

电机轴承防护措施及 Al_2O_3 陶瓷绝缘涂层研究现状

卜珍宇^{1,2}, 赵晓琴¹, 郭向东³, 杨明奇³,
薛芸^{1,2}, 魏晓东^{1,2}, 安宇龙^{1,2}, 周惠娣^{1,2}

(1.中国科学院兰州化学物理研究所 材料磨损与防护重点实验室, 兰州 730000; 2.中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049; 3.洛阳轴承研究所有限公司, 河南 洛阳 471000)

摘 要: 讨论了避免电机轴承电蚀失效的主要防护措施, 包括安装接地碳刷疏导轴电流、使用绝缘轴承截断轴电流这两类方式, 并对其优缺点分别进行了阐述。针对绝缘轴承, 着重分析了 Al_2O_3 陶瓷涂层的热喷涂工艺(粉末粒径、喷涂参数等)、涂层结构(表面形貌与微观组织)以及涂层性能(力学性能、摩擦性能、绝缘性能)三者间的关系, 介绍了通过掺杂其他金属阳离子氧化物或纳米结构粉末对涂层性能进行改性的方法。在此基础上, 对绝缘轴承 Al_2O_3 陶瓷涂层制备技术存在的难点进行了分析, 总结了存在的主要问题。最后对绝缘轴承 Al_2O_3 陶瓷涂层制备技术的发展趋势进行了展望。

关键词: 电蚀; 绝缘轴承; Al_2O_3 涂层; 微观结构; 喷涂工艺; 涂层性能

中图分类号: TG174.4; TH133.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)05-0051-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.05.004

Electromotor Bearing Protection Measures and Research Status of Al_2O_3 Ceramic Coating

BU Zhen-yu^{1,2}, ZHAO Xiao-qin¹, GUO Xiang-dong³, YANG Ming-qi³,
XUE Yun^{1,2}, WEI Xiao-dong^{1,2}, AN Yu-long^{1,2}, ZHOU Hui-di^{1,2}

(1.Key Laboratory of Science and Technology on Wear and Protection of Materials, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2.Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Luoyang Bearing Research Institute Co. Ltd, Luoyang 471000, China)

ABSTRACT: This paper discusses the main protective measures to avoid electrical corrosion failure of electromotor bearings, including the installation of grounded carbon brushes to channel the shaft current, and using insulated bearings to cut off the shaft current, and the advantages and disadvantages of them are explained respectively. For insulated bearings, the relationship among the thermal spraying process (powder particle size, spraying parameters) the coating structure (surface morphology and microstructure) and the coating properties of the Al_2O_3 ceramic coating are analyzed, and the methods of modifying the coating

收稿日期: 2021-01-25; 修订日期: 2021-03-23

Received: 2021-01-25; Revised: 2021-03-23

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB2007900)

Fund: Supported by the National Key R & D Program of China (2020YFB2007900)

作者简介: 卜珍宇(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: BU Zhen-yu (1997—), Male, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 安宇龙(1978—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为表面工程。邮箱: csuayl@sohu.com

Corresponding author: AN Yu-long (1978—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: surface engineering. E-mail: csuayl@sohu.com

引文格式: 卜珍宇, 赵晓琴, 郭向东, 等. 电机轴承防护措施及 Al_2O_3 陶瓷绝缘涂层研究现状[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 51-59.

BU Zhen-yu, ZHAO Xiao-qin, GUO Xiang-dong, et al. Electromotor bearing protection measures and research status of Al_2O_3 ceramic coating[J]. Surface technology, 2021, 50(5): 51-59.

performance by doping other metal cation oxides or nanostructured powders are introduced. On this basis, the difficulties existing in the preparation technology of Al_2O_3 ceramic coating for insulated bearings are analyzed, and the main problems are summarized. Finally, the development trend of Al_2O_3 ceramic coating preparation technology for insulated bearings is prospected.

KEY WORDS: electric corrosion; electrically insulated bearing; Al_2O_3 coating; microstructure; spraying process; coating properties

轴承作为现代装备所必须的关键基础部件,其精度、材质和特性直接影响着机械装备的使用性能、寿命以及可靠性等^[1]。一般工况下,轴承往往承受较大的交变载荷与热载荷,其失效形式通常为磨损失效、断裂失效与疲劳失效等^[2-4]。在铁路轨道交通、风力发电以及新能源电动汽车等应用电机的领域中,由于电机零部件的装配误差,会导致在旋转工况下电机内部的磁场分布不均匀,从而在电机轴上产生如图1所示的轴电流。当轴电流泄露并通过电机内的轴承时,就极易导致轴承内部的润滑油膜被击穿,进一步致使轴承滚道表面和滚动体表面产生明显的电蚀现象(见图2)^[5-8]。电蚀会迅速降解润滑油脂,造成轴承润滑失效,还会使轴承内外滚道以及滚动体硬度下降,从而产生剧烈磨损,甚至材料剥落,直接影响电动机乃至主机的性能和寿命^[9-11]。目前电蚀现象已经成为轨道交通、风力发电以及电动汽车等领域中轴承失效的主要原因。

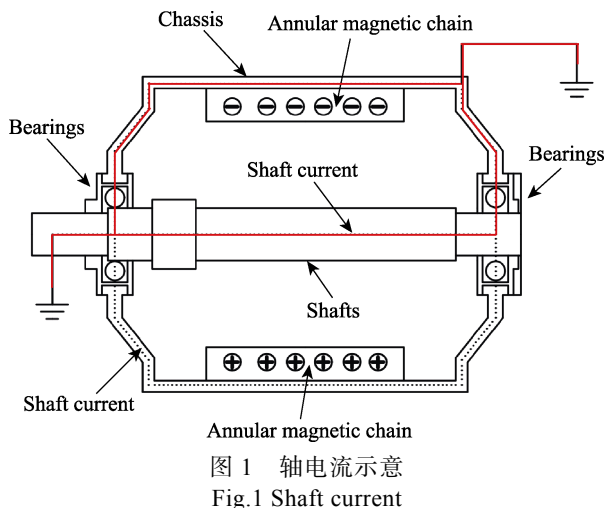


图2 产生电蚀损伤后的轴承滚道面面貌
Fig.2 Morphology of the bearing raceway after electrical corrosion

