

非水介质中纳米金刚石的改性、分散与应用*

许向阳^{1,2} 余志明¹ 朱永伟² 王柏春²

(1 中南大学材料科学与工程学院, 长沙 410083; 2 长沙矿冶研究院研究开发中心, 长沙 410012)

摘要 开展纳米金刚石在非水介质中应用的前提是其在介质中的良好分散与稳定。鉴于此, 综述了非水介质中纳米金刚石改性及分散研究进展, 以及相关应用现状和前景。

关键词 纳米金刚石 非水介质 改性 分散

Modification, Dispersion and Application of Nanodiamond in Non-aqueous Media

XU Xiangyang^{1,2} YU Zhiming¹ ZHU Yongwei² WANG Baichun²

(1 School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083;

2 R & D, Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, Changsha 410012)

Abstract As dispersion and stability of nanodiamond in non-aqueous media are the fundamental premises in promoting its applications, the development of modification and dispersion researches of nanodiamond are reviewed, and current and potential applications thereof are discussed.

Key words nanodiamond, non-aqueous medium, modification, dispersion

0 引言

爆轰法合成纳米金刚石是利用负氧平衡炸药在高温高压条件下瞬间爆炸, 反应时未被氧化的碳原子或原子团聚结长大并相变成金刚石相, 生成纳米粒级金刚石的技术。这种纳米粉体是目前纳米材料领域研究热点之一, 俄罗斯、白俄罗斯、乌克兰、美国、德国、日本等目前均有研究机构对其进行合成研究和产品开发^[1]。在国内, 中科院兰州化学物理所首先报道了相关研究工作^[2~4]。此后, 北京理工大学^[5,6]、第二炮兵工程学院^[7]等积极开展了研究。

纳米金刚石兼具纳米材料和金刚石的良好特性, 在低电场发射、复合镀、超精密抛光、金属润滑剂、润滑油、涂层材料、生物抗原载体等领域具有广阔的应用前景^[4,5]。在实际应用中, 纳米金刚石的解团聚及其在介质中的分散是一个技术瓶颈。很多应用如计算机磁头抛光、高分子材料复合填充等需在非水介质体系中进行, 而纳米金刚石在这些体系中的稳定分散是应用开展的前提。

1 纳米金刚石的改性与分散

对纳米金刚石粒度和表面性质进行表征是对其进行改性和分散的基础。陈权等^[8]对在惰性气体、盐类、水和冰作为保护介质条件下爆轰合成并经过强氧化剂提纯得到的灰粉样品进行了 X 射线衍射分析, 测量计算结果表明, 纳米金刚石微晶尺寸为 4~6 nm。利用 X 射线小角度散射对纳米金刚石进行粒度分析, 发现纳米金刚石一次粒度分布较窄, 中位径为 8.5 nm 左右^[9,10]。

但是, 纳米金刚石颗粒由于具有很高的比表面能, 处于一种热力学不稳定的状态, 容易自发聚集, 颗粒在合成过程中以及后期处理工艺中形成了牢固的团聚体。对这种团聚体进行解聚是一个比较困难的问题^[11,12]。在体系中, 纳米金刚石团聚严重, 发生明显的絮凝和沉降^[10]。

在实际应用中, 稳定分散是发挥纳米金刚石优异性能的关键。例如, 金增寿等^[13]认为, 由于纳米金刚石粉比重较大, 在用作润滑油添加剂时必须解决其长期悬浮和胶态稳定性问题, 否则很难在生产中得到实际应用。他们认为这是制约金刚石粉大量用作润滑油添加剂的原因。胡志孟等^[14]认为, 使用分散剂, 解决纳米金刚石在油中分散悬浮问题是其作为精抛光材料应用的前提。

X 射线光电子能谱和红外光谱分析表明, 纳米金刚石表面含有大量官能团、悬键, 这是其化学活性高、吸附性能强、表面能高、容易团聚的原因^[15~17]。不过, 官能团的存在同时也为分散剂在颗粒表面的作用提供了基础。通过化学或者物理手段对颗粒表面进行改性, 可以改变纳米金刚石表面官能团的组成和相对强度, 调控颗粒在介质中的分散行为。

