

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20211025002

MAX / 金属基自润滑复合涂层研究现状与展望^{*}

付田力^{1,2} 马国政² 周永欣¹ 郭伟玲² 何鹏飞³
黄艳斐² 刘明² 邢志国² 王海斗^{2,4}

(1. 西安理工大学材料科学与工程学院 西安 710048;

2. 陆军装甲兵学院装备再制造技术国防科技重点实验室 北京 100072;

3. 军事科学院国防科技创新研究院 北京 100071;

4. 陆军装甲兵学院机械产品再制造国家工程研究中心 北京 100072)

摘要: MAX / 金属基自润滑复合涂层具有优异的力学性能和摩擦学性能, MAX 相的加入拓宽了金属基复合涂层的研究和应用范围。首先分析 MAX / 金属基复合涂层在摩擦磨损过程中自润滑特性是如何起作用的, 分别从 MAX 相的本质结构说明自润滑性能的存在, 摩擦过程中润滑膜的生成说明提高减摩润滑性能的原因。随后阐述近年常见几种 MAX 相涂层以及 MAX / 金属基复合涂层的制备和特性, 包括 Ti_2AlC 、 Cr_2AlC 涂层、高低温金属基体下的 MAX 复合涂层。最后归纳总结 MAX / 金属基复合涂层常见应用领域和表面防护效果, 并对 MAX / 金属基复合涂层目前存在的问题和涂层质量的提升进行展望, 为 MAX / 金属基自润滑复合涂层的推广应用提供参考。

关键词: MAX 相; 涂层; 制备技术; 润滑机理; 应用

中图分类号: TB33

Research Status and Outlook of MAX / Metal-based Self-lubricated Composite Coatings

FU Tianli^{1,2} MA Guozheng² ZHOU Yongxin¹ GUO Weiling² HE Pengfei³
HUANG Yanfei² LIU Ming² XING Zhiguo² WANG Haidou^{2,4}

(1. College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. National Key Laboratory for Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China;

3. Defense Innovation Institute, Academy of Military Science, Beijing 100071, China;

4. National Engineering Research Center for Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China)

Abstract: The MAX / metal-based self-lubricate composite coatings have excellent mechanical and tribological properties, and the addition of the MAX phase broadens the research and application scope of the metal-based composite coatings. Firstly, this paper analyzes how the self-lubrication properties of the MAX / metal-based composite coating act during friction wear. The essential structure of the MAX phase illustrates the existence of self-lubrication properties, and the generation of the lubrication film during friction explains the reasons for improving the friction lubrication performance. Subsequently, the preparation and properties of several common MAX phase coatings and MAX / metal matrix composite coatings in recent years are described, including Ti_2AlC , Cr_2AlC coatings, and MAX composite coatings under high and low temperature metal substrates. Finally, the common application fields and surface protection effects of MAX / metal-based composite coatings are summarized, and the current problems of MAX/metal matrix composite coatings and the improvement of coatings quality are prospected, the promotion and application of the

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (52122508, 52005511, 52130509)。

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (52122508, 52005511, 52130509).

20211025 收到初稿, 20220316 收到修改稿

coating provides a reference.

Keywords: MAX phase; coating; preparation technology; lubrication mechanism; application

0 前言

随着机械零部件服役环境的恶劣化发展, 常规金属合金零部件由于低硬度和高温易氧化等缺陷, 无法满足机件表面对耐磨、耐腐蚀以及抗氧化等性能的要求。金属陶瓷复合涂层既具有金属材料良好的韧性、导电性与导热性, 又具有陶瓷材料耐磨、耐高温、抗热震以及耐腐蚀等优点, 二者可弥补基体材料性能上的缺点与不足, 针对性地有效提高零部件表面所需性能, 该复合涂层目前已广泛应用于航空航天、水电化工等领域^[1-2]。

三元 MAX 陶瓷材料具有优异的高温抗氧化性和摩擦磨损性能, 其纳米层状结构在一定载荷作用下可通过位错滑移产生塑性变形, 使其具有较高的损伤容限与断裂韧度, 还具有自润滑特性^[3-6]。高温摩擦表面三元 MAX 相的挤出与氧化膜的产生可使摩擦性能相比室温更占优势^[7-8]。将 MAX 相加入到金属基自润滑复合涂层中, 不仅可提高涂层整体耐磨性, 润滑减摩方面也有很大的优势。

近年来,根据三元 MAX 相优异的各项性能,研究人员已制备出大量 MAX 相和含 MAX 相的复合涂层。本文主要阐述近几年 MAX 相涂层与复合涂层的发展概况,结合 MAX 相自身结构特点、摩擦磨损特性,分析总结 MAX 相自润滑复合涂层的润滑机理,最后归纳整理 MAX 相涂层目前的典型应用,并对 MAX 相涂层未来发展趋势进行展望。

1 MAX 相自润滑复合涂层

1.1 MAX 相结构及其润滑机理

三元 MAX 相中元素分布如图 1^[9]所示: M 代表过渡金属元素, A 代表主族元素, X 是碳或氮元素^[10]。MAX 相晶体结构如图 2 所示^[11], 随 n 值增大, A 原子层之间的 M 原子层数目增多。MAX 相的价键组合可理解为: M-X 原子之间以强共价键连接, 而 M-A 原子之间以弱键结合; 或 A 原子层弱键连接着 M-X 原子层^[12]。强共价键的存在使 MAX 相具有高模量陶瓷特性, 弱键使其具有低剪切、易加工等金属特性^[13]。弱键连接的 A 原子层极易脱离 M₆X 原子层的束缚,

片层状结构使 MAX 相具有自润滑性能^[11]。柏跃磊等^[14]用键刚度(k)定量表征化学键在静水压力下的变形抗力,当 $k_{\min}/k_{\max} \leq 1/2$ 时, A 原子层与 M-X 原子层之间是以“足够弱”的状态结合的,此时 MAX 相表现出高损伤容限和断裂韧性,这与传统陶瓷的高脆性有极大的区别。

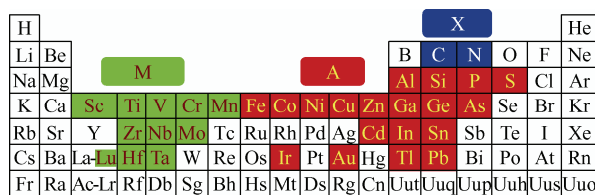


图1 MAX相中M、A、X对应元素在元素周期表中的位置^[9]

Fig. 1 Position of the M, A, X corresponding element in the element periodic table in the MAX phase^[9]

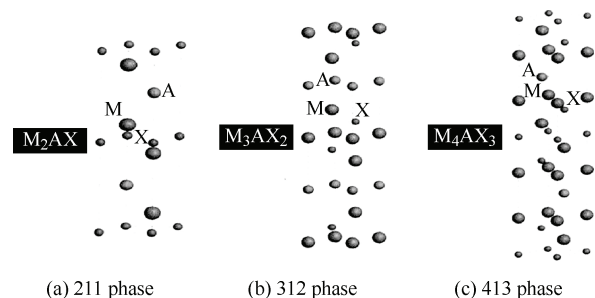
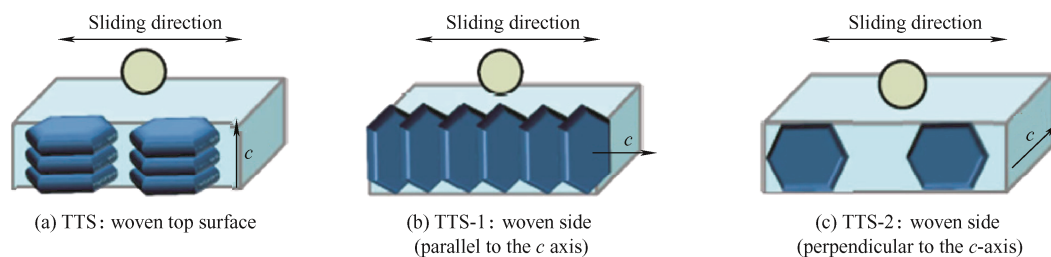
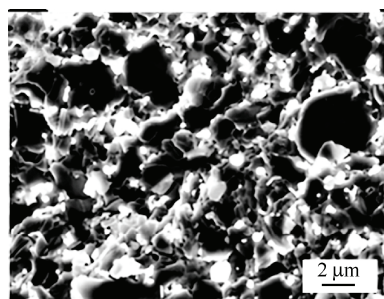


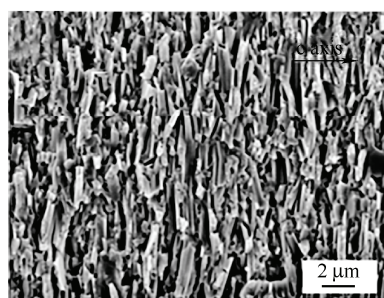
图 2 典型 $M_{n+1}AX_n$ 相的晶体结构^[11]

Fig. 2 Crystal structure of the typical $M_{n+1}AX_n$ phase^[11]

