

金属基纳米复合材料的研究进展*

田雅琴¹,朱书豪^{1,2},张小平^{1,2}

(1.太原科技大学 机械工程学院,太原 030024;2.太原科技大学 重型机械教育部工程研究中心,太原 030024)

摘要: 金属基纳米复合材料以其优异的性能和独特的组织结构受到越来越多的重视,成为了材料领域研究的热点并得到了越来越广泛的应用。对目前常见的金属基纳米复合材料按照不同标准进行了分类并介绍其分类的特点,叙述了金属基纳米材料在力学、电学、热学、光学、磁学、化学等方面的特征与优势,介绍了常用制备金属基纳米复合材料的方法,并对其应用、研究热点以及难点进行了分析,提出了未来的研究的内容与方向。

关键词: 金属基纳米复合材料;性能;制备方法;研究方向;综述

中图分类号: TG383;TG113;TB331

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-9731.2019.06.005

0 引言

随着经济、技术以及社会的发展,传统的材料已经不能满足用户和市场需求,要求材料具有更优良的复合性能。纳米复合材料的研究能够适应这样的发展要求,为用户提供更多的选择。所谓纳米复合材料是由金属、陶瓷、树脂等材料为基体,通过合适的工艺将尺寸为0.1~100 nm的颗粒、晶须、纤维等增强材料均匀地分布到基体中的复合材料,通过复合合适的纳米材料可以显著地改善基体材料的性能^[1]。金属基材料凭借其基体的优良的特性,在新材料领域有着广泛的应用。金属基纳米复合材料(metal matrix nanocomposites,简称MMNCs)是基体为金属或者合金、增强体为一种或多种纳米级金属或者非金属粒子构成的新型复合材料^[2]。相对于传统金属基复合材料来说,MMNCs材料的界面的结合力更强,增强体在基体中的分布情况更均匀、更容易得到性能优良的复合材料,且具有小尺寸效应、界面效应、量子尺寸效应、宏观量子隧道效应等独特的材料效应,使材料具有一些独特的性质,如高膨胀、磁性、吸波特性等。MMNCs材料的性能主要取决于基体与增强体本身的性质、两者的界面结合状况以及两者之间的相互作用力,能够很好地结合金属基与纳米材料的性能特点。

1 MMNCs的分类

1.1 按基体材料分类

按照基体材料的不同MMNCs可分为铝基、轻金属基、金属间化合物基以及高熔点金属基等。铝基具有成本低、密度小、高比强度、优良的延展性等特点^[3]。轻金属基是基体比重 <5 的金属,主要为钛、镁、钠,有

着较高的比强度、密度小等优点得到广泛应用,但表面耐损性能较差,一般要进行表面工艺处理^[4]。金属基化合物基以铝化物和硅化物应用最广,其具有优异的高温抗氧化性和导热、导电性,但在断裂强度和脆性方面有一定的限制。高熔点金属基主要有镍、铜、铁、钴等金属,有着良好的物理性能,但一般制备时工艺温度较高,在高温状况下增强体与基体过渡区易发生界面反应和氧化反应^[5]。

1.2 按增强体数量分类

按增强体的数量MMNCs可分为一元和多元两类。一元纳米粒子复合材料是一种金属纳米粒子或者其氧化物纳米粒子与基体形成的复合材料;多元纳米粒子复合材料是两种或者两种以上的增强体同时与基体形成的复合材料。相对于单体金属材料,多元纳米粒子的协同增强作用使其在光性、电性、磁性和催化作用等方面有着巨大的优势,同时在材料的稳定性上与选择性上相比单体金属有所提升。现阶段的研究主要还是一元纳米粒子复合材料上,多元纳米粒子复合材料的研究开展得相对较少^[6]。