A P Voznyakovskii 等^[18]采用将纳米金刚石表面甲硅基化的方法对纳米金刚石进行表面疏水处理, 清除纳米金刚石表面的吸附水分子, 增强其表面疏水性。该研究采用含过量三甲基甲硅基混合物、含不足量的甲硅基混合物以及含乙烯组分的甲硅基混合物等 3 种体系在甲苯中对纳米金刚石进行表面改性, 所得悬浮液中颗粒的粒度分布曲线如图 1 所示。结果表明, 采用三甲基或二甲基乙烯基甲硅基基团, 纳米金刚石在甲苯体系中分散性性能较好(平均粒径为 14.5~18 nm)。

* 基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(04JJ3074)

许向阳: 男, 1971 年生, 博士研究生, 高级工程师 E-mail: xuxy@crimm.cn

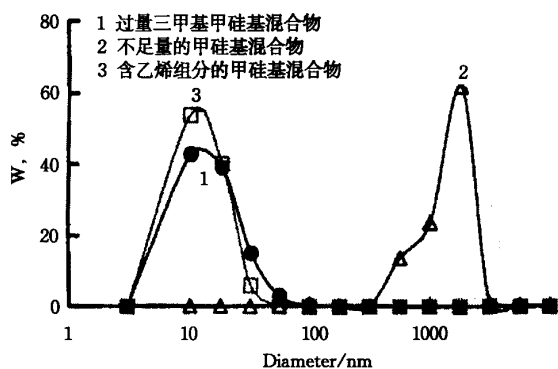


图1 甲硅基体系对纳米金刚石改性后颗粒的粒度分布^[18]

A P Voznyakovskii 等^[19]还对几种非水介质如丙酮、苯、丙醇中纳米金刚石的分散性能进行了研究。他们认为介质极性对悬浮液中纳米金刚石颗粒的稳定性及其粒度分布均有重要影响,对于不同介质,极性越低,则置于其中的纳米金刚石颗粒分散性越低(图2),同时,在介质调整组合时,往较小极性的介质中(如丙酮)中添加较大极性物质,将导致纳米金刚石在悬浮液中的分散性得到改善。可见,在非水介质尤其是非极性介质中的分散是实际应用中的一个难点,如何对纳米金刚石在改性和调整介质组成,实现粉体在这些体系中的稳定分散值得深入研究。Voznyakovskii 等研究了在苯介质中采用聚二甲硅氧烷和聚异戊二烯等聚合物对纳米金刚石进行表面改性的效果,所得体系中纳米金刚石颗粒平均尺寸为300nm左右,可稳定存放10天。

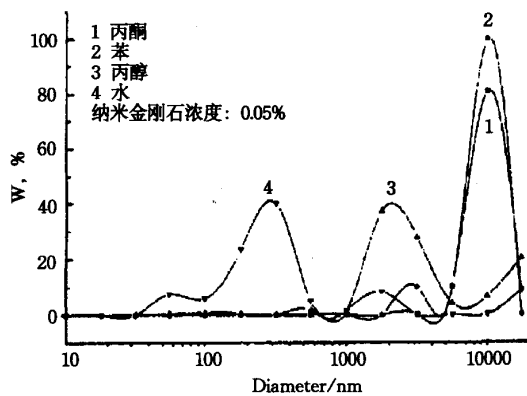


图2 不同体系中纳米金刚石的粒度分布

笔者所在的课题组在纳米金刚石应用研究中对纳米金刚石在水介质和非水介质中的稳定分散进行了大量的研究^[10,20~22]。我们发现,如果只采用机械方法对纳米金刚石团聚体进行解聚,悬浮体系的稳定性不好,颗粒很容易重新聚集,仅采用化学方法,则无法解开纳米金刚石硬团聚体。我们采用机械化学方法,利用机械力的作用与表面活性剂和超分散剂的协同作用,在高效地粉碎纳米金刚石团聚体的同时,对纳米金刚石表面尤其是粉碎过程中新生成的表面进行修饰,改变其表面的官能团组成,调节其亲水疏水性能,从而实现纳米金刚石在介质中的稳定分散。项目组研发的纳米金刚石水体系和白油基、液体石蜡基

以及正构烷烃体系均能保持长期稳定。在白油体系中,纳米金刚石与聚合物分散剂配比不同时,机械化学改性所得体系中纳米金刚石颗粒的累计粒度分布曲线如图3所示。当分散剂与纳米金刚石重量比为1:1时解团聚效果最佳,体系小于50nm颗粒占92%以上。继续增加分散剂用量,粒度有增粗的现象。这说明,分散剂过量时,可能导致部分已经解团聚的颗粒重新聚集,分散性变差^[22]。

