

专题——粉末冶金零件表面处理

# 粉末冶金零件中孔隙的涂镀前封闭处理技术进展

朱立群<sup>a</sup>, 刘慧丛<sup>a</sup>, 李卫平<sup>a</sup>, 陈贻炽<sup>b</sup>

(北京航空航天大学 a.材料科学与工程学院, b.化学学院, 北京 100191)

**摘要:** 阐述了粉末冶金零件中孔隙的涂镀前封闭处理技术的进展。介绍了粉末冶金的历史沿革及概念, 提出、分析了粉末冶金材料在前处理过程中存在的问题, 阐述了电镀或者油漆前处理之前进行材料孔隙封闭处理的重要意义, 讨论了现代工业应用越来越多的粉末冶金材料的类型及产品零件。针对粉末冶金零件涂镀过程中孔隙中易残留溶液成分, 导致表面涂镀层起泡、剥离等问题, 介绍了目前采用的粉末冶金零件孔隙涂镀前的封闭处理方法, 分析探讨了粉末冶金零件镀前用防锈水封闭处理的优势, 并分析了防锈水中缓蚀剂的作用原理。防锈水中缓蚀剂等成分的渗入与扩散, 对粉末冶金材料的孔隙产生化学吸附、转化及沉淀, 从而封闭和填充粉末冶金材料中的孔隙, 可以有效提高粉末冶金零件表面涂镀层的结合力和耐腐蚀性能。

**关键词:** 粉末冶金材料; 孔隙; 涂镀处理; 封闭方法; 防锈水溶液; 缓蚀剂

**中图分类号:** TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)04-0001-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.04.001

## Research Progress of Pore Sealing Technology of Powder Metallurgy Parts before Plating

ZHU Li-qun<sup>a</sup>, LIU Hui-cong<sup>a</sup>, LI Wei-ping<sup>a</sup>, CHEN Yi-chi<sup>b</sup>

(a.School of Materials Science and Engineering; b.School of Chemistry, Beihang University, Beijing 100191, China)

**ABSTRACT:** The work aims to introduce progress of sealing treatment technology before plating of pores in powder metallurgy parts. The historical evolution and concept of powder metallurgy were introduced. Problems existing during pretreatment of powder metallurgy materials were proposed and analyzed. The significance of the material pore sealing treatment before plating or painting pretreatment was expounded. Types of powder metallurgy materials and product parts commonly used in modern industry were discussed. Solution composition could be easily left in pores of the powder metallurgy parts during plating and led to coating blistering and peeling. To resolve the problem, many different methods of sealing the pores before plating commonly applied at present were introduced; advantages of sealing the parts with antirust water were analyzed and discussed, action principle of the inhibitor in antirust water were analyzed. Adhesion and corrosion resistance of coatings on the surface of powder metallurgy parts are efficiently improved for the permeation and diffusion of the inhibitor in antirust water results in chemical adsorption, conversion and precipitation in pores of powder metallurgy materials, which seals and fills pores in powder metallurgy materials.

收稿日期: 2016-12-29; 修订日期: 2017-02-27

Received: 2016-12-29; Revised: 2017-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1637204)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (U1637204)

作者简介: 朱立群 (1955—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为材料表面工程。

Biography: ZHU Li-qun(1955—), Male, Doctor, Professor, Ph.D. supervisor, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 刘慧丛 (1975—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为材料的腐蚀与防护。

Corresponding author: LIU Hui-cong(1975—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: corrosion and protection of materials.