1 电机轴承防护措施

虽然轴承的电蚀损伤是因轴电流和轴电压的产生而发生的,但是迄今为止,我国和国际的 IEC 标准中,均没有对轴电压或轴电流的限值范围做出明确规定^[12]。分析轴电压产生的原因可知,若要完全消除轴承内、外圈之间的电势差几乎不可能,但若阻止或大幅度降低通过轴承的电流,便可以有效防止轴承遭受电蚀损伤^[13]。随着工程技术与材料科学的发展,保护电机轴承的方式逐渐发展出了两类:一类是增加接地装置,另一类则是提高轴承本身的耐压性能,即提高轴承的绝缘性能。

通过在电机的非传动轴与端盖之间安装碳刷(如图3所示),可起到消除静电荷与短接轴电流通路的作用,从而使发电机中的轴承得到有效保护^[14]。这样的保护方式存在两个问题,一是接地电刷由于磨损会在电刷表面形成氧化层,从而增大电刷和转轴之间的接触电阻,这又阻碍了轴电压的顺利释放,需要定期进行人工维护或替换,增加了成本,更为麻烦的是多种电机因安装空间的限制,使得碳刷的更换和维护较为困难^[15-17]。第二个问题在于,采用这种方式保护电机轴承,会面临接地不良的特殊情况。特别是对于双馈风力发电机,这种电机的主轴较长,转子和变流器相连的一端因变流器共模电压的原因,其电势高于另一端,需要采取双端接地的方式来消除轴电压及共模电流的影响。在接地正常的情况下,共模电流通路不经过电机轴承,减小了对电机轴承的影响;如果出现接地异常的情况,共模电流会直接穿过电机轴

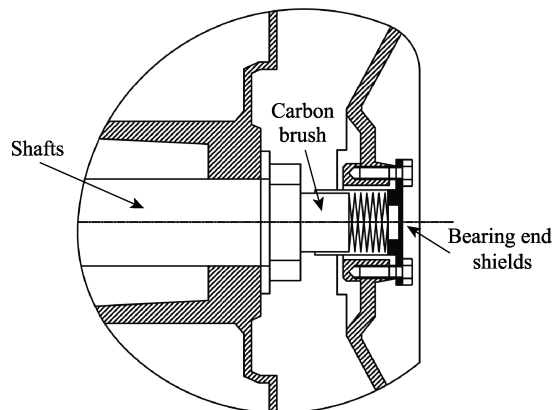


图3 接地碳刷安装
Fig.3 Installation of grounding carbon brush

承, 轴承电压将显著增加, 轴电流增大, 轴承电蚀失效的风险急剧增大^[14]。由于这两个问题的存在, 因此安装碳刷的方法无法成为满足防止轴承电蚀失效需求的最佳方式。

如果说增加接地装置的方式是“疏导轴电流”, 那么更直接且有效的保护电机轴承的方式则是“截断轴承电流”, 即使用绝缘(耐压)性能良好的轴承代替普通轴承。目前, 国内外将具有这种特性的轴承分为两种: 陶瓷轴承与绝缘轴承。这两种轴承之所以耐压性能好, 是因为利用特殊的材质, 使其内部不存在可自由移动的电子或离子(即带电粒子)。如利用 Si_3N_4 陶瓷制备的陶瓷轴承, 由于其内部 Si 原子与 N 原子由共价键相连, Si_3N_4 晶体为原子晶体, 内部没有可以自由移动的带电粒子。再如 Al_2O_3 绝缘轴承, 无论是 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 还是 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, 都是离子晶体, 其内部的 Al^{3+} 与 O^{2-} 由离子键相连, 同样不存在可以自由移动的带电粒子。因此, 轴电流在通过这两种轴承时, 均会被阻断。

2 轴承绝缘的实现

2.1 陶瓷轴承

所谓的陶瓷轴承是一种利用绝缘性优异的陶瓷材料, 通过特殊工艺制成整个轴承(见图 4)或轴承中的一部分(如滚动体, 见图 5), 轴承中陶瓷部分就会阻断轴电流通过轴承, 从而赋予轴承的绝缘特性。依据轴承中使用陶瓷材料的多少, 该类轴承分为全陶瓷轴承和混合式陶瓷轴承^[18]。1972 年美国生产出第一套陶瓷轴承开始, 世界各工业强国便一直十分重视陶瓷轴承的开发, 致力于研制更高性能的轴承^[19]。各国对陶瓷轴承的研究可以总结为以下 3 个阶段: 最早是对陶瓷轴承材料选择, 认定 Si_3N_4 陶瓷可作为主要陶瓷轴承的材料; 第二阶段便开始进行实验, 用 Si_3N_4 陶瓷滚动体代替金属(钢制)滚动体, 并研究了这种混合式陶瓷轴承的使用性能和寿命; 第三阶段是研究全陶瓷轴承的性能, 并在实际工况中得到初步运用^[20-22]。由于我国在该领域的研究起步较晚, 在轴承性能与使用寿命方面, 目前与国际先进水平仍有差距。



图 4 Si_3N_4 全陶瓷轴承
Fig.4 Si_3N_4 ceramic bearing



图 5 混合陶瓷球轴承
Fig.5 Hybrid ceramic ball bearing

由于 Si_3N_4 陶瓷是电绝缘体, 因此在通直流电的工况下, Si_3N_4 陶瓷轴承的电阻值极高。可将整个陶瓷轴承视作绝缘体, 此时 Si_3N_4 陶瓷轴承发挥的作用便是切断流经滚动体与滚道间的电流。在高频交流电环境下, 陶瓷滚动体在轴承的内外圈之间起阻断作用。由于陶瓷轴承的电容非常低, 相比起很小的滚道接触点, 滚动体的直径较大, Si_3N_4 陶瓷的相对介电常数低, 其电阻值很大, 则此时陶瓷轴承仍是阻隔轴电流的有效工具^[23]。