2 纳米金刚石在非水介质中的应用研究

2.1 超精密抛光

含纳米金刚石的抛光体系可以用于电子、光学、机械等产品的精密抛光^[23,24]。Dolmatov^[25]认为,含纳米金刚石的抛光体系具有很优越的性能:纳米金刚石的细粒级保证了抛光体系的稳定和被抛表面的最小粗糙度;体系的化学稳定性可以方便化学活性添加剂的使用以及抛光体系自身的回收;被抛表面的物质损失减小;由于纳米金刚石的离子交换和吸附特性,抛下的离子和分子产物可附着在纳米金刚石表面而被去除,从而保证了被抛表面的清洁等。

在计算机磁头超精密抛光工艺中,由于工艺的特殊要求,需要采用非水基的抛光液。采用纳米金刚石作为抛光材料,将大大降低被抛光表面的粗糙度,被加工的基片表面平整度达到亚纳米级,可以获得很好的抛光表面。

清华大学摩擦学国家重点实验室^[14,26]开发出白油基纳米金刚石抛光液,用于计算机磁头、光学器件和陶瓷等高精度表面研磨和抛光。

笔者所在的课题组继续解决了纳米金刚石在白油等非极性体系中的解团聚和分散问题之后,研制了适用于计算机磁头抛光的含纳米金刚石抛光液。在保证较高的抛光速率的同时,可以使被抛光的磁头表面粗糙度达到0.20nm以下。

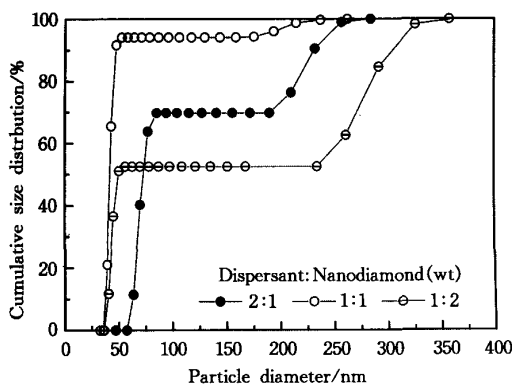


图3 白油中纳米金刚石粒度累计分布与分散剂用量的关系^[22]

2.2 润滑油、磨合油

多功能高效添加剂是现代高级润滑油和磨合油必不可少的重要组成部分,良好的添加剂对于提高油品性能,降低工件的摩擦磨损起着重要的作用。近年来,国内外学者在将纳米粒子作为添加剂引入润滑油应用领域方面进行了大量的研究工作^[27~29]。纳米金刚石具有规则的球状、椭球状形貌和高硬度等优点,作为金属润滑剂,纳米金刚石可以起到很好的抗磨减摩效果^[30,31]。在润滑油添加剂研究中,纳米金刚石同样是一种性能优异的固

体添加颗粒材料。

俄罗斯生产的牌号为 N—50A 的润滑剂即采用纳米金刚石作为添加剂,用于内燃机磨合和精密加工机床的润滑,可缩短磨合时间,降低润滑油的消耗,同时提高了磨合质量和加工精度。俄罗斯研究人员将未提纯的爆轰产物(黑粉)加入润滑油,可降低摩擦系数、磨损量、摩擦区的温度和油品粘度,使内燃机运行寿命提高 2~10 倍^[32]。

徐洮等^[33,34]研究了纳米金刚石添加到石蜡油中的摩擦性能。含有纳米金刚石的石蜡油随着载荷的增加,其磨损量增加幅度大大低于不含纳米金刚石和只含有石墨的石蜡油。不含纳米金刚石的石蜡油的摩擦系数要比含纳米金刚石的油品高出 1 倍。沈武等^[35]认为,球形的纳米金刚石颗粒在摩擦副间有滚动摩擦作用,由于其具有超硬性质,在工件间隙支撑载荷,起到良好的抗磨减摩作用。

