

热喷涂与冷喷涂技术

纳米 ZrO_2 -8% Y_2O_3 水相悬浮液分散稳定性研究

许艳华, 颜文焮, 何惜琴

(闽南理工学院, 福建 泉州 362700)

摘要:目的 探究 Y_2O_3 为 8% 的纳米 ZrO_2 -8 Y_2O_3 (8YSZ) 水相悬浮液的分散机理。方法 选用 PAA、PEG600、PEG2000 三种不同分散剂, 在不同分散剂含量和 pH 值条件下, 制备固相含量 (以质量分数计) 为 20% 的纳米 8YSZ 水相悬浮液。采用 Zeta 电位、粒度分布和悬浮液黏度对纳米 8YSZ 水相悬浮液的分散稳定性进行表征。结果 pH 为中性时, 悬浮液中分散剂 PAA、PEG2000、PEG600 的最佳用量 (以质量分数计) 分别为 2.4%、2.4%、3.2%, 对应的最低黏度分别为 4.08、3.84、3.36 mPa·s。加入分散剂 PAA 后, 纳米 8YSZ 等电点的 pH 值由 6 左移到 4 附近。当 pH 值为 8 时, 纳米 8YSZ 颗粒的 Zeta 电位最高, 达 -44.5 mV。结论 纳米 8YSZ 水相悬浮液的分散稳定性与分散剂的种类、含量和 pH 值有关。仅添加分散剂或调节 pH 值均不能使纳米 8YSZ 水相悬浮液分散稳定。分散剂 PAA 同时具有静电稳定和空间位阻稳定的作用。分散剂的总体分散效果由高到低依次为 PAA、PEG2000、PEG600。制备固相含量为 20% 的纳米 8YSZ 水相悬浮液的最佳条件为: pH=8, PAA 含量为 2.4%。此时悬浮液的分散效果最好, 黏度最低, 为 2.56 mPa·s。

关键词: 分散剂; pH 值; 纳米 8YSZ; 水相悬浮液; Zeta 电位

中图分类号: TG174.4; TB321 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2021)03-0206-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.03.019

Study on the Dispersion and Stability of Nano ZrO_2 -8% Y_2O_3
Nanoparticles Aqueous Suspension

XU Yan-hua, YAN Wen-duan, HE Xi-qin

(Minnan University of Science and Technology, Quanzhou 362700, China)

ABSTRACT: Dispersion mechanism of nano- ZrO_2 -8wt.% Y_2O_3 (8YSZ) aqueous suspension is explored to prepare a dispersion-stable nano-8YSZ aqueous suspension in the study. Dispersant PAA, PEG600, and PEG2000 including different dispersant additions and pH values are used in preparation of a nano-8YSZ aqueous suspension with 20 wt.% solid content. The dispersion and stability of nano-8YSZ aqueous suspension is characterized by Zeta potential, particle size distribution and suspension viscosity. The results show that the optimal content of dispersant PAA, PEG2000, and PEG600 in nano-8YSZ aqueous suspension at neutral pH is 2.4 wt.%, 2.4 wt.%, and 3.2 wt.% respectively. The corresponded lowest viscosity is

收稿日期: 2020-10-28; 修订日期: 2020-12-24

Received: 2020-10-28; Revised: 2020-12-24

基金项目: 泉州科技计划项目 (2019G037, 2019CT003)

Fund: Funding for Quanzhou Science and Technology Program (2019G037, 2019CT003)

作者简介: 许艳华 (1983—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为纳米结构涂层。

Biography: XU Yan-hua (1983—), Male, Master, Lecturer, Research focus: Nano-structured coatings.

通讯作者: 颜文焮 (1983—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为材料微观行为。邮箱: yanwenduan@163.com

Corresponding author: YAN Wen-duan (1983—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: microscopic behavior of materials. E-mail: yanwenduan@163.com

引文格式: 许艳华, 颜文焮, 何惜琴. 纳米 ZrO_2 -8% Y_2O_3 水相悬浮液分散稳定性研究[J]. 表面技术, 2021, 50(3): 206-211.

XU Yan-hua, YAN Wen-duan, HE Xi-qin. Study on the dispersion and stability of nano ZrO_2 -8% Y_2O_3 nanoparticles aqueous suspension[J]. Surface technology, 2021, 50(3): 206-211.