由于高性能陶瓷轴承中使用的陶瓷球制造加工难度很大, 因此陶瓷轴承价格一直十分昂贵, 限制了陶瓷轴承在大型电机中的大规模应用。另外, 陶瓷轴承虽然绝缘性能良好, 但仍然无法摆脱陶瓷材料固有的“低韧性、易发生脆性断裂、耐冲击能力低”等问题。以最常用的 Si_3N_4 陶瓷轴承为例, 与金属轴承比, Si_3N_4 韧性低、硬度高、弯曲强度差的特点, 正是其对损伤和缺陷敏感的致命弱点^[24-26]。此外, 陶瓷轴承装配时对尺寸精度的要求很高, 而对混合式陶瓷轴承来说, 由于陶瓷材料滚动体极高的硬度和耐磨性, 极易损坏保持架, 反而成为造成这类轴承失效的主要原因。

2.2 绝缘轴承

采用热喷涂的方法在轴承的金属内圈或外圈(见图 6)上喷涂一层陶瓷涂层, 其目的同样在于阻断轴电流, 以防止轴承遭电蚀损伤。显然, 利用这种方式保护轴承, 既可以保证轴承的绝缘性能, 又可以解决一些陶瓷轴承难以加工、装配的问题, 同时还降低了成本。凭借这些优势, 绝缘轴承在大型发电机、牵引电机等领域迅速崛起, 并已逐渐占据主要地位。自 21 世纪初, 为了满足日益严苛的工况需求, 国外各大轴承制造厂商均开始研发不同型号的绝缘轴承。例如, 日本 NTN 公司研发的 MEGA OHM 系列绝缘轴承, 常温下其绝缘电阻至少为 $2000 \text{ M}\Omega$, 绝缘性能十

分优异。将该系列轴承应用于本国的新干线高速铁路系统中后,大大降低了高速列车牵引电机的故障率。为了减少风力发电机组中轴承失效问题的发生,瑞典SKF公司生产了INSOCOAT系列绝缘轴承。该系列轴承的击穿电压可达到3000 V(DC),最小电阻可达到400 M Ω 。将这种绝缘轴承与混合式陶瓷轴承组合应用,则可对处在高频交流电工况下的双馈风力发电机起到十分显著的保护效果^[27-28]。高铁作为我国新世纪的世界名片,CRH3及CRH380HL动车组中也大量使用了利用热喷涂工艺制备的绝缘陶瓷涂层轴承,为列车运行的高速稳定性和可靠性提供了保障^[13]。目前,我国在绝缘陶瓷涂层轴承方向的研究基础匮乏,对绝缘陶瓷涂层轴承的研制技术不成熟,使得我国目前在高铁领域所采用的绝缘陶瓷涂层轴承几乎全部依赖进口,而这种高性能绝缘轴承价格也十分昂贵,成为我国迫切需要解决的关键部件。



a 内圈喷涂绝缘轴承



b 外圈喷涂绝缘涂层

图6 内/外圈喷涂绝缘涂层的轴承

Fig.6 Bearing with inner/outer ring sprayed with insulating coating

与陶瓷轴承一样,绝缘轴承中涂层材料的选择也尤为重要,考虑到对绝缘轴承性能的需求,研究者们

首先想到使用绝缘性能十分优异的 Si_3N_4 陶瓷粉末进行喷涂,但是 Si_3N_4 陶瓷在常压下约1700℃就发生分解^[29],这就不能利用热喷涂工艺制备 Si_3N_4 陶瓷涂层。继而,找到了一种替代 Si_3N_4 的可喷涂陶瓷材料,即 Al_2O_3 陶瓷粉末。 Al_2O_3 是研究者们最早开始研究的金属氧化物,也是目前应用最广的氧化物材料之一,其中最主要的应用就是制成各种 Al_2O_3 陶瓷制品。 Al_2O_3 的熔点为2054℃,且具有极佳的热稳定性,是良好的热喷涂材料,其介电常数大,体积电阻率大,介质损耗小,耐热冲击强度大,几乎具备电子器件应用绝缘材料的所有良好性能^[30]。

Al_2O_3 涂层也有韧性低的缺点,且喷涂的 Al_2O_3 涂层中,相成分几乎全部由 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 转变为 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$,而随着这一转变的发生, Al_2O_3 涂层的绝缘性能等也随之降低。为了解决 Al_2O_3 在喷涂后涂层绝缘性能降低的问题,工程人员通过增加 Al_2O_3 涂层厚度来降低轴承与机壳间的电容。这可以减轻轴电压在轴承与机壳之间的放电现象,但前提是必须要求涂层拥有足够的厚度才能达到较好的效果。这不仅增加了成本,还会带来轴承散热的问题,且涂层过厚会导致涂层残余应力无法及时消散,反而更容易剥落^[31]。因此,抑制喷涂过程中 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 向 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的转变,改善 Al_2O_3 涂层的韧性,进一步提升其绝缘能力,是 Al_2O_3 绝缘陶瓷涂层进一步应用于高性能绝缘轴承的前提。

3 Al_2O_3 绝缘涂层的制备及研究现状

3.1 等离子喷涂技术

Al_2O_3 因其熔点高、绝缘性好的特点,是应用于绝缘轴承的最佳选择,而 Al_2O_3 绝缘涂层的获得,通常采用等离子喷涂的方式。等离子喷涂的特点包括射流温度高(能熔化几乎所有材料)、气氛可控等,因而喷涂用材广泛,可以采用等离子喷涂的方法制备各种性能优异的先进涂层,是现代工业和科学技术领域不可缺少的先进功能涂层制备手段^[32-36]。其中,大气等离子喷涂(APS)凭借其焰流温度高、采用惰性工作气体、喷涂涂层应用广等特点,成为喷涂陶瓷涂层的首选方式。然而,APS工艺也存在制备的涂层孔隙率较高和涂层内部应力较大等问题,因此调整和优化喷涂参数以及根据具体使用要求对涂层进行一定的后处理,是该工艺制备的涂层最后满足应用要求的关键。

总之,采用APS是目前制备 Al_2O_3 基陶瓷绝缘涂层最常见的方式,其制备成本低,制备效率高,且涂层质量较好^[37]。然而,目前APS制备 Al_2O_3 绝缘陶瓷涂层在理论研究方面,仍缺乏对涂层形成机理、涂层孔隙率范围、涂层与基体结合方式与其耐电压和绝缘特性之间映射关系的全面系统性研究,难以提出减小孔隙率和提高涂层结合强度的新方

