

脉冲磁场处理对硬质合金/钛合金摩擦性能的影响

陈 喆¹, 胥杨洋², 闫乔松¹, 陈依桐³, 张 琳¹, 吴明霞¹, 刘 剑¹

(1. 四川大学 机械工程学院, 四川 成都 610065)

(2. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200240)

(3. 四川大学 工程训练中心, 四川 成都 610207)

摘 要: 采用脉冲磁场对不同钴 (Co) 含量的YG系列硬质合金球进行改性处理, 通过往复式摩擦机及SEM研究脉冲磁场处理对YG6/YG8/YG12-钛合金 (TC4) 摩擦性能的影响。结果表明, 脉冲磁场处理可以有效地降低YG系列硬质合金-TC4合金摩擦副的摩擦系数, 场强弱改变了外源磁场输入的能量强度, 以YG8为例, 与未经磁场处理时相比, 本研究梯度设计的0.5、1、1.5 T磁处理后平均摩擦系数分别减小20.5%、29.7%、25.9%; 在磁场强度1 T时, YG6、YG8、YG12的平均摩擦系数分别下降了19.5%、29.7%、20.1%, 随Co含量的增加, 磁场的效果呈先上升后下降的趋势, Co含量为8% (质量分数) 时的磁场效应最为显著。磁处理硬质合金时, 脉冲磁场作为外源能量, 引发Co相发生从fcc的 α -Co向hcp的 ϵ -Co的马氏体转变, 从而引发位错增殖, 提高硬质合金抵抗塑性变形的能力, 宏观表现为硬质合金强度及耐磨性的提升, 从而改善了摩擦性能。

关键词: 脉冲磁场处理; YG硬质合金; TC4钛合金; 摩擦性能; 马氏体转变

中图分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)03-0697-09

1 引言

硬质合金是以碳化钨(WC)为硬质相, 添加粘结剂及其他难熔碳化物作硬质相烧结而成^[1]。硬质合金通常具有硬度高、耐磨性好、抗冲击强、耐腐蚀等优点^[2], 因此被广泛地应用于工业领域, 特别是在切削刀具方面发挥着举足轻重的作用。其中钨钴类(WC-Co)硬质合金, 代号YG, 凭借较为优异的综合性能及较高性价比常被用于加工铸铁、有色金属及部分非金属^[3-4]。但是不同的被加工材料会一定程度影响刀具的耐磨性及寿命。其中, 钛合金作为典型的难加工材料, 其化学活性高、导热性差^[5], 加工过程中的摩擦及挤压产生的高温会促使硬质合金刀具发生严重磨损^[6], 影响钛合金的加工质量, 降低刀具的服役寿命。虽然已有学者采用耐磨性更好的陶瓷刀具、涂层刀具等, 但是基于成本和效率的综合考虑, 硬质合金刀具仍具有很强的行业吸引力。因此, 研究硬质合金的改性优化, 提高用于加工钛合金的硬质合金刀具的摩擦性能是十分必要的。

学者们目前采用了多种技术改善硬质合金的摩擦性能。Xiang等人^[7]通过适当的热处理工艺强化Co相, 可以获得具有良好硬度和韧性的超细晶WC-Co硬质合金, 并且提高了它的耐磨性与切削使用寿命。Weng等人^[8]通过深冷处理促进fcc α -Co向hcp ϵ -Co的马氏体转变,

成功提高WC-20Co硬质合金的断裂韧性和耐磨性。Zhang等人^[9]通过高能电子束照射WC-10Ni硬质合金的表面, 使得摩擦系数从8.13降低到了0.5, 磨损率也显著下降。Zheng等人^[10]通过激光加工在硬质合金表面制备微槽, 与传统表面相比, 微槽硬质合金的摩擦系数和表面磨损显著降低。Liu等人^[11]在硬质合金表面制备了等离子氮化物涂层, 结果表明该涂层可以降低摩擦系数, 有效提高基体的耐磨性。然而上述技术耗时长、能耗大, 提高了加工成本。一种无接触、快速、绿色环保、经济便捷的脉冲磁场处理技术在硬质合金摩擦性能的强化中已经获得了许多有参考价值的研究成果。Yang等人^[12]对硬质合金(WC-12Co)进行脉冲磁场处理, 增强其不同摩擦条件下的减摩和抗磨损效果。结果表明, 施加脉冲磁场可以改善硬质合金磨损情况, 提高耐磨性, 磁处理后TC4磨损量减少26.8%, 平均摩擦系数降低12.4%。Zhang等人^[13]对WC-8Co硬质合金进行电磁耦合处理, 提高了硬质合金的导热性与热扩散率, 增强了其在高温下的抗氧化性, 减少了硬质合金刀具的粘着、扩散、氧化磨损。Zhou等人^[14]研究发现电磁耦合处理后的硬质合金表面硬度偏差降低了82.03%, 有助于减少硬质合金刀具的表面缺陷, 提高刀具的均匀性, 提升磨损性能。以往的研究采用脉冲磁场处理探究特定牌号的硬质合金的摩擦性能, 但是不同的脉冲磁场强度下多种钴(Co)含量的YG

收稿日期: 2024-08-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(52205490); 四川大学-遂宁校市战略合作项目(2022CDSN-12, 2023CDSN-9)

作者简介: 陈 喆, 女, 1996年生, 博士, 四川大学机械工程学院, 四川 成都 610065, E-mail: 874298978@qq.com

系列硬质合金的摩擦性能的研究尚有空缺。

本研究对 YG6、YG8、YG12 硬质合金进行脉冲磁场处理,与具有高比强度、小弹性模量等优点而被广泛地应用于航空航天等领域^[15-18]的 Ti6Al4V 钛合金(TC4)构成摩擦副。利用往复式摩擦机采集实时摩擦系数,采用 SEM 观察 YG 硬质合金球及 TC4 试样表面形貌,探究不同 Co 含量的硬质合金球在脉冲磁场处理后的摩擦性能及不同脉冲磁场强度对 YG/TC4 摩擦副的影响。

2 实验

采用 Co 含量(质量分数)分别为 6%(YG6)、8%(YG8)、12%(YG12)的 3 种硬质合金球为原材料,试样尺寸 $\Phi=6\text{ mm}$ 。应用自主研发的脉冲磁场处理设备分别在 0.5、1、1.5 T 3 种磁场强度下对硬质合金球进行单正向处理,除磁场强度变化外,其余参数均保持一致:磁脉冲间隔时间为 10 s,处理次数为 20 次。对每种牌号的硬质合金设置无磁场处理的对照组,命名为 UT。利用电火花线切割将 TC4 钛合金加工成尺寸为 12 mm×50 mm×3 mm,其化学成分如表 1 所示。采用砂纸打磨钛合金板材使其平整,用粒度 0.04 μm 的 SiO_2 抛光液抛光至镜面,在无水乙醇中超声清洗 30 min,干燥后用于摩擦磨损测试。