1.3 按增强体种类分类

按增强体种类MMNCs可分为碳纳米材料增强体、外向非连续纳米相增强体、原位合成纳米相增强体复合材料。碳纳米增强体主要为碳纳米管、石墨烯、纳米金刚石等碳纳米材料。这种增强体使材料的力学性能得到很大的提升,能够降低材料的热膨胀系数,提高材料的导热性,使材料综合性能得到改善^[7]。外向非连续纳米相增强体是将制备完成的纳米级金属或者非金属增强体加入到基体中从而得到复合材料。原位合成纳米相增强体是利用化学反应在基体产生自反应产生,使增强体能够与基体有着很好的结合力,并且使增

* 基金项目:山西省回国留学人员科研资助项目(2016-095)

收到初稿日期:2018-09-25

收到修改稿日期:2019-04-21

通讯作者:田雅琴,E-mail:274290944@qq.com

作者简介:田雅琴(1976—),女,山西介休人,副教授,硕士生导师,主要从事双金属复合管成型工艺、微纳米复合材料制备的研究。

强体均匀的分布在基体中。原位合成是使复合材料均匀分布、避免团聚较好的解决方法,是现阶段的研究热点^[8]。

1.4 按材料功能特性分类

按复合材料的功能特性 MMNCs 可分为结构型与功能型。结构型是用于制作零件和工程结构件,利用其强度、刚度、力学性能、耐腐蚀性等机械性能达到要求结构件的结构要求。功能型是利用材料的光、电、磁的敏感性,用于满足信息能量的储存、传输、释放等功能要求。结构型目前主要在航空、航天、汽车工业等领域的零部件的生产中得到应用,功能型则在催化剂、传感器、储能材料等方面的应用较广^[9]。

2 MMNCs 的性能及其应用

2.1 MMNCs 的性能

金属基纳米复合材料的性能取决于基体与增强体的特点、含量及分布等,和两者的界面结合状况以及两者之间的相互作用力也有着密切的关系。通过两者的结合可获得力学、电学、热学、化学等综合性能优良的复合材料。

2.1.1 力学性能

在金属基体中添加增强体材料特别是碳纳米材料能显著提高材料的弹性模量、拉伸强度、耐疲劳强度等。一般认为提高力学性能是因为增强体能起到细化晶粒的效果,阻碍位错的发生,并且能承担部分应力。研究人员采用纳米复合镀在结晶器铜板表面制备 Ni-Al₂O₃ 纳米复合镀层,显著提高了镀层硬度,在相同的工况条件下纳米复合镀层的磨损量是纯镍镀层的 1/2^[10]。研究表明采用无压渗透法制备的碳纳米管-铝基复合材料,随着碳纳米管含量的升高硬度也随之升高,摩擦系数和磨损率则减小^[11]。

2.1.2 电学性能

MMNCs 中基体的体积分数大,所以材料仍保持金属的良好导电性。在金属基体中添加电学性能优良的增强体材料可改善材料的电学性能。石墨烯的载流子特性使其电阻率小、内电子抗干扰性强且有室温霍尔效应,在导电领域有着很好的应用前景^[12]。研究者用还原法制备了石墨烯-镍钴双金属氧化物复合材料,比电容量明显高于单纯的镍钴双金属氧化物且具有很好的循环稳定性和结构稳定性,展现出了复合材料优良的电化学性质^[13]。研究人员用电镀 Ni-Co 合金对 La-Mg-Ni 基进行处理所制备的复合材料,材料的最大放电容量由 316 mAh/g 升至 335 mAh/g,电化学阻抗 R_{ct} 由 0.667 Ω 降至 0.521 Ω ,制备的材料相对于原材料电学性能得到了很大的提升^[14]。

2.1.3 热学性能

通过添加不同含量的增强体可以得到具有不同热容、热导率、热膨胀、高温特性的 MMNCs,能够满足不同工作条件下的要求。这类 MMNCs 在电子元件、集

成电路的散热方面有重要应用。研究人员采用粉末冶金法制备的石墨烯-铜基复合材料在测试中导热系数达到 396 W/(m·K),相对于纯铜提高了 10%^[15]。采用搅拌摩擦法制备的 CNTs(碳纳米管)-7075 铝基复合材料随着 CNTs 含量的增加,材料热膨胀系数呈减少的趋势^[16]。