**KEY WORDS:** powder metallurgy parts; pores; plating process; sealing method; antirust water; inhibitor

粉末冶金是一种历史悠久的冶炼技术<sup>[1-10]</sup>。在我国古代,人们就已经掌握了冶炼生铁的技术。18世纪,欧洲人在制造铂金的过程中就采用了粉末冶金技术。进入21世纪,粉末冶金技术得到了更快的发展,现代新的粉末冶金材料在不断涌现,其应用范围也在不断扩大,如在国防军工、汽车、机械制造、家用电器等行业的应用<sup>[11-20]</sup>。

粉末冶金是利用金属或合金粉末经成形、烧结工艺而制备出材料或零件<sup>[21-25]</sup>。常用的金属或合金有青铜、不锈钢、铁、镍、钛、钨、钼、难熔金属化合物粉末冶金材料、磁性粉末冶金材料等。由于制备工艺的特点,零件表面与内部布满了孔隙,是一种多孔结构材料。而在实际应用这些粉末冶金材料制备的产品零件时,需要在表面进行电镀、涂装等处理,通过表面涂镀层提供有效的防护(防腐蚀),才能保证这类零部件材料的使用寿命和产品质量<sup>[26-30]</sup>。而电镀或涂漆的前处理过程接触到一些酸(除锈、活化)、碱(除油)、盐等成分,并且会残留到粉末冶金零件的孔隙内部,当电镀层或者油漆层覆盖后,可能过一段时间,这些残留的成分与镀层或者涂层的孔隙相互作用,导致零件表面出现锈蚀或者出现镀层、涂层的局部起泡、剥离等现象<sup>[31-40]</sup>。

本文针对粉末冶金零件的孔隙对涂镀层的影响以及这种材料涂镀前的孔隙封闭进展进行了分析讨论,为这种材料的工业应用和零件表面涂镀层质量的提高提出了一些有益的建议。

## 1 粉末冶金材料的种类及应用

粉末冶金材料主要有传统的粉末冶金材料和现代新的粉末冶金材料两大类:传统的粉末冶金材料主要有铁基、铜基、难熔金属、硬质合金粉末冶金等材料,现代新的粉末冶金材料主要有信息、能源、生物、军事等领域应用的材料<sup>[41-45]</sup>。

### 1.1 传统粉末冶金材料

铁基粉末冶金材料目前多用于汽车制造业,如汽车发动机零件、变速器零件等。另外,这种材料在其他一些机加工行业也有大量应用<sup>[46-50]</sup>。铜基粉末冶金材料制备的零件具有较好的耐腐蚀性,在机械、电器制造业中,铜基粉末冶金材料也被大规模应用。美国航空航天局 Glenn 研究中心的研究人员开发出了一种 Cu-Cr-Nb 粉末冶金材料,用于制备火箭发动机的零件,可在 768 ℃ (1282 ℉) 高温下工作,并显著节省成本。这种新材料还可用于制作发射地球轨

道、地球至月球及地球至火星飞行器的液体燃料火箭发动机的燃烧室内衬、喷嘴及注射器面板等。

难熔金属粉末冶金材料的熔点一般高于 1650 ℃,这类材料具有较高的硬度和强度,主要用于一些高技术领域,如武器装备、航空航天、核能等。硬质合金粉末冶金材料具有特殊的性能,如较高的熔点、硬度和强度等,主要应用在工业切削加工领域中。

粉末冶金电工材料通常用在电子领域(以电器元件居多,如电阻器件、真空领域的器件),还可以在电极的制造中。目前这类粉末冶金材料的应用也越来越广。粉末冶金制备的摩擦材料本身具有极强的耐磨性,主要应用在一些易产生摩擦的机械零部件中,例如汽车的摩擦离合器和摩擦制动器等。

### 1.2 现代新的先进粉末冶金材料

信息领域的粉末冶金材料主要是粉末冶金软磁材料,有金属类和铁氧体材料等。其中铁氧体磁性材料多是通过粉末冶金技术进行制造。目前在制造高性能稀土永磁材料过程中,粉末冶金技术占着很重要的地位,如高性能钕铁硼材料,不管是军用还是民用市场都有着极大的需求量。