另外,采用线切割将 YG6、YG8、YG12 加工成 15 mm×10 mm×5 mm 的块体,依次在目数 320/800/1500/2000/2500 的金刚石磨盘上打磨,使用粒度 7.0/3.5/1/0.5/0.25 μm 的金刚石抛光液抛至镜面,清洗干燥后,氩离子抛光去除表面应力,用于微观检测。

采用往复式 CFT- I 摩擦磨损机研究脉冲磁场处理前后硬质合金球的摩擦性能。硬质合金球作上试件,TC4 钛合金作下试件。实验采用湿摩擦,TC4 浸润在环保切削液和水混合(配比 1:18)而成的润滑液中,润滑液的表面比 TC4 表面高出 1~2 mm,保证接触部分完全润滑。摩擦机实验参数为:往复频率 10 Hz(往复速度 0.1 m/s),往复长度 5 mm,持续时间 120 min,载荷 20 N。

摩擦系数(COF)由摩擦机的数据传感器实时采集。

表1 TC4钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy (wt%)							
Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
5.5~6.8	3.5~4.5	≤0.30	≤0.10	≤0.05	≤0.015	≤0.20	Bal.

摩擦实验结束后,采用配备能谱仪(EDS)探头的 Phenom Pro 扫描电子显微镜(SEM)分析观察硬质合金球与 TC4 试件接触表面元素分布及磨损形貌。使用装配有背散射电子衍射(EBSD)探头的 Tescan Mira3 LHM 高分辨扫描电镜采集硬质合金块体表面晶体学特征,分析相成分及局部应变,阐明微观组织转变对硬质合金耐磨性的影响。

3 结果与讨论

3.1 摩擦系数

摩擦系数能够综合表征摩擦过程稳定性、接触表面粗糙度、硬质合金破损失效,因此以摩擦系数来评判磁处理对硬质合金摩擦学性能的影响。图 1 是 3 种硬质合金在不同脉冲磁场强度处理后的实时摩擦系数(COF)。每种合金在摩擦磨损的前 10 min 内 COF 的波动较大,起始阶段的接触表面粗糙度变化剧烈,TC4 逐渐被去除,YG 球产生磨损,摩擦系数震荡增加。随着摩擦地进行,摩擦副逐渐磨合,经过不同脉冲磁场强度(0.5、1、1.5 T)处理后的摩擦系统 COF 趋于稳定,在长时(40 min 以上)有小范围的波动但会快速建立新稳态;而未经磁场处理的试样 COF 整体呈持续上升趋势,表明脉冲磁场可以改善 YG/TC4 摩擦状态,降低 COF,提高硬质合金的抗摩擦性能,且 1 T 的改善效果最为显著。

3 种硬质合金在脉冲磁场处理前后的平均摩擦系数(ACOF)如图 2 所示,YG6、YG8、YG12 3 种硬质合金在经过不同磁场强度处理后 ACOF 都得到了不同程度的改善。磁场强弱(不同磁场强度)改变了外源磁场输入的能量强度,以摩擦系数降低最明显的 YG8 为例,本实验梯度设计的 0.5、1、1.5 T 磁处理后平均摩擦系数分别减小 20.5%、29.7%、25.9%,磁场效果呈先上升后下降的趋势,并且 1.5 T 的数值位于 0.5~1 T 之间,即在 1 T 时平均摩擦

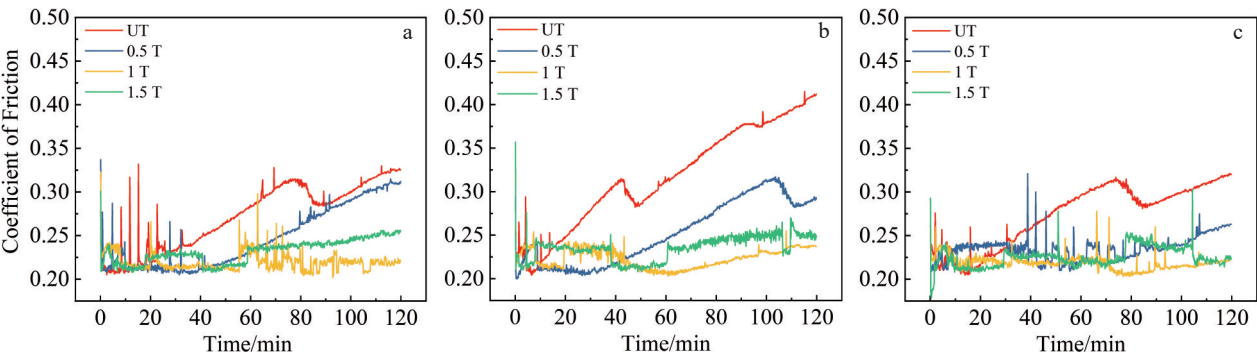


图1 3种硬质合金在不同磁场强度处理后的实时摩擦系数

Fig.1 Real-time coefficient of friction vs time of YG6/YG8/YG12 with different magnetic field intensities: (a) YG6, (b) YG8, and (c) YG12

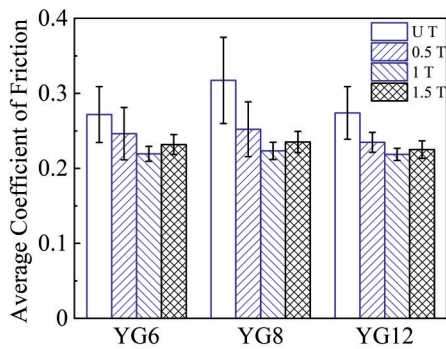


图2 3种硬质合金在不同磁场强度处理下的平均摩擦系数
Fig.2 Average coefficient of friction of YG6/YG8/YG12 with different magnetic fields intensities

系数达到最小。同时,经过脉冲磁场处理后的摩擦过程COF震荡幅度显著改善,提高了摩擦稳定性。以最佳参数1 T为例,对比不同Co含量的摩擦响应,YG6、YG8、YG12分别下降了19.5%、29.7%、20.1%,随着Co含量的增加,磁场的效果呈先上升后下降的趋势,Co含量为8%时的磁场作用最为显著。