4.08 mPa·s, 3.84 mPa·s, and 3.36 mPa·s, respectively. The isoelectric point (IEP) of nano-8YSZ particles in aqueous suspension moved from the left of pH 6 to the vicinity of pH 4 after adding dispersant PAA. At pH 8, nano-8YSZ particle has its largest Zeta potential by -44.5 mV. It is found that the dispersion and stability of nano-8YSZ aqueous suspension is closely related to the types and contents of dispersant and values of pH. The dispersion and stability will not be obtained by adding dispersion or by adjusting pH value only. Dispersant PAA has both functions of electrostatic stability and steric stability. The overall dispersion effect of dispersants from high to low is PAA, PEG2000, and PEG600. In preparation of a nano-8YSZ aqueous suspension with 20 wt.% solid content, the optimum condition were pH value of 8, and dispersant PAA content of 2.4 wt.%. Then, the dispersion and stability of suspension was the best with the lowest viscosity of 2.56 mPa·s.

KEY WORDS: dispersants; PH value; nano-8YSZ; aqueous suspension; Zeta potential

质量分数为 8% 的氧化钇部分稳定的氧化锆 $\text{ZrO}_2\text{-}8\text{Y}_2\text{O}_3$ (8YSZ)具有熔点高、硬度高、热导率低等特性，广泛应用于热喷涂领域，以制备高性能热障涂层（TBCs）^[1-5]。纳米材料具有大比表面积、界面与表面效应、量子尺寸效应等特点，拥有比许多常规材料更加优异的性能，展现出良好的应用前景^[6-8]。将纳米材料与表面涂层技术相结合，制备出纳米结构的复合涂层，可以提高涂层的使用效果^[9-13]。近年来，许多学者研究了悬浮液等离子喷涂（SPS）制备的纳米或精细结构涂层，主要研究 SPS 涂层的形成机制^[14-15]、柱状微观结构^[16-18]，以及 SPS 热障涂层的高温性能^[19-21]。在悬浮液等离子喷涂工艺中，首先需制备低黏度、分散稳定性良好的纳米水相悬浮液，作为喷涂液体喂料，之后添加适当的分散剂。材料表面的性质不同，对分散剂的要求也不同，因此分散剂的选择至关重要^[22-23]。国内外对纳米氧化锆水相悬浮液的分散稳定性已有一定的研究^[24-26]，但是主要针对较低固相含量的纳米水相悬浮液，不适合悬浮液等离子喷涂。本文针对固相为 20% 的纳米 8YSZ 水相悬浮液，研究不同分散剂种类、用量、pH 值对分散稳定性的影响，并表征了纳米 8YSZ 在悬浮液中的 Zeta 电位、粒度分布和悬浮液黏度，以期制备分散稳定的悬浮液等离子喷涂喂料提供思路。

1 试验

1.1 试验材料

试验所用纳米 8YSZ 粉末为四方相二氧化锆，比表面积为 25 m²/g，平均粒径为 40 nm，由南京海泰纳米材料有限公司提供。图 1 为纳米 8YSZ 粉末的 SEM 形貌图。所用分散剂为 PEG600、PEG2000、聚丙烯酸（PAA）。PAA 使用时需先稀释成 0.3% 的溶液，采用盐酸和氨水调节悬浮液的 pH 值。试验材料具体参数见表 1。

1.2 试验方法

采用去离子水作为溶剂，称取一定量的纳米 8YSZ 粉末分散其中，磁力搅拌 10 min，配制固相

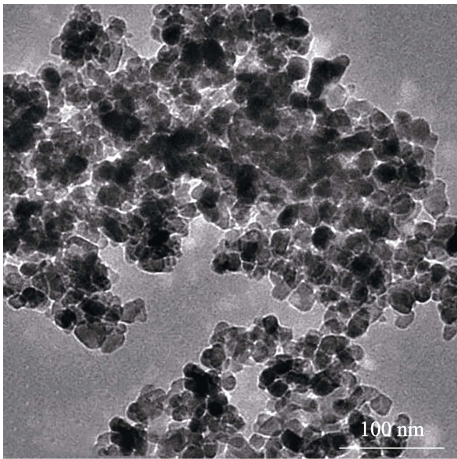


图 1 纳米 8YSZ 粉末的 SEM 形貌
Fig.1 SEM image of nano-8YSZ powders

表 1 制备纳米 8YSZ 悬浮液所用材料

Tab.1 List of materials required for preparation of nano-8YSZ suspension

Material name	Level	Origin
Nano-8YSZ	Average particle size 40 nm	Nanjing High Technology Nano Material Co., Ltd
Hydrochloric acid	Analytically pure	Sinopharm Chemical Reagent Co., Ltd
Ammonia water	Analytically pure	Sinopharm Chemical Reagent Co., Ltd
PEG600	Chemically pure	Sinopharm Chemical Reagent Co., Ltd
PEG2000	Chemically pure	Sinopharm Chemical Reagent Co., Ltd
Polypropylene (PAA)	Chemically pure	Shandong Taihe Water Treatment Co., Ltd
Deionized water	Three-stage	Laboratory self-made