西安交通大学与第二炮兵工程学院合作,研制开发了一种专用内燃机磨合油 MR-OIL^[7,36,37]。在内燃机磨合过程中,纳米金刚石不但对缸套表面起到促磨作用,而且对缸套基体表面组织性能进行微调而起化学改性作用实现了发动机磨合与表面改性的有机结合。张家玺等^[38]将固体润滑剂纳米金刚石(UDD)加入 15W/30 发动机润滑油时发现,基础油的承载能力明显提高。在添加了 0.10% 纳米金刚石的 15W/30 油品润滑下,试件的磨损体积损失增加平缓,而未加入纳米金刚石的基础油润滑时,试件磨损明显增大。当载荷达到 200N 时,二相润滑剂可使磨损量降至 1/5。表明重载条件下,纳米金刚石作为添加剂可以有效减轻磨损。此外,相对于未添加纳米金刚石的油品,纳米金刚石—15W/30 二相润滑剂润滑条件下的摩擦系数较低且平稳。同时,对球—盘摩擦磨损实验前后试件表面硬度的测量表明,二相润滑剂可使试件表面硬度提高更多,这可能是由于纳米金刚石渗入试件表层所致。2 种油品在不同载荷下摩擦件磨损体积随载荷变化的关系曲线如图 4 所示。

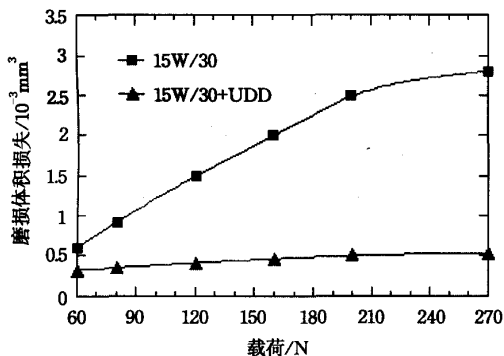


图 4 纳米金刚石添加前后摩擦体积损失与载荷的关系

曲建俊等^[39]研究了纳米金刚石石墨粉作为添加剂对 20 号机械油摩擦磨损性能的影响,他们认为,3%~5% 的添加剂用量时,油品摩擦磨损特性得到较大改善,机理是石墨在摩擦表面形成减摩保护层,同时可能还有金刚石粉嵌入金属表面支撑载荷,减小滑动摩擦的作用。

由于纳米金刚石的表面效应引发纳米金刚石颗粒间的团聚,从而影响其在润滑油中的悬浮稳定性。若采用直接将纳米金刚石粉体加入基础油的方法,在基础油体系中纳米金刚石的分散性、稳定性,以及均匀程度都会受到制约,影响其性能的发挥。

乔玉林等^[40]考虑到这一因素,在将纳米金刚石引入基础油之前,用钛偶联剂对纳米金刚石进行表面改性,使得粉体表面具有亲油单分子膜。对复合油品摩擦学性能的研究表明,表面改性的纳米金刚石在基础油中含量为 0.02% 时,磨斑直径最小,抗磨性最好。这种纳米金刚石与磷氮剂复配,具有优异的抗磨减摩性能。

2.3 高分子复合材料

纳米金刚石具有多孔表面,具有很大的比表面积,还具有球形颗粒形状等特点,可在塑料和橡胶等领域得到应用。

聚四氟乙烯(PTFE)是氟塑料中应用最为广泛的一种。PTFE 有较好的耐化学腐蚀性能,几乎任何强酸、强碱、强氧化剂和溶剂在高温下对它都不起作用,但 PTFE 有着抗磨损性能较差的缺陷。Ultradiamond Technologies Inc.^[41]将纳米金刚石与传统的填料 MoS₂ 组合使用填充到 PTFE 基体中,可将其耐磨性能提高 1500% 以上。同时,由于纳米金刚石的加入,材料的摩擦系数降低。该应用研究认为,复合过程中,纳米金刚石防止了 PTFE 材料形成薄片状的结构,从而使得材料性能提高,其中,纳米金刚石的多孔表面和球形的形状是产生这一效应的主要因素。

刘晓新等^[42]用提纯前后的爆轰合成产品(爆轰灰和纳米金刚石)对氟橡胶和丁腈橡胶进行改性。研究表明,爆轰灰虽然可以提高橡胶硬度,但拉伸强度和扯断伸长率反而下降。纳米金刚石添加到氟橡胶中,橡胶的综合性能指标上升,他们认为,纳米金刚石含有羟基、羧基、甲基等官能团,增强了与聚合物键合的活性,从而提高了橡胶的拉伸性能、硬度、耐磨性等性能指标。