3.2 硬质合金物相组成的准原位观察

鉴于1 T在3种硬质合金中的磁处理效果均最为明显,因此后续以1 T及UT进行对比,深入研究脉冲磁处理对不同Co含量硬质合金的影响。为获得更为准确的磁处理前后物相组成的对比结果,通过标定位置,在同一个试样上尽可能实现脉冲磁处理前后的准原位(in situ)SEM观察。YG系列硬质合金主要由碳化钨(WC)和钴(Co)组成,3种硬质合金块体磁处理前后的准原位SEM

照片如图3所示,其中白色部分为硬质相WC,黑色部分是粘结相Co。可以看出未经磁场处理UT的硬质合金中WC晶粒具有多种尺寸(0.5~5 μm),晶粒边界分明,呈规则的多边形,无明显晶粒聚集情况和其他特殊区域。经1 T磁场处理后,硬质合金整体晶粒尺寸没有发生改变,仍保持着多边形的特征,边界清晰可见。硬质相WC和粘结相Co的分布无明显改变,二者混合较为均匀。

3.3 TC4板材磨损

图4~图6分别展示了YG6、YG8、YG12 3种硬质合金对应的TC4试样的磨损形貌。从图4a、图5a、图6a中可以看出,TC4的主要磨损方式是黏着磨损,试样表面具有明显的剥落现象,这是因为在摩擦过程中会产生材料挤压变形及大量的摩擦热,钛合金的导热性差,从而使TC4与试样接触表面出现局部高温高压,产生黏着;而TC4硬度远低于YG6硬质合金,TC4表面被硬质合金切削去除,在摩擦过程中粘结在硬质合金表面或随切屑离开界面,最终造成基体了剥落。

如图4d、图5b所示,几乎看不到较大的剥落区域,与UT相比表面更加平整;但是可以清楚地看到在摩擦方向上出现了明显的犁沟,从而推断此摩擦副的主要磨损方式是磨粒磨损。这种情况出现的原因可能是摩擦过程中脱落的硬质合金颗粒由于局部高温高压被冷焊在硬质合金表面,由面接触转变为线接触,在外部载荷的持续作用下沿着摩擦的方向对TC4表面进行切削,致使TC4表面被犁出较长的沟槽;犁沟两侧的金属在挤压的作用下发生塑性变形而堆积起来,随着摩擦的进行堆积部分又被压平,故呈现出犁沟形貌。而在其它磁场强度处理下,主要磨损方式均是黏着磨损,与UT相比TC4表面的剥落

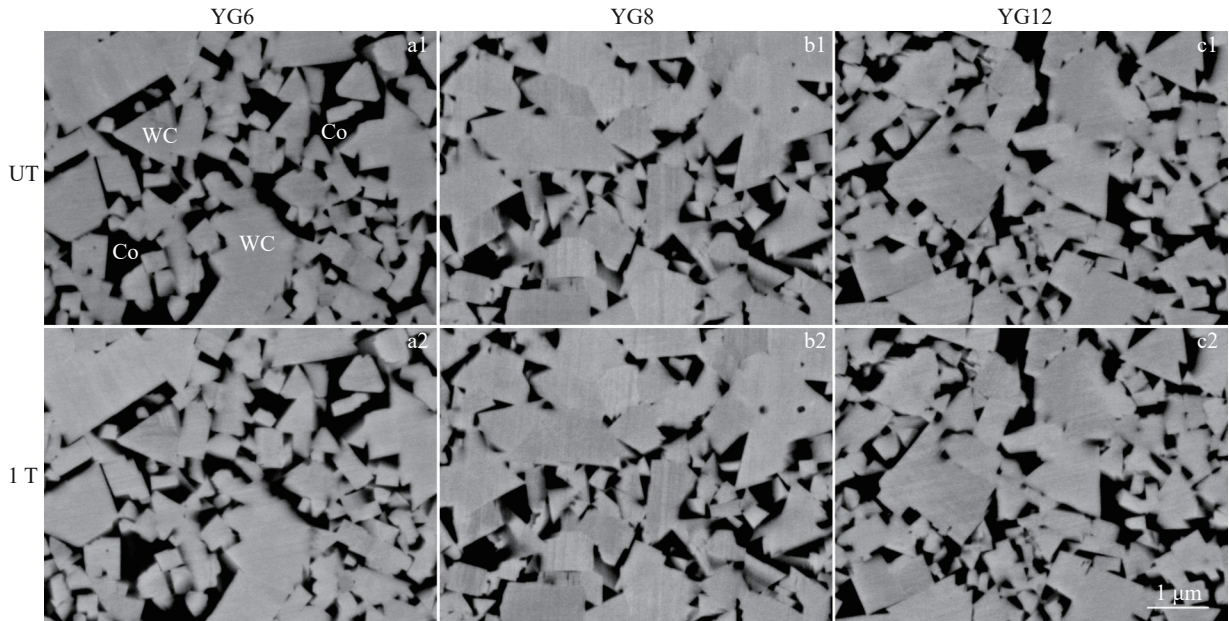


图3 YG6、YG8、YG12 3种硬质合金磁处理前后的准原位SEM形貌
Fig.3 In-situ SEM images of the cemented carbide samples before untreated (UT) and after magnetic field treatment

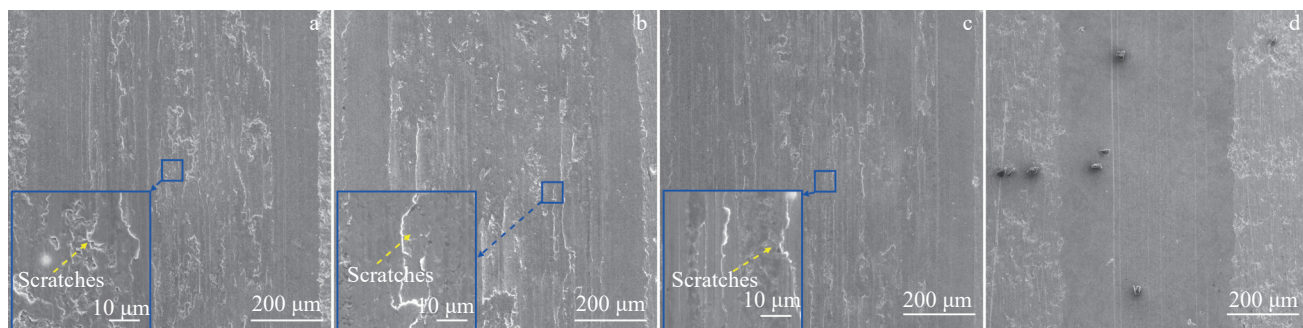


图4 YG6对应的TC4试样的表面形貌

Fig.4 Morphologies of TC4 samples corresponding to YG6: (a) UT, (b) 0.5 T, (c) 1 T, and (d) 1.5 T