质量分数为 20% 的悬浮液。进行分组试验，一组在悬浮液 pH 中性条件下，添加不同种类及用量的分散剂；一组未加分散剂，仅调节悬浮液 pH 值；一组在 PAA 最佳用量下再调节悬浮液 pH 值。结合粒度分析仪、Zeta 电位仪、黏度测定仪等分析纳米 8YSZ 在水相体系中的分散程度，以获得分散均匀稳定的纳米 8YSZ 水相悬浮液。

1.3 产品表征

通过 Winner2000Z 型激光粒度仪分析测量纳米 8YSZ 颗粒在水中的粒度分布。采用 Js94H 型微电泳仪测量悬浮液中纳米 8YSZ 粒子在水中的 Zeta 电位。采用 PHS-25 型数字酸度计测量悬浮液的 pH 值。利用美国 Brookfield (博勒飞) 公司 DV-III_ULTRA 流变仪测量悬浮液的黏度, 转子型号为 61, 转速为 150 r/min, 室温。

2 结果与讨论

2.1 不同类型分散剂对悬浮液分散稳定性的影响

2.1.1 非离子表面活性剂聚乙二醇 (PEG) 的分散作用

分散剂对纳米 8YSZ 悬浮液的稳定作用机理主要

有三种: 静电稳定机制、空间位阻稳定机制、电空间稳定机制^[27], 如图 2 所示。静电稳定在于颗粒表面形成一种双电层的结构, 粒子表面同种电荷相互排斥, 实现分散效果。空间位阻是通过分散剂吸附于纳米粒子表面, 使相邻颗粒上的聚合物因体积效应相斥, 提高了纳米颗粒聚集必须克服的能量势垒, 从而实现粒子在悬浮液中的分散。电空间稳定是前者两种机制共同作用的结果。

图 3 是 20% 纳米 8YSZ 水相悬浮液黏度随分散剂 PEG600 和 PEG2000 加入量的变化。可以看出, 未加分散剂时, 悬浮液黏度较大。加入 PEG600 和 PEG2000 后, 悬浮液的黏度都是先下降后升高, 说明两种分散剂用量都有一个最佳值。当分散剂 PEG600 用量为 3.2% 时, 悬浮液黏度最低, 为 4.08 mPa·s, 分散效果最佳。PEG2000 用量达 2.4% 时, 分散效果最佳, 悬浮液黏度最低, 为 3.84 mPa·s。

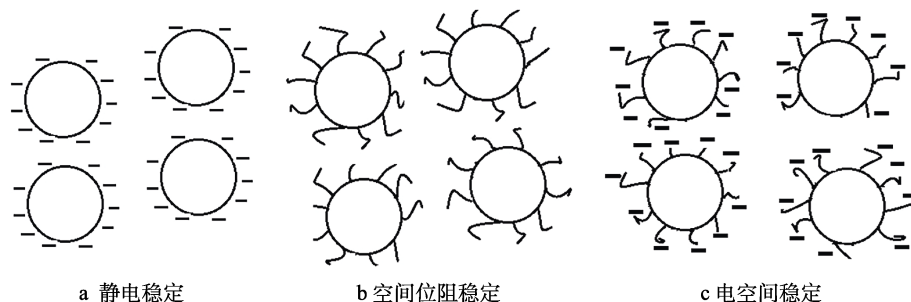


图 2 分散剂稳定机制

Fig.2 Dispersant stabilization mechanism: a) electrostatic stabilization; b) steric stabilization; c) electrosteric stabilization