2.1.4 化学性能

MMNCs 具有良好的耐腐蚀性能与催化性能等化学特性。石墨烯-稀有金属复合材料所具有的催化活性在燃料电池、生物传感器、光谱学、超级电容器上有着重要体现。采用溶剂热法制备的 Ag-Ti₂O 光催化剂,在可见光和紫外光下,Ag 在摩尔分数是 5% 时体现了更优的光催化效应^[17]。使用激光烧结法制备的石墨烯-镍复合材料,在用电化学进行腐蚀测试时,发现其在酸性溶液中的长效抗腐蚀性比激光烧结的纯镍要好很多^[18]。

2.1.5 功能物性

MMNCs 对特定元素的选择性、高响应特性也有重要应用。用 MMNCs 做气敏材料对特定气体具有很好的灵敏性和选择性,例如石墨烯-钯复合材料对氢具有高敏感选择性。MMNCs 做四探针结构时材料中的石墨烯可降低电噪声,用于测定微量的气体原子时可避免电阻影响。在磁流体微波吸收材料、催化剂、载体磁记录材料中纳米 Fe₃O₄ 的电磁吸收性能展示了其用途^[19]。纳米银的抑菌性能、药用铁基纳米材料在医学上得到应用,保证了生物的相容性与降解达到医用的要求^[20-21]。

2.2 MMNCs 的应用

相对于聚合物基和陶瓷基来说,MMNCs 的制备成本较高且制备工艺较复杂,所以应用相对没有聚合物基和陶瓷基广泛。金属基纳米复合材料主要应用于航空、航天等高精端工业领域,在民用、商用等领域应用还相对较少,主要有:(1) MMNCs 以其独特的力学耐磨、减摩性质、耐高温特性、低热膨胀系数等特点在涂层防护领域得到了重要应用,并且相对于传统的涂层更高效、更节约资源^[22];(2) 在医用领域中,纳米银、金的抑菌性质、药用铁基等 MMNCs 的应用,保证生物的相容性与降解,经过表面修饰材料后拓展其生理功能开发出新医疗产品,让 MMNCs 的应用越来越广泛^[20-21];(3) 在制造业 MMNCs 的应用更为广泛,尤其是用于航空、航天、汽车工业等领域零部件的制造,有着优良综合性能的 MMNCs 构件能够满足不同工况条件下的要求;(4) MMNCs 在多相催化剂、废水催化剂、燃料电池的核心部分、太阳能电池的光电转换等新型材料中也得到广泛应用;(5) 生物传感器、光谱学、超级电容器、液晶器件电子器件、催化剂载体、气敏材料、超导材料、分子检测器、储能材料等广泛领域也有着独特的应用^[23]。

3 MMNCs 的制备方法

制备 MMNCs 的工艺方法有很多,特点也不尽相同。不同的基体材料根据增强体的特点与使用范围需

要选择合适的制备方法。常用的制备方法有高能球磨法、原位复合法、纳米复合电镀法、快速凝固法等。常用的制备 MMNCs 方法的特点与适用范围如表 1^[6-9]。

表 1 金属基纳米复合材料的主要制备方法和适用的范围

Table 1 Main preparation methods and applicable range of metal matrix nanocomposites