法。基于我国热喷涂 Al_2O_3 绝缘陶瓷涂层市场的巨大潜力, 研究并推广应用 Al_2O_3 绝缘陶瓷涂层具有十分重要的意义。

3.2 Al_2O_3 基陶瓷涂层的性能及影响因素

国内外对 Al_2O_3 涂层的研究内容十分广泛, 事实证明, 涂层的各项性能(力学性能、绝缘性能等)均与喷涂材料、喷涂参数密切相关^[38-39]。APS 工艺制备的 Al_2O_3 涂层中, 主相为 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。这是由于喷涂过程中微滴迅速凝固导致的, 但涂层中仍然含有少量 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 二次受热转变或未熔颗粒残留产生)^[40]。 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 是稳定相, 其力学性能与绝缘性能较 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相更好, 虽然将 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 加热至 $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 就会发生 γ 相向 α 相的转变, 但这种方法常常受制于基体材料的耐高温能力, 因此并不具备现实意义。在 Lech Pawłowski 等^[41]的研究中指出: 喷涂材料的粒径越大, 喷涂后涂层中 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相的含量越高(粒径越大, 越容易出现熔化不完全的情况, 则涂层中会存在更多的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相)。朱晖朝等^[42]用平均粒径不同的氧化铝粉末为喷涂材料制备涂层, 发现粒径的大小直接影响涂层的孔隙率、沉积率、结合强度与显微硬度, 但并不是简单的线性关系。如在使用粒径很小的喷涂粉末时, 相较于大粒径粉末, 需要更长的喷涂时间才能达到预期厚度, 在喷涂过程中残余应力过大, 更容易产生气孔, 反而使孔隙率升高。S. Mahdavi 等^[43]在对 Al_2O_3 涂层的耐腐蚀和摩擦学行为进行研究时指出, 往 Al_2O_3 中添加金属阳离子氧化物可以达到改善涂层性能的目的。在众多的陶瓷喷涂材料中, TiO_2 陶瓷不仅价格低廉, 物理化学性质也十分优异, 使得 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 成为应用广泛的 Al_2O_3 基复合粉末。不仅如此, 自 2001 年蒋显亮^[44]率先在国际上提出微米/纳米结构复合涂层后, 对这种复合结构涂层的研究逐渐丰富, 近年来掺杂纳米材料更是已经成为材料改性的重要手段。例如, 在 Al_2O_3 基质中加入 5% (体积分数)、粒度小于 300 nm 的 SiC 进行喷涂, 其涂层强度可以提高到 1 GPa 以上, 经 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 退火, 通过自增韧相变, 强度进一步上升至 1.5 GPa , 并可以明显观察到区别于普通微米级复合陶瓷的内晶型粒子^[45]。中国科学院兰州化学物理所的研究人员合成了不同粒径的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}30\%\text{TiO}_2$ 纳米复合粉体, 用喷雾干燥法对不同合成粉体进行喷雾造粒, 然后用等离子喷涂法制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 复合涂层。经过表征, 发现涂层均具有微米-纳米复合结构, 但初始粒径越大, 涂层的磨损率越低。其中, 粒径为 100 nm 相较于 30 nm 的初始粉体, 制备的涂层磨损率提高了 2 个数量级^[46]。可见, 想要提高 Al_2O_3 涂层中 α 相的含量, 目前几乎只能依赖于控制喷涂材料的粒径和喷涂参数。喷涂材料成分、粒径的选择将会直接影响到涂层的微观结构, 进而由微观结构影响其性能^[47]。

3.2.1 Al_2O_3 陶瓷涂层的增韧

韧性本质上是指材料在断裂过程中吸收能量的能力, 吸收的能量包括促使裂纹形成的能量和使裂纹扩展直到断裂所需的能量^[48]。研究表明, Al_2O_3 陶瓷高脆性的原因主要为: 晶体由方向性很强的离子键与共价键组成, 在外力作用下, 几乎不会发生由晶体滑移引起的塑性变形, 但应力会集中在内部缺陷和微裂纹尖端处, 造成材料韧性下降而脆断^[49]。因此, 对 Al_2O_3 陶瓷增韧的关键在于: ①有效减少裂纹源及合理控制裂纹的扩展速度; ②提高陶瓷材料自身抵抗裂纹的扩展能力, 尽量避免应力在裂纹尖端集中, 即提高材料断裂能和减少组织内部缺陷。目前, 针对高脆性陶瓷材料的增韧手段主要包括以下三种^[50-52]。

1) 第二相增韧(颗粒弥散增韧)。引入第二相, 是提高硬质陶瓷材料韧性最简单、最常用的方式, 其韧性增量主要来自 3 个方面: ①第二相的塑性变形, 使得通过第二相的裂纹尖端应力场发生松弛或裂纹尖端钝化; ②裂纹扩展过程中, 第二相的塑性变形引起的裂纹桥联; ③第二相的析出会改变陶瓷涂层的生长结构, 使涂层更加致密, 从而提高韧性。根据添加颗粒物的属性, 可分为刚性颗粒强化与延性颗粒强化。刚性颗粒多为非金属陶瓷颗粒(非金属粉末), 例如 TiC 、 SiC 、 Si_3N_4 等。延性颗粒强化 Al_2O_3 陶瓷主要是以金属颗粒作为增韧相添加到陶瓷材料基体中(如图 7 所示), 常见的金属颗粒体系有 $\text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 等。值得注意的是, 第二相的加入虽然可以增加陶瓷材料的韧性, 但基体相与第二相常常存在不相容或分布不均的情况, 会使材料的强度和硬度有所下降^[53]。

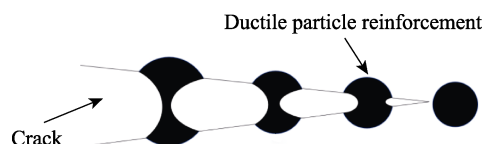


图 7 颗粒弥散增韧示意
Fig.7 Particle dispersion toughening

2) 自增韧。通过加入添加剂(如 TiO_2), 并控制生成条件和反应过程, 使 Al_2O_3 晶粒生长为类似短纤维的棒状、板状、长柱状结构, 以形成高韧性高强度的陶瓷复合材料。这种方法可以有效改善“第二相增韧”带来的“不相容”与“不均匀”问题, 因此在增韧的同时, 保证了陶瓷材料的强度和硬度。最近的研究表明, 通过改善原始粉体粒度可以进一步使 Al_2O_3 基陶瓷获得更好的韧性^[54-55]。