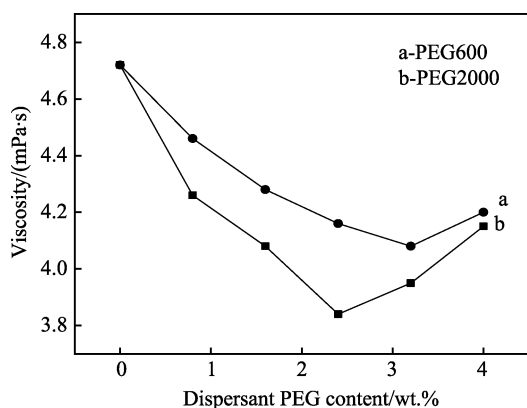


图 3 PEG 含量对纳米 8YSZ 水相悬浮液黏度的影响

Fig.3 Effect of PEG content on viscosity of nano-8YSZ aqueous suspension

PEG600 和 PEG2000 是常用的非离子表面活性剂, 其分散机理主要是空间位阻稳定机制。悬浮液中的纳米 8YSZ 颗粒对 PEG 具有吸附作用。PEG 吸附在粉体表面形成保护层, 利用屏障效应, 阻碍了粉体粒子之间的相互接触, 起到一定的分散效果。随着分散剂用量增加, 粒子表面吸附的高分子化合物逐渐增多。如果 PEG 的浓度超过其饱和吸附浓度, 则悬浮

液中多余的高分子链将发生相互缠绕, 引起颗粒团聚而沉降, 导致悬浮液分散稳定性下降。当 PEG 不断添加至过量时, 悬浮液中固体颗粒直径明显变大, 最后悬浮液出现絮凝现象。总体来说, PEG2000 的分散效果好于 PEG600, 达到最佳分散效果的用量也少于 PEG600。这是因为 PEG2000 的分子量大, 它在颗粒表面的吸附能大, 从而形成的保护层厚度也较大, 不容易从颗粒表面脱落下来, 使得颗粒之间产生较大的空间位阻, 取得较好分散效果。

2.1.2 阴离子型表面活性剂聚丙烯酸 (PAA) 的分散作用

在去离子水介质中, 纳米 8YSZ 颗粒表面带负电。根据 DLVO 双电层理论, 带电粒子表面会从溶液中吸附一些反号离子, 构成紧密的吸附层 (Stern layer), 吸附层以外, 溶液中的其他离子则构成扩散层 (Gouy layer), 吸附层与扩散层共同构成了粒子的双电层结构^[28], 如图 4 所示。吸附层与扩散层之间的界面称为滑动面, 在滑动面产生的动电位称为 Zeta 电位。Zeta 电位大小决定了粒子之间斥力的强弱, 从而影响了粒子团聚。

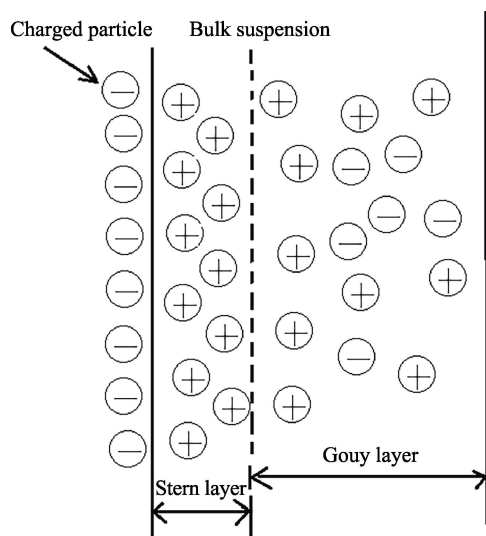


图 4 双电层结构

Fig.4 Electrical double layers structure

图 5 是悬浮液黏度随分散剂 PAA 加入量的变化。可以看出,随着 PAA 用量增加,悬浮液的黏度先减小后增大,说明悬浮液的分散稳定性先上升再下降。当 PAA 用量为 2.4% 时,黏度最低,为 3.36 mPa·s,分散效果最好。PAA 是一种阴离子表面活性剂,在水中容易发生离解,产生阴离子基团。在一定范围内增大 PAA 浓度,离解形成的阴离子基团会吸附在粒子表面,增加粒子所带负电,同时大量阴离子基团还会被迫挤入吸附层,增加双电层的厚度,使得颗粒间的 Zeta 电位增大,静电排斥作用增强。另一方面,阴离子基团阻碍了纳米 8YSZ 颗粒之间的碰撞,从而使纳米颗粒团聚几率下降^[29]。但是加入过量的 PAA 时,同 PEG 分散效果类似,PAA 高分子链也将发生缠绕,导致颗粒团聚而沉降。比较 PEG 和 PAA 的分散效果可以得知,PAA 同时具有静电稳定和空间稳定两种机制,分散效果更优,所能达到的最低黏度为 3.36 mPa·s。而 PEG 作为非离子型分散剂,只具有空间稳定作用,所能达到的最低黏度为 3.84 mPa·s。总体分散效果有 PAA>PEG2000>PEG600。