在橡胶加工过程中,用纳米金刚石黑粉(core-and-shell nanodiamond)以同样的重量取代 1%~3% (重量百分比) 传统的碳填充剂,组合使用的效果,可以使非极性的异戊二烯橡胶汽车轮胎使用寿命(里程)延长 30%,而轴衬等橡胶工件的寿命则可以提高 30%~100%。同时,由于纳米金刚石的加入减少了孔隙率,混样所需功率减少 5%~7%,而且减少了表面气泡、碎屑、黏附,更容易脱模。

不过,应该看到,要完全发挥纳米金刚石对高分子材料的增强补强作用,必须解决二者的相容性,即纳米金刚石在体系中良好分散的问题。

3 结语与展望

已经开展的纳米金刚石在非水体系中的一系列研究如作为超精密抛光液、润滑油添加剂以及塑料和橡胶的填充剂等表明,在这些体系中引入纳米金刚石可以有效改善性能,效益明显。

纳米金刚石在很多技术领域有着巨大的应用潜力,对其研究开发和推广应用还大有可为。在非水体系,特别是在非极性介质中实现纳米金刚石均匀稳定的分散是开展纳米金刚石在这些领域的应用、发挥其纳米颗粒和超硬特性等优异性能的前提。目前,纳米金刚石的分散问题还是一个难点,研究其不同介质中的分散行为和机理,将有助于解决应用时纳米金刚石在体系中均匀和稳定分布这一难题。