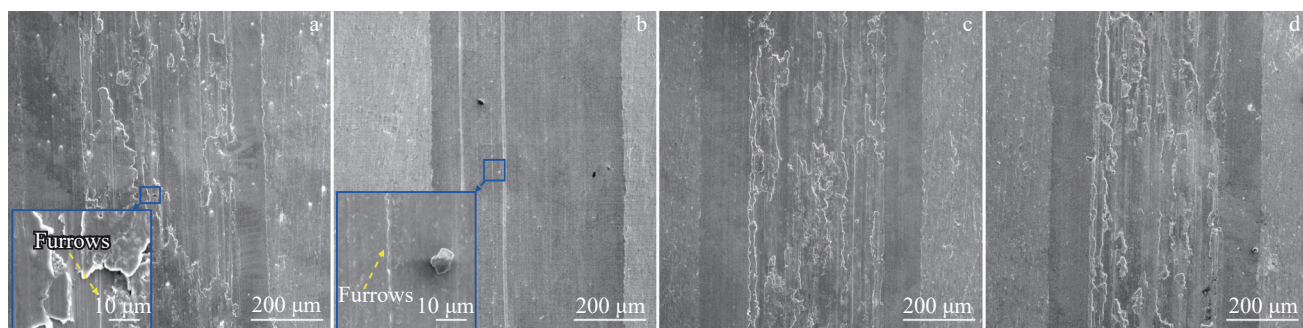


图5 YG8对应的TC4试样的表面形貌

Fig.5 Morphologies of TC4 samples corresponding to YG8: (a) UT, (b) 0.5 T, (c) 1 T, and (d) 1.5 T

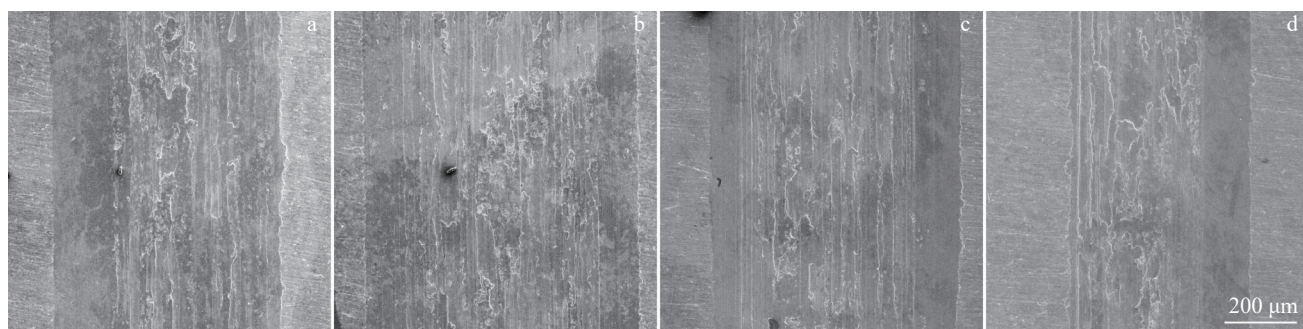


图6 YG12对应的TC4试样的表面形貌

Fig.6 Morphologies of TC4 samples corresponding to YG12: (a) UT, (b) 0.5 T, (c) 1 T, and (d) 1.5 T

区域有所减少,摩擦性能得到了提升。

以磁处理后平均摩擦系数最低的YG8为例,探究磁处理对摩擦表面元素分布及含量的影响。图7是YG8硬质合金对磨的TC4试样的EDS元素面分布。表2为图7中不同标记位置的EDS成分分析结果。如图7a所示,未经磁场处理获得的TC4表面呈现出明显的黏着磨损形貌,点1靠近表层的位置,该点氧含量高达30.67%,远超磁处理后的O含量,说明摩擦产生使TC4表面发生了严重的氧化磨损;该点还出现了微量的Co元素,即高温下硬质合金发生了扩散磨损,Co相的缺失导致WC相暴露,在连续摩擦过程中转移到TC4中。点2更靠近TC4

基体,该点含氧量大为降低,Ti含量最多,接近基体的元素组成,即点2处是粘接磨损发生后由于表面材料脱落而露出的轻微或尚未发生磨损的区域。

图7b中磁处理后产生的犁沟形貌中点1位于犁沟的底部,主要由Ti和V 2种元素组成,二者合计占比高达90%,此时表面氧元素含量远远小于UT;同时,不同磁场强度处理后的图7c和7d虽然与UT有类似的磨损形貌,但与UT不同的是O含量的显著下降。无论磁场强度大小,脉冲磁场的引入缓解了TC4表面的氧化磨损,降低接触表面粗糙度,从而缓解刀具磨损,提高了TC4的加工质量。

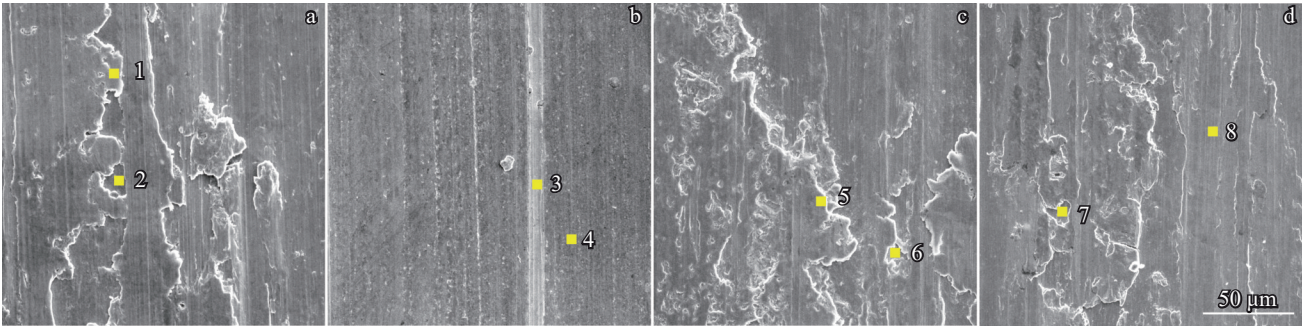


图7 YG8硬质合金对应TC4的EDS元素面分布
Fig.7 EDS element mappings of TC4 corresponding to YG8 cemented carbide: (a) UT, (b) 0.5 T, (c) 1 T, and (d) 1.5 T