3) 相变增韧。由于相变过程会消耗能量, 即会消耗裂纹扩展所需要的能量, 使得裂纹尖端应力松弛, 阻碍裂纹的进一步扩展, 且周围基体会因相变产生的体积膨胀而被压缩, 促使其他裂纹闭合, 从而提高断裂韧性和强度。最成功的相变增韧就是利用 ZrO_2

与马氏体相变过程中的体积膨胀和剪切应变,使裂纹尖端转向或分叉,以达到对氧化锆陶瓷的增韧效果。该方法主要应用于发动机或内燃机等高温环境下的耐火陶瓷增韧^[56-57]。

事实上,无论单独采用以上哪种方式对 Al_2O_3 陶瓷进行增韧,都存在一定的问题或弊端。因此,更合适的增韧方式是“协同韧化”,即将几种增韧方式相结合,几种增韧体相互促进,以达到更好的增韧效果。目前,协同韧化也是材料增韧的重点研究方向^[58]。

3.2.2 Al_2O_3 陶瓷涂层的绝缘性能

从现象上看, Al_2O_3 涂层的微观结构对绝缘性能的影响很明显,但机理解释却很复杂。即使是绝缘材料,也并非完全“不导电”。事实上,外加电场会诱导绝缘材料发生极化,产生电荷移动,交变电流频率越大,绝缘材料越容易发生极化^[59]。对于大气等离子喷涂 Al_2O_3 涂层,其相组成主要为 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$,为离子晶体,因此涂层中只会存在原子极化与离子极化,这使得在交流电作用下,涂层的介电损耗很小,几乎可以忽略不计。由于等离子喷涂的特性,涂层中不可避免地存在缺陷(孔隙、裂纹和晶界),在外加电场的作用下,电荷会向缺陷处聚集,使局部电压迅速升高,造成局部击穿^[60]。之后,由于局部击穿过程中电能会转化为热能,使涂层局部温度也迅速上升,破坏涂层结构,导致涂层内的缺陷沿着电场继续扩大。随着局部击穿的发生,涂层内积累的热能和裂纹使涂层结构彻底崩溃,最终完全击穿^[38,57]。

郭瑞等^[60]通过 SEM 对被电击穿的 Al_2O_3 涂层的微观结构进行了表征,发现 Al_2O_3 涂层存在 2 种击穿形貌,且涂层中的孔隙是电绝缘失效发生的主要部位。L. Haddour 等^[61]在研究典型烧结 Al_2O_3 陶瓷击穿形貌时发现,与等离子喷涂 Al_2O_3 涂层相似,击穿隧道沿着涂层的薄弱处,同样存在 2 种击穿形貌(火山型坑、深坑)。2 种形貌都可以在涂层表面观察到,这传达了一个重要信息:击穿的方向只与发生局部击穿的位置有关,而与电极极性无关。换言之,如果涂层界面附近先击穿,涂层表面可以观察到火山型坑;如果涂层表面附近先击穿,涂层表面则为深坑^[54,59]。由此可知,对于氧化铝涂层的绝缘性能,降低涂层的孔隙率对改善涂层的绝缘性能起到决定性作用。同时,对于内部结构均匀的绝缘体,其介电击穿强度与厚度呈线性正相关。然而,采用大气等离子喷涂的涂层内部一定存在缺陷,且并不均匀。因此,探究涂层介电强度与厚度的关系,找到最适宜的涂层厚度对涂层改性,也是陶瓷绝缘轴承发展的方向之一。

4 结语

有效解决电机轴承的电蚀问题,可以提高轴承本身乃至整机的寿命和稳定性,但无论是增加接地装

置,还是采用绝缘性能良好的绝缘轴承,都各自存在一些问题。从电机绝缘轴承的应用场合来看,采用喷涂绝缘陶瓷涂层的轴承更具有适用性,因此提高绝缘涂层的性能显得至关重要。目前评价等离子喷涂高性能(电机轴承用) Al_2O_3 涂层的指标主要包括:硬度、韧性、结合强度、击穿电压、电阻率与介质损耗正切等。我国这种高性能 Al_2O_3 绝缘陶瓷涂层制备技术在工艺、材料等方面,目前尚未完全掌握,严重阻碍了其在许多领域的应用。例如由于绝缘涂层性能不过关,限制了高性能绝缘轴承在重点装备上的应用。甚至可以说,正是高性能涂层制备技术的不成熟,限制了我国变频电机技术的发展。因此,制备综合性能更优异的 Al_2O_3 精密涂层,是目前急需掌握的核心技术。

根据以往的研究可知,高性能精密 Al_2O_3 涂层的制备必须从喷涂材料、工艺入手。其力学性能(韧性与硬度)由于受到涂层微观结构的影响,直接依赖于喷涂材料与参数的选择。例如:使用 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 复合粉末喷涂的涂层,由于 TiO_2 的加入改变了涂层的微观结构,使涂层在硬度、韧性上都得到明显改善,但为了保证涂层的结合强度及绝缘性能,应当严格控制涂层中 TiO_2 的含量。微/纳复合结构材料在热喷涂领域得到了十分广泛的应用,其中最显著的应用之一就是利用掺杂了纳米粉末(如纳米级的 TiO_2)的 Al_2O_3 喷涂涂层。这种具有微/纳复合结构的涂层相较于普通 Al_2O_3 涂层,其性能得到了极大改善。 Al_2O_3 涂层绝缘性能的评价较为复杂,但同样与涂层的微观结构有着十分紧密的联系。根据绝缘材料电击穿的原理可知, Al_2O_3 涂层中存在缺陷(如孔隙、裂纹和晶界)的地方是最容易发生击穿的部位。评价涂层的绝缘性能应分为 2 部分:涂层未被击穿时,评价指标为介电常数、电导率;涂层被击穿时,评价指标为击穿电压。这可以给研究者们带来启示,对于高性能精密 Al_2O_3 涂层绝缘涂层性能的需求是:介电常数和电阻率大。因为介电常数越大,理论上能承受的电压越大,但由于介电常数大导致极化能力强。若是涂层孔隙率过大,电荷越容易在缺陷处集中,则很容易发生击穿,反而降低了涂层的介电强度。综上所述,控制涂层的孔隙率和涂层厚度,即选择合适的喷涂材料复配、优化喷涂工艺,是改善 Al_2O_3 绝缘涂层综合性能并使之得到广泛应用的关键。