参考文献

- 1 <http://www.nanodiamond.spb.ru/alcen-e.htm>

- 2 徐康,金增寿. 炸药爆轰纳米金刚石的制备和应用. 含能材料,1993,1(3):19
- 3 徐康,金增寿,等. 纳米金刚石制备方法的改进——水下连续爆炸法. 含能材料,1996,4(4):175
- 4 徐康,薛群基. 炸药爆炸法合成的纳米金刚石粉. 化学进展,1997,9(2):201
- 5 恽寿榕,黄风雷,马峰,等. 超微金刚石——二十一世纪新材料. 世界科技研究与发展,2000,22(1):39
- 6 周刚,文潮,孙德玉,等. 爆轰合成超分散金刚石的实验研究. 爆炸与冲击,1999,19(4):365
- 7 陈生玉,陈增凯. 纳米级金刚石系列产品的现状及展望. 宇航材料工艺,1999,(2):9
- 8 陈权,马峰,恽寿榕,等. 爆轰法合成超微金刚石的X射线衍射研究. 材料研究学报,1999,13(3):317
- 9 相英伟,张晋远,金成海,等. 超细金刚石粉末的显微结构和热稳定性. 金刚石与磨料磨具工程,1999,2(110):5
- 10 许向阳,朱永伟,王柏春,等. 水介质中纳米金刚石表面改性研究. 中国粉体技术,2003,9(4):30
- 11 徐康,金增寿. 纳米金刚石粉制备方法的改进和解团聚问题的初步探讨. 见:96中国材料研讨会论文,1-2. 北京:化学工业出版社,1997. 44
- 12 陈鹏万. 爆炸合成超微金刚石的机理及特性研究:[博士学位论文]. 北京:北京理工大学,1999
- 13 金增寿,徐康. 炸药爆轰法制备纳米金刚石. 含能材料,1999,7(1):38
- 14 胡志孟,雒建斌,温诗铸,等. 纳米金刚石用作磁头抛光材料的研究. 材料保护,2001,34(12):11
- 15 王大志,徐康,贾云波,等. 纳米金刚石及其稳定性. 无机材料学报,1995,10(3):281
- 16 Chen P W, Ding Y S, Chen Q, et al. Spherical nanometer-sized diamond obtained from detonation. Diamond Relat Mater, 2000,9:1723
- 17 Mironov E, Koretz A, Petrov E. Detonation synthesis ultradispersed diamond structural properties investigation by infrared adsorption. Diamond Relat Mater, 2002,11: 872
- 18 Voznyakovskii A P, Gujamura T, Dolmatov V Yu. Formation and stabilization of nanodiamond suspensions in liquid media. Superhard Materials, 2002,(6):22
- 19 Voznyakovskii A P, Dolmatov V Yu, Klyubin V V, et al. Structure and sedimentation stability of suspensions of detonation nanodiamonds in nonaqueous liquid media. Sverkhv Mater, 2000,(2):64
- 20 Xu X Y, Zhu Y W, Wang B C, et al. Surface modification of nanodiamond in aqueous medium. Trans of Nonferrous Metal Society of China, 2003,13(6):1415
- 21 Zhu Y W, Xu X Y, Wang B C, et al. Surface modification and dispersion of nanodiamond in clean oil. PARTEC2004, 2004, Germany
- 22 许向阳,朱永伟,王柏春. 纳米金刚石团聚体在白油介质中的解聚与分散. 矿冶工程,2004,24(4):61
- 23 Komarov V F. Ultradisperse diamonds in engineering industries: polishing. Tehnika Mashinostroeniya, 1997,(4):106
- 24 Chkhalo N I, Fedorchenko M V, Kruglyakov E P, et al. Ultradispersed diamond powders of detonation nature for polishing X-ray mirrors. Nucl Instrum Methods A, 1995,359(1-2):155
- 25 Dolmatov V Yu. Detonation synthesis ultradispersed diamonds: properties and applications. Rus Chem Rev, 2001,70(7):607
- 26 雒建斌,胡志孟,高峰,等. 中华人民共和国专利, CN1304968A. 2001
- 27 薛群基. 纳米摩擦材料及应用. 见:“工程科技论坛——纳米材料与技术”报告会,2000. 8
- 28 江贵长,官文超. 纳米润滑材料的研究与应用. 材料导报,1997,16(12):31
- 29 赵修臣,刘颖,余智勇. 纳米粒子作润滑油添加剂的研究与展望. 润滑与密封,2002,(6):80
- 30 Ouyang Q, Okada K. Nano-ball bearing of ultra-fine particles of cluster diamond. Appl Surf Sci, 1994,(78):309
- 31 Chepovetskii I Kh, et al. Effect of metal lubricants containing ultradisperse diamond on wear resistance elements. Sverkhv Mater, 1994,(3):62
- 32 Sakovich G V, Brylyakov P M, Verestchagin A L, et al. Production of diamond cluster by explosion and their application. Zhurnal Vses Khim Obschestva, 1990,35(5):600
- 33 Xu T, Zhao J Z, Xu K. The ball-bearing effect of diamond nanoparticles as an oil additive. Appl Phys, 1996,29(7):2932
- 34 Xu T, Xu K, Xue Q J, et al. Study on the tribological properties of ultradispersed diamond containing soot as an oil additive. Tribol Trans, 1997,40(1):178
- 35 沈明武,雒建斌,温诗铸. 材料工程学报,2001,37(1):14
- 36 张家玺,朱均,陈增凯,等. 纳米金刚石对内燃机缸套——活塞环摩擦学改性研究. 润滑与密封,1998,(4):27
- 37 张家玺,朱均. 内燃机磨合与表面改性研究. 摩擦学报,2001,21(1):59
- 38 张家玺,刘琨,胡献国. 纳米金刚石颗粒对发动机润滑油摩擦学性能的影响. 摩擦学报,2002,22(1):44
- 39 曲建俊,罗云霞. 含超细金刚石石墨粉润滑油摩擦磨损特性研究. 摩擦与润滑,1999,(3):29
- 40 乔玉林,徐滨士,马世宁,等. 含纳米金刚石复合润滑油添加剂的摩擦学性能. 石油炼制与化工,1999,30(3):12
- 41 Kamman D, Komarov V F. Use of core-and-shell and core ultradispersed diamond (nanodiamond) for strengthening, polishing, and lubricating. In: Intertech 2000, Vancouver, Canada. 2000
- 42 刘晓新,周刚,文潮,等. 纳米金刚石对橡胶改性的探索性实验研究. 见:王光祖. 纳米结构金刚石发展研讨会文集. 浙江杭州. 杭州高发磨料磨具集团公司,1999. 95

(责任编辑 林芳)

非水介质中纳米金刚石的改性、分散与应用

作者: [许向阳](#), [余志明](#), [朱永伟](#), [王柏春](#)

作者单位: [许向阳\(中南大学材料科学与工程学院, 长沙, 410083; 长沙矿冶研究院研究开发中心, 长沙, 410012\)](#), [余志明\(中南大学材料科学与工程学院, 长沙, 410083\)](#), [朱永伟, 王柏春\(长沙矿冶研究院研究开发中心, 长沙, 410012\)](#)

刊名: [材料导报](#) **ISTIC** **PKU**

英文刊名: [MATERIALS REVIEW](#)

年, 卷(期): 2004, 18(11)

被引用次数: 1次

参考文献(42条)