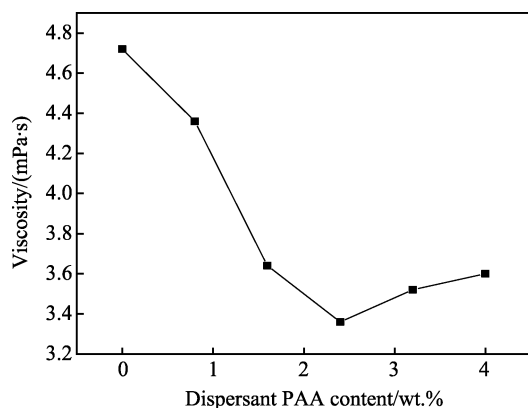


图 5 PAA 含量对纳米 8YSZ 水相悬浮液黏度的影响

Fig.5 Effect of PAA content on viscosity of nano-8YSZ aqueous suspension

2.2 pH 值对悬浮液分散稳定性的影响

2.2.1 无分散剂时 pH 值对粉体表面 Zeta 电位的影响

在水介质中,纳米粉体由于自身解离、吸附作用等,使粉末颗粒表面带电。纳米 8YSZ 粉体在悬浮液中的分散稳定性与在水中的电动性能密切相关。粉体表面的 Zeta 电位越高,颗粒之间的排斥力越大,粉体在水中的分散性越好^[30-31]。

图 6 为未加分散剂时, pH 值对纳米 8YSZ 颗粒 Zeta 电位的影响曲线。可以看出,8YSZ 粉体在水中的等电点为 pH=6。在等电点处,8YSZ 粒子吸附的 H^+ 和粒子表面所带负电荷相等,因此 Zeta 电位等于零,此时,悬浮液中颗粒易发生团聚而沉降,稳定性最差。所以配制悬浮液时,因尽量避开等电点的 pH 值。当 pH 低于或高于 6 时,8YSZ 颗粒表面分别带正电和负电,这是由吸附到粒子表面的反号离子数量所决定。pH 值离开等电点后,纳米粉末颗粒表面 Zeta 电位绝对值均有所增加,粒子之间形成的静电斥力阻止了由于布朗运动产生的粒子之间相互吸引和碰撞,悬浮液的分散稳定性得以改善。在 pH<3 和 pH>8 的情况下,Zeta 电位有降低的趋势。这是因为在过酸或过碱条件下,悬浮液中离子浓度增大,压缩了双电层厚度,Zeta 电位降低。从图 6 还可以看出,pH=8 时,8YSZ 粉体的 Zeta 电位最大,分散效果相对最好。

图 7 和图 8 分别是 pH=8 时,纳米 8YSZ 水相悬浮液中粉末颗粒粒径分布及其粒径累计分布图。可以看出,颗粒直径大多分布在 6~24 μm 之间,90% 以上颗粒直径大于 6 μm ,表明悬浮液中,颗粒之间仍存在较大的团聚度,说明仅仅调节 pH 值不能得到分散均匀、稳定悬浮的纳米 8YSZ 水相悬浮液。

2.2.2 PAA 分散下 pH 值对粉体表面 Zeta 电位的影响

图 9 为加入 2.4% 分散剂 PAA 后, pH 值对 8YSZ 在悬浮液中的 Zeta 电位的影响。从图 9 可以看出,加入 PAA 后,当 pH 值约等于 4 时,Zeta 电位接近于 0,说明等电点发生了偏移,等电点由原来的 pH=6