参考文献:

- [1] 潘光翔. 基于多级载荷试验的滚动轴承疲劳寿命研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
PAN Guang-xiang. Research on fatigue life for rolling bearing based on multistage loading test[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [2] 焦育洁. 航空发动机主轴承可靠性技术研究[D]. 合

- 肥: 合肥工业大学, 2004.
- JIAO Yu-Jie. Research on reliability technology for main shaft bearings of aircraft engine[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004.
- [3] 刘秀莲, 班君, 罗燕, 等. 高温轴承钢球表面缺陷分析[J]. 失效分析与预防, 2015, 10(4): 258-262.
- LIU Xiu-lian, BAN Jun, LUO Yan, et al. Surface defect analysis of high-temperature bearing steel ball[J]. Failure analysis and prevention, 2015, 10(4): 258-262.
- [4] HENMI Nobuhiko. Recent cases of diagnosis method of rolling bearing failure[C]// The proceedings of the machine design and tribology division meeting in JSME. Japan: [s. n.], 2016.
- [5] 关俊峰. 变频电机轴承电蚀故障分析与处理方法[J]. 冶金动力, 2019(3): 24-25.
- GUAN Jun-feng. Analysis of electric corrosion of variable frequency motor bearings and treatment method[J]. Metallurgical power, 2019(3): 24-25.
- [6] 李煌. 大型风电机组的发电机故障诊断技术研究与应用[D]. 太原: 山西大学, 2018.
- LI Huang. Research and application of generator fault diagnosis based on large-scale wind turbine[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2018.
- [7] 师玲萍. 高速动车组转向架轴承常见故障及选型设计分析[J]. 时代汽车, 2020(17): 112-113.
- SHI Ling-ping. Analysis of common faults and selection design of bogie bearings for high-speed trains[J]. Auto time, 2020(17): 112-113.
- [8] 赵锋. 变频控制自动扶梯驱动电动机轴承电蚀的问题分析[J]. 中国电梯, 2020, 31(14): 22-24.
- ZHAO Feng. Analysis on the electric erosion of the drive motor bearing of frequency conversion controlled escalator[J]. China elevator, 2020, 31(14): 22-24.
- [9] ROMANOV D A, MOSKOVSKII S V, GROMOV V E, et al. On the structure and electrical erosion resistance of the electroexplosive spraying of a ZnO-Ag-System coating[J]. Journal of surface investigation X-ray synchrotron and neutron techniques, 2020, 14(5): 944-950.
- [10] PRASHAD H. Theoretical and experimental investigation on the pitch and width of corrugations on the surfaces of ball bearings[J]. Wear, 1991, 143(1): 1-14.
- [11] 蔡梅园, 陈薛梅, 聂思宇, 等. 风电机组发电机轴承电蚀研究[J]. 船舶工程, 2019, 41(S1): 302-306.
- CAI Mei-yuan, CHEN Xue-mei, NIE Si-yu, et al. Study on electric corrosion of generator bearings for wind turbine[J]. Ship engineering, 2019, 41(S1): 302-306.
- [12] 周国玉, 周佩荣. 消除电机轴电流的几种方法[J]. 电机技术, 2013(5): 45-47.
- ZHOU Guo-yu, ZHOU Pei-rong. Ways to eliminate the shaft current of the motor[J]. Electrical machinery technology, 2013(5): 45-47.
- [13] 相阿峰, 郭秀违. 高速动车组牵引电机轴承电蚀及对策[J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(2): 102-106.
- XIANG A-feng, GUO Xiu-wei. Electric erosion of bearings on traction motor of high-speed EMU and its solution[J]. Railway locomotive & car, 2015, 35(2): 102-106.
- [14] 姜锐, 滕伟, 刘潇波, 等. 风电机组发电机轴承电腐蚀故障的分析诊断[J]. 中国电力, 2019, 52(6): 128-133.
- JIANG Rui, TENG Wei, LIU Xiao-bo, et al. Diagnosis of electrical corrosion fault in wind turbine generator bearing based on vibration signal analysis[J]. Electric power, 2019, 52(6): 128-133.
- [15] 姜艳姝, 陈希有, 徐殿国, 等. 一种消除 PWM 逆变器驱动系统中电动机端轴电压和轴承电流的前馈有源滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2003(7): 134-138.
- JIANG Yan-shu, CHEN Xi-you, XU Dian-guo, et al. A novel feed-forward-type active filter to eliminate shaft voltage and bearing current at motor terminal in a PWM inverter drives[J]. Proceedings of the CSEE, 2003(7): 134-138.
- [16] 王晓华. 基于轴电压的发电机典型故障诊断研究[D]. 保定: 华北电力大学(河北), 2010.
- WANG Xiao-hua. The diagnosis study of turbo-generator typical fault based on shaft voltage[D]. Baoding: North China Electric Power University(Hebei province), 2010.
- [17] 李小军, 王建功, 吴宏彬, 等. CRH380BL 动车组接地方案的优化研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2013, 36(5): 19-21.
- LI Xiao-jun, WANG Jian-gong, WU Hong-bin, et al. Optimization research of the earthing design for CRH380BL EMU[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2013, 36(5): 19-21.
- [18] 王黎钦, 贾虹霞, 郑德志, 等. 高可靠性陶瓷轴承技术研究进展[J]. 航空发动机, 2013, 39(2): 6-13.
- WANG Li-qin, JIA Hong-xia, ZHENG De-zhi, et al. Advances in high-reliability ceramic rolling element bearing technology[J]. Aeroengine, 2013, 39(2): 6-13.
- [19] 田朋. 精密陶瓷球加工工艺优化研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2015.
- TIAN Peng. The optimization research of precision ceramic ball processing[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2015.
- [20] 王玉金. 高速机床主轴用陶瓷轴承动态性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.
- WANG Yu-jin. Research on dynamic characteristic of ceramic hybrid ball bearing for high-speed spindle[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004.
- [21] 王重海, 张伟儒, 刘子峰, 等. 全陶瓷轴承的研究现状及其应用前景[J]. 现代技术陶瓷, 2003(3): 30-32.
- WANG Chong-hai, ZHANG Wei-ru, LIU Zi-feng, et al. Present status of full-ceramic bearing and its application prospects[J]. Advanced ceramics, 2003(3): 30-32.
- [22] 朱爱华, 朱成九, 徐国权. 陶瓷轴承在机车牵引电机中的应用分析[J]. 机电产品开发与创新, 2007(1): 66-67.
- ZHU Ai-hua, ZHU Cheng-jiu, XU Guo-quan. Analysis of the application on ceramic bearings in traction motors of locomotives[J]. Development & innovation of machinery & electrical products, 2007(01): 66-67.
- [23] 朱爱华, 朱成九, 张卫华. 机车牵引电动机用陶瓷轴承