表2 图7中不同标记位置的EDS成分分析结果
Table 2 EDS analysis results of marked positions in Fig.7

Position	Content/wt%					
	Ti	O	Co	V	W	Al
1	69.15	30.67	0.18	–	–	–
2	85.45	13.83	0.19	0.21	–	0.32
3	80.42	3.48	1.96	14.14	–	–
4	54.59	17.10	2.50	24.60	0.94	0.27
5	78.86	20.74	–	0.11	–	0.30
6	83.94	15.12	–	0.24	0.70	–
7	87.29	10.43	1.70	–	0.34	0.24
8	85.78	11.45	1.86	–	0.60	0.31

3.4 YG系列硬质合金球的磨损

图8是YG6、YG8、YG12 3种硬质合金球磨损的SEM-BSE照片。从图8中可见,硬质合金的磨损面主要呈椭圆形,垂直于摩擦方向的磨痕宽度与图4~图6中TC4磨损宽度一致。摩擦表面覆盖有大量的灰黑色黏着物即轻质的TC4,颜色越深的区域黏着物聚集越严重;沿摩擦方向有条状磨痕及无明显TC4黏着物的白色区域是还未参与摩擦的硬质合金表面或在摩擦过程中因表层材料随磨屑一起被带走而裸露的硬质合金深层材料。为了探究硬质合金的磨损形式,对合金球磨损面(图9a)中心区(图9b)域进行EDS元素面扫描,结果如图9c所示,包含O、Ti、W、C 4种元素。Ti含量高达22.19%,即摩擦过程中一些被去除的TC4随着摩擦的进行从表面脱落,在高温的作用下粘结在了硬质合金球表面。

图10是3种硬质合金经UT和1 T磁场强度处理后的硬质合金球表面SEM照片及EDS成分分析。从图中可见3种硬质合金在UT时粘结了许多TC4的表面脱落物,磁处理后黏着状态均有明显改善。其中YG6的UT中Ti含量高达22.19%,而磁处理后的YG6的Ti含量下降至9.70%,黏着物区域显著减少,TC4表面脱落的程度

大幅下降,硬质合金球的材料表面完整性得以较好保全,有利于平稳的摩擦状态,提高了合金球的寿命。YG8和YG12的元素含量无明显变化。

3.5 脉冲磁场处理对硬质合金摩擦性能的影响机制

根据章节3.1~3.4的摩擦性能表征可知,脉冲磁场处理能够有效降低摩擦系数,减少黏着磨损及TC4氧化现象,延长硬质合金球的寿命,提高摩擦性能。为了阐明脉冲磁场处理对硬质合金摩擦性能的影响机理,采用背散射电子衍射(EBSD)测试,采集硬质合金块体表面晶体学特征,分析相成分及局部应变。

脉冲磁场处理前后的3种硬质合金相分布如图11所示。YG硬质合金包含普通六方相WC、面心立方(fcc)的 α -Co、体心立方(hcp)的 ε -Co。其中, α -Co相有12个滑动面,韧性优异,而 ε -Co相有3个滑动面,韧性较低,耐磨性较好。绿色代表WC相,占绝大多数;黄色代表hcp的 ε -Co相,含量最少;红色代表fcc的 α -Co相,是硬质合金中Co的主要晶体结构。从图11中可见,磁场对晶粒尺寸及相分布无明显影响,与图3结论一致。

采用Chanel 5软件,统计磁处理前后相成分占比。相比于Co相,Wc共价键结构稳定,脉冲磁场能量的引入不足以使得WC发生相变,故脉冲磁场主要通过影响顺磁性的Co相改变硬质合金微观结构。表3是磁处理前后的Co相成分。从表3中可见,脉冲磁处理会引发相变,减少 α -Co,增加 ε -Co含量。除YG12含量相同外,磁处理后YG6、YG8中 ε -Co含量均有提升,即Co发生了从fcc的 α -Co向hcp的 ε -Co的马氏体转变。磁场作用在金属上常会发生微观变形,即磁致塑性效应,这些变形会在材料中引发弹性应力,而由于材料本身组织并不是完美的而会存在一些的位错缺陷,原子间为了抵抗这种位错会产生一定的弹性应力,从而与磁场引入的弹性应力产生相互作用,造成局部应力的存在,成为Co相发生马氏体相变的一个诱因。同时,当外源能量达到Co的同素异构转变焓时,相变发生,并通过脉冲磁场引起的缺陷积累进一步促进相变,hcp结构的 ε -Co增多最终提高硬质合