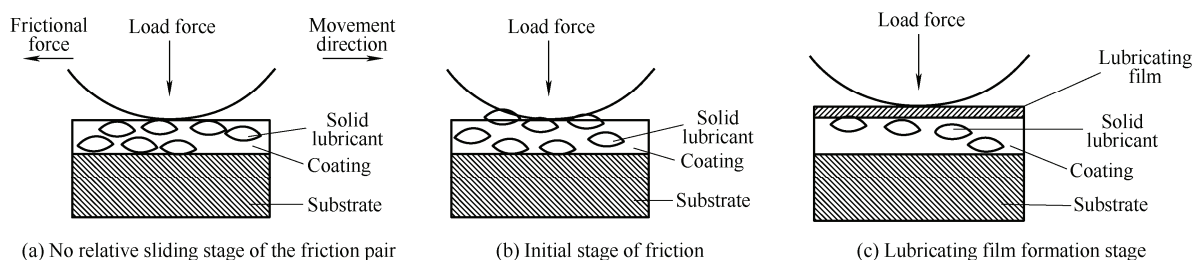
MAX 相的层状结构使力学性能具有各向异性,材料磨损行为依赖于结晶取向。保持陶瓷材料原有传统特性,通过微观调控可提高其特定方向上的性能。XU 等^[15]通过强磁场排列法加火花等离子烧结法制备了三种不同织构下的 Ti_3AlC_2 陶瓷材料,如图 3 所示。试验结果表明晶体织构对材料摩擦性能有很大影响,在 TTS (0001) 平面上摩擦因数最低,摩擦过程中 TTS 和 TTS-1 面由于基材易剪切分层,晶粒的拔出和破碎使材料磨损率较高,TTS-2 面在较高载荷下并没有出现剥落区域,只观察到犁沟切削痕迹,磨损率相对前两者较低。陶瓷材料断口表面晶粒的有序堆叠呈现出鲜明的各向异性特点(如图 4)。此试验有力地证明了 Ti_3AlC_2 中优先织构对耐磨性能有较大的影响。

图3 不同织构方向的磨损试验示意图^[15]Fig. 3 Schematic diagram of wear test in different fabric directions^[15]

(a) TTS



(b) TSS

图4 Ti_3AlC_2 陶瓷断口 SEM 图^[15]Fig. 4 SEM images of Ti_3AlC_2 ceramic fracture^[15]图5 MAX / 金属基自润滑复合涂层自润滑原理^[18-19]Fig. 5 Self lubrication principle of Max / metal base self-lubricating composite coating^[18-19]

三元 MAX 相在摩擦过程中出现的自生氧化物具有低剪切强度特性,可持续向摩擦表面提供润滑补偿作用,同时 MAX 相分解产生的 MX 硬质相颗粒在涂层中具有钉扎作用,可提升涂层表面磨损性能^[20-23]。润滑膜的生成受到滑动速率、载荷、温度以及对偶等多种因素影响,当润滑膜的生成能够持续补给摩擦过程中的损耗时,润滑膜得以保持稳定并发挥稳定减摩作用^[24-25]。三元 MAX 相在高温下

1.2 成膜润滑理论

润滑理论有耗散结构论^[16]、类比法^[17]和协同理论^[16]。其润滑机理为:摩擦过程中润滑粒子拔出挤压形成润滑膜,通过损耗润滑膜保护基体不受摩擦损耗失效;或利用同类结构性质相似原则添加氧化物或固体润滑剂达到减摩作用;还可通过多种固体润滑剂之间相互协同,达到稳定状态后提升耐磨减摩性。借鉴以往润滑理论,在复合涂层中加入具有自润滑特性的三元 MAX 陶瓷相,摩擦磨损过程中可综合发挥以上几种润滑作用。其润滑过程如图 5 所示^[18-19],未发生摩擦运动时(如图 5a),MAX 相均匀分布在金属基体中,涂层表面与涂层内部基本无区别。摩擦初始阶段摩擦力较大(如图 5b),基体材料摩擦消耗大,涂层表面挤压发生塑性变形,MAX 相颗粒凸起被挤出在涂层表面,此时 MAX 相参与到摩擦过程中,并且温度升高。随着涂层表面 MAX 相颗粒越来越多,高温下分解的硬质相和氧化物增多,在载荷和摩擦作用下摊开形成低剪切特性的润滑膜(如图 5c),润滑膜可改善涂层摩擦表面,涂层耐磨减摩性能能上升。

摩擦性能表现更为突出,涂层表面润滑膜通常由三元 MAX 相、氧化膜和硬质碳化物组成^[26-28]。

2 常见 MAX 相涂层及其制备方法

2.1 三元 MAX 相陶瓷涂层

MAX 相的结构特性决定其极易在高温环境下分解失效,故早期三元 MAX 相涂层的制备更

多趋向于提高涂层中的 MAX 含量, 选择不同的沉积方式或不同的粉末沉积体系均会影响到三元相的纯度高低, 高纯度 MAX 相涂层成功制备可为后续研究涂层独特“自润滑”特性方面埋下重要的铺垫。

2.1.1 Ti_2AlC 陶瓷涂层

Ti_2AlC 是 MAX 相中研究较多的材料, 密度为 4.11 g/cm^3 , 具有金属陶瓷双重特性^[29]。在高温防护涂层^[29]、热障涂层、耐辐射包层材料^[30-31]以及抗侵蚀涂层方面具有极大的发展潜力。早期研究主要以制备高纯 Ti_2AlC 涂层为主要目标, 采用合适沉积方式制备含 M、A、X 三元素的涂层, 通过真空热处理提高涂层中三元相含量^[32-35]。直流磁控溅射技术是制备薄膜的常用方法之一, 具有沉积效率高、靶材选择范围广和沉积温度低等优势, 基片上沉积的薄膜通常为非晶无定形态, 需配合退火处理制备所需涂层^[36]。FENG 等^[37]使用直流磁控溅射法分别

制备了不同沉积时间下 Ti_2AlC 、 Ti_3AlC_2 和 TiC 相的复合涂层, 通过 800°C 真空退火得到厚约 $13 \mu\text{m}$ 的纯 Ti_2AlC 相涂层。热处理在提高涂层中三元相含量之外, 也可改善涂层内部缺陷, RICHARDSON 等^[38]采用激光熔覆法在纯钛板上沉积了低纯度 Ti_2AlC 涂层, 在流动氩气氛下分别退火 1 h、2 h 和 3 h, 以提高涂层中 Ti_2AlC 相的含量, 如图 6 所示。退火处理消除了涂层中残余应力裂纹, 涂层由薄氧化层、纯 Ti_2AlC 相两层组成, 表面氧化层起到抵抗外部侵蚀、保护内部涂层的作用。激光熔覆技术是利用激光束将粉末熔化形成表面涂层的方法, 具有能量密度高、加热与冷却速度快等特性, 三元相陶瓷材料作为目标粉末极易出现大量分解而降低其在涂层中的含量, 沉积后需要通过退火处理二次加工提高三元相纯度^[39]。除上述退火处理提高三元相含量之外, 还可通过延长非晶涂层退火时间、调节工艺参数等方法来获得高纯度 Ti_2AlC 相^[40-41]。

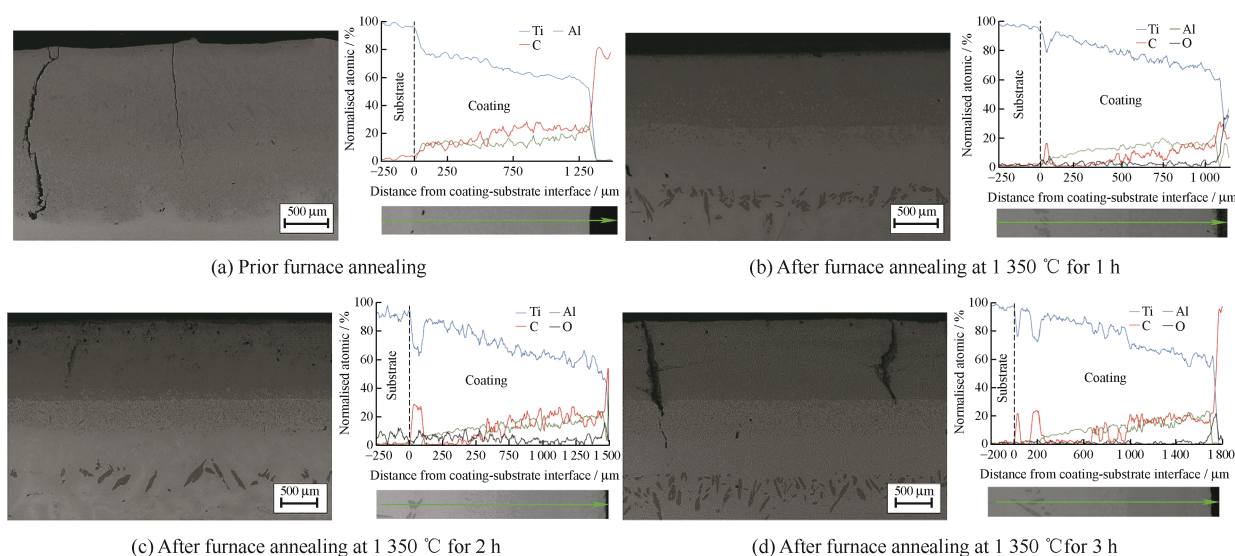
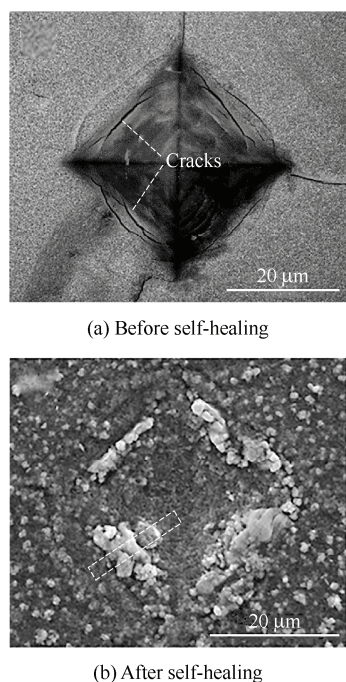