粉末冶金能源材料分为储能材料、新能源材料等。目前,储氢(能)合金材料主要有稀土类、镁镍类以及钛铁类等。新能源材料主要有硅类太阳能电池、核能等清洁能源材料。

在生物材料中,有些金属合金或者化合物是粉末冶金材料,如人工关节、人造牙齿等。生物陶瓷具有某些与人体相似的生理特征,常被用来制成人造骨骼和牙齿,还可以用这种材料部分或者整体制造代替人体的某些器官。如具有生物惰性的氧化铝和氧化锆等氧化物生物陶瓷,可作为人造关节和负重骨骼使用;具有活性的生物陶瓷,如生物活性微晶玻璃;可降解的生物陶瓷有石膏陶瓷和铝酸钙陶瓷等,在失效后不会对环境产生影响。

军事领域用粉末冶金材料具有更重要的作用。航空航天工业用的粉末冶金材料,如减磨、防辐射等具有特殊功能的粉末冶金材料,主要用在飞机及其他航天器的仪表和机载设备上;还有用在发动机上的抗高温、高强度的粉末冶金材料,可以提高发动机的寿命和性能,如美国 F-104 飞机、F22 飞机发动机上的粉末涡轮盘等零件。

核工业本身对核材料有特殊的要求,有些金属特性只有粉末冶金技术才能实现,或者在采用粉末冶金技术后,材料的性能进一步提高。如新型核反应堆,要从源头上防止核辐射和核泄漏,这对核能的储能装

置提出了更高的要求,采用粉末冶金技术制造储能装置,可以增强核反应堆的安全性,甚至还可以有效降低核辐射的程度。

## 2 粉末冶金零件的孔隙对电镀质量的影响

粉末冶金零件的金属种类多,而且内部和表面都有一定的孔隙(见图 1、图 2),是一种典型的多孔结构材料。随着工业上这些粉末冶金零件的大量应用,对这些粉末冶金零件的耐磨损、耐腐蚀、装饰外观等都提出了高要求,而材料中存在的这些孔隙,或多或少会影响粉末冶金产品零件的外观及耐腐蚀等性能。因此,通常对粉末冶金零件表面进行电镀或者涂覆油漆,通过表面的涂镀层达到提高粉末冶金零件表面性能的要求。

但是,在这些多孔结构的粉末冶金零件进行前处理、电镀及电镀后处理的过程中,零件会不可避免地接触到不同的溶液成分,该成分很容易在零件孔隙中残留,如前处理、电镀等过程中的一些酸碱液体难以除去。即便在零件表面沉积了镀层或涂覆了油漆层,这些零件在不同的服役环境(温度、湿度、受力、震动等)中,残留在零件内部孔隙中的酸、碱、盐等成分也可能会使粉末冶金零件的涂镀层逐渐出现鼓泡、脱落、基体锈蚀等现象(见图 3),从而影响粉末冶金产品零件的性能和使用寿命。因此,在电镀或油漆前处理之前进行材料孔隙的封闭处理非常重要。



图 1 粉末冶金材料试样与粉末冶金零件  
Fig.1 Powder metallurgy material sample and powder metallurgy parts: a) Ti-24Nb-4Zr sample; b) GH22 parts

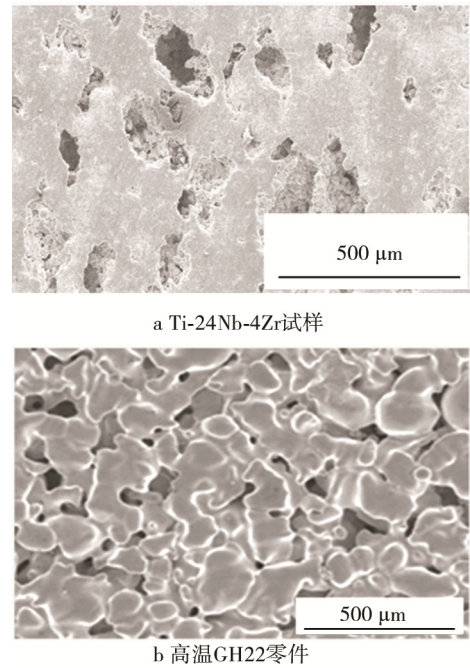


图 2 不同粉末冶金材料的微观形貌  
Fig.2 The microstructure of different powder metallurgy materials: a) Ti-24Nb-4Zr sample; b) High temperature GH22 parts

