

DOI: 10.11973/jxgccl202010003

# Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub> 基金属陶瓷制备技术及应用的研究进展

李 强<sup>1</sup>, 李文戈<sup>1</sup>, 赵远涛<sup>1</sup>, 王争强<sup>1</sup>, 袁东林<sup>1</sup>, 张 森<sup>2</sup>

(上海海事大学 1. 商船学院, 2. 物流与工程学院, 上海 201306)

**摘要:** 综述了 Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub> 基金属陶瓷的性能与特点, 详细介绍了真空液相烧结技术、激光熔覆技术、固相反应法、反应热喷涂法、铸造烧结法等 Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub> 基金属陶瓷常用制备方法及各自的优缺点, 简述了采用不同技术制备得到 Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub> 基金属陶瓷的硬度、耐磨性能和耐腐蚀性能等, 对 Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub> 基金属陶瓷的相关应用领域进行了总结, 最后对今后我国 Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub> 基金属陶瓷的研究方向进行了展望。

**关键词:** Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub> 基金属陶瓷; 制备技术; 耐腐蚀性能; 耐磨性能

中图分类号: TF125.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2020)10-0012-05

## Research Progress on Preparation Technique and Application of Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub>-based Cermet

**LI Qiang<sup>1</sup>, LI Wenge<sup>1</sup>, ZHAO Yuantao<sup>1</sup>, WANG Zhengqiang<sup>1</sup>, YUAN Donglin<sup>1</sup>, ZHANG Miao<sup>2</sup>**

(1. Merchant Marine College, 2. School of Logistics and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The performance and characteristics of Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub>-based cermet are reviewed, and the common preparation methods, such as vacuum liquid sintering technique, laser cladding technique, solid phase reaction method, reactive thermal spraying method, and casting sintering method, and their advantages and disadvantages of Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub>-based cermets are described in detail. The hardness, wear resistance and corrosion resistance of Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub>-based cermets prepared by different techniques are briefly described, and the related application fields of Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub>-based cermets are summarized. Finally the future research direction of Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub>-based cermets at home is prospected.

**Key words:** Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub>-based cermet; preparation technique; corrosion resistance; wear resistance

## 0 引言

现代材料工程在科技快速发展的今天尤为重要, 而性能单一的材料越来越难满足工业生产的需求。钢铁具有良好的韧性以及较高的强度, 但是耐磨性能、耐腐蚀性能以及耐高温性能却差强人意; 陶瓷材料的硬度高、耐腐蚀和耐磨性能好, 但韧性不足, 脆性大, 容易发生断裂<sup>[1-3]</sup>。金属陶瓷材料综合了二者的优点, 不仅具有高塑性和韧性, 而且耐磨性能、耐腐蚀性能和耐高温性能也很突出, 是一种应用广泛的工程材料, 在海水泵轴承、空压机气缸衬垫、

汽车车门热锻模等方面均有应用<sup>[4-6]</sup>。

硼化物在工业应用中表现出耐磨、耐高温的特性, 因此硼化物常用来生产阻燃材料、耐磨材料、绝缘材料等。其中, 金属硼化物因具有独特的高硬度、高熔点、良好耐腐蚀性能等特点, 而在各个领域都有着广泛的应用。二元硼化物中的化学键以共价键形式存在, 原子轨道发生重叠<sup>[7]</sup>, 使得其化学结构稳定, 但也导致在二元硼化物合成过程中易出现晶粒聚集成团的现象, 这会降低金属液相对硼化物晶粒的润湿性, 造成二元硼化物基金属陶瓷力学性能的降低。但是在通过添加合金元素或者晶粒抑制剂等方法合成三元硼化物的过程中不易出现晶粒聚集成团现象, 且合成的三元硼化物晶粒细小, 尺寸分布均匀, 因此三元硼化物基金属陶瓷具有较高的硬度和强度, 在工业生产中发挥着巨大的作用。目前, 国内

收稿日期: 2019-11-25; 修訂日期: 2020-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51572168)