图6 涂层横截面 BSE 图像与 EDS 分析确定的元素分布^[38]

Fig. 6 Coated cross-section BSE images and the element distribution determined by EDS analysis^[38]

Ti_2AlC 相的热稳定性和抗氧化性已被研究过。 Ti_2AlC 相中 Al 原子层与 Ti-C 键之间为弱键结合, 高温下 Al 原子易脱键扩散和蒸发, 造成 Ti_2AlC 相的分解。据文献^[32], Ti_2AlC 相经 800°C 退火处理得到纯 Ti_2AlC 相涂层, 在 1000°C 时开始分解, 1200°C 下 Ti_2AlC 相完全分解成 TiC 相, Al 元素全部蒸发, 为缓解铝元素的大量损失, 可通过添加与 Al 元素结合较强的 M 元素延缓 Al 原子的扩散损失, 也可在涂层表面通过生成氧化铝氧化层的方式减缓 Al 原子的扩散损失。 Ti_2AlC 相的抗氧化性与其基体

之间的热膨胀系数有关, 在热循环过程中热膨胀系数过大会造成涂层与基体界面出现分层裂纹及裂纹内部氧化的现象^[42]。高温下分层裂纹具有自愈合特性, WANG 等^[43]发现 Ti_2AlC 涂层在 700°C 具有自愈合特性, 用低熔点 Sn 原子替代部分 Al 原子后, 700°C 下形成的氧化物 SnO_2 和 rutile- TiO_2 逐渐填充满维氏压痕裂纹 (如图 7 所示), 该温度目前是铝基 MAX 相中最低的自愈合温度。除此之外, Ti_2AlC 陶瓷的抗冲击性^[44]、抗侵蚀性^[45]以及耐磨减摩性能^[46]也被大量研究。

图 7 涂层表面裂纹 SEM 图^[43]Fig. 7 SEM images of coating surface cracks^[43]

2.1.2 Cr_2AlC 陶瓷涂层

Cr_2AlC 陶瓷相具有优异的高温抗氧化性和抗腐蚀性, 其力学性能和弹性模量因制备方式不同具有较大的差别^[47-50]。采用直流磁控溅射法 (DCMS) 制备的 Cr_2AlC 涂层, 在溅射功率为 4.5 kW 时涂层硬度 (13.9 ± 4.6 GPa) 和弹性模量 (289.2 ± 111 GPa) 最高^[51]。而采用高功率脉冲磁控溅射技术 (HiPIMS) 制备的非晶 Cr_2AlC 涂层, 通过 650 °C 恒温 1 h 炉内退火结晶形成的 Cr_2AlC 相涂层, 涂层硬度可达到 19.29 GPa, 弹性模量为 285 GPa^[52]。相比传统 DCMS, HiPIMS 有更多操作模式和可控沉积参数, 溅射材料具有更高的等离子体密度和电离度, 能够形成更加致密、表面更加光滑及高硬度的耐磨耐蚀涂层, 若以提高涂层性能为主, HiPIMS 有更明显的优势^[53-55]。

Cr_2AlC 相也可应用于冷喷涂技术, 相比热喷涂类的方法, 冷喷涂无须将喷涂粉末熔化, 粉末粒子高速撞击于基体表面时仍为固态, 所形成涂层不仅结合强度高, 其氧化与相变程度也极低^[56]。GO 等^[57]在不锈钢基底上用沉积温度较低 (< 950 °C) 的冷喷涂技术合成纯度高达 98% 的 Cr_2AlC 涂层, 涂层表面无裂纹缺陷, 在无任何预防措施下夹紧切割, 涂层并未出现剥落现象, 涂层内部具有良好的黏附性。

金属合金涂层中加入 Cr_2AlC 陶瓷相可改善涂层表面耐磨耐蚀性能。DAVIS 等^[58]用 Cr_2AlC 陶瓷相去提高 Ni-Mo-Al 合金涂层性能, 采用空气等离子

喷涂方法 (APS) 使 Cr_2AlC 相发生大量分解和氧化, 生成的 Al_2O_3 氧化物与 Cr_7C_3 碳化物提高了涂层整体硬度, 涂层耐磨性大幅提高, 其热循环寿命也提高了近 2 倍。大气等离子喷涂技术由于热源温度极高, 等离子弧中心温度最高可达 3.2×10^4 K, 此种状况下三元 MAX 陶瓷相虽发生大量分解氧化, 但分解产生的硬质陶瓷相和氧化物均有助于提高涂层的耐磨性能^[59]。 Cr_2AlC ($7.2 \times 10^{-6} \sim 13.3 \times 10^{-6}$ / °C^[60]) 与高温合金的热膨胀系数较接近, 可作为高温合金的增强相或钢基体的保护层候选材料。除此之外, Cr_2AlC 涂层还是高温合金表面优秀的氧化阻挡层, 从室温到 1 000 °C 的 20 次热循环并未观察到任何裂纹、分层和表面退化^[42]。

2.1.3 其他三元 MAX 相陶瓷涂层

除以上研究较多的三元 MAX 相涂层之外, Ti_2AlN 、 V_2AlC 、 Ti_3SiC_2 ^[61] 以及非常规形式的 $\text{Zr}_2\text{Al}_3\text{C}_4$ 涂层^[62] 都已被制备研究。研究表明, Ti_2AlN 涂层在 1 200 °C 下完全分解为 TiN_x , 700 °C 大气环境下具有良好的氧化行为, 氧化层主要由 TiO_2 和 Al_2O_3 组成, 涂层以 Ti_2AlN 相转换为 $\text{Ti}_3\text{NiAl}_2\text{N}$ 相最终失效^[32, 63]。回顾以上三元 MAX 相涂层的制备方式, 高纯致密 MAX 相涂层往往是通过多种涂层沉积技术和热处理两种工艺方法结合制备。除此之外通过改变沉积工艺参数也可提高涂层性能, 如赵公澍等^[64]通过改变磁控溅射沉积技术中的轰击离子能量参数, 制备出高密度的 V_2AlC 涂层, 并发现规律: 随轰击离子能量增高, 涂层愈加致密, 硬度增至 21 GPa, 弹性模量达到 362.6 GPa。

2.2 金属基 MAX 陶瓷自润滑复合涂层

金属基复合涂层中金属基体可划分为: 以 W、Mo 为代表的难熔金属基体, 以 Ni、Cr、Co 为代表的高温金属基体, 以 Cu、Al、Fe 为代表的低温金属基体, 以及以 Ag 为代表的软金属基体四大类。目前 MAX / 金属基复合涂层中基体主要以低熔点金属基体和高熔点金属基体为研究对象。低熔点金属易剪切、低塑性等特点赋予复合涂层自润滑性, 在减摩耐磨上有显著优势, MAX 陶瓷相的加入可提升涂层总体硬度与耐磨性; 高熔点金属在高温环境下具有优异的抗高温氧化性能和力学性能, 而 MAX 相可充当高温下的润滑材料, 由于自身结构与氧化物的产生都将提供不同程度的减摩耐磨性, 这样可延长设备的使用寿命^[65-66]。

2.2.1 低熔点金属 / MAX 陶瓷复合涂层

铝及铝合金熔点较低, 有良好的耐蚀性, 广泛应用于热喷涂。JAMSHIDI 等^[67]在纯 Al 涂层中加入

10 wt.% Ti_3SiC_2 陶瓷相, 摩擦力随外加载荷增加而增加, 摩擦局部温度增加导致部分 Ti_3SiC_2 相部分分解为 TiC 相和 Si 原子, 30 N 载荷下复合涂层摩擦因数和磨损率分别降低了 32% 和 94%, Ti_3SiC_2 相的加入提高了纯铝涂层的耐磨性。涂层中金属元素在合成三元相时起到辅助作用, 李伟等^[68]采用低压熔结技术将 Al-Si-TiC 粉末体系涂覆在 TC4 合金表面上生成 $\text{Ti}_3\text{SiC}_2/\text{Al}$ 基复合涂层, Al 原子在 Ti_3SiC_2 相合成过程中起到稀释剂、催化剂、辅助剂、除氧剂和填充剂的作用。