制备方法	工艺特点与开发程度	适用范围
高能球磨法	成本低、产量高、工艺简单、但易混入杂质。 开发应用中	纳米金属/金属 纳米陶瓷/金属
原位反应法	第二相与基体无界面污染,理想原位匹配,一次合成,工艺简单、成本低。开发应用中	纳米陶瓷/金属
快速凝固法	技术成熟、工艺简单且易于控制,成本低、产量高。开发应用中	纳米金属/非晶, 碳纳米管增强合金
纳米复合电镀法	纳米微粒有效抑制基体组织晶粒长大,工艺简单且易于控制,成本低。开发应用中	镍、铜、铁、贵金属/纳米复合薄膜
无压渗透法	工艺简单、成本低廉、产品性能优良、增强体的体积可控等优点。开发应用中	纳米颗粒/铝
搅拌摩擦法	清除氧化膜,细化晶粒、工艺简单。开发应用中	纳米颗粒/轻金属
溶剂热法	工艺简单可控,封闭环境避免污染。开发应用中	有机纳米颗粒/金属
激光烧结法	性能好、制作速度快、材料多样化,成本低。开发应用中	纳米颗粒/高熔点材料
还原法	制备效果好,组织结构稳定。实验室研究中	纳米颗粒/金属
非晶晶化	成本低,产量高,界面清洁致密,无微孔隙,粒度可控。 实验室研究中	纳米颗粒/非晶成能力较强合金
惰性气体	表面清洁,粒度小,设备要求高,产量低。	Cu /Fe,Ag /Fe
凝聚法	实验室研究中	SiO ₂ /BiSb
反应性	沉积速度快、粒度小、表面洁净、能耗大。	氮、氧、碳化物/金属
等离子体法	实验室研究中	
微乳液法	核-壳结构纳米晶复合,粒度分布窄且可控。实验室研究中	纳米颗粒/金属
大塑性变形法	产品致密、界面洁净且粒度可控性好。开发研究中	纳米陶瓷/金属
溅射法	靶材无限制,薄膜组织致密、粒度小、表面清洁、附着力大,适于 实验室制备。开发研究中	纳米金属/ 纳米复合薄膜

本文主要介绍制备工艺较为成熟的高能球磨法、发展迅速的纳米复合电镀法和未来最具发展前途的原位反应复合法。

3.1 高能球磨法

高能球磨法是在球磨机的转动或者振动中将金属粉末或非金属粉末混合进行研磨、破碎、冷焊,将粉末尺寸降到纳米级,从而获得材料粉末的一种复合材料制备工艺。高能球磨法具有成本低、产量高、工艺简单等优点,是制备高熔点金属及其合金的纳米级复合材料最常用的方法,也是现阶段工业化程度最高的制备技术^[15]。高能球磨法不足之处为:制备过程中耗能大,制备的材料尺寸大小分布不均,不能保证结构的完整性,工艺过程中温度较高易发生界面反应和氧化反应,影响界面结合,且易引入杂质污染制备的材料,工艺不当时常易产生团聚现象。蒋等利用高能球磨法制备 CNTs-Cu 基复合材料,碳纳米管含量 1%时导电率 36.28%、致密度 95.01%、布氏硬度 79 HB、抗拉强度 143.5 MPa^[24]。目前经过界面湿润性模拟测试改善工艺过程,建立分子之间的吸附力,对颗粒进行表面改性让分子间有更好的兼容性,采用静电吸附等方法改善

工艺,未来高能球磨法工艺会越来越成熟。

3.2 纳米复合电镀

纳米复合电镀是一种利用电化学沉积原理的制备工艺。在镀液中加入纳米级的颗粒,通过与金属基体共沉积得到镀层并成型获得零件。纳米复合镀具有工艺过程易控制、成本低等优点,是制作抗高温、抗腐蚀复合材料最有潜力的方法。与其他工艺相比纳米复合镀的制备温度低、能有效避免界面反应,较好地保持基体与增强体各自特性和结构尺寸。液相电沉积还能够促进增强体更好地分散在基体中,优化增强体的分布。纳米复合镀的不足为:对于复杂外形的零件或细小的孔洞与盲孔效果较差,对工艺环境清洁度要求较高,镀液废液对环境有污染需要进行洁净处理,工艺所需时间较长,使用工艺材料种类有一定局限,现阶段应用较多的是镍、铜等金属。匡等利用纳米复合镀制备 0.12%(质量分数)的石墨烯-镍基复合材料,热导率提升 15%、电导率提升 34%、屈服强度提高 2.4 倍、极限强度提升 42%、断裂强度提高 2.8 倍^[25]。纳米复合镀技术虽有不足但其优点也是十分明显,未来应用领域尤其是在涂层领域会得到越来越广泛的应用。