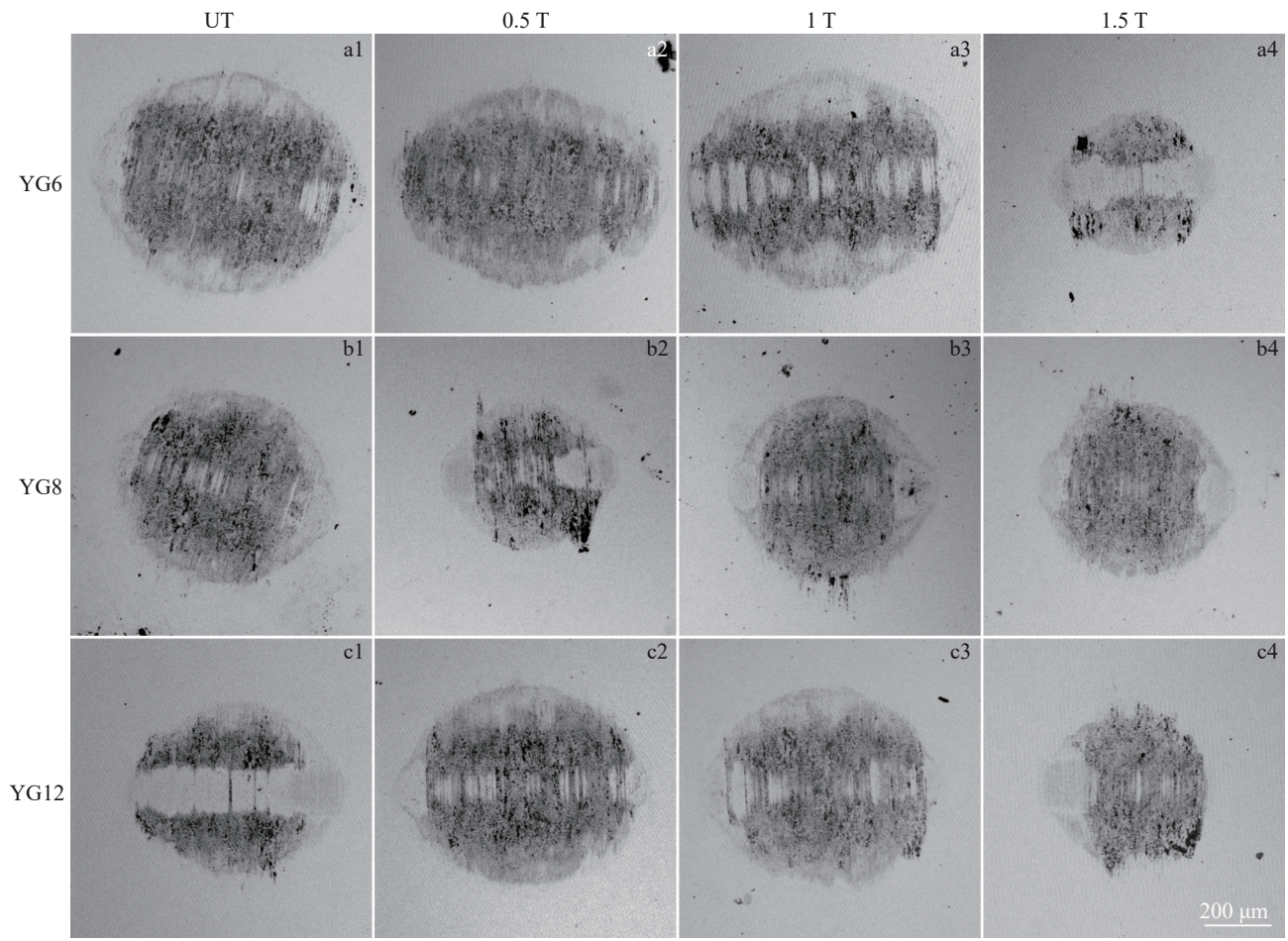


图8 不同硬质合金球磨损表面SEM照片
Fig.8 SEM images of wear surface on cemented carbide balls

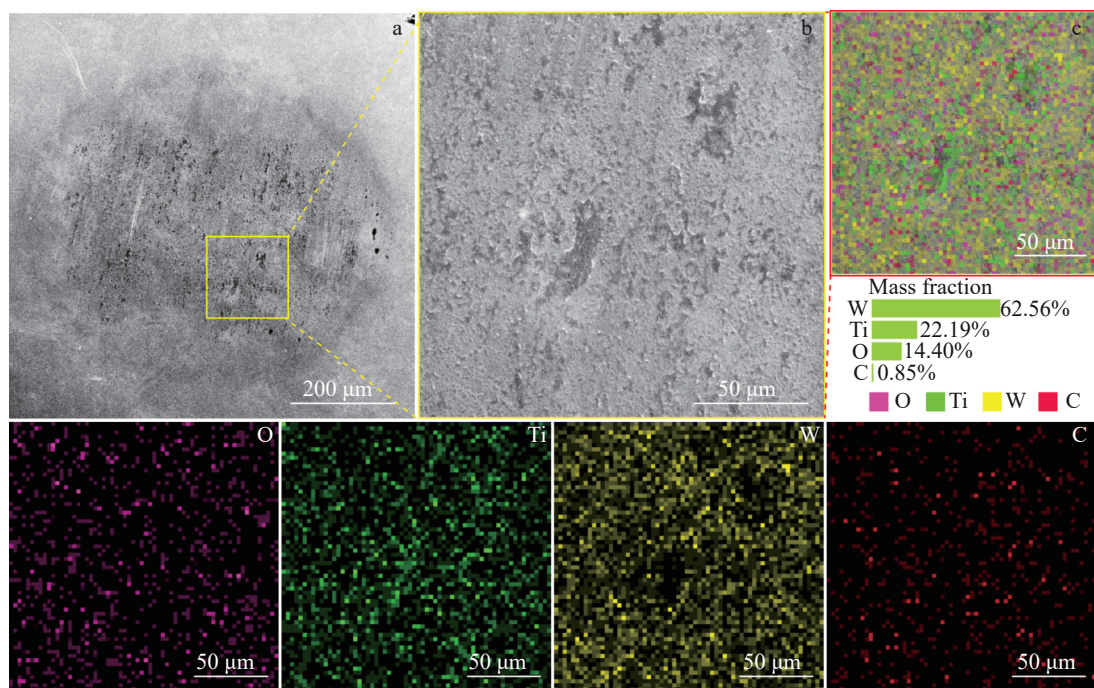


图9 硬质合金球磨损表面的SEM照片及EDS元素面扫描
Fig.9 SEM images (a-b) and EDS element mappings (c) of wear surface on WC-C cemented carbide balls

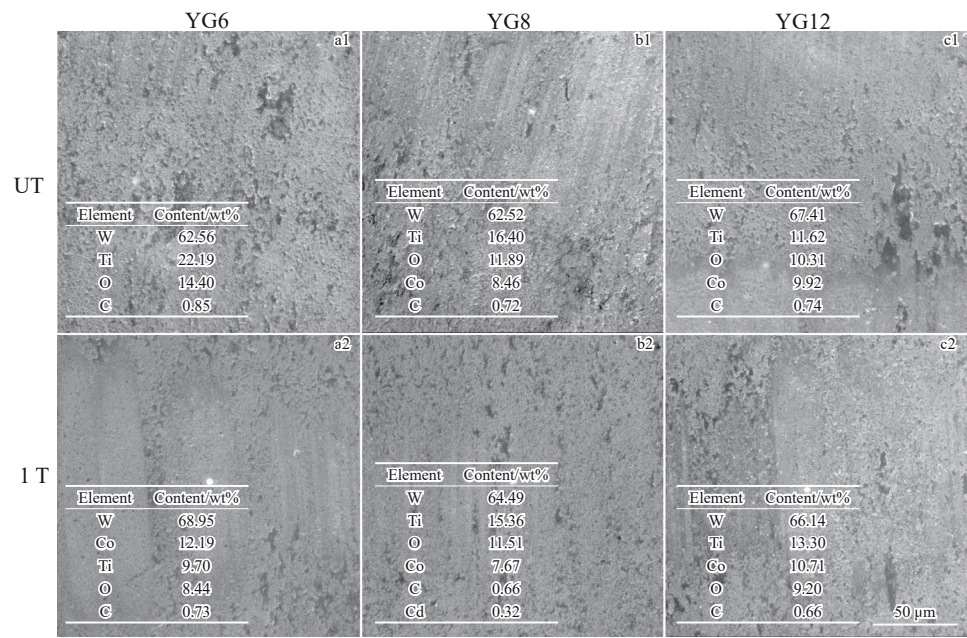


图 10 3 种硬质合金球在 UT 和 1 T 的摩擦表面的 SEM 照片及 EDS 成分分析
Fig.10 SEM images and EDS analysis results of the cemented carbide balls under UT and 1 T