- [J]. 轴承, 2007(8): 42-44.
ZHU Ai-hua, ZHU Cheng-jiu, ZHANG Wei-hua. Ceramic bearing used in locomotive traction motors[J]. Bearing, 2007(8): 42-44.
- [24] 李亚玲. 混合陶瓷轴承使用寿命研究现状[J]. 工业技术创新, 2014, 1(4): 503-507.
LI Ya-ling. Research status of hybrid ceramic bearing life[J]. Industrial technology innovation, 2014, 1(4): 503-507.
- [25] 肖九梅. 浅谈陶瓷轴承的使用与维护[J]. 陶瓷, 2020(2): 9-14.
XIAO Jiu-mei. Discussion on use and maintenance of ceramic bearing[J]. Ceramics, 2020(2): 9-14.
- [26] WANG Y, HADFIELD M. A study of line defect fatigue failure of ceramic rolling elements in rolling contact[J]. Wear, 2002, 253(9-10): 975-985.
- [27] 李庆林. 电机轴承用 Al_2O_3 基复合陶瓷绝缘涂层的制备及性能研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017.
LI Qing-lin. Preparation and properties of Al_2O_3 -based composite ceramic insulating coating for motor bearings[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2017.
- [28] GERWIN P. SKF x-large hybrid deep groove ball bearings—A reliable solution for wind turbine generators[J]. Electric machines & control application, 2008, 35(12): 54-57.
- [29] 赵振宁, 朱世步, 李崇俊, 等. SiBCN 陶瓷制备及性能研究进展[J]. 航天制造技术, 2018(5): 4-9.
ZHAO Zhen-ning, ZHU Shi-bu, LI Chong-jun, et al. Progress in preparation and property of SiBCN ceramics[J]. Aerospace manufacturing technology, 2018(5): 4-9.
- [30] 李夏, 冯颖, 孔永刚. 绝缘轴承等离子喷涂技术及检测[J]. 轴承, 2013(7): 24-26.
LI Xia, FENG Ying, KONG Yong-gang. Plasma spraying technology and testing for insulating bearings[J]. Bearing, 2013(7): 24-26.
- [31] 刘前, 王优强, 苏新勇, 等. Al_2O_3 -40% TiO_2 陶瓷涂层残余应力的有限元分析[J]. 热喷涂技术, 2015, 7(2): 51-55.
LIU Qian, WANG You-qiang, SU Xin-yong, et al. FEM analysis of the residual stresses of Al_2O_3 -40% TiO_2 ceramic coating[J]. Thermal spray technology, 2015, 7(2): 51-55.
- [32] WANG Yan-wei, WANG XIAO-long, WANG Xing-yu, et al. Effect of CeO_2 on the microstructure and properties of plasma-sprayed Al_2O_3 - ZrO_2 ceramic coatings[J]. Journal of materials engineering and performance, 2020, 29(2-3): 1-12.
- [33] 张晶晶, 季玮华, 白岩, 等. 等离子喷涂 YSZ 热障涂层的制备与耐高温性能[J]. 大连工业大学学报, 2020, 39(5): 380-385.
ZHANG Jing-jing, JI Wei-hua, BAI Yan, et al. Fabrication and corrosion resistance of plasma sprayed YSZ thermal barrier coatings[J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2020, 39(5): 380-385.
- [34] LEE Jong Kweon, HONG Gun Kim. YSZ atmospheric plasma coating method for improved high temperature corrosion and wear resistance[J]. Journal of mechanical science and technology, 2020, 34(9): 3629-3633.
- [35] NAGABHUSHANA N, RAJANNA S, RAMESH M R. Erosion studies of plasma-sprayed NiCrBSi, Mo and fly-ash cenosphere coating[J]. IOP conference series: Materials science and engineering, 2020, 925(1): 012009.
- [36] 杨焜, 牛少鹏, 邓春明, 等. 等离子喷涂 Al_2O_3 -3% TiO_2 涂层结构及加载绝缘性能[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 63-72.
YANG Kun, NIU Shao-peng, DENG Chun-ming, et al. Microstructure and load-insulation performance of plasma-sprayed Al_2O_3 -3% TiO_2 coating[J]. Surface technology, 2020, 49(8): 63-72.
- [37] 张继豪, 宋凯强, 张敏, 等. 高性能陶瓷涂层及其制备工艺发展趋势[J]. 表面技术, 2017, 46(12): 96-103.
ZHANG Ji-hao, SONG Kai-qiang, ZHANG Min, et al. Development trend of high performance ceramic coatings and preparation technologies[J]. Surface technology, 2017, 46(12): 96-103.
- [38] PAVEL C, JOSEF S, KAREL N. Influence of chemical composition on dielectric properties of Al_2O_3 and ZrO_2 plasma deposits[J]. Ceramics international, 2003, 29(5): 527-532.
- [39] 张玲, 冯颖, 马越. 孔隙率对 Al_2O_3 陶瓷涂层绝缘轴承绝缘性能的影响[J]. 轴承, 2017(6): 45-47.
ZHANG Ling, FENG Ying, MA Yue. Influence of porosity on insulation performance of insulation bearings with Al_2O_3 ceramic coatings[J]. Bearing, 2017(6): 45-47.
- [40] 胡勇, 牛博龙, 梁爱民, 等. 等离子喷涂制备不同晶型氧化铝涂层的微观结构和摩擦磨损性能[J]. 兰州理工大学学报, 2019, 45(3): 6-10.
HU Yong, NIU Bo-long, LIANG Ai-min, et al. Microstructure of coating prepared by means of plasma spraying with different crystalline alumina and its friction-wear behavior[J]. Journal of Lanzhou University of technology, 2019, 45(3): 6-10.
- [41] PAWŁOWSKI Lech. The relationship between structure and dielectric properties in plasma-sprayed alumina coatings[J]. Surface & coatings technology, 1988, 35(3-4): 285-298.
- [42] 朱晖朝, 邓春明, 周克崧, 等. 不同氧化铝粉末等离子喷涂氧化铝涂层的性能[J]. 材料研究与应用, 2009, 3(3): 153-157.
ZHU Hui-chao, DENG Chun-ming, ZHOU Ke-song, et al. Properties of APS alumina coating with different alumina particle distributions as feedstock[J]. Materials research and application, 2009, 3(3): 153-157.
- [43] MAHDAVI S, ASGHARI-ALAMDARI A, ZOLOLA-MEIBODI M. Effect of alumina particle size on characteristics, corrosion, and tribological behavior of Co/ Al_2O_3 composite coatings[J]. Ceramics international, 2020, 46(4): 5351-5359.
- [44] 吕强. 表面包覆对稀土掺杂 Y_2O_3 纳米材料上转换发光的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
LV Qiang. Influence of surface coating on upconversion