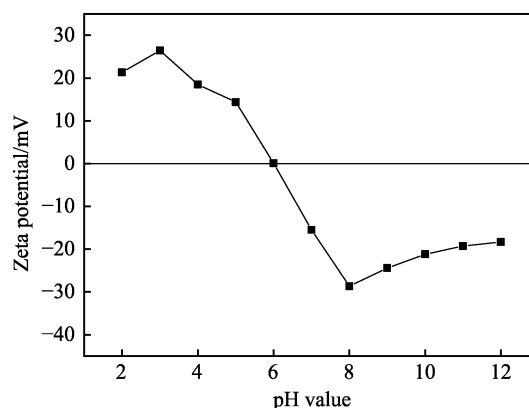


图 6 无分散剂时 pH 值对纳米 8YSZ 的 Zeta 电位的影响

Fig.6 Effect of pH value on Zeta potential of nano-8YSZ without dispersants

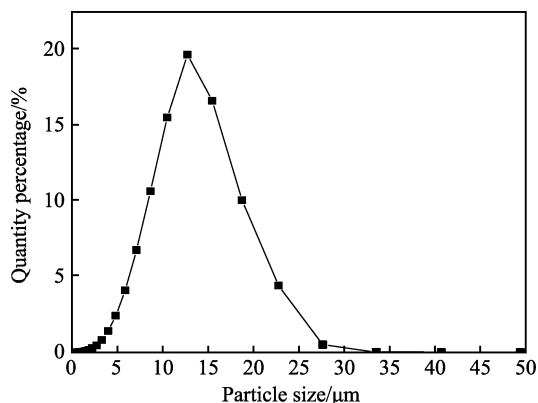


图7 纳米8YSZ水相悬浮液中的粉末颗粒粒径分析
Fig.7 Particle size analysis of nano-8YSZ in aqueous suspension

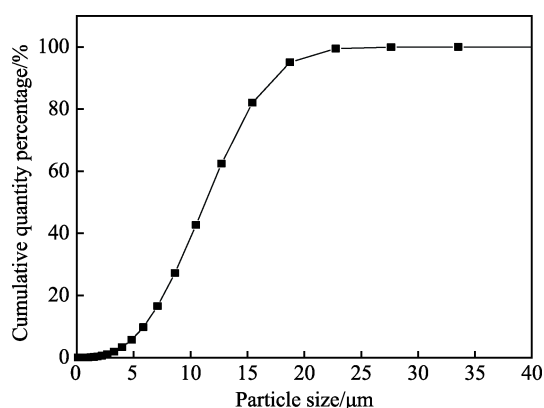


图8 纳米8YSZ水相悬浮液中粉末颗粒粒径累积分布
Fig.8 Cumulative size distribution of powder particles in aqueous suspension of nano-8YSZ

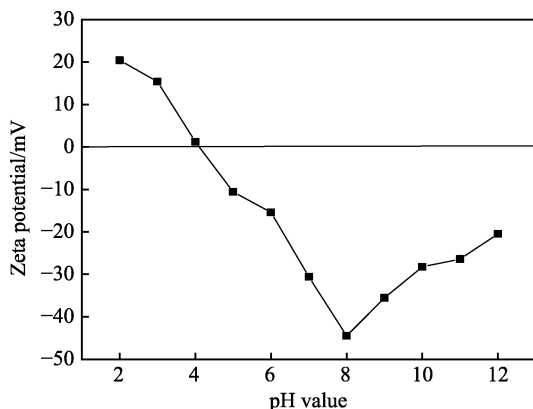


图9 加入PAA后pH值对纳米8YSZ的Zeta电位的影响
Fig.9 Effect of pH value on Zeta potential of nano-8YSZ after adding PAA

左移到pH=4。这是因为PAA是一种阴离子表面活性剂，在水中会发生离解。其离解的方程式如下：



在水中电离出带负电的 RCOO^- 基团，非常容易吸附在8YSZ颗粒表面，使8YSZ颗粒表面负电密度增加，这样可以吸附更多 H^+ ，使纳米8YSZ粉体表面显电中性。因此，8YSZ的等电点向酸性方向偏移。对比图6和图9还可以看出，加入PAA分散剂后，

粒子Zeta电位随pH值变化趋势几乎相同，仍在pH=8时具有最大的Zeta电位，为-44.5 mV，粒子间的静电斥力最大，悬浮液具有最佳的分散性。

图10为加入2.4%分散剂PAA后，pH值对20%纳米8YSZ水相悬浮液黏度的影响。当pH值大于10时，8YSZ水相悬浮液出现了絮凝。考虑实验环境，强酸不适合悬浮液等离子喷涂，最终选择黏度测定pH值的范围为6~9。从图10中可以看出，在pH=8时，悬浮液的黏度最低，为2.56 mPa·s。这与图9中悬浮液中粉末Zeta电位与pH关系的趋势是一致的。