作者简介: 李强(1993—), 男, 河南新蔡人, 硕士研究生

通信作者(导师): 李文戈教授

外已成功研制出多种体系三元硼化物基金属陶瓷<sup>[8-9]</sup>,其中  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷因具有较优异的耐磨性能和耐腐蚀性能而具有广阔的应用前景。在日本, $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷广泛应用于耐磨耐腐蚀部件上,如注射成型机零部件<sup>[10]</sup>、恶劣环境下泵的轴承部件等,在高硬度钢切割工具和陶瓷刀具上也有相应的应用。我国学者主要对  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷作为硬质涂层应用在钢基体表面方面进行了研究,但是有关  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷在应用转化方面的研究较欠缺,且未将工业推广与性能优化进行有效的结合。为了给相关研究人员提供参考,作者综述了  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的性能与特点以及制备技术,并对  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷相关应用及未来发展方向进行了总结。

## 1 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$ 基金属陶瓷的性能及特点

$\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷主要由  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  硬质相和镍黏结相组成,为了改进和提高  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的相关性能,可向其添加铬、锰、镍、钒等合金元素或稀土元素<sup>[11-13]</sup>。加入铬、钒元素可使  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的晶体结构由原来的斜方晶体转变成为正方晶体,改善显微结构;加入锰元素可以细化晶粒组织,提高抗弯强度、硬度等力学性能。

张恒<sup>[14]</sup>研究发现,当添加质量分数 5% 的铬元素时, $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的性能最佳,继续添加质量分数大于 10% 钒元素后,金属陶瓷的硬度和抗弯强度先稳定升高后基本不变。

周佩德等<sup>[15]</sup>系统研究了添加不同质量分数(0, 0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2%)纳米  $\text{La}_2\text{O}_3$  对  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷摩擦磨损性能的影响,发现在相同载荷下当纳米  $\text{La}_2\text{O}_3$  质量分数为 0.3% 时, $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的摩擦因数和磨损率最大,添加质量分数 1.2% 纳米  $\text{La}_2\text{O}_3$  的  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的摩擦因数和磨损率最小。

KORNAI 等<sup>[16-17]</sup>研究发现:在体积分数 10%  $\text{HNO}_3$  溶液中, $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的耐腐蚀性能与粉末冶金高速钢的相近,当向  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷中添加适量铬元素后,耐腐蚀性能显著提高; $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的结合相为镍基合金,易受  $\text{HNO}_3$  等氧化性酸的腐蚀,而添加一定量的铬元素可以提高镍的稳定性,进而使  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷具有抵抗非氧化性酸和氧化性酸腐蚀的性能。

## 2 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$ 基金属陶瓷的制备技术

### 2.1 真空液相烧结技术

采用真空液相烧结技术制备材料是在接近真空的中性气氛下进行的,在制备过程中不会引入其他物质而与烧结材料发生化学反应,但可吸附混合在烧结材料内的气体,从而改善烧结收缩问题。在采用真空液相烧结技术制备  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的过程中,需要选取若干个物相发生变化的温度,通过在这些温度处的保温处理使烧结材料发生充分的化学反应,进而使烧结试样获得良好的致密性能<sup>[18]</sup>。

早在 20 世纪 80 年代,TAKAGI 等<sup>[19-20]</sup>就采用真空液相烧结方法,在 1 240~1 340 ℃ 温度范围烧结 20 min 成功制备了  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷,研究发现:当钼与硼的质量比在 1.2 时金属陶瓷的抗弯强度与硬度达到最大,分别为 2.95 GPa,89.6 HRA,此时金属陶瓷具有理想的四方  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$ ( $\text{M}_3\text{B}_2$ )两相结构。

$\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的真空液相烧结包括液相烧结和固相烧结两部分<sup>[21]</sup>;液相烧结和固相烧结所生成的不同产物影响和决定着金属陶瓷的性能,所以烧结工艺的制定至关重要。张恒<sup>[14]</sup>研究了烧结温度(1 300~1 400 ℃)对  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷力学性能的影响,发现烧结温度为 1 330 ℃ 时, $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的抗弯强度和硬度达到最大,在烧结过程中孔隙被液相充分填充,所制备金属陶瓷的致密性良好<sup>[22-23]</sup>。杨林等<sup>[12]</sup>研究发现,当添加质量分数为 0.6% 的稀土  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  时,真空液相烧结  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的晶粒最小,晶粒尺寸在 0.8~3.0  $\mu\text{m}$ ,且组织分布最为均匀,硬度和抗弯强度最大,分别为 88.7 HRA 和 1 500 MPa;适量稀土  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  的添加会明显改善  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的组织和性能。