铜具有良好的导电、导热性能, 硬度较低。三元 MAX 相的加入能够提高材料整体硬度, 断裂韧性和结合强度均有所改善。MAX 相中弱键结合的 A 原子在高温下易脱出, 空位形成的脱链通道为其他原子的进入提供了机会, 研究者抓住这一特性研究铜原子进入 A 原子位置之后涂层的性能变化。LI 等^[69]用等离子喷涂法制备了原位纳米 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{Cu}$ 复合涂层, Ti_3AlC_2 陶瓷相中 Al 原子在高温下脱出, Cu 原子通过脱链通道进入空位处, 分散在陶瓷颗粒间的纳米铜粒子组成的铜带形成空间铜网络结构 (如图 8), 铜网络与 Cu (Al) 固溶体可提高复合涂层的断裂韧性, 比较相同试验条件下陶瓷-NiCr 合金梯度过渡涂层、陶瓷-金属玻璃梯度过渡涂层的三点弯曲试验, 如图 9 所示, 原位纳米复合涂层在达到最大载荷之前有明显的塑性变形, 断裂过程中具有明显的阻力, 表现出良好的断裂韧性和抗裂纹扩展能力。与此同时, 作者探究了这一复合涂层作为黏结层与陶瓷涂层之间的界面耐久性, 用等离子喷涂技术制备了 $(\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}40\text{wt}\%\text{TiO}_2)\text{-Cu}/\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ 复合涂层, 经热处理后 $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ 中间层可作为黏结层使用, 涂层与基体连接模式为: 陶瓷顶层与黏结层、黏结层中铜网与纳米粒子以梯度互穿模式连接起来, 陶瓷涂层与基体之间通过铜网钉扎提高了界面耐久性^[70]。相类似, Ti_2SnC 陶瓷相与 TC4 基材依靠 Cu 中间层实现了机械焊接, 这一过程也是由 Sn 原子与 Cu 原子之间的相互扩散实现的^[71]。

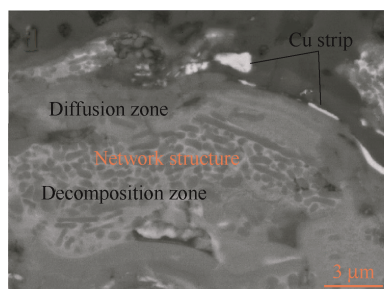


图 8 纳米涂层截面 SEM 图^[69]

Fig. 8 SEM diagram of nano-coating cross-section^[69]

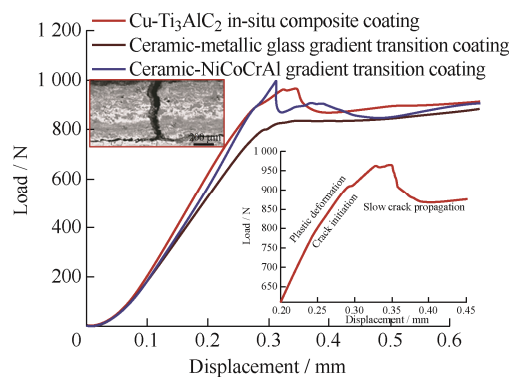


图 9 原位纳米复合涂层、陶瓷-镍铬合金梯度过渡涂层和陶瓷-金属玻璃梯度过渡涂层的 3PB 测试载荷-位移曲线^[69]

Fig. 9 3 PB test load-displacement curve of in situ nanocomposite coating, ceramic-nickel-chromium alloy gradient transition coating and ceramic-metal glass gradient transition coating^[69]

2.2.2 高熔点金属 / MAX 陶瓷复合涂层

Ni 是一种重要的高温工程材料, 刚度低、抗氧化性和耐磨性差, 广泛应用于石油天然气、涡轮叶片等各个工业领域^[72-73]。Ni 基自熔性合金粉末含有 B、Cr 和 C 等元素, 具有优异的抗氧化、耐腐蚀以及耐磨损等特性^[74-75]。Ni 基耐磨复合涂层通常以 Ni 基合金和陶瓷相 (如 TiN 、 SiC 、 TiB_2 等^[76]) 作为喷涂材料制备而成, 目前常用激光熔覆技术制备偏多, 激光熔覆通过高能激光束将熔覆材料熔化, 能量密度高, 稀释率较低, 加热速度和冷却速度极快^[77]。真空高温环境下润滑油和固体润滑剂由于失效无法发挥润滑作用, 向熔覆层中加入具有自润滑特性的陶瓷材料可极大提高涂层高温摩擦润滑性能。具有层状易剪切结构特点的三元 MAX 相可提高复合涂层的减摩性, 扩大 Ni 基复合涂层在高温下的潜在应用。WANG 等^[78]采用激光熔覆技术制备了 $\text{Ti}_3\text{SiC}_2\text{-Ni}$ 基复合涂层, 涂层硬度比 TC4 合金基体 ($350 \text{ HV}_{0.5}$) 高达 2.6~3.2 倍, 如图 10 所示, 不同温度段下的涂层相比基材具有显著的低摩擦因数和磨损率, 优异的耐磨性可归因于 $\gamma\text{-Ni}$ 基的固溶强化效应、硬质相的均匀分布以及 Ti_3SiC_2 陶瓷相的自润滑特性。截至目前研究者已探索制备出多种 MAX / 镍基复合涂层, 均不同程度上提高了涂层的硬度和减摩耐磨性^[79-83]。

Co 基合金涂层作为高温涂层也具有优异的耐磨性^[84-87]。添加 MAX 相可进一步提高涂层的耐磨减摩性, LI 等^[88]采用激光熔覆技术制备了 $\text{Ti}_3\text{SiC}_2/\text{Co}$ 基复合涂层, 涂层中 MAX 相与分解生成的硬质相使涂层显微硬度提高 2.3 倍, $\gamma\text{-Co}$ 和 TiC 相的存在提高了涂层的耐磨性, 其最低磨损率为 $5.2 \times 10^{-6} \mu\text{m}^3$, 相比 35CrMo 钢材磨损率降低 84%。三元相与其同元素硬质相结合不仅抑制 MAX

相的分解,也可提高涂层耐磨性,CHEN 等^[89]制备了 $\text{TiC}/\text{Ti}_3\text{AlC}_2\text{-Co}$ 基复合涂层,相比 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{Co}$ 基复合涂层^[90], Ti_3AlC_2 高温分解后生成的氧化物和大量硬质相 TiC 可大范围填充涂层中孔隙,极大提高涂层致密性和耐磨性,复合涂层摩擦因数更低^[11]。

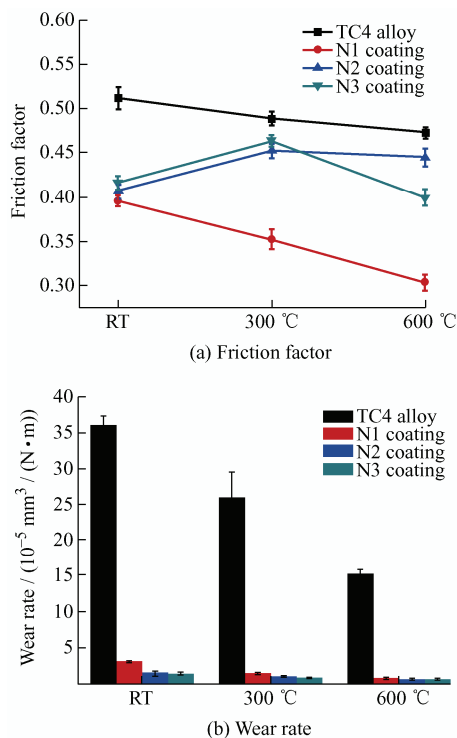


图 10 不同试验温度下 Ti6Al4V 合金和陶瓷涂层的摩擦因数、磨损率数值^[76]

Fig. 10 Friction coefficient and wear rate values of Ti6Al4V alloy and ceramic coatings at different experimental temperatures^[76]

3 MAX/金属基自润滑复合涂层的应用

MAX/金属基自润滑复合涂层既提高了基体表面耐磨性,也增加了涂层表面的润滑效果。根据其导电、耐磨和耐腐蚀等特性,重点介绍其在电接触材料、耐磨耐腐蚀材料和高温结构材料方面的表面防护作用和应用。

3.1 电接触材料表面防护

触头材料在电接触材料中直接影响设备运行过程中的可靠性和使用寿命^[91]。纯铜作为优良的导电导热材料,其抗熔焊性差^[92]。目前铜合金、铜基复合材料以及铜-陶瓷复合材料是最常用的新型电接触材料,广泛应用于受电弓滑板、高压开关触头以及导电滑环等领域。MAX 陶瓷相具有良好的导电性和较高硬度,在金属基复合涂层中作为增强相可提高耐磨减摩性,该增强相的加入并不会大幅降低材料的导电性能。GRIESELER 等^[93]将 3 wt.%微米