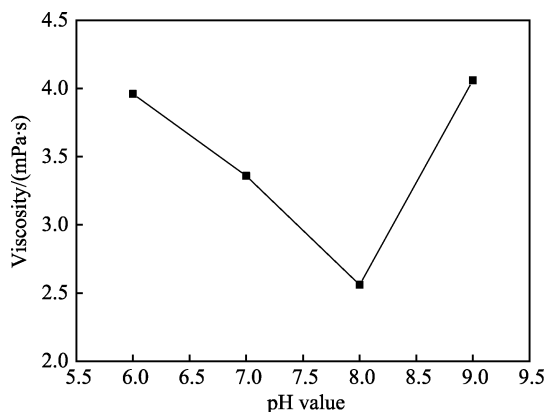


图10 pH对纳米8YSZ水相悬浮液黏度的影响
Fig.10 Effect of pH on viscosity of nano-8YSZ suspension after adding PAA

PAA是一种弱酸聚电解质。一方面，在碱性条件下有利于促进PAA电离，使8YSZ颗粒表面负电密度增加。另一方面，pH值提高使粉体表面可供化学吸附的活性点减少，从而使PAA在8YSZ粒子表面的饱和吸附量降低，提高了PAA对8YSZ粒子表面的覆盖率。所以，在一定范围内增大pH值，有利于提高悬浮液的稳定性。随着pH值继续增加，用于调节pH值的氨水浓度增大，压缩了双电层厚度，Zeta电位绝对值有降低的趋势，这时静电稳定成了主导因素，因此悬浮液的稳定性反而下降。对比pH值对悬浮液Zeta电位和黏度的影响，可以得出，制备稳定性好的纳米8YSZ水相悬浮液的最佳pH值应在8附近。实验室采用该方案，在pH=8、分散剂PAA为2.4%条件下，配制了纳米8YSZ水相悬浮液，运用悬浮液等离子喷涂工艺，制备得到了纳米结构涂层^[16]。喷涂过程中，未发生堵料现象，验证了该方案的有效性。

3 结论

本文围绕几种不同分散剂和PH值对纳米8YSZ水相悬浮液的分散稳定性进行了试验研究，主要结论如下：

1) 分散剂的种类和含量对纳米8YSZ在水中的分散有很大影响。分散效果是 $\text{PAA} > \text{PEG2000} >$

PEG600。分散剂不是越多越好, 各分散剂均有最佳添加量。对于 20% 纳米 8YSZ 悬浮液, PAA、PEG2000、PEG600 的最佳用量分别是 2.4%、2.4%、3.2%。

2) 纳米 8YSZ 水相悬浮液的等电点在 $\text{pH}=6$ 附近, 仅仅调节 pH 值或者只加入分散剂, 均不能得到分散均匀、稳定悬浮的 8YSZ 水相悬浮液。

3) 加入 PAA 后, 纳米 8YSZ 水相悬浮液的等电点左移至 $\text{pH}=4$ 。对于 20% 纳米 8YSZ 悬浮液, 最佳分散条件为: PAA 为 2.4%, $\text{pH}=8$ 。此时, 悬浮液中纳米粒子的 Zeta 电位最大为 -44.5 mV , 悬浮液黏度最低, 为 $2.56 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 分散稳定性最好。

参考文献:

