40 h 以下,力学性能随球磨时间的延长而增强,磨损率随之下降。因此在球磨时间为 30 h 时,磨损率最低。综合力学性能和摩擦磨损性能分析,球磨 30 h 为最佳球磨时间。

3) 球磨时间为 50 h 时,  $\text{WS}_2$  的分解和  $\text{Cu}_2\text{S}$  的生成减少了润滑相的生成,导致基体耐磨性下降,且此时复合材料韧性下降,故磨损率显著提高。

### 参考文献:

- [1] GRANDIN M, WIKLUND U. Wear phenomena and tribofilm formation of copper/copper-graphite sliding electrical contact materials[J]. *Wear*, 2018, 398-399: 227-235.
- [2] CHENG Jun, LI Fei, ZHU Sheng-yu, et al. High temperature tribological properties of a nickel-alloy-based solid-lubricating composite: Effect of surface tribochemistry, counterpart and mechanical properties[J]. *Wear*,

- 2017, 386-387: 39-48.
- [3] ZHEN Jin-ming, CHENG Jun, ZHU Sheng-yu, et al. High-temperature tribological behavior of a nickel alloy matrix solid-lubricating composite under vacuum[J]. *Tribology international*, 2017, 110: 52-56.
- [4] 陈树. VN 基自润滑复合材料的制备及宽温域摩擦磨损性能研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- CHEN Shu. Preparation of VN-based self-lubricating composites and study on tribological properties in wide temperature[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [5] BASTWROS M M H, ESAWI A M K, WIFI A. Friction and wear behavior of Al-CNT composites[J]. *Wear*, 2013, 307(1-2): 164-173.
- [6] TAN Hui, WANG Shuai, YU Yuan, et al. Friction and wear properties of Al-20Si-5Fe-2Ni-Graphite solid-lubricating composite at elevated temperatures[J]. *Tribology international*, 2018, 122: 228-235.
- [7] HAMMES G, MUCELIN K J, DA COSTA GONÇALVES P, et al. Effect of hexagonal boron nitride and graphite on mechanical and scuffing resistance of self lubricating iron based composite[J]. *Wear*, 2017, 376-377: 1084-1090.
- [8] 柏明磊. 镍包石墨自润滑激光熔覆层摩擦磨损性能研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
- BAI Ming-lei. Study on friction and wear properties of Ni-graphite self-lubricating laser cladding layer[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.
- [9] FURLAN K P, PRATES P B, ANDREA DOS SANTOS T, et al. Influence of alloying elements on the sintering thermodynamics, microstructure and properties of Fe-MoS<sub>2</sub> composites[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2015, 652: 450-458.
- [10] HUANG Shi-yin, FENG Yi, LIU Hong-juan, et al. Electrical sliding friction and wear properties of Cu-MoS<sub>2</sub>-graphite- $\text{WS}_2$  nanotubes composites in air and vacuum conditions[J]. *Materials science and engineering: A*, 2013, 560: 685-692.
- [11] LU Z C, ZENG M Q, XING J Q, et al. Improving wear performance of CuSn<sub>3</sub>Bi<sub>5</sub> alloys through forming self-organized graphene/Bi nanocomposite tribolayer[J]. *Wear*, 2016, 364-365: 122-129.
- [12] ZHANG Lei, XIAO Jin-kun, ZHOU Ke-chao. Sliding wear behavior of silver-molybdenum disulfide composite [J]. *Tribology transactions*, 2012, 55(4): 473-480.
- [13] LIU Er-yong, WANG Wen-zhen, GAO Yi-min, et al. Tribological properties of Ni-based self-lubricating composites with addition of silver and molybdenum disulfide[J]. *Tribology international*, 2013, 57: 235-241.
- [14] ZHAI Wen-zheng, SHI Xiao-liang, WANG Mang, et al. Grain refinement: A mechanism for graphene nanoplatelets to reduce friction and wear of Ni<sub>3</sub>Al matrix self-lubricating composites[J]. *Wear*, 2014, 310(1-2): 33-40.
- [15] 胡艳艳, 刘耀, 张建波, 等. 金属基固体自润滑复合材料