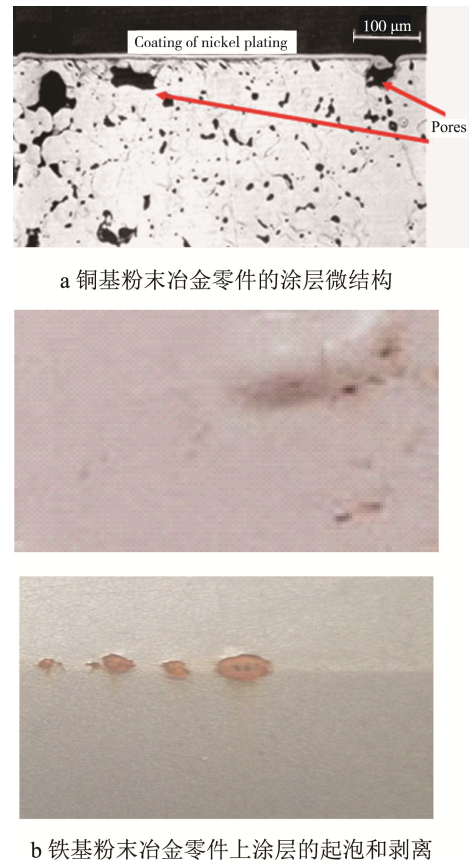


图 3 粉末冶金零件电镀后出现镀层脱落和漆膜出现鼓泡  
Fig.3 Photos for coating off and bubbling of powder metallurgy parts after electroplating: a) microstructure of coating off for copper based powder metallurgy parts, b) bubbling and peeling photos of coatings on iron base powder metallurgy parts

### 3 用于封闭粉末冶金零件孔隙的处理技术

解决前述问题的关键,是在电镀前封闭粉末冶金零件中的孔隙,减少和避免酸、碱、盐等成分的残留,提高零件表面涂镀层的结合力和耐腐蚀性能。常见的粉末冶金零件孔隙封闭方法有:机械变形形式的喷砂、抛丸、挤压等,这类方法是利用机械变形的方式对零件表面孔隙进行挤压封闭,对于大孔隙则效果不明显。

凝固沉积式封闭方法有浸渍石蜡、浸渍硬脂酸锌、浸渍环氧树脂等,但这些方法在实际生产中的操作比较繁琐,如蜡、硬脂酸锌、环氧树脂等封闭孔隙后,需要清洗残留在零件表面的成分,清洗不干净就会污染电镀液或影响镀层的结合力,而且实际应用效果并不好。

近年来,人们采取了一些不同的粉末冶金零件电镀前的封孔方法,如将粉末冶金零件浸泡在某些防锈磷化液中,常温下,这些液体进入材料内部孔隙内,并在孔隙表面发生反应,生成新的固态物质而使孔隙被填充,其余液体在凝固沉积后进一步封闭零件表面孔隙,从而将粉末冶金零件的表面孔隙封闭起来。但该封闭液成分的凝固沉积可能会影响零件后续电镀层的结合力,同样没有取得明显效果。

汪仕元等人<sup>[5]</sup>在密度为  $6\sim 6.3\text{ g/cm}^3$  和  $6.6\sim 6.8\text{ g/cm}^3$  的两种铁基粉末冶金零件上,采用了普通防锈液、常温发黑液(+液体凝固)、磷化液(+液体凝固)进行孔隙封闭处理,然后在其表面进行电沉积镀层。结果发现,普通防锈液的效果不太好,而采用常温发黑液、磷化液封闭处理虽然有一定的效果,但对于内部孔隙较大的铁基粉末冶金零件,这两种溶液都不足以填充这些孔隙,同样给后续的电镀层结合及耐腐蚀性能带来隐患。