3.3 原位反应法

原位反应法是利用化学反应在基体产生自反应产生增强体,使其能够与基体有着很好的结合力,在制备过程中生成优异的第二相,从而达到改善复合材料性能的目的,得到性能优良的复合材料。原位反应法相对于其他制备方法有着更好的界面结合力,能够通过控制化学反应的控制从而控制增强体,增强体在基体中分布也较为均匀,是现阶段得到高性能金属基纳米复合材料常用的制备方法之一。但目前对制备工艺过程中的热力学、面结构及强度、弥散强化机制及其控制措施等理论研究不足,对反应中副产物的处理缺少合适的方法,反应过程中增强体的成分与体积分数不易控制^[8]。康等利用原位反应法制备的 TiB₂-ZA27(高铝锌基合金,含铝为 27%复合材料,在 TiB₂ 含量为 4%(质量分数)时,材料的抗拉强度和硬度达到了 432 MPa、136 Hv,相对于基体材料来说分别提升了 14%,38%^[26]。原位反应法的独特优势使其在近年来飞速发展,加快了实验室向工业生产中的转化。

4 MMNCs 研究存在的问题及发展趋势

4.1 MMNCs 研究存在的问题

综合分析目前文献,MMNCs 的研究仍然存在以下问题:

(1) MMNCs 的增强体与基体结合的作用机理不明确,没有形成系统的理论体系。现阶段的增强体与基体的组合往往依靠尝试法,缺少系统的理论支持;(2) 增强体与基体成分分散性、相容性、两者的结合程度也有待解决。在制备中易出现材料分布不均而产生团聚现象,导致材料的制备失败。有些制备工艺所需温度较高易产生界面反应,也造成了增强体与基体的相容问题与分散不均;(3) 现有的制备工艺不能精确控制纳米颗粒的尺寸,不能保证纳米颗粒大小的一致性;有的制备工艺在制备过程中破坏材料的组织结构,达不到材料预期性能,材料的质量不能保证;(4) MMNCs 的制备工艺复杂、成本较高,制备工艺还没能标准化、工艺化。材料制备中所用的仪器设备价格昂贵。

4.2 MMNCs 的发展趋势

现阶段 MMNCs 在各个领域都取得了长足的进步,针对现有研究存在的问题,未来 MMNCs 的研究或许会朝着以下方向发展:

(1) 完善 MMNCs 理论基础,明确材料基体与增强体间的作用机理,加强纳米效应的系统微观与理论研究。(2) 改善材料制备工艺,促进制备工艺标准化、规范化,创新设计出成本低、制备效果较好的新型制备工艺,为 MMNCs 的普及应用创造有利条件。(3) 加强界面控制,从一元向多元,从一维到多维精确控制,提高材料质量,尽量接近理论性能指标;(4) 拓展 MMNCs 用途,利用其独特的材料性能制造结构复杂

的零件,促进大规模集成化器件的制备及扩大其应用领域;(5) 提高模拟仿真能力,模拟应力、应变分布、导热、导电及热膨胀等行为的预期效果,演示载荷传递断裂的情况,为材料的制备提供预期参考,节约研究成本,为 MMNCs 的制备提供可行性分析。

5 结 语

纵观,MMNCs 的研究重点应主要围绕高品质制备工艺、材料性能用途设计和界面尺寸控制这 3 点来展开。未来的 MMNCs 将出现以制备工艺高效化、构型复杂化、用途多元化和高效仿真技术为主要的发展趋势。

致谢:感谢人力资源和社会保障部留学回国人员科技活动择优项目(启动类)对本课题的大力支持!

参考文献:

- [1] Latanish R M. Corrosion engineering and advanced technologies[J]. Corrosion Science, 1995, 51(4): 270-283.
- [2] Wang Huafeng. Investigation on nano-composite preparation and mechanical properties [D]. Hangzhou: Zhejiang Univesrsity, 2005: 3-7(in Chinese).
汪华锋. 纳米复合材料的制备及力学性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 3-7.
- [3] Yan Shaojiu, Chen Xiang, Hong Qihu. Graphene reinforces aluminum matrix nanocomposites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 20016, 36(3): 57-70(in Chinese).
燕绍九, 陈翔, 洪起虎. 石墨烯增强铝基纳米复合材料研究进展[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 57-70.
- [4] Hu Zhi, Yan Hong, Chen Guoxiang, et al. Present research status and prospect of Mg based nano-composites[J]. Material & Heat Treatment, 2009, 38(14): 58-61(in Chinese).
胡志, 闫洪, 陈国香, 等. 镁基纳米复合材料的研究现状与展望[J]. 热加工工艺, 2009, 38(14): 58-61.
- [5] Wu Liying, Gao Jianjun, Jin Wugang. Present development and application of metal matrix composites[J]. New Ceimical Materials, 2002, 30(10): 32-35(in Chinese).
吴利英, 高建军, 靳武刚. 金属基复合材料的发展及应用[J]. 化工新型材料, 2002, 30(10): 32-35.
- [6] Du Tao, Zhang Hongdi, Fan Tongxiang. Recent progress on graphene/metal composites [J]. Materials Review, 2015, 29(2): 121-129(in Chinese).
独涛, 张洪迪, 范同祥. 石墨烯-金属复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(2): 121-129.
- [7] Ding Ruihua. Research status of carbon nanotubes reinforced metal matrix composite[J]. Material & Heat Treatment, 2017, 46(14): 11-14(in Chinese).
丁瑞华. 碳纳米管增强金属基复合材料的研究现状[J]. 热加工工艺, 2017, 46(14): 11-14.
- [8] Li Shunlin, Lu Xiang, Zhu Zhenghou. Preparation technology in metal matrix nanocomposites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2003, (5): 572-578(in Chinese).