- 料研究现状及展望[J]. 有色金属材料与工程, 2016, 37(4): 165-170.
- HU Yan-yan, LIU Yao, ZHANG Jian-bo, et al. Prospect and advances of metal matrix self-lubricating composites[J]. Nonferrous metal materials and engineering, 2016, 37(4): 165-170.
- [16] 甄金明, 李斐, 朱圣宇, 等. Ti 对镍基高温自润滑复合材料力学和摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(5): 586-591.
- ZHEN Jin-ming, LI Fei, ZHU Sheng-yu, et al. The influence of Ti on the mechanical and tribological properties of nickel-based high-temperature self-lubricating composites[J]. Tribology, 2014, 34(5): 586-591.
- [17] 刘鹤. 固体润滑石墨复合材料的制备与性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- LIU He. Study on preparation and properties of graphite solid lubricating composites[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.
- [18] 程嘉兴, 谢凤. 二硫化钨润滑添加剂的摩擦学性能[J]. 合成润滑材料, 2016, 43(2): 18-20.
- CHENG Jia-xing, XIE Feng. Tribological characteristics of tungsten disulfide lubricant additive[J]. Synthetic lubricants, 2016, 43(2): 18-20.
- [19] 李长生, 于云, 刘艳清, 等.  $WS_2$  纳米颗粒的合成及摩擦学性能研究[J]. 无机化学学报, 2008, 24(2): 275-279.
- LI Chang-sheng, YU Yun, LIU Yan-qing, et al. Synthesis and tribological properties of  $WS_2$  nanoparticles[J]. Chinese journal of inorganic chemistry, 2008, 24(2): 275-279.
- [20] 施凯烽, 谢凤. 二硫化钨润滑添加剂摩擦学性能研究现状[J]. 化工时刊, 2017, 31(12): 36-39.
- SHI Kai-feng, XIE Feng. Research status about tribological characteristics of tungsten disulfide lubricant additive[J]. Chemical industry times, 2017, 31(12): 36-39.
- [21] XIAO Shu-long, TIAN Jing, XU Li-juan, et al. Microstructures and mechanical properties of TiAl alloy prepared by spark plasma sintering[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(6): 1423-1427.
- [22] 邹正光, 李金莲, 陈寒元. 高能球磨在复合材料制备中的应用[J]. 桂林工学院学报, 2002, 22(2): 174-178.
- ZOU Zheng-guang, LI Jin-lian, CHEN Han-yuan. Application of ball milling process in synthesis of composite materials[J]. Journal of Guilin institute of technology, 2002, 22(2): 174-178.
- [23] 文国富, 梁艳娟, 王秀飞, 等. 球磨参数对石墨烯增强铜基复合材料性能的影响[J]. 润滑与密封, 2021, 46(1): 103-110.
- WEN Guo-fu, LIANG Yan-juan, WANG Xiu-fei, et al. Effects of ball-milling parameters on properties of graphene reinforced copper-based composites[J]. Lubrication engineering, 2021, 46(1): 103-110.
- [24] 刘建秀, 郝源丰, 樊江磊, 等. 混料时间对含石墨的铜基摩擦材料性能的影响[J]. 粉末冶金工业, 2020, 30(4): 37-41.
- LIU Jian-xiu, HAO Yuan-feng, FAN Jiang-lei, et al. Effect of mixing time on properties of graphite-containing copper-based friction materials[J]. Powder metallurgy industry, 2020, 30(4): 37-41.
- [25] 靳忠伟, 黄依娜, 吴玉程, 等. 机械合金化和放电等离子体烧结技术制备 Fe-(8/15)Cr 合金及其微观结构分析[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(12): 72-79.
- JIN Zhong-wei, HUANG Yi-na, WU Yu-cheng, et al. Microstructure characterization of Fe-(8/15)Cr alloy fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2020, 41(12): 72-79.
- [26] NAVASER M, ATAPOUR M. Effect of friction stir processing on pitting corrosion and intergranular attack of 7075 aluminum alloy[J]. Journal of materials science & technology, 2017, 33(2): 155-165.
- [27] 杨逸斐, 王兴庆, 黄英华, 等. 超细硬质合金烧结方法与抑制剂的研究[J]. 上海有色金属, 2004, 25(4): 156-162.
- YANG Yi-fei, WANG Qing-xing, HUANG Ying-hua, et al. Study of sintering method for ultra-fine powder of hard metals and applied inhibitors[J]. Shanghai nonferrous metals, 2004, 25(4): 156-162.
- [28] 雒晗, 栾道成, 王正云, 等. 高能球磨工艺对钨铜复合材料组织的影响[J]. 粉末冶金工业, 2007, 17(1): 30-33.
- LUO Han, LUAN Dao-cheng, WANG Zheng-yun, et al. Influence of high power ball mill technology on structure of tungsten-copper composites[J]. Powder metallurgy industry, 2007, 17(1): 30-33.
- [29] 吴开霞, 查五生, 唐鑫鑫, 等. 氧化锆球体表面机械球磨涂覆钛涂层工艺研究[J]. 粉末冶金技术, 2019, 37(6): 444-450.
- WU Kai-xia, ZHA Wu-sheng, TANG Xin-xin, et al. Study on the preparation process of Ti coatings on  $ZrO_2$  balls by mechanical milling coating technology[J]. Powder metallurgy technology, 2019, 37(6): 444-450.
- [30] 张启芳, 潘一凡. 钨-铜系纳米材料研究[J]. 南京林业大学学报, 1998, 22(4): 63-65.
- ZHANG Qi-fang, PAN Yi-fan. A study on nanocrystalline material of the W-Cu system[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 1998, 22(4): 63-65.