杜志强<sup>[6]</sup>对钨基粉末冶金材料零件采用了蒸馏水煮沸  $2\sim 4\text{ h}$ , 然后对零件进行真空浸漆,再自然干燥。这种方法得到的产品零件经湿热试验后,发现浸漆处理的零件表面有析出物,可能会影响镀层的耐腐蚀性能。

北航研制了一种用于粉末冶金零件(也用于钕铁硼磁体零件)孔隙的防锈水封闭处理技术,经过两年来工厂实际钕铁硼零件的试用,可以大幅度提高钕铁硼磁体零件表面电镀锌层的结合力和镀锌层的防护性能。这种防锈水封闭孔隙处理的基本思路是:通过专门的防锈水缓蚀剂成分扩散渗入粉末冶金的零件孔隙,并且与零件的金属进行化学转化、吸附、部分反应物填充孔隙等,可以有效地提高粉末冶金零件表面涂镀层的结合力和耐腐蚀性能。因为在涂镀工艺前将粉末冶金零件中的孔隙吸附钝化、填充封闭,可以减少或者避免除油、酸洗、水洗等工序中酸等成分在

孔隙里的残留,尽管在电镀过程中这些孔隙还会接触酸、碱、盐等成分,由于孔隙表面已有化学吸附和化学钝化,其对前处理和电镀过程中的影响会降低,而且这种防锈水在孔隙处发生的吸附、化学钝化不会影响后续电镀层的结合力和耐腐蚀性能。两年来的镀锌实践表明,这种防锈水封闭处理效果显著,零件电镀后,镀层的结合力由原来的 90% 提高到 99%, 镀锌层白钝化抗盐雾腐蚀性能由  $24\sim 48\text{ h}$  提高到  $72\text{ h}$ 。

后续的研究重点是进一步探索多孔材料的孔隙封闭机制和不同电镀工艺的适应性,进一步强化改进防锈水溶液中缓蚀剂成分的作用范围,为大量工程应用打好基础。

### 4 结语

现代工业对粉末冶金产品零件的要求越来越高,提高其表面涂镀层的质量越来越受到人们的重视。针对粉末冶金零件中的孔隙,用防锈水封闭处理方法具有明显的效果,防锈水中缓蚀剂等成分的渗入与扩散,对粉末冶金材料孔隙的化学吸附、转化及沉淀有益,可以有效提高粉末冶金零件表面涂镀层的结合力和耐腐蚀性能。

#### 参考文献:

- [1] JANG G B, HUR M D, KANG S S. Study on the Development of a Substitution Process by Powder Metallurgy in Automobile Parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 100: 110—115.
- [2] WHITTAKER D. Current and Future Forces Driving Automotive PM[J]. Metal Powder Report, 2000, 55(5): 22—27.
- [3] READE G W, KERR C, BARKER B D, et al. The Importance of Substrate Surface Condition in Controlling the Porosity of Electroless Nickel Deposits[J]. Transactions of the Institute of Metal Finishing, 1998, 76(7): 149—155.
- [4] ROSSI S, FEDRIZZI L. Corrosion Protection of P/M parts by Hot Dipping[J]. International Journal of Powder Metallurgy, 2002, 38: 61.
- [5] 汪仕元, 雍志华, 李娟, 等. 铁基粉末冶金零件电镀前的孔隙处理[J]. 电镀与精饰, 2003, 25(1): 10—12.  
WANG Shi-yuan, YONG Zhi-hua, LI Juan, et al. Preplating Pore Treatment for Iron Base Powder Metallurgical Articles[J]. Plating and Finishing, 2003, 25(1): 10—12.
- [6] 杜志强. 钨基粉末冶金材料电镀工艺试验[J]. 电镀与精饰, 2009, 31(1): 32—33.  
DU Zhi-qiang. Electroplating Technological Test for Tungsten Based Powder Metallurgy Materials[J]. Plating and Finishing, 2009, 31(1): 32—33.