级的 MAX 相 (Ti_2AlC 、 Ti_3AlC_2) 掺入到酸性 CuSO_4 镀液中,采用直流电沉积法制备厚约 $50 \mu\text{m}$ 的涂层,MAX 陶瓷相比纯铜,热容量高而热导率低,涂层中弥散分布的 MAX 相,其周身热量既分散于涂层中又不会扩散太远。如图 11 所示,在电弧作用下纯铜涂层出现明显的熔化和再结晶,而复合镀层几乎不受电弧影响,仅出现微小熔化和再结晶现象,证明 Cu-MAX 镀层能够成为电器开关等此类电接触材料触头表面的防护材料^[94-95]。

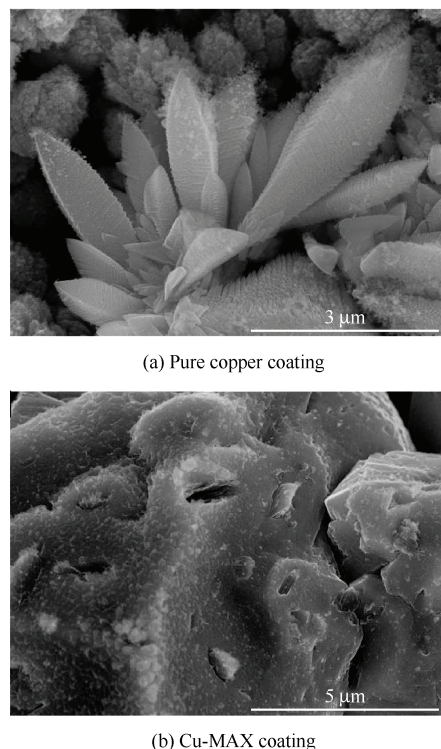
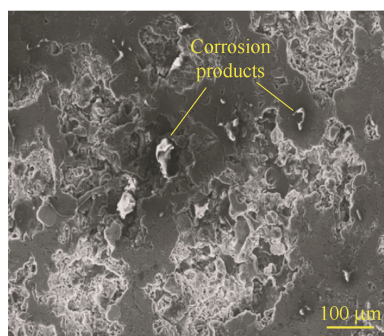


图 11 垂直设置中电弧放电后的 SEM 电镜显微照片^[93]
Fig. 11 SEM microscope photo after arc discharge in vertical setting^[93]

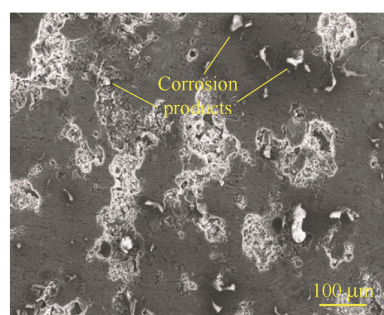
3.2 耐磨耐腐蚀材料表面防护

类似石墨层状结构的 MAX 陶瓷相也具有自润滑特性,其导热性和高温抗氧化性能都优于石墨,可用作苛刻环境下(如强酸、强碱以及高温)的摩擦润滑部件。ZHOU 等^[90]探索了不同含量下 Ti_3AlC_2 相在 Co 基合金涂层中高温 600 °C 的摩擦磨损性能。研究表明,MAX 相含量增多可提高复合涂层减摩性能,Co based-5% Ti_3AlC_2 复合涂层的摩擦因数相比 Co based 涂层 (0.84) 降低到 0.52,高温下涂层表面生成的 Al_2O_3 氧化膜不仅提高表面减摩性,也提高了涂层耐高温氧化性能。三元 MAX 相的耐蚀性也是极其优异的,Al+10wt% Ti_3SiC_2 复合涂层要比纯铝涂层有更高的腐蚀电位和较低的腐蚀电流密度,如图 12 所示,纯铝表面出现大而深的凹坑,复合涂层表面的凹坑变小变浅,这与 MAX 第二相的加入阻止凹坑的扩散有关,MAX 相加入的复合涂层表现出良好的耐腐蚀性和有

效保护^[67]。MAX 相与滑动摩擦生成的致密氧化膜在提高涂层表面减摩性能之外, 在一些高温极端环境下可防止外界物质的侵蚀, 极大扩展了该类复合涂层的应用范围和服役环境^[45,27]。



(a) Pure aluminum coating



(b) Al-10%Ti₃SiC₂ coating

图 12 电势极化测试涂层 SEM 图^[67]

Fig. 12 SEM micrograph of coatings after potentiodynamic polarization test^[67]

3.3 高温结构材料表面防护

高温结构材料具有优异的高温力学性能、抗氧化性能以及抗热腐蚀性能。目前高温结构材料以金属合金居多, 最为典型的 Co 基、Ni 基以及 Fe 基高温合金已广泛应用于航空发动机涡轮叶片、火箭发动机喷管以及高温热交换器等^[96-97]。三元 MAX 相具有优异的力学性能、低膨胀系数和低密度等优点, 加入高温金属合金基体中可大幅提高磨损性能, 高温下具有好的塑性和高的损伤容限^[98-99]。MAX 相可作为高温环境下起减摩作用的润滑材料, 弥补常温、低温润滑材料在高温下因氧化失去润滑作用这一短板, 可配合常规低温固体润滑剂实现宽温域范围内的协同润滑效果^[100-101]。例如: MoS₂+ Ti₃SiC₂ / NiAl 基复合润滑材料^[102]实现了从室温到 800 °C 宽温域不同温度范围下的良好协同润滑作用, 如图 13 所示, 含有 MAX 相的磨损表面相对光滑, 其 400 °C 下摩擦因数仅为 0.13, 润滑作用由氧化膜组成的摩擦膜支撑, 中低温下 MoS₂ 其主要润滑作用, 而高温下由 MAX 相提供润滑作用, 此类型复合材料的减摩耐磨性能有望在连续升温环境中发挥出色的结果, 是一种有前途的耐磨减摩高温应用材料。

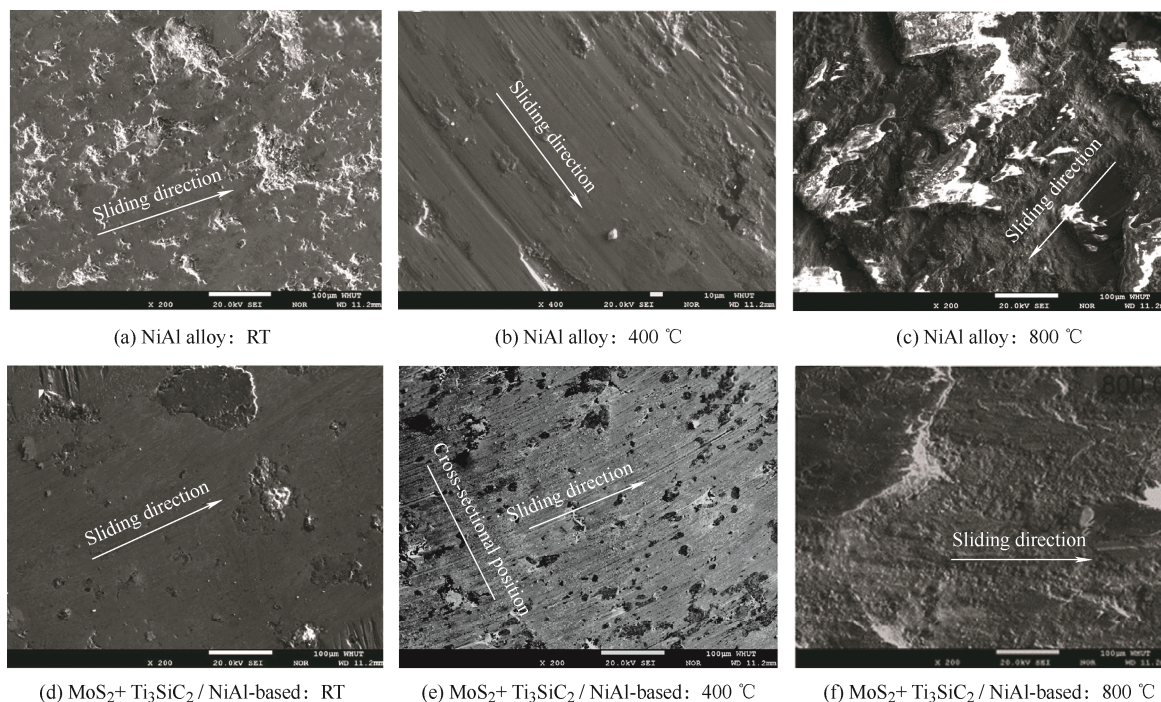


图 13 磨损表面形貌^[102]

Fig. 13 SEM micrograph of worn surface^[102]

4 结论与展望

目前研究者制备的 MAX / 金属基复合涂层体现出较优异的性能, 并且涂层的种类发展极快, 涂层的应用面也非常广泛, 加之更多的 MAX 相也在不断地被发现并制备出来, 含 MAX 相的复合涂层会更加完善。根据 MAX / 金属基复合涂层的研究情况可得出以下结论:

(1) 三元 MAX 相涂层研究初期主要集中于制备和提高涂层中 MAX 相含量。MAX 相在高温下容易分解, 导致涂层中 MAX 相含量降低, 而分解物偏多, 通过退火处理可明显提升 MAX 相含量。热喷涂下保证 MAX 相不被分解难度较大, 可通过多种工艺搭配、冷喷涂或低温条件下的沉积方式减少分解程度。

(2) MAX / 金属基复合涂层能够有效改善基体表面性能, 机械结合的界面结合强度较少表征, 可通过喷涂打底黏结层的方式提高界面结合强度。MAX / 金属基复合涂层作为中间层也被证实可提高陶瓷与基体之间的界面结合强度。

涂层质量是涂层应用于工业生产的第一关, 涂层质量与粉末体系、造粒处理方式、沉积技术以及后处理类型等每一环节息息相关。为了得到质量良好的涂层, 可以从以下方面入手:

(1) 挖掘更加新颖的粉末体系, 从粉末自身特性和喷涂时涂层成形特点选择合适的设备。

(2) 粉末造粒方式和涂层结构设计上有更多的创新, 喷涂技术以及设备有更多的探索和改进。

参 考 文 献

- [1] 袁秦鲁, 胡锐, 李金山, 等. 梯度复合材料制备技术研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(6): 4.
YUAN Qinlu, HU Rui, LI Jinshan, et al. Research progress on preparation technology of gradient composites[J]. Ordnance Materials Science and Engineering, 2003, 26(6): 4. (in Chinese)
- [2] 李长久. 超音速火焰喷涂及涂层性能简介[J]. 中国表面工程, 1996, 9(4): 29-33.
LI Changjiu. Brief introduction of supersonic flame spraying and coating properties[J]. China Surface Engineering, 1996, 9(4): 29-33. (in Chinese)
- [3] BAI Y L, HE X D, WANG R G, et al. High temperature physical and mechanical properties of large-scale Ti_2AlC bulk synthesized by self-propagating high temperature

- combustion synthesis with pseudo hot isostatic pressing[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2013, 33(13-14): 2435-2445.
- [4] FARBER L, BARSOUM M W, ZAVALIANGOS A, et al. Dislocations and stacking faults in Ti_3SiC_2 [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 81(6): 1677-1681.
- [5] BARSOUM M W. Mechanical properties: ambient temperature[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013: 307-361.
- [6] REN S F, MENG J H, WANG J B, et al. Tribocorrosion behavior of Ti_3SiC_2 in the dilute and concentrated sulfuric acid solutions[J]. Wear, 2010, 269(1-2): 50-59.
- [7] 任书芳, 孟军虎, 吕晋军, 等. $\text{M}_{N+1}\text{AX}_N$ 相及其复合材料的摩擦学性能研究进展[J]. 材料导报, 2009, 23(1): 12-15.
RENG Shufang, MENG Junhu, LÜ Jinjun, et al. Research progress on tribological properties of $\text{M}_{N+1}\text{AX}_N$ phase and its composites[J]. Material Review, 2009, 23(1): 12-15. (in Chinese)
- [8] JAMSHIDI R, BAYAT O, HEIDAROUR A. Tribological and corrosion behavior of flame sprayed Al-10wt% Ti_3SiC_2 composite coating on carbon steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2018, 358(10): 1-10.
- [9] 田莉, 付超, 李月明, 等. MAX 相陶瓷的结构、制备及物理性能研究[J]. 物理学进展, 2021, 41(1): 23.
TIAN Li, FU Chao, LI Yueming, et al. Study on the structure, preparation and physical properties of MAX-phase ceramics[J]. Physical Advances, 2021, 41(1): 23. (in Chinese)
- [10] BARSOUM M W. The $\text{M}_{N+1}\text{AX}_N$ phases: A new class of solids; thermodynamically stable nanolaminates[J]. Progress in Solid State Chemistry, 2000, 28: 28-201.
- [11] 郑丽雅, 周延春, 冯志海. MAX 相陶瓷的制备、结构、性能及发展趋势[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(6): 1-23.
ZHENG Liya, ZHOU Yanchun, FEN Zhihai. Preparation, structure, performance and development trend of MAX-phase ceramics[J]. Aerospace Materials & Technology, 2013, 43(6): 1-23. (in Chinese)
- [12] BAI Y L, NARASIMALU S, CHUA K Z, et al. Density functional theory study of $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n$ phases: A review[J]. Critical Reviews in Solid State and Material Sciences, 2019, 44(1): 56-107.
- [13] LIAO T, WANG J Y, ZHOU Y C. Deformation modes and ideal strengths of ternary layered Ti_2AlC and Ti_2AlN from first-principles calculations[J]. Physical. Review B, 2006, 73(21): 214109.

- [14] 柏跃磊, 尹航, 宋广平, 等. 高韧性三元层状陶瓷: 从 MAX 相到 MAB 相[J]. 材料工程, 2021, 49(5): 1-23.
BAI Yuelei, YIN Hang, SONG Guangping, et al. High toughness ternary layered ceramic: From max phase to mab phase[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(5): 1-23. (in Chinese)
- [15] XU L D, ZHU D G, GRASSO S, et al. Effect of texture microstructure on tribological properties of tailored Ti_3AlC_2 ceramic[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2017, 6(2): 1-9.
- [16] 薛群基. 摩擦体系热力学引论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
XUE Qunji. Introduction to the thermodynamics of frictional systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [17] ERDEMIR A. A crystal-chemical approach to lubrication by solid oxides[J]. Tribology Letters, 2000, 8(2-3): 97-102.
- [18] WU Y X, WANG F X, CHENG Y Q, et al. A study of the optimization mechanism of solid lubricant concentration in self-lubricating composite[J]. Wear, 1997, 205(1-2): 64-70.
- [19] 李博雅, 曹志强. 金属基固体自润滑复合涂层及其制备技术研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 32-38.
LI Boya, CAO Zhiqiang. Progress in metal-based solid and its preparation technology[J]. Surface Technology, 2017, 46(9): 32-38. (in Chinese)
- [20] SUN Y. Tribological rutile- TiO_2 coating on aluminium alloy[J]. Applied Surface Science, 2004, 233(1-4): 328-335.
- [21] GARDOS M N. Magnéli phases of anion-deficient rutile as lubricious oxides. Part II. Tribological behavior of Cu-doped polycrystalline rutile ($\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1}$)[J]. Tribology Letters, 2000, 8(2): 79-96.
- [22] KRÓL S, ZALISZ Z, HEPNER M. Comparison of the friction and wear properties of titanium and oxidised titanium in dry sliding against sintered high speed steel HS18-0-1 and against C45 carbon steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164-165(2): 868-875.
- [23] 郑乙, 党文涛, 任书芳. 放电等离子烧结 Ti_3SiC_2 -金属复合材料摩擦学性能研究[J]. 材料开发与应用, 2016, 31(3): 86-93.
ZHENG Yi, DANG Wentao, REN Shufang. Study on Fricological properties of Ti_3SiC_2 -metal composite[J]. Development and Application of Material, 2016, 31(3): 86-93. (in Chinese)
- [24] 黄振莺, 翟洪祥, 刘新, 等. Ti_3SiC_2 系材料的载流磨损特性及机理[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(A02): 4.
HUANG Zhenying, ZHAI Hongxiang, LIU Xin, et al. Current wear characteristics and mechanism of Ti_3SiC_2 system materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(A02): 4. (in Chinese)
- [25] FILIMONOV D, GUPTA S, PALANISAMY T, et al. Effect of applied load and surface roughness on the tribological properties of Ni-Based superalloys versus Ta_2AlC / Ag or Cr_2AlC / Ag composites[J]. Tribology Letters, 2009, 33(1): 9-20.
- [26] GUPTA S, FILIMONOV D, ZAITSEV V, et al. Study of tribofilms formed during dry sliding of Ta_2AlC / Ag or Cr_2AlC / Ag composites against Ni-based superalloys and Al_2O_3 [J]. Wear, 2009, 267(9-10): 1490-1500.
- [27] SHI X L, WANG M, ZHAI W Z, et al. Friction and wear behavior of NiAl-10 wt% Ti_3SiC_2 composites[J]. Wear, 2013, 303(1-2): 9-20.
- [28] WANG Y, LIU, X B, LIU Y F, et al. Microstructure and tribological performance of Ni60-based composite coatings on Ti6Al4V alloy with different Ti_3SiC_2 ceramic additions by laser cladding-ScienceDirect[J]. Ceramics International, 2020, 46(18): 28996-29010.
- [29] WANG X H, ZHOU Y C. High-temperature oxidation behavior of Ti_2AlC in air[J]. Oxidation of Metals, 2003, 59(3): 303-320.
- [30] DARIN J T, ELIZABETH N H, EFAD N C, et al. Effect of neutron irradiation on select MAX phases[J]. Acta Materialia, 2015, 85(1): 132-143.
- [31] WANG C X, YANG T F, XIAO J R, et al. Irradiation-induced structural transitions in Ti_2AlC [J]. Acta Materialia, 2015, 98(7): 197-205.
- [32] GARKAS W, LEYENS C, FLORES A. Synthesis and characterization of Ti_2AlC and Ti_2AlN MAX phase coatings manufactured in an industrial-size coater[J]. Advanced Materials Research, 2010, 89-91(1): 208-213.
- [33] LI J J, QIAN Y H, NIU D, et al. Phase formation and microstructure evolution of arc ion deposited Cr_2AlC coating after heat treatment[J]. Applied Surface Science, 2012, 263(1): 457-464.
- [34] YANG Y, KEUNECKE M, STEIN C, et al. Formation of Ti_2AlN phase after post-heat treatment of Ti-Al-N films deposited by pulsed magnetron sputtering[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(10): 2661-2666.