真空液相烧结技术具有操作简单、成本低廉等优点而得到广泛应用,但是烧结过程中降温速率不可控,且在烧结液相量较大且具有高黏结剂含量的硬质合金时,硬质合金易发生变形。基于此,国内外学者提出了相应的改进措施,如卢伟民等<sup>[10]</sup>发明了一种改进真空液相烧结方法,即采用可控速率缓慢降温工艺,可使产品出炉合格率达到 97%。

### 2.2 激光熔覆技术

激光熔覆技术以激光作为热源,使涂层材料在高温下发生熔融而在基体表面形成熔覆层<sup>[24]</sup>,该技

术可改善基体表面的特性,使涂层与基体间具有高的结合强度,并保证涂层结构的致密性。

代宽宽等<sup>[25]</sup>采用激光熔覆技术在Q235钢表面原位合成制备 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$ 基金属陶瓷涂层,发现涂层具有优异的耐腐蚀性能,这与激光熔覆制备的涂层结构致密,合成的 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$ 增强相分布均匀有关。

胡肇炜等<sup>[26]</sup>通过数值模拟激光熔覆温度场,对基体与 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$ 基金属陶瓷涂层的反应机制进行了研究,发现在激光功率为2 500 W、扫描速度为1  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、光斑尺寸为6 mm×2 mm条件下,涂层粉体的温度可达4 000 K,远远超过粉体的熔点,使得粉体在液相下发生原位反应;部分基体材料在温度达到1 800 K后发生熔化,熔融涂层材料与基体材料发生冶金结合,因此涂层与基体间具有较高的结合强度。

激光熔覆技术与传统表面改性技术相比,具有凝固和冷却速率快的特点,而且通过优化激光工艺参数可使熔覆层获得较低的稀释率,从而使熔覆层与基体间形成较好的冶金结合。但是激光熔覆层中也存在一些缺陷,如气孔以及因组织不均匀而出现的裂纹等。目前,已经出现许多改进激光熔覆技术和优化工艺参数的研究。顾小颜等<sup>[27]</sup>提出了一种激光诱导自蔓延高温合成技术,该技术融合了激光熔覆和燃烧合成技术的优点;其试验设备也已研制成功,但是如何较好地控制反应过程仍是目前需要解决的难题。胡肇炜等<sup>[28]</sup>研究发现,在激光熔覆原位合成 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$ 基金属陶瓷涂层的过程中,功率会影响凝固特征参数,从而引起涂层组织的改变。

### 2.3 固相反应法

固相反应法<sup>[29-30]</sup>需将陶瓷粉制成料浆涂覆在基体表面,待干燥后送入真空炉中在高温下进行固化,从而使涂层与基体或者涂层内部发生化学反应,实现基体与涂层牢固的化学结合。

马壮等<sup>[31]</sup>将纯钼粉、镍粉、铁粉、铝粉以及Fe-B粉球磨混合,用磷酸二氢铝作黏结剂将混合粉体制成料浆涂覆在Q235钢基体表面,室温干燥后放进真空度5.0 Pa的真空炉中在860 ℃下制备三元硼化物金属陶瓷涂层,发现:三元硼化物涂层与基体形成了冶金结合,在结合区没有孔洞和微裂纹出现,涂层与基体间的结合良好,结合强度可达14.15 MPa;采用聚氨脂清漆对制备得到陶瓷涂层进行封孔处理后,涂层结构更加致密,耐磨性能远优于Q235钢基体的,因此封孔处理工艺在三元硼化物涂层的制备

过程中具有重要的意义。

固相反应法作为一种制备金属陶瓷的方法,最近几年才逐渐得到一定的应用;该方法具有产量高、生产成本低、操作简单的优点,但是由于制备材料固体质点扩散系数小,因此反应速率较慢。从工业化大批量生产方面考虑,固相反应法依然具有较好的发展前景。

### 2.4 反应热喷涂法

反应热喷涂法是对普通热喷涂法进行改进和创新而形成的<sup>[32-33]</sup>,即采用自蔓延高温合成反应火焰喷涂技术使喷涂过程中喷涂材料发生铝热反应,利用反应过程中放出的热量合成涂层。由于火焰喷射的温度和速度具有局限性,所制备的涂层中难免存在孔隙等缺陷。