- [7] THOMAS J, MEISTER J. Shot Gun Method Can Improve PM Steel Fatigue Life[J]. Metal Powder Report, 2004, 59(7): 48—52.
- [8] BELL T. Surface Treatment and Coating of PM Components[J]. Materials & Design, 1992, 13(3): 139—144.
- [9] CHARIZANOVA S, DIMITROV G. Upon the Advantages of the Application of Gas Carbonitriding for Ferrous Sintered Alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 77: 73—79.
- [10] GALLO A, GALLO S A. Steam Oxidation of Ferroussintered Parts: Contribution to Study[J]. Powder Metallurgy, 2003, 46(3): 271—276.
- [11] YANG X J. Decorative Chromium Plating of Powder Metallurgy Parts[J]. Materials Protection, 1994, 27(7): 38—39.
- [12] VADIRAJA S. Failure Analysis Approach to Fracture Studies in Powder Metallurgy Parts[J]. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2004, 43(1/2): 105—109.
- [13] CRISTOFOLINI I, MENAPACE C, CAZZOLLI M, et al. The Effect of Anisotropic Dimensional Change on the Precision of Steel Parts Produced by Powder Metallurgy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(7): 1513—1519.
- [14] CHERIAN R P, MIDHA P S, SMITH L N, et al. Knowledge Based and Adaptive Computational Techniques for Concurrent Design of Powder Metallurgy Parts[J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32(6): 455—465.
- [15] BENDER S, EI WAKIL S D, CHALIVENDRA V B. Fabrication and Characterisation of Powder Metallurgy Parts Having Porosity Gradient[J]. Powder Metallurgy, 2011, 54(5): 599—603.
- [16] 刘旭麟, 彭乔, 刘顺华, 等. FX16 型黑色金属铸件 (或工件) 防锈水的研制[J]. 铸造技术, 2009, 30(2): 285—287.  
LIU Xu-lin, PENG Qiao, LIU Shun-hua, et al. Research and Development on the FX16 Anticorrosive Water for Ferrous Metal Casting[J]. Foundry Technology, 2009, 30(2): 285—287.
- [17] 刘旭麟, 彭乔, 刘顺华, 等. 成膜剂对黑色金属防锈水防锈性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(12): 970—972.  
LIU Xu-lin, PENG Qiao, LIU Shun-hua, et al. Influence of Some Filmogens on Antirust Properties of Antirust Water for Ferrous Metal[J]. Corrosion & Protection, 2010, 31(12): 970—972.
- [18] 刘志宝, 马洪芳, 张颖, 等. 防锈水、防锈油及其在金属表面处理中的应用[J]. 山东化工, 2001, 30(4): 18—19.  
LIU Zhi-bao, MA Hong-fang, Zhang Ying, et al. The Use of Antirust Water and Antirust Oil in Metal Surface Treatment[J]. Shandong Chemical Industry, 2001, 30(4): 18—19.