1. [查看详情](#)
2. [徐康, 金增寿 炸药爆轰纳米金刚石的制备和应用](#) [期刊论文] - [含能材料](#) 1993 (03)
3. [徐康, 金增寿 纳米金刚石制备方法的改进——水下连续爆炸法](#) [期刊论文] - [含能材料](#) 1996 (04)
4. [徐康, 薛群基 炸药爆炸法合成的纳米金刚石粉](#) [期刊论文] - [化学进展](#) 1997 (02)
5. [恽寿榕, 黄风雷, 马峰 超微金刚石-二十一世纪新材料](#) [期刊论文] - [世界科技研究与发展](#) 2000 (01)
6. [周刚, 文潮, 孙德玉 爆轰合成超分散金刚石的实验研究](#) [期刊论文] - [爆炸与冲击](#) 1999 (04)
7. [陈生玉, 陈增凯 纳米级金刚石系列产品的现状及展望](#) [期刊论文] - [宇航材料工艺](#) 1999 (02)
8. [陈权, 马峰, 恽寿榕 爆轰法合成超微金刚石的X射线衍射研究](#) 1999 (03)
9. [相英伟, 张晋远, 金成海 超细金刚石粉末的显微结构和热稳定性](#) 1999 (10)
10. [许向阳, 朱永伟, 王柏春 水介质中纳米金刚石表面改性研究](#) [期刊论文] - [中国粉体技术](#) 2003 (04)
11. [徐康, 金增寿 纳米金刚石粉制备方法的改进和解团聚问题的初步探讨](#) 1997
12. [陈鹏万 爆轰合成超微金刚石的机理及特性研究](#) [学位论文] 1999
13. [金增寿, 徐康 炸药爆轰法制备纳米金刚石](#) [期刊论文] - [含能材料](#) 1999 (01)
14. [胡志孟, 雒建斌, 温诗铸 纳米金刚石用作磁头抛光材料的研究](#) [期刊论文] - [材料保护](#) 2001 (12)
15. [王大志, 徐康, 贾云波 纳米金刚石及其稳定性](#) 1995 (03)
16. [ChenPW, Ding Y S, Chen Q Spherical nanometersized diamond obtained from detonation](#) 2000 (09)
17. [MironovE, Koretz A, Petrov E Detonation synthesis ultradispersed diamond structural properties investigation by infrared adsorption](#) 2002
18. [VoznyakovskiiAP, Gujimura T, Dolmatov V Yu Formatioan and stabilization of nanodiamond suspensions in liquid media](#) 2002 (06)
19. [VoznyakovskiiAP, Dolmatov V Yu, Klyubin V V Structure and sedimentation stability of suspensions of detonation nanodiamonds in nonaqueous liquid media](#) 2000 (02)
20. [XuXY, Zhu Y W, Wang B C Surface modification of nanodiamond in aqueous medium](#) [期刊论文] - [Trans of Nonferrous Metal Society of China](#) 2003 (06)
21. [ZhuYW, Xu X Y, Wang B C Surface modification and dispersion of nanodiamond in clean oil](#) 2004
22. [许向阳, 朱永伟, 王柏春 纳米金刚石团聚体在白油介质中的解聚与分散](#) [期刊论文] - [矿冶工程](#) 2004 (04)
23. [KomarovVF Ultradisperse diamonds in engineering industries](#) : 1997 (04)
24. [ChkhaloNI, Fedorchenko M V, Kruglyakov E P Ultradispersed diamond powders of detonation nature for polishing X-ray mirrors](#) [外文期刊] 1995 (1-2)
25. [DolmatovVYu Detonation synthesis ultradispersed diamonds: properties and applications](#) [外文期刊]

2001(07)