- [35] AHMED A A, TETSUYA T A, DENIS M A, et al. MAX phase formation by intercalation upon annealing of TiC_x/Al ($0.4 \leq x \leq 1$) bilayer thin films[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(15): 6168-6175.
- [36] KELLY P J, ARNELL R D. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications[J]. *Vacuum*, 2000, 56(3): 159-172.
- [37] FENG Z J, KE P L, WANG A Y. Preparation of Ti_2AlC MAX phase coating by DC magnetron sputtering deposition and vacuum heat treatment[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, 31(12): 1193-1197.
- [38] RICHARDSON P, CUSKELLY D, BRANDT M, et al. Effects of furnace annealing on in situ reacted Ti_2AlC MAX phase composite coatings deposited by laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 405(1): 126597.
- [39] LIU F C, LIN X, ZHAO W W, et al. Effects of solution treatment temperature on microstructures and properties of laser solid forming GH4169 superalloy[J]. *Rare Metal Materials & Engineering*, 2010, 39(9): 1519-1524.
- [40] WANG Z Y, LI W T, WANG C C, et al. Transforming the amorphous Ti-Al-C coatings to high-purity Ti_2AlC MAX phase coatings by prolonged annealing at 550 °C [J]. *Materials Letters*, 2019, 261(1): 127160.
- [41] ZHANG Z, LIM S H, CHAI J W, et al. Plasma spray of Ti_2AlC MAX phase powders: effects of process parameters on coatings' properties[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 325(7): 429-436.
- [42] SOKOL M, YANG J, KESHAVAN H, et al. Bonding and oxidation protection of Ti_2AlC and Cr_2AlC for a Ni-based Superalloy[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, 39(4): 878-882.
- [43] WANG Z Y, SUN J, XU B B, et al. Reducing the self-healing temperature of Ti_2AlC MAX phase coating by substituting Al with Sn[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 40(1): 197-201.
- [44] NAVEED M, RENTERIA A F, NEBEL D, et al. Study of high velocity solid particle erosion behaviour of Ti_2AlC MAX phase coatings[J]. *Wear*, 2015, 10(342-343): 391-397.
- [45] GUO L, YAN Z, WANG X H, et al. Ti_2AlC MAX phase for resistance against CMAS attack to thermal barrier coatings[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(6): 7627-7634.
- [46] LOGANATHAN A, SAHU A, RUDOLF C, et al. Multi scales tribological and nanomechanical behavior of cold sprayed Ti_2AlC MAX phase coating[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2018, 331(1): 384-393.
- [47] TIAN W, WANG P, KAN Y, et al. Oxidation behavior of Cr_2AlC ceramics at 1 100 and 1 250 °C [J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 43(8): 2785-2791.
- [48] LEE D B, NGUYEN T D. Cyclic oxidation of Cr_2AlC between 1 000 and 1 300 °C in air[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2008, 464(1-2): 434-439.
- [49] WANG Q M, RENTERIA A F, SCHROETER O, et al. Fabrication and oxidation behavior of Cr_2AlC coating on Ti6242 alloy[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2010, 204(15): 2343-2352.
- [50] SMIALEK, JAMES L, GARG, et al. Interfacial reactions of a MAX phase / superalloy hybrid[J]. *Interfaces and Thin Films*, 2015, 47(8): 844-853.
- [51] NAVEED M, OBROSOV A, ZAK A, et al. Sputtering power effects on growth and mechanical properties of Cr_2AlC MAX phase coatings[J]. *Metals-Open Access Metallurgy Journal*, 2016, 6(11): 265.
- [52] QURESHI M W, MA X X, TANG G Z, et al. Fabrication and mechanical properties of Cr_2AlC MAX phase coatings on $\text{TiB}_w/\text{Ti6Al4V}$ composite prepared by HiPIMS[J]. *Materials*, 2021, 14(4): 826.
- [53] GHASEMI S, FARHADIZADEH A R, GHOMI H. Effect of frequency and pulse-on time of high power impulse magnetron sputtering on deposition rate and morphology of titanium nitride using response surface methodology[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(12): 2577-2590.
- [54] EICHENHOFER G, FERNANDEZ I, WENNBERG A. Industrial use of HiPIMS and the hiP-V hiPlus technology[J]. *Vakuum in Forschung und Praxis*, 2017, 29(2): 40-44.
- [55] BISWAS B, PURANDARE Y, SUGUMARAN A, et al. Effect of chamber pressure on defect generation and their influence on corrosion and tribological properties of HIPIMS deposited CrN / NbN coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 336(8): 84-91.
- [56] 周香林, 张济山, 巫湘坤. 先进冷喷涂技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- ZHOU Xianglin, ZHANG Jishan, WU Xiangkun. Advanced cold spray technology and application[M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
- [57] GO T, SOHN Y J, MAUER G, et al. Cold spray deposition of Cr_2AlC MAX phase for coatings and bond-coat

- layers[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, 39(4): 860-867.
- [58] DAVIS D, SRIVASTAVA M, MALATHI M, et al. Effect of Cr_2AlC MAX phase addition on strengthening of Ni-Mo-Al alloy coating on piston ring: Tribological and twist-fatigue life assessment[J]. Applied Surface Science: A Journal Devoted to the Properties of Interfaces in Relation to the Synthesis and Behaviour of Materials, 2018, 449(Aug.15): 295-303.
- [59] 高荣发. 热喷涂[M]. 北京: 化学工业出版社, 1992. GAO Rongfa. Thermal spray[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1992. (in Chinese)
- [60] RAHMAN M A, RAHAMAN M Z. Study on structural electronic, optical and mechanical properties of MAX phase compounds and applications review article[J]. American Journal of Modern Physics, 2015, 4(2): 75-91.
- [61] GALVIN T, HYATT N C, RAINFORTH W M, et al. Laser sintering of electrophoretically deposited (EPD) Ti_3SiC_2 MAX phase coatings on titanium[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 366(1): 199-203.
- [62] 梁佳敏. 磁控溅射制备 $\text{Zr}_2\text{Al}_3\text{C}_4$ 涂层及其抗高温水蒸气氧化性能的研究[D]. 天津: 天津大学. LIANG Jiamin. Study on $\text{Zr}_2\text{Al}_3\text{C}_4$ coating prepared by magnetron sputtering and its resistance to high temperature water vapor oxidation[D]. Tianjin: Tianjin University. (in Chinese)
- [63] GARKAS W, FRÖHLICH M, WELTMANN KD, et al. Oxidation and decomposition of Ti_2AlN MAX phase coating deposited on nickel-based super alloy IN718[J]. Materials Science Forum, 2015, 825 / 826(Pt. 2): 628-635.
- [64] 赵公澍, 葛芳芳, 程晓英, 等. 轰击离子能量对 V_2AlC MAX 相涂层结构及力学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2019, 32(3): 80-87. ZHAO Gongshu, GE Fangfang, CHENG Xiaoying, et al. Influence of bombardment ion energy on the structure and mechanical properties of V_2AlC MAX phase coatings[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(3): 80-87. (in Chinese)
- [65] RAVINDRAN P, MANISEKAR K, NARAYANASAMY P, et al. Application of factorial techniques to study the wear of Al hybrid composites with graphite addition[J]. Materials & Design, 2012, 39(Aug.): 42-54.
- [66] 唐中杰, 郭铁明, 付迎, 等. 镍基高温合金的研究现状与发展前景[J]. 航空材料, 2014, 67(1): 36-40. TANG Zhongjie, GUO Tieming, FU Ying, et al. Research present situation and the development prospect of Nickel-based superalloy[J]. Aeronautical Materials, 2014, 67(1): 36-40. (in Chinese)
- [67] JAMSHIDI R, BAYAT O, HEIDARPOUR A. Tribological and corrosion behavior of flame sprayed Al-10wt% Ti_3SiC_2 composite coating on carbon steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2018, 358(1): 1-10.
- [68] 李伟, 周伟, 赵宇光. Ti-6Al-4V 合金表面原位内生 $(\text{Ti}_3\text{SiC}_2+\text{TiB}_2)_p$ / Al 基复合材料涂层制备[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(11): 1235-1239. LI Wei, ZHOU Wei, ZHAO Yuguang. Preparation of Ti-6Al-4V alloy surface in situ $(\text{Ti}_3\text{SiC}_2 + \text{TiB}_2)_p$ / Al based composite coating[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(11): 1235-1239. (in Chinese)
- [69] LI Q L, YUAN X H, XU H, et al. Microstructure and fracture toughness of in-situ nanocomposite coating by thermal spraying of Ti_3AlC_2 / Cu powder[J]. Ceramics International, 2019, 45(10): 13119-13126.
- [70] LI Q L, SONG P, HUANG W L, et al. Improvement in the mechanical properties of plasma spray ceramic-Cu / Ti_3AlC_2 gradient coatings by heat treatment[J]. Ceramics International, 2019, 45(17): 22452-22463.
- [71] YU W B, ZHAO H B, HUANG Z Y, et al. Microstructure evolution and bonding mechanism of Ti_2SnC -Ti6Al4V joint by using Cu pure foil interlayer[J]. Materials Characterization, 2017, 127(2): 53-59.
- [72] MURUGESAN S, MONTEIRO O, KHABASHESKU V N. Extending the lifetime of oil and gas equipment with corrosion and erosion-resistant Ni-B-nanodiamond metal-matrix-nanocomposite coatings[C]// Offshore Technology Conference, Houston, 2016.
- [73] RASHID A, CAMPBELL J. Oxide defects in a vacuum investment-cast Ni-based turbine blade[J]. Metallurgical & Materials Transactions. Part A, 2004, 35(7): 2063-2071.
- [74] KONG D, ZHAO B. Effects of loads on friction-wear properties of HVOF sprayed NiCrBSi alloy coatings by laser remelting[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 705(2): 700-707.
- [75] DEVOJNO O G, FELDSHTEIN E, KARDAPOLAVA M A, et al. On the formation features, microstructure and microhardness of single laser tracks formed by laser cladding of a NiCrBSi self-fluxing alloy[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2018, 106(July): 32-38.
- [76] 孙荣禄, 牛伟, 王成扬. 钛合金表面激光熔覆 TiN-Ni 基合金复合涂层的组织和磨损性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2007(1): 7-10. SUN Ronglu, NIU Wei, WANG Chengyang.