- [19] 万仁荣. 粉末冶金件白油填充封闭法电镀工艺[J]. 材料保护, 1980(3): 5.  
WAN Ren-rong. The Electroplating Process of Oil Filling Sealing Method for Powder Metallurgy Parts[J]. Journal of Materials protection, 1980(3): 5.
- [20] WANG X, YANG J. Problems Occurred During the Steam Treatment of Iron Base Powder Metallurgy Parts and the Solving Methods[J]. Tool Engineering, 2011, 45(9): 38—41.
- [21] NARAYANASAMY R, RAMESH T, PANDEY K S. Some Aspects on Workability of Aluminium-Iron Powder Metallurgy Composite During Cold Upsetting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 391(1): 418—426.
- [22] XIAO Z Y, YE X, LU Y H, et al. Progress of Research on Fatigue Properties of Iron Based Powder Metallurgy Materials[J]. Powder Metallurgy Technology, 2012, 5: 013.
- [23] GAIDUCHENKO A K, NAPARA-VOLGINA S G. Development of Iron Powder Metallurgy[J]. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 1996, 34(7/8): 424—428.
- [24] AKIMENKO V B, GULYAEV I A, KATASHNIKOVA O Y, et al. New Developments in The Domestic Powder Metallurgy of Iron and Alloy Steels[J]. Metallurgist, 1999, 43(11): 493—499.
- [25] 储荣邦. 粉末冶金铁基件的电镀和发黑氧化 (II)[J]. 材料保护, 2005, 38(8): 61—63.  
CHU Rong-bang. Electroplating and Oxidizing Blackening for Power Metallurgical Iron-based Wares (II)[J]. Journal of Materials protection, 2005, 38(8): 61—63.
- [26] 袁诗璞. 钢铁件上薄层亮镍的孔隙及其封闭试验[J]. 涂装与电镀, 2010(2): 28—31.  
YUAN Shi-pu. The Small Opening and Seal Test of Thin Bright Nickel Plating for Steel and Iron Works[J]. Painting and finishing, 2010 (2): 28—31.
- [27] 吴久章. 关于“粉末冶金件硅油封闭法电镀”的几点补充[J]. 低压电器, 1979(2): 12.  
WU Jiu-zhang. Some Additional Points on "Powder Metallurgy Silicon Oil Sealing Method" [J]. Low-voltage apparatus, 1979(2): 12.
- [28] 韩文生, 谢锐兵, 萧以德. 钕铁硼永磁体室温熔盐电镀铝前处理工艺初探[J]. 材料保护, 2007, 40(2): 44—49.  
HAN Wen-sheng, XIE Rui-bing, XIAO Yi-de. Pretreatment Process for Al Electroplating of NdFeB Permanent Magnet in Melted Salt at Room Temperature[J]. Journal of Materials Protection, 2007, 40(2): 44—49.
- [29] 党国亮. 铁粉末冶金零件电镀[J]. 电镀与环保, 1993 (1): 20.  
DANG Guo-liang. Electroplating of Iron Powder Metallurgy Parts[J]. Electroplating and Environmental Protection, 1993(1): 20.
- [30] YU L Y, XIE K, LU Y W. Process of Electroless Nickel Plating on Iron-based Powder Metallurgy Articles[J].