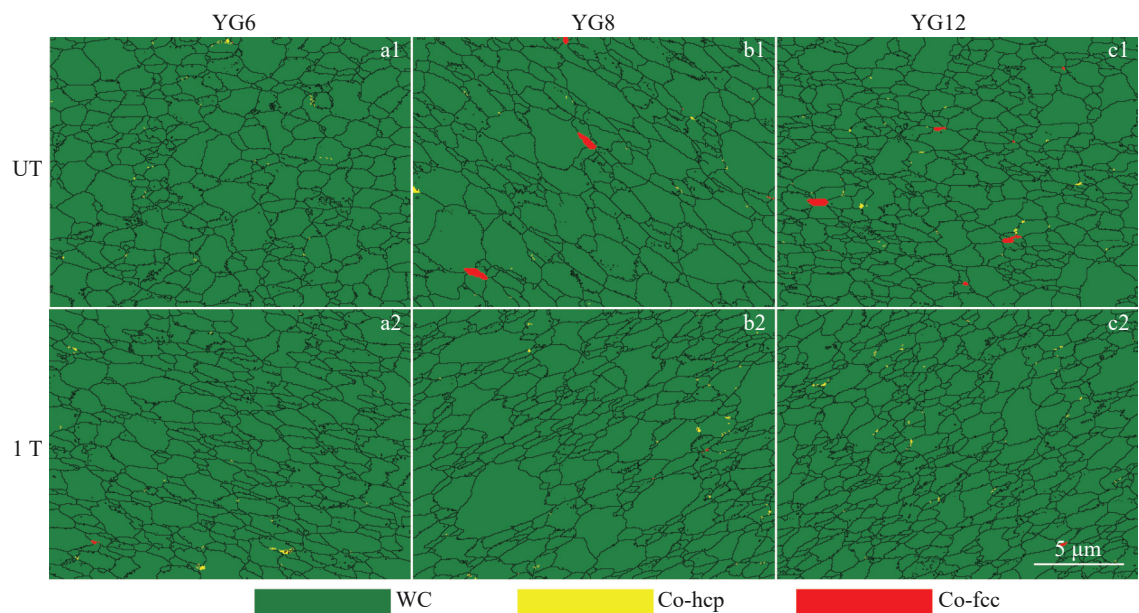


图 11 磁处理前后 3 种 WC-Co 硬质合金相分布
Fig.11 Phase distributions of the WC-Co cemented carbide

Table 3 Phase compositions of Co phases in cemented carbide before and after 1 T magnetic field treatment (wt%)						
Phase	YG6		YG8		YG12	
	UT	1 T	UT	1 T	UT	1 T
α -Co(fcc)	0.00167	0.0166	0.329	0.01	0.277	0.0225
ε -Co(hcp)	0.0817	0.124	0.0794	0.113	0.106	0.106

金材料抵抗塑性变形能力及耐磨性。缺陷的存在,KAM中颜色的转变常与晶粒位错有关,3
EBSD中的局部取向差(KAM)可以定性判断应力及种硬质合金磁处理前后的KAM图如图12所示,硬质合

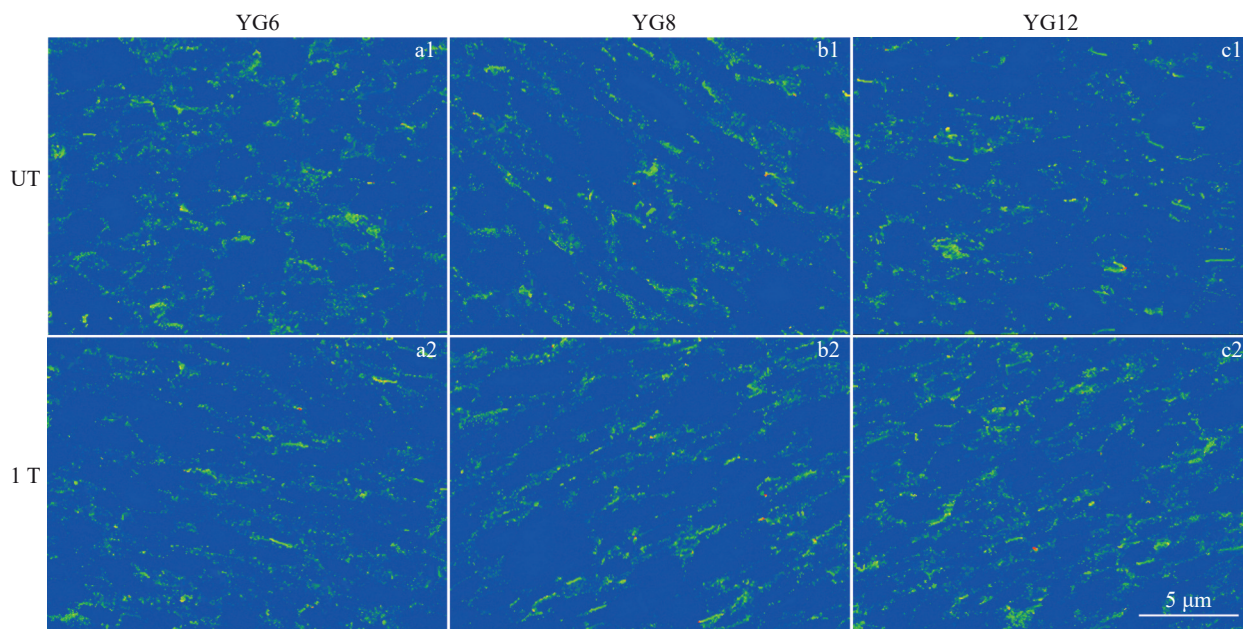


图 12 磁处理前后 3 种硬质合金的 KAM 图

Fig.12 KAM images of the cemented carbide before and after pulsed magnetic treatment