- luminescence of rare earth ions doped Y_2O_3 nanomaterials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [45] 龚正. 掺杂纳米粒子 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\beta\text{-Sialon}$ 的复合涂层的制备与研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
GONG Zheng. Preparation and study of doping nanoparticles $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\beta\text{-Sialon}$ composite coating[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [46] 易德亮, 冶银平, 刘光, 等. 等离子喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}30\%\text{TiO}_2$ 微米/纳米复合涂层的结构与耐磨性能[J]. 材料工程, 2012(5): 24-29.
YI De-liang, YE Yin-ping, LIU Guang, et al. Structure and wear properties of plasma sprayed $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}30\%\text{TiO}_2$ micro/nano-composite coatings[J]. Journal of materials engineering, 2012(5): 24-29.
- [47] 马东林. 特征喷涂参数对等离子喷涂氧化铝涂层的微观结构及性能影响[D]. 成都: 西华大学, 2011.
MA Dong-lin. Influence of critical plasma spray parameters on microstructure and properties to alumina coatings[D]. Chengdu: Xihua University, 2011.
- [48] 孙亚娟. Zr 基块体非晶合金的玻璃形成能力及力学行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
SUN Ya-juan. Glass forming ability and mechanical behaviors of Zr-based bulk metallic glasses[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [49] 赵介南. $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合陶瓷材料的制备及性能研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2018.
ZHAO Jie-nan. Preparation and properties of $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ composite[D]. Shenyang: Shenyang University, 2018.
- [50] 张希华, 张建华, 刘长霞. 氧化铝基陶瓷材料增韧研究现状及其发展方向[J]. 山东大学学报(工学版), 2004(5): 14-17.
ZHANG Xi-hua, ZHANG Jian-hua, LIU Chang-xia. An overview and prospect of toughening research on alumina matrix ceramic material[J]. Journal of Shandong University (engineering science), 2004(5): 14-17.
- [51] 武志红, 薛群虎, 曹怡, 等. $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复相陶瓷的复合机理、制备、应用及展望[J]. 材料科学与工艺, 2009, 17(1): 137-140.
WU Zhi-hong, XUE Qun-hu, CAO Yi, et al. Mechanical properties, preparation technology, application and prospect of zirconia/aluminum ceramic composites[J]. Materials science and technology, 2009, 17(1): 137-140.
- [52] 黄康明, 李伟信, 饶平根, 等. 陶瓷增韧技术的研究进展[J]. 中国陶瓷, 2007(11): 6-9.
HUANG Kang-ming, LI Wei-xin, RAO Ping-gen, et al. Development of ceramic toughening technology[J]. China ceramics, 2007(11): 6-9.
- [53] 赵介南, 张宁, 周彬彬, 等. Al_2O_3 基陶瓷材料的增韧研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(9): 2866-2871.
ZHAO Jie-nan, ZHANG Ning, ZHOU Bin-bin, et al. Toughening research and prospect of development on alumina matrix ceramic material[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2016, 35(9): 2866-2871.
- [54] HASSAN A M, NAGA S M, AWAAD M. Toughening and strengthening of Nb_2O_5 doped zirconia/alumina (ZTA) composites[J]. International journal of refractory metals & hard materials, 2015, 48: 338-345.
- [55] CHEN X M, YANG B. A new approach for toughening of ceramics[J]. Materials letters, 1997, 33(3): 237-240.
- [56] WANG Z, VASHISHTH D, PICU R C. Eigenstrain toughening in presence of elastic heterogeneity with application to bone[J]. International journal of solids and structures, 2018, 144-145: 137-144.
- [57] 储爱民, 王志谦, 张德智, 等. Al_2O_3 基陶瓷材料增韧的研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(S1): 363-367.
CHU Ai-min, WANG Zhi-qian, ZHANG De-zhi, et al. Review on toughening techniques for alumina matrix ceramic material[J]. Materials reports, 2017, 31(S1): 363-367.
- [58] 王正君, 刘虹财, 郭怡, 等. 功能化石墨烯/埃洛石纳米管对聚丙烯的协同强韧化改性研究[J]. 材料研究学报, 2019, 33(7): 505-514.
WANG Zheng-jun, LIU Hong-cai, GUO Yi, et al. Synergistic strengthening-toughening modification of polypropylene with functional graphene/halloysite nanotubes[J]. Chinese journal of materials research, 2019, 33(7): 505-514.
- [59] DAVID M, VINCENT B, FATIHA T, et al. Contribution to the understanding of the relationship between mechanical and dielectric strengths of alumina[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2010, 30(15): 3117-3123.
- [60] 郭瑞, 梁波, 赵晓兵, 等. 等离子喷涂 Al_2O_3 涂层的电击穿机理[J]. 航空材料学报, 2014, 34(5): 43-48.
GUO Rui, LIANG Bo, ZHAO Xiao-bing, et al. Electrical insulating properties of plasma sprayed Al_2O_3 coating[J]. Journal of aeronautical materials, 2014, 34(5): 43-48.
- [61] HADDOUR L, MESRATI N, GOEURLOT D, et al. Relationships between microstructure, mechanical and dielectric properties of different alumina materials[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2009, 29(13): 2747-2756.