- 李顺林,卢翔,朱正吼.金属基纳米复合材料的制备技术研究[J].南京航空航天大学学报,2003,(5):572-578.
- [9] Zhang Dandan, Guo Changhong, Gou Xingjun. Review of metal matrix nanocomposites reinforced by graphene[J]. Journal of Yanshan University, 2014, 38(6): 484-490(in Chinese).
- 张丹丹,郭长虹,勾兴军.石墨烯增强金属基纳米复合材料的研究进展[J].燕山大学学报,2014,38(6):484-490.
- [10] Bai Lin, Chen Dengfu, Liu Peng. Preparation of wear resistant nano composite coating on surface of copper crystallize[J]. Surface Technology, 2017, 46(7): 7-12(in Chinese).
- 白林,陈登福,刘鹏.结晶器铜板表面耐磨纳米复合镀层的制备及性能[J].表面技术,2017,46(7):7-12.
- [11] Ding Zhipeng, Zhang Xiaobin, Xu Guoliang. Fabrication and tribological properties of carbon nanotubes aluminum composites[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(11): 1811-1815(in Chinese).
- 丁志鹏,张孝彬,许国良.碳纳米管/铝基复合材料的制备及摩擦性能研究[J].浙江大学学报(工学版),2005,39(11):1811-1815.
- [12] Novoselov K, Geim A, Morozov S, et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene[J]. Nature, 2005, 438(7065): 201-204.
- [13] Niu Yulian, Jin Xin, Zheng Jia. Synthesis and electrochemical property of graphene/Co-Ni double hydroxides composites[J]. Chinese Journal OF Inorganic Chemistry, 2012, 28(9): 1878-1884(in Chinese).
- 牛玉,金鑫,郑佳.石墨烯/钴镍双金属氢氧化物复合材料的制备及电化学性能研究[J].无机化学学报,2012,28(9):1878-1884.
- [14] Ding Huiling, Hao Jiansheng, Zhu Xilin. Electrochemical performance studies on nickel-cobalt electroplated La-Mg-Ni-based hydrogen storage alloys[J]. Journal of Inorganic Materials, 2010, 25(6): 647-652(in Chinese).
- 丁慧玲,蒿建生,朱惜林,等.电镀镍-钴合金对La-Mg-Ni基贮氢合金电化学性能的影响[J].无机材料学报,2010,25(6):647-652.
- [15] Gao Xin, Yue Hongyan, Guo Erjun. Preparation and properties of graphene reinforced copper matrix composites[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(11): 1-6(in Chinese).
- 高鑫,岳红彦,郭二军.石墨烯增强铜基复合材料的制备及性能[J].材料热处理学报,2016,37(11):1-6.
- [16] Liu Fencheng, Qian Tao, Xing Li. Thermal expansion characteristic of CNTs/7075 aluminum alloy composites prepared by friction stir processing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(2): 251-256(in Chinese).
- 刘奋成,钱涛,邢丽.搅拌摩擦加工CNTs/7075铝基复合材料热膨胀性能[J].中国有色金属学报,2017,27(2):251-256.
- [17] Xu Pingchang, Liu Yang, Wei Jianhong. Solvothermal preparation of Ag/TiO₂ nanoparticles and their photocatalytic activity[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2010, 26(8): 2261-2266(in Chinese).
- (8): 2261-2266(in Chinese).
- 许平昌,柳阳,魏建红.溶剂热法制备Ag/TiO₂纳米材料及其光催化性能[J].物理化学学报,2010,26(8):2261-2266.
- [18] Hu Zengron, Tong Guoquan, Zhang Chao. Corrosion resistance and hardness of laser sintered graphene reinforced nickel matrix nanocomposites[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(1): 56-60(in Chinese).
- 胡增荣,童国权,张超.石墨烯-镍纳米复合材料的制备及性能[J].材料热处理学报,2016,37(1):56-60.
- [19] Luo Jun, Wang Fanghui, Kong Linghan. A size-controllable preparation of monodisperse PAA/Fe₃O₄ magnetic microspheres[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(7): 7100-7108(in Chinese).
- 罗俊,王芳辉,孔令汉. Fe₃O₄/石墨烯复合材料的制备与表征[J].功能材料,2015,46(7):7100-7108.
- [20] Chen Bo, Gu Ning. Current status and development of pharmaceutical iron based nanomaterials[J]. Materials China, 2017, 36(3): 211-218(in Chinese).
- 陈博,顾宁.药用铁基纳米材料及其发展前景[J].中国材料进展,2017,36(3):211-218.
- [21] He Guangyu, Ma Kai, Hou Jinghui. Green synthesis of Ag/graphene nano-composite and its antibacterial activity[J]. Fine Chemicals, 2012, 29(9): 840-843(in Chinese).
- 何光裕,马凯,侯景会.纳米银/石墨烯复合材料的绿色制备及其抑菌性能[J].精细化工,2012,29(9):840-843.
- [22] Li Meng, Zhang Xiaoping, Zhou Cunlong. Research progress of Ni-based nano-composite coatings[J]. Plating and Finishing, 2016, 38(11): 24-28(in Chinese).
- 李萌,张小平,周存龙.镍基纳米复合镀层的研究现状[J].电镀与精饰,2016,38(11):24-28.
- [23] Li Aikun, Xie Ming, Zhang Jiming. Advances in precious metal nanoparticles/carbon nanotubes nanocomposite[J]. Precious Metals, 2015, 36(3): 87-94(in Chinese).
- 李爱坤,谢明,张吉明.贵金属纳米粒子-碳纳米管复合材料的研究进展[J].贵金属,2015,36(3):87-94.
- [24] Jiang Taiwei. Preparation of CNTs/Cu composites by high energy ball milling[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012: 7-13(in Chinese).
- 蒋太伟.高能球磨法制备CNTs-Cu复合材料[D].昆明:昆明理工大学,2012:7-13.
- [25] Kuang Da. Fabrication and properties of the nickel matrix graphene composites[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012: 7-10(in Chinese).
- 匡达.石墨烯-镍基复合材料的制备和性能研究[D].上海:上海交通大学,2012:7-10.
- [26] Kang Wei, Li Zhenguo, Zheng Ziqiao. Study on microstructure and properties of in-situ TiB₂/ZA27 composite[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(16): 84-88(in Chinese).
- 康巍,李振国,郑子樵.原位反应法TiB₂-ZA27复合材料的组织及性能研究[J].热加工工艺,2016,45(16):84-88.