26. [雒建斌](#), [胡志孟](#), [高峰](#) [查看详情](#) 2001
27. [薛群基](#) [纳米摩擦材料及应用](#) 2000
28. [江贵长](#), [官文超](#) [纳米润滑材料的研究与应用](#) 1997(12)
29. [赵修臣](#), [刘颖](#), [余智勇](#) [纳米粒子作润滑油添加剂的研究与展望](#)[期刊论文]-[润滑与密封](#) 2002(06)
30. [OuyangQ](#), [Okada K](#) [Nano-ball bearing of ultra-fine particles of cluster diamond](#) 1994(78)
31. [ChepovetskiiKh](#) [Effect of metal lubricants containing ultradisperse diamond on wear resistance elements](#) 1994(03)
32. [SakovichGV](#), [Brylyakov P M](#), [Verestchagin A L](#) [Production of diamond cluster by explosion and their application](#) 1990(05)
33. [XUT](#), [Zhao J Z](#), [Xu K](#) [The ball-bearing effect of diamond nanoparticles as an oil additive](#)[外文期刊] 1996(07)
34. [XUT](#), [Xu K](#), [Xue Q J](#) [Study on the tribological properties of ultradispersed diamond containing soot as an oil additive](#) 1997(01)
35. [沈明武](#), [雒建斌](#), [温诗铸](#) [查看详情](#) 2001(01)
36. [张家玺](#), [朱均](#), [陈增凯](#) [纳米金刚石对内燃机缸套—活塞环摩擦学改性研究](#) 1998(04)
37. [张家玺](#), [朱均](#) [内燃机磨合与表面改性研究](#)[期刊论文]-[摩擦学学报](#) 2001(01)
38. [张家玺](#), [刘琨](#), [胡献国](#) [纳米金刚石颗粒对发动机润滑油摩擦学性能的影响](#)[期刊论文]-[摩擦学学报](#) 2002(01)
39. [曲建俊](#), [罗云霞](#) [含超细金刚石石墨粉润滑油摩擦磨损特性研究](#) 1999(03)
40. [乔玉林](#), [徐滨士](#), [马世宁](#) [含纳米金刚石复合润滑油添加剂的摩擦学性能](#) 1999(03)
41. [KammanD](#), [Komarov V F](#) [Use of core-and-shell and core ultradispersed diamond nanodiamondfor strengthening, polishing, and lubricating](#) 2000
42. [刘晓新](#), [周刚](#), [文潮](#) [纳米金刚石对橡胶改性的探索性实验研究](#) 1999

本文读者也读过(10条)

1. [田立朋](#), [朱贺](#), [TIAN Li-peng](#), [ZHU He](#) [纳米金刚石在水性介质中的分散研究](#)[期刊论文]-[中原工学院学报](#) 2007, 18(1)
2. [许向阳](#), [朱永伟](#), [王柏春](#), [沈湘黔](#) [水介质中纳米金刚石表面改性研究](#)[期刊论文]-[中国粉体技术](#)2003, 9(4)
3. [许向阳](#), [王柏春](#), [朱永伟](#), [沈湘黔](#), [谢圣中](#) [表面活性剂组合使用对纳米金刚石在水介质中分散行为的影响](#)[期刊论文]-[矿冶工程](#)2003, 23(3)
4. [王柏春](#), [朱永伟](#), [许向阳](#), [谢圣中](#) [纳米金刚石硬团聚体的超细粉碎机械化学解聚研究](#)[期刊论文]-[矿冶工程](#) 2003, 23(6)
5. [胡志孟](#), [Hu Zhimeng](#) [纳米金刚石在聚乙二醇中的摩擦学特性](#)[期刊论文]-[润滑与密封](#)2005(5)
6. [许向阳](#), [余志明](#), [刘学璋](#), [翟海军](#), [谢圣中](#), [王绍斌](#) [爆轰法纳米金刚石的表面性能研究](#)[会议论文]-2010
7. [许向阳](#), [朱永伟](#), [王柏春](#) [水基体系中纳米金刚石的解团聚研究](#)[会议论文]-2003
8. [倪龙兴](#), [姜永](#), [钟玉修](#) [纳米金刚石填料对光固化窝沟封闭剂渗透性的影响](#)[期刊论文]-[牙体牙髓牙周病学杂志](#) 2003, 13(8)
9. [张来祥](#), [韩云海](#), [谢洪波](#), [马学奎](#), [Zhang Laixiang](#), [Han Yunhai](#), [Xie Hongbo](#), [Ma Xuekui](#) [纳米金刚石/CaCO₃/PP复合材料制备及力学性能研究](#)[期刊论文]-[实验技术与管理](#)2009, 26(12)
10. [朱永伟](#), [王柏春](#), [陈立舫](#), [许向阳](#), [沈湘黔](#) [纳米金刚石的应用现状及发展前景](#)[期刊论文]-[材料导报](#)2002, 16(12)

引证文献(1条)

1. 田立朋, 朱贺 纳米金刚石在水性介质中的分散研究[期刊论文]-中原工学院学报 2007(1)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_cldb200411016.aspx