王伟<sup>[5]</sup>研究发现,将采用反应火焰热喷涂法制备的Mo-FeB-Fe系三元硼化物金属陶瓷涂层在1 000 ℃真空炉中热处理5 h后,涂层的孔隙率明显下降,这是由于经过热处理后涂层元素容易扩散,使得涂层元素相互搭接现象减少导致的。

目前,反应热喷涂方法包括反应等离子喷涂、反应火焰喷涂和反应电弧喷涂。反应热喷涂工艺简单,在涂层制备过程中同时进行材料合成与沉积,在汽车船舶、机械制造、模具制造、钢铁等领域应用广泛<sup>[34]</sup>。目前,反应热喷涂技术在黑色金属表面制备陶瓷涂层的技术较成熟,但在有色金属表面制备陶瓷涂层的研究较少<sup>[35]</sup>。

### 2.5 铸造烧结法

铸造烧结法广泛应用于复合材料的加工生产过程中,该方法是铸造法和粉末冶金法二者之间优势互补而形成的一种全新的方法。采用该方法制备三元硼化物金属陶瓷时,先将混合粉末进行压坯,然后放置在铸型中,在铸型中倒入钢液或者铁液形成的高温环境中,含有金属陶瓷硬质相颗粒的坯块发生高温合成反应从而完成烧结和致密化过程,并且与铸件形成良好的冶金结合<sup>[36]</sup>。

SANIN等<sup>[37]</sup>以 $\text{MoO}_3$ 粉、 $\text{NiO}$ 粉、铝粉和硼粉为原料,并加入促进相分离的添加剂后,在钢基体上采用铸造烧结法制备 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2\text{-Ni}$ 复合陶瓷涂层,钢基体表面熔化而与涂层形成冶金结合;制备的铸造涂层具有明显的复合结构,包含正交晶系的 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$ 和 $\text{MoNi}_4$ 金属化合物,涂层的维氏硬度在1 000~1 200 HV。采用铸造烧结法制备涂层时的烧结时间短,工艺简单,能节省烧结材料,并且金属

液界面处具有大热流密度<sup>[38]</sup>。然而,铸造烧结法依然存在许多工艺问题有待进行研究,这对于铸造烧结涂层性能和机理的研究至关重要。

## 2.6 其他方法

目前,国内外制备金属陶瓷涂层的方法除了真空液相烧结法、激光熔覆技术、固相反应法、反应热喷涂法、铸造烧结法之外,还有等离子堆焊、热化学反应法<sup>[39]</sup>等。等离子堆焊既可以用来修复再制造零件,也可以进行表面强化涂层的制备<sup>[40]</sup>;等离子弧温度高、能量集中而且可控性好,所形成的堆焊层组织分布均匀,硬度较高,但是在工作过程中会出现少量粉粒溅出的现象,这不仅会造成原料的浪费,还会对施工人员的健康造成一定的危害。热化学反应法的工艺流程简单,不需要特殊气体的参与,操作方便,在陶瓷复合钢管等领域已得到了实际应用<sup>[41-42]</sup>。

## 3 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$ 基金属陶瓷的应用

随着工业技术的迅猛发展,工业生产中的机械零件需要具有更稳定、更好的综合性能,在严酷的环境下还需具有更加优良的耐磨性能、耐腐蚀性能; $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷正是因为具有这些优点而得到广泛应用。 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷具有与哈氏合金C同等优异的耐腐蚀性能,并且在很宽的温度范围内具有高的热导率。根据这些特性, $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷广泛用于在高温以及强腐蚀环境下工作的树脂注射成型机部件、高温锻造模具部件、钢丝冷热拉模部件、熔融铝铸造部件等方面<sup>[6,11]</sup>。日本ToYo Kohan公司生产的 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  三元硼化物基钢结硬质合金的密度仅为普通硬质合金的3/5,但是硬度与抗弯强度却与普通硬质合金的相当,在制罐工具、轧辊、刀具等方面已得到有效的应用<sup>[43]</sup>。 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷可在钢基体上用作耐高温、耐磨损以及耐腐蚀的保护涂层,如窑炉衬板与衬套<sup>[44]</sup>等,而且在 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷制备过程中不需要钨、钽、钴等战略性金属<sup>[43-45]</sup>,因此应用前景良好。

## 4 结束语

$\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷在化学性能和物理性能等方面表现优异,完全符合工业生产对硬质合金性能的要求。但是,目前国内有关 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的研究起步较晚,生产技术方面不够完善,生产推广化程度还不是很高,同时制备成本高、生产周期较