金是多晶体材料,晶粒细小,晶界众多,受晶界两侧原子排布不同产生的相互拉扯,晶界上能量较高,会产生晶界能,且会存在较多的晶体缺陷,即 KAM 中绿色区域。一方面, α -Co 向 ε -Co 的转化是立方向六方结构的转变,单个晶胞空间体积减小,即在相变过程中伴随应力能,为了降低 fcc 相和 hcp 相之间的界面能,可能引发位错等缺陷;另一方面,由于 Co 成分较少且晶粒小,故随着 Co 含量的增加,材料平均晶粒尺寸减小,晶界增多,位错密度增大,磁处后的硬质合金 KAM 中局部绿色区域更加明显。因此,磁处理通过调控硬质合金中 Co 相转变,引起位错增殖,改善材料抵抗塑性变形的能力,宏观表现为硬质合金强度及耐磨性的提升,从而改善摩擦性能。

4 结 论

1) 脉冲磁场处理能够有效改善硬质合金/钛合金摩擦状态,未经磁场处理的试样摩擦系数整体呈持续上升趋势,而磁处理后的摩擦状态稳定,实时摩擦系数及平均系数得到有效降低。

2) 磁场强弱改变了外源磁场输入的能量强度,以 YG8 为例,本实验梯度设计的 0.5、1、1.5 T 磁处理后平均摩擦系数分别减小 20.5%、29.7%、25.9%,呈先上升后下降的趋势,在 1 T 时平均摩擦系数达到最小,此时磁场的输入能最大程度作用为 Co 相马氏体转变的能量源,提高硬质合金耐磨性,而 0.5 T 时能量稍显不足,1.5 T 能量过剩。故本实验中最佳参数是:磁处理强度 1 T,处理 20 次,每次间隔 10 s。

3) 以最佳参数 1 T 为例,对比不同 Co 含量的摩擦响

应, YG6、YG8、YG12 的平均摩擦系数分别下降了 19.5%、29.7%、20.1%,随 Co 含量的增加,磁场的效果呈先上升后下降的趋势,Co 含量为 8% 时的磁场响应最为显著。

4) 磁处理硬质合金时,脉冲磁场作为外源能量,引发 Co 相发生从 fcc 的 α -Co 向 hcp 的 ε -Co 的马氏体转变,从而引发位错增殖,提高硬质合金抵抗塑性变形的能力,宏观表现为硬质合金强度及耐磨性的提升,从而改善摩擦性能。

参考文献

References

- [1] Wu Yucheng(吴玉程), Tang Junyu(汤俊宇), Yang Yu(杨宇) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(8): 2361
- [2] Wang Yiqian(王倚倩), Su Yifan(苏一凡), Zhang Yuming(张聿铭) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2024, 53(4): 1138
- [3] Hourmand M, Sarhan A A D, Sayuti M et al. *Arabian Journal for Science and Engineering*[J], 2021, 46(8): 7087
- [4] Li Meng(李萌), Gong Manfeng(弓满锋), Cheng Zanlin(程赞琳) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2023, 52(7): 2653
- [5] Huang J Y, Zhang W, Fang W P et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2024, 53(8): 2174
- [6] Song Wei(宋伟), Li Wanjia(李万佳), Yu Shurong(俞树荣) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(5): 1791
- [7] Xiang Z N, Li Z J, Chang F et al. *Metals*[J], 2019, 9(12): 1302

- [8] Weng Z J, Gu K X, Wang K K *et al.* *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*[J], 2019, 85: 105059
- [9] Zhang F G, Zhu X P, Lei M K. *Vacuum*[J], 2017, 124: 137119
- [10] Zheng G Q, Lin Y X. *Micromachines*[J], 2021, 12(5): 48
- [11] Liu S, Wu N Y. *Rare Metals & Cemented Carbides*[J], 2017, 45(2): 75
- [12] Yang Y F, Yang Y, Liao C Z *et al.* *Tribology International*[J], 2021, 161: 107086
- [13] Zhang Q W, Huang K L, Wang J *et al.* *Ceramics International*[J], 2021, 47(16): 22683
- [14] Zhou W M, Lin J C, Feng F *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2021, 113(5–8): 1
- [15] Babaremu K O, Jen T C, Oladijo P O *et al.* *Journal of Composite and Advanced Materials*[J], 2022, 32(1): 11
- [16] Kumar V A, Gupta R K, Prasad M J N V *et al.* *Journal of Materials Research*[J], 2021, 36(3): 689
- [17] Kaur M, Singh K. *Materials Science & Engineering C-Materials for Biological Applications*[J], 2019, 862: 102844
- [18] Liu W, Liu S F, Wang L Q. *Coatings* [J], 2019, 9(4): 249

Effects of Pulsed Magnetic Field Treatment on Tribological Properties of Cemented Carbide/Titanium Alloy

Chen Zhe¹, Xu Yangyang², Yan Qiaosong¹, Chen Yitong³, Zhang Lin¹, Wu Mingxia¹, Liu Jian¹

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(3. Teaching and Experiment Center for Fundamental Computer Courses, Sichuan University, Chengdu 610207, China)

Abstract: WC-Co cemented carbide balls with different cobalt (Co) contents were modified by pulsed magnetic field. The effects of pulsed magnetic field treatment on tribological properties of YG6/YG8/YG12-titanium alloy (TC4) were investigated by reciprocating friction machine and SEM. The results show that pulsed magnetic field treatment can effectively reduce the coefficient of friction (COF) of YG cemented carbides-TC4 titanium alloy friction pair. Main wear forms are adhesive wear and oxidation wear. Different intensities of pulsed magnetic field change the energy amount generated. Taking YG8 as an example, the average COF are reduced by 20.5%, 29.7%, and 25.9%, after the magnetic 0.5, 1, and 1.5 T treatments, respectively, compared with that without treatment. At magnetic field intensity of 1 T, the average COF of YG6, YG8, YG12 cemented carbide decreases by 19.5%, 29.7%, 20.1%, respectively. With the increase in Co content, the effect of the magnetic field treatment increases first and then decreases, and the magnetic field response is the most significant when the Co content is 8wt%. As an external energy, the pulsed magnetic field used on cemented carbide causes the Co phase from α -Co to ε -Co and thus results in dislocation proliferation; as a result, the ability of cemented carbide to resist plastic deformation is improved, and the corresponding macro-phenomenon is an increase in strength and wear resistance, so that the friction performance is finally improved.

Key words: pulsed magnetic field treatment; YG cemented carbides; TC4 titanium alloy; tribological properties; martensitic transformation

Corresponding author: Liu Jian, Ph. D., Professor, School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. China, E-mail: liujian@scu.edu.cn