- Microstructure and wear properties of laser cladding TiN-Ni-based alloy composite coatings on titanium alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007(1): 7-10. (in Chinese)
- [77] BULL S J, BERASETEGUI E G. An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing[J]. *Tribology International*, 2006, 39(2): 99-114.
- [78] WANG Y, LIU X B, LIU Y F, et al. Microstructure and tribological performance of Ni60-based composite coatings on Ti6Al4V alloy with different Ti_3SiC_2 ceramic additions by laser cladding[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(18): 28996-29010.
- [79] LIANG Y, LIU M Y, CHEN J X, et al. Electrodeposition and characterization of Ni / $\text{Ti}_3\text{Si}(\text{Al})\text{C}_2$ composite coatings[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2011(11): 1016-1024.
- [80] 秦阳, 闫华, 高秋实, 等. TC4 表面激光熔覆原位合成 Ti_3SiC_2 / Ni 基涂层的组织与耐磨性能[J]. *有色金属工程*, 2019, 9(4): 34-40.
- QIN Yang, YAN Hua, GAO Qiushi, et al. Organization and wear resistance of Ti_3SiC_2 / Ni base coating synthesized with TC4 surface laser melting recovery position[J]. *Nonferrous Metal Engineering*, 2019, 9(4): 34-40. (in Chinese)
- [81] 欧阳春生, 刘秀波, 罗迎社, 等. 304 不锈钢表面激光制备 Ti_3SiC_2 -Ni 基自润滑复合涂层的高温摩擦学性能[J]. *表面技术*, 49(8): 11.
- OUYANG Chunsheng, LIU Xiubo, LUO Yingshe, et al. High temperature tribological properties of Ti_3SiC_2 -Ni based self-lubricate composite coating with 304 stainless steel surface laser[J]. *Surface Technology*, 49(8): 11. (in Chinese)
- [82] 张天刚, 张倩, 庄怀风, 等. TC4 表面 Ti_2SC - Ti_2Ni 复合结构相的自润滑激光熔覆层组织与性能[J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 11.
- ZHANG Tiangang, ZHANG Qian, ZHUANG Huaifeng, et al. Self-lubricating laser fusion complex layer tissue and performance of TC4 surface Ti_2SC - Ti_2Ni composite structure phase[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 11. (in Chinese)
- [83] YAN H, LIU K W, ZHANG P L, et al. Fabrication and tribological behaviors of Ti_3SiC_2 / Ti_5Si_3 / TiC / Ni-based composite coatings by laser cladding for self-lubricating applications[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 126(3): 106077.
- [84] WANG J Y, ZHANG B S, YU Y Q, et al. Study of high temperature friction and wear performance of (CoCrFeMnNi) 85Ti15 high-entropy alloy coating prepared by plasma cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 384(1): 125337.
- [85] WANG H B, QIU Q F, GEE M, et al. Wear resistance enhancement of HVOF-sprayed WC-Co coating by complete densification of starting powder[J]. *Materials & Design*, 2020, 191(1): 108586.
- [86] DING L, HU S S, QUAN X M, et al. Effect of Ti on the microstructure evolution and wear behavior of VN alloy / Co-based composite coatings by laser cladding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 252(1): 711-719.
- [87] WALL M T, PANTAWANE M V, JOSHI S, et al. Laser-coated CoFeNiCrAlTi high entropy alloy onto a H13 steel die head[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 387(1): 125473.
- [88] LI X, ZHANG C H, ZHANG S, et al. Manufacturing of Ti_3SiC_2 lubricated Co-based alloy coatings using laser cladding technology[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 114(2): 209-215.
- [89] CHEN H F, DU Y X, WANG D J, et al. TiC / Ti_3AlC_2 -Co plasma-sprayed coatings with excellent high-temperature tribological properties[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(18): S0272884218324891-.
- [90] ZHOU J L, KONG D J. Friction-wear performances and oxidation behaviors of Ti_3AlC_2 reinforced Co-based alloy coatings by laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 408(25): 126816.
- [91] 王其平. 电器电弧理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- WANG Qiping. *Electrical arc theory*[M]. Beijing: China Machine Press, 1982. (in Chinese)
- [92] 李辛庚, 傅敏. 真空电触头材料技术开发现状及展望[J]. *中国电力*, 2001, 34(8): 39-42.
- LI Xingeng, FU Min. Development status and prospect of vacuum electric contact material technology[J]. *Electric Power*, 2001, 34(8): 39-42. (in Chinese)
- [93] GRIESELER R, CAMARGO M K, HOPFELD M, et al. Copper-MAX-phase composite coatings obtained by electro-co-deposition: a promising material for electrical contacts[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 321(4): 219-228.
- [94] SUN Z M. Progress in research and development on MAX phases: A family of layered ternary compounds[J].

- International Materials Reviews, 2011, 56(3): 143-166.
- [95] BRANDES A E, BROOK G B. Smithells metals reference book[M]. Oxford: Butterworth Heinemann, 1983.
- [96] 刘永康, 王博, 赖小明, 等. 密封舱结构材料 5B70 铝合金高温压缩实验与晶体塑性模拟研究[J]. 载人航天, 2021, 27(2): 8.
- LIU Yongkang, WANG Bo, LAI Xiaoming, et al. Study on high temperature compression experiment and crystal plastic simulation of 5B70 aluminum alloy[J]. Manned Space Flight, 2021, 27(2): 8. (in Chinese)
- [97] 杨玲玲, 任毅如, 宁克焱, 等. 干片式制动器典型结构材料高温性能研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(6): 62-66.
- YANG Lingling, REN Yiru, NING Keyan, et al. Study on high temperature performance of typical structural material of dry plate brake[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(6): 62-66. (in Chinese)
- [98] BARSOUM M W. The $M_{n+1}AX_n$ phases: A new class of solids[J]. Progress in Solid State Chemistry, 2000, 28(1-4): 201-281.
- [99] EKLUND P, BECKERS M, JANSSON U, et al. The $M_{n+1}AX_n$ phases: Materials science and thin-film processing[J]. Thin Solid Films, 2010, 518(8): 1851-1878.
- [100] ARSLAN E, TOTIK Y, BAYRAK O, et al. High temperature friction and wear behavior of MoS_2 / Nb coating in ambient air[J]. Journal of Coatings Technology & Research, 2010, 7(1): 131-137.
- [101] CLAUSS F J. Solid lubricants and self-lubricating solids[J]. New York: Academic Press, 1972: 164-194.
- [102] SHI X L, ZHAI W Z, XU Z S, et al. Synergetic lubricating effect of MoS_2 and Ti_3SiC_2 on tribological properties of NiAl matrix self-lubricating composites over a wide temperature range[J]. Materials & Design, 2014, 55(3): 93-103.
-
- 作者简介: 付田力, 女, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为三元 MAX 润滑涂层制备。
E-mail: xaut_futianli@126.com
- 马国政 (通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为表面工程与极端工况摩擦学。
E-mail: magz0929@163.com