长, $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷性能相较于日本和欧美等地区来说差距较大,这些均制约着我国 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的应用推广。未来我国 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的研究应集中在制备工艺优化和产业推广方面。

(1) 除了相对成熟的真空液相烧结和激光熔覆技术,还应对其它 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷制备技术均开展广泛研究,完善制备工艺流程,改进制备方法。

(2) 改进 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的原料配方,重点对添加纳米粉体后金属陶瓷的制备、结构与性能进行系统研究,揭示纳米粉体对金属陶瓷性能影响的机理。

(3) 在 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷的产业化应用上,应降低制造过程中的条件成本和技术成本,以纯钼粉、镍粉和硼粉代替二元硼化物来制备 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  基金属陶瓷。

## 参考文献:

- [1] 赵丽,周小平.感应加热三元硼化物金属陶瓷涂层的组织和性能[J].表面技术,2016,45(9):106-111.
- [2] 周小平,胡心彬,高博,等.反应烧结三元硼化物金属陶瓷覆层的组织与性能[J].金属热处理,2008,33(3):73-75.
- [3] 周小平,徐义胜.感应加热三元硼化物金属陶瓷涂层的组织及耐磨性[J].表面技术,2010,39(1):12-14.
- [4] 陈慧,邓莹,李力.Ti(C,N)基金属陶瓷刀具材料的研究现状[J].重庆文理学院学报(自然科学版),2012(5):13-16.
- [5] 王伟.反应热喷涂三元硼化物金属陶瓷涂层制备工艺及性能研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2011:12-23.
- [6] 胡肇炜,李文戈. $\text{Mo-Ni-B}$ 系三元硼化物制备与性能研究评述[J].表面技术,2016,45(11):1-9.
- [7] 罗致.钢体表面 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$ 金属陶瓷涂层的设计、制备及应用研究[D].湘潭:湘潭大学,2016:10-18.
- [8] 吕和平.新型三元硼化物基陶瓷涂层的制备及其性能研究[D].上海:上海交通大学,2010:23-33.
- [9] 王福军,修启迪.三元硼化物陶瓷涂层耐磨性的研究[J].科技风,2012,25(22):35.
- [10] 卢伟民,杨宣增.真空液相烧结方法:1184011[P].1998-06-10.
- [11] 山崎裕司,西麻里,高木研一.MnおよびVを含有した $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$ 系硬質合金の組織および機械的特性に及ぼすMo量の影響[J].粉体および粉末冶金,2002,49(4):312-317.
- [12] 杨林,潘应君,柯德庆,等.稀土 $\text{Sm}_2\text{O}_3$ 对 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$ 基金属陶瓷微观组织和力学性能的影响[J].武汉科技大学学报,2017,40(2):105-109.
- [13] 中島健太,小池涉,藤間卓也,等.Cr含有 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$ 三元硼化物の機械的及び物理的特性[J].粉体および粉末冶金,2012,59(8):473-478.