- [1] 魏晓东, 侯国梁, 赵荻, 等. 氧化物掺杂 YSZ 热障涂层的最新研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 92-103.
WEI X D, HOU G L, ZHAO D, et al. Recent research progress on oxide doped YSZ thermal barrier coatings[J]. Surface technology, 2020, 49(6): 92-103.
- [2] 薛召露, 郭洪波, 宫声凯, 等. 新型热障涂层陶瓷隔热层材料[J]. 航空材料学报, 2018, 38(2): 10-20.
XUE Z L, GUO H B, GONG S K, et al. Novel ceramic materials for thermal barrier coatings[J]. Journal of aeronautical materials, 2018, 38(2): 10-20.
- [3] QIAO X, WENG W X, LI Q. Acoustic emission monitoring and failure behavior discrimination of 8YSZ thermal barrier coatings under Vickers indentation testing[J]. Surface and coatings technology, 2019, 358: 913-922.
- [4] 赵荻, 安宇龙, 赵晓琴, 等. 不同厚度 8YSZ 热障涂层的结构及性能表征[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 276-284.
ZHAO D, AN Y L, ZHAO X Q, et al. Structure and properties of 8YSZ thermal barrier coatings with different thickness[J]. Surface technology, 2020, 49(1): 276-284.
- [5] NIKHIL R K, KARTHIKEYAN G, DHANANJAY M K. Effect of substrate rotation on the microstructure of 8YSZ thermal barrier coatings by EB-PVD[J]. Materials today: Proceedings, 2020, 28(2): 678-683.
- [6] 秦瑞轩, 邓果诚, 郑南峰. 金属纳米材料表面配体聚集效应[J]. 化学进展, 2020, 32(8): 1140-1157.
QIN R X, DENG G C, ZHENG N F. Assembling effects of surface ligands on metal nanomaterials[J]. Progress in chemistry, 2020, 32(8): 1140-1157.
- [7] ABDUL V K, HASAN H. Grinding of calcite to nano-size: Effect of mill capacity and grinding media shape[J]. Open journal of nano, 2019, 1: 1-5.
- [8] SCHURMANN M G, OLMS C. Shade stability of polymer-infiltrated and resin nano ceramics[J]. The open dentistry journal, 2018, 12: 791-800.
- [9] ZHOU F F, DENG C M, WANG Y, et al. Characterization of multi-scale synergistic toughened nanostructured YSZ thermal barrier coatings: From feedstocks to coatings[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(4): 1443-1452.
- [10] 王铀, 王亮, 刘赛月, 等. 热喷涂纳米结构 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7(\text{LZ})/8\text{YSZ}$ 双陶瓷热障涂层[J]. 中国表面工程, 2016, 27(1): 16-24.
WANG Y, WANG L, LIU S Y, et al. Nanostructured $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7(\text{LZ})/8\text{YSZ}$ double ceramic layer thermal barrier coatings fabricated by thermal spraying[J]. China surface engineering, 2016, 27(1): 16-24.
- [11] DZHANAKHMEDOV A K. Tribological phenomena during contact interactions in nanostructured coatings[J]. Journal of friction and wear, 2020, 41(1): 46-51.
- [12] BULYCHEV N A, KUZNETSOVA E L. Ultrasonic application of nanostructured coatings on metals[J]. Russian engineering research, 2019, 39(9): 809-812.
- [13] ATTARI V, CRUZADO A, ARROYAVE R. Exploration of the microstructure space in TiAlZrN ultra-hard nanostructured coatings[J]. Acta materialia, 2019, 174: 459-476.
- [14] JOULIA A, BOLELLI G, GUALTIERI E, et al. Comparing the deposition mechanisms in suspension plasma spray (SPS) and solution precursor plasma spray (SPPS) deposition of yttria-stabilised zirconia (YSZ)[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014, 34(15): 3925-3940.
- [15] GIZYNSKI M, CHEN X, DUSAUTOY N, et al. Comparative study of the failure mechanism of atmospheric and suspension plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Surface and coatings technology, 2019, 370: 163-176.
- [16] 许艳华, 李强. 悬浮液等离子喷涂与常规等离子喷涂纳米结构陶瓷涂层的研究[J]. 中国表面工程, 2010, 23(1): 51-56.
XU Y H, LI Q. Research on nanostructured ceramic coatings by suspension plasma spraying and conventional plasma spraying[J]. China surface engineering, 2010, 23(1): 51-56.
- [17] BERNARD B, QUET A, BIANCHI L, et al. Effect of suspension plasma-sprayed YSZ columnar microstructure and bond coat surface preparation on thermal barrier coating properties[J]. Journal of thermal spray technology, 2017, 26(6): 1025-1037.
- [18] GANVIR A, CURRY N, MARKOCSAN N. Influence of microstructure on thermal properties of columnar axial suspension plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Journal of thermal spray technology, 2016, 25(1/2): 202-212.
- [19] ZHAO Y, WANG L, YANG J, et al. Thermal aging behavior of axial suspension plasma-sprayed yttria-stabilized zirconia (YSZ) thermal barrier coatings[J]. Journal of thermal spray technology, 2015, 24(3): 338-347.
- [20] 李燃, 张敏良. 悬浮液等离子喷涂 YSZ/GZ 热障涂层的等温氧化性能研究[J]. 中国陶瓷, 2016, 52(3): 82-87.
LI R, ZHANG M L. Study on isothermal oxidation behavior of YSZ/GZ thermal barrier coating using suspension plasma spraying[J]. China ceramics, 2016, 52(3): 82-87.
- [21] BERNARD B, QUET A, BIANCHI L, et al. Thermal insulation properties of YSZ coatings: Suspension plasma spraying (SPS) versus electron beam physical vapor deposition (EB-PVD) and atmospheric plasma spraying (APS)[J]. Surface and coatings technology, 2017, 318: 122-128.

(下转第 238 页)