- Electroplating & finishing, 2008, 27(4): 24.
- [31] REN Y X. Electroless Nickel Plating Technics of Small Iron-based Powder Metallurgy Components[J]. Electroplating & Finishing, 2006, 25(10): 11—13.
- [32] FEDORCHENKO I M, KUSHCHEVSKII A E, PUSHKAREV V V, et al. Influence of Porosity on the Tribological Properties of Iron-base Powder Metallurgy Materials[J]. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 1984, 23(5): 394—396.
- [33] FANG J, CHEN G, SI Z X. Effects of Hot Galvanizing on the Corrosion-resistance of Iron-based Powder Metallurgy Parts[J]. Powder Metallurgy Technology, 2008, 6: 13.
- [34] OMIDVAR H, SSJJADNEJAD M, STREMSDOERFER G, et al. Manufacturing Ternary Alloy NiBP-PTFE Composite Coatings by Dynamic Chemical Plating Process[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31(1): 31—36.
- [35] 濮贵德, 王水源. 铁基粉末零件的电镀防蚀工艺[J]. 仪表技术与传感器, 1983(6): 1—4.  
PU Gui-de, WANG Shui-yuan. Electroplating Anticorrosion Technology of Iron Base Powder Parts[J]. Instrument Technique and Sensor, 1983(6): 1—4.
- [36] 王朝铭. 铁基粉末冶金薄铜镀层零件的防腐蚀[J]. 材料保护, 1998(4): 38.  
WANG Chao-ming. Corrosion Prevention of Fe-base Powder Metallurgical Parts with Thin Copper Deposition[J]. Journal of Materials Protection, 1998(4): 38.
- [37] 陈仙花, 郑砬玮. 铁基粉末冶金件的表面处理[J]. 电镀与环保, 2007, 27(6): 41—42.  
CHEN Xian-hua, ZHENG Li-wei. Surface Treatment of Iron Base Powder Metallurgy Parts[J]. Electroplating and Environmental Protection, 2007, 27(6): 41—42.
- [38] 刘定福. 铁基粉末冶金件镀锌新工艺[J]. 新技术新工艺, 2003 (11): 45—46.  
LIU Ding-fu. The New Technology of Zinc-plating of Iron Base Powder Metallurgical Articles[J]. New Technology and Process, 2003 (11): 45—46.
- [39] 余丽艳, 谢鲲, 吕延伟, 等. 铁基粉末冶金件化学镀镍工艺[J]. 电镀与涂饰, 2008(4): 24—25.  
YU Li-yan, XIE Kun, LYU Yan-wei, et al. Electroless Nickel Plating Process for Iron Base Powder Metallurgy Parts[J]. Plating & Finishing, 2008(4): 24—25.
- [40] PUJARI M, AGARWAL A, UPPALURI R, et al. Efficacy of Novel Electroless Plating Process for Dense Pd/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PSS Membrane Fabrication[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31(1): 1—5.
- [41] REKHA S, JEEVA P A, KARTHIKEYAN S, et al. Metallization of Iron Powders by Autocatalytic Copper Plating Process[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2013, 28(8): 905—909.
- [42] PUYRENIER W, ROUESSAC V, BROUSSOUS L, et al. Effect of Plasma Treatments on a Porous Low-k Material Study of Pore Sealing[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2007, 106(1): 40—48.
- [43] WU X, LIU H, WU Y, et al. Pore-sealing Performance of a Novel Water-based Pore-sealing Agent[J]. Materials Protection, 2013, 2: 008.
- [44] ZHANG Y P, LIU L X, YANG C F, et al. Preparation of an Environmentally Acceptable Water-borne Antirust Agent and Evaluation of Its Performance[J]. Journal of Materials Protection, 2012, 10: 018.
- [45] SU J, DENG J, HUANG X. Development of a New Water Soluble Antirust Coating[J]. Electroplating & Finishing, 2003, 22(1): 43—44.
- [46] SHAO S Y, SONG C Q, WANG S T, et al. Preparation of Antirust Agent of Water-based Cutting Fluid and Evaluation of Its Antirust Performance[J]. Materials Protection, 2012, 4: 23.
- [47] 侯敏, 李宁, 黎德育, 等. 铁基粉末冶金件前处理的研究[J]. 电镀与环保, 2003, 23(4): 12—15.  
HOU Min, LI Ning, LI De-yu, et al. A Research on the Pretreatment of Fe-based Powder Metallurgy[J]. Electroplating & Pollution Control, 2003, 23(4): 12—15.
- [48] 王旗. 铁基粉末冶金零件电镀工艺试验[J]. 电镀与精饰, 1997, 19(1): 35—36.  
WANG Qi. Electroplating Process Test of Fe Based Powder Metallurgy Parts[J]. Plating & Finishing, 1997, 19(1): 35—36.
- [49] 任雅勋. 小型铁基粉末冶金件的化学镀镍工艺[J]. 电镀与涂饰, 2006, 25(10): 11—13.  
REN Ya-xun. Electroless Nickel Plating Technics of Small Iron-based Powder Metallurgy Components[J]. Electroplating & Finishing, 2006, 25(10): 11—13.
- [50] 刘旭麟, 彭乔, 刘顺华, 等. 一种不含亚硝酸钠的黑色金属防锈水的研制[J]. 铸造, 2002, 51(11): 720—722.  
LIU Xu-lin, PENG Qiao, LIU Shun-hua, et al. Development of Anticorrosion Water not Containing NaNO<sub>2</sub> for Ferrous Metal[J]. Foundry, 2002, 51(11): 720—722.