- [14] 张恒. Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub>基金属陶瓷的制备及其组织性能研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2016:25-42.
- [15] 周佩德, 李文虎, 艾桃桃, 等. 纳米 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>掺杂 Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub>基金属陶瓷的摩擦磨损特性研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2019, 47(2):10-14.
- [16] KOMAI M, TAKAGI K I. Development of boride base cermets with excellent mechanical properties [J]. Materia Japan, 1994, 33(12):1514-1523.
- [17] KOMAI M, YAMASAKI Y, TAKAGI K. Sintering behavior of a reactive sintered ternary boride base cermet [J]. Solid State Phenomena, 1992, 25/26:531-538.
- [18] 赵正, 刘福田, 张英才, 等. 真空液相烧结法制备三元硼化物硬质合金覆层材料[J]. 山东冶金, 2006, 28(2):44-46.
- [19] TAKAGI K, WATANABE T, ANDO T, et al. Effect of molybdenum and carbon on the properties of iron-molybdenum boride hard alloys [J]. The International Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology, 1986, 22(2): 91-96.
- [20] TAKAGI K I, KOMAI M, IDE T, et al. Effects of Mo/B atomic ratio on the properties and structure of iron-molybdenum complex boride base hard alloys[J]. Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 1988, 35(8):769-774.
- [21] 刘福田, 李兆前, 黄传真. 三元硼化物基金属陶瓷复合材料及其液相烧结机理[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2001, 15(4):291-295.
- [22] 杨俊茹, 刘福田, 张悦刊, 等. 对金属陶瓷硬质覆层材料界面层扩散的研究[J]. 材料导报, 2006, 20(5):123-125.
- [23] 董飞, 刘福田, 刘元新, 等. 液相烧结三元硼化物硬质合金覆层材料的特性[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(8):1046-1050.
- [24] 杨坤. 镍基合金激光熔覆层质量改善的研究及其应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2005:18-29.
- [25] 代宽宽, 宋光明. 三元硼化物基金属陶瓷涂层的制备、应用与发展[J]. 科技信息, 2012, 29(1): 156-157.
- [26] 胡肇炜, 李文戈, 吴钱林. 激光熔覆原位合成 Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub>的热力学分析及数值模拟[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(5): 166-171.
- [27] 顾小颜, 赵海云. 激光诱导自蔓延高温合成技术[C]//第十二次全国焊接会议论文集(第1册). 哈尔滨: 中国机械协会焊接协会, 2005:594-597.
- [28] 胡肇炜, 李文戈. 激光熔覆原位合成 Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub>涂层工艺研究[J]. 表面技术, 2017, 46(8): 1-6.
- [29] 白璐, 吴裕功. 一种新的固相反应法制备高掺杂浓度的 CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub>陶瓷[J]. 天津理工大学学报, 2016, 32(4): 14-19.
- [30] 李芸华, 胡胜龙, 李建云. 固相反应法制备 Li 和 La 共掺杂 NiO 基陶瓷材料电学性能研究[J]. 信息记录材料, 2019, 20(3): 12-13.
- [31] 马壮, 王伟, 李智超. 固相反应法三元硼化物陶瓷涂层的制备及性能研究[J]. 材料导报, 2010, 24(8):98-102.
- [32] 石春艳, 赵淑金, 王涛, 等. 反应热喷涂法制备陶瓷涂层的研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2011, 29(3):392-395.
- [33] 孙方红, 马壮, 李福永, 等. 反应热喷涂制备陶瓷涂层的研究进展[J]. 材料保护, 2013, 46(4):48-50.
- [34] 李小龙, 王引真, 石建稳, 等. 热喷涂技术的最新发展——反应热喷涂[J]. 新技术新工艺, 2004(10):64-66.
- [35] 曲文超. 镁合金、纯铜表面反应热喷涂陶瓷涂层制备工艺及性能研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2008:4-8.
- [36] 李文虎, 刘福田, 朱陆益, 等. 铸造烧结三元硼化物硬质合金钢覆层材料[J]. 铸造技术, 2006, 27(6):594-597.
- [37] SANIN V, IKORNIKOV D. Deposition of cast Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub>-Ni metal-matrix composite coating by combined centrifugal SHS [J]. Blucher Material Science Proceedings, 2014, 1(1): 95.
- [38] 杨屹, 冯可芹, 王一三, 等. 铸造烧结法[J]. 热加工工艺, 2003(4):38-40.
- [39] 曲彦平, 石娇, 杨爱宁, 等. 热化学反应法制备耐海水腐蚀陶瓷涂层及机理分析[J]. 表面技术, 2010, 39(6):39-41.
- [40] 温永策, 孙俊生, 焦恩理, 等. 三元硼化物系堆焊合金的研究进展[J]. 精密成形工程, 2017, 9(5):90-97.
- [41] 金华峰. 燃烧合成陶瓷涂层技术的应用研究与发展趋势[J]. 表面技术, 2000, 29(6):26-29.
- [42] 周健儿, 李家科, 江伟辉. 金属基陶瓷涂层的制备、应用及发展[J]. 陶瓷学报, 2004, 25(3):179-185.
- [43] 李沐山. 国外钢结硬质合金新进展[J]. 硬质合金, 1994, 11(2):105-114.
- [44] 李淑华, 王建江. 小口径内衬陶瓷复合钢管涂层厚度控制[J]. 材料保护, 2000, 33(3):28-29.
- [45] 駒井正雄, 山崎裕司, 小崎信也, 等. Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub>系硬質合金の機械的性質と硼化物相の結晶構造[J]. 日本金属学会誌, 1994, 58(8): 959-965.

欢迎来稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告