

一、 项目名称：

贝壳和翅膜的独特微结构和力学行为及其仿生应用

二、 推荐奖种/完成人：

国家自然科学基金二等奖/ 宋凡、白以龙

三、 推荐专家：

1. 魏悦广 北京大学，教授，学科专业：固体力学
2. 武晓雷 中国科学院力学研究所，研究员，学科专业：固体力学
3. 冷劲松 哈尔滨工业大学，教授，学科专业：复合材料力学

四、 专家推荐意见：

魏悦广：

本项目针对具有独特微结构的两类生物材料，研究了生物微结构的独特性及其导致的力学行为，并应用于指导工程陶瓷的微结构设计。主要成果包括：

1) 在国际上首次实验证明贝壳珍珠母有机基质界面层中存在矿物桥，并确定了矿物桥的结构特征和分布规律。

2) 率先确定了矿物桥对珍珠母力学性能的关键作用和规律，提出了珍珠母的矿物桥强韧性机制和“砖-桥-泥”结构新模型。

3) 国际上首创通过对陶瓷材料表面进行微结构仿生设计改性，提升陶瓷材料抗热震阻力的新方法。

八篇代表性论文 SCI 他引 428 次，包括 17 位国内外院士引用。本项工作是生物材料微结构与力学性能关联和仿生应用领域的一项产生了重要国际学术影响的、有实质性重要进展的成果。

武晓雷：

本项目针对贝壳珍珠母和昆虫翅膜两类生物材料，研究了其微结构的独特性及其导致的优异力学行为，并将其应用于指导现代高性能工程合成陶瓷材料的内部和表面微结构设计。主要成果包括：

1) 在国际上首次实验证明贝壳珍珠母有机基质界面层中，存在纳米尺度的矿物桥，并确定了矿物桥在有机基质层中的结构特征和分布规律。研究成果为先进材料的仿珍珠母微结构设计奠定了基础，

2) 率先确定了矿物桥对珍珠母优异力学性能的关键作用和规律，提出了珍

珠母强韧性的矿物桥机制；提出了珍珠母的“砖-桥-泥”结构模型。

3) 国际上首创通过对陶瓷材料表面微结构进行仿生设计改性，提升工程陶瓷材料整体抗热震阻力的新方法，为先进工程材料和结构的防热设计开辟了新思路。

鉴于本项成果的 8 篇代表性论文共被 SCI 重要刊物他人引用 428 次，引用者中包括 17 位国内外院士。本项研究是生物材料微结构与力学性能关联和仿生应用领域的一项产生了重要国际学术影响的、有实质性重要进展的成果。

冷劲松：

本项目针对具有独特内部和表面微结构的生物承载构件：贝壳珍珠母和昆虫翅膜两类生物材料，研究了微结构的独特性及其导致的优异力学行为，并将其应用于指导现代高性能工程合成陶瓷材料的内部和表面微结构设计。主要成果包括：1) 在国际上首次实验证明贝壳珍珠母有机基质界面层中，存在纳米尺度的矿物桥，并确定了矿物桥在有机基质层中的结构特征和分布规律。研究成果为先进材料的仿珍珠母微结构设计奠定了基础，同时也为贝壳珍珠母是通过矿物桥连续生长、而不是传统上认为的钙离子外延沉积生长这一生物矿化理论，提供了直接的实物证据。2) 率先确定了矿物桥对珍珠母优异力学性能的关键作用和规律，提出了珍珠母强韧性的矿物桥机制，该机制已成为目前国际公认的四种珍珠母强韧化机制之一；提出了珍珠母的“砖-桥-泥”结构模型，由此解释了传统仿珍珠母“砖-泥”结构的人工合成层状陶瓷材料，与珍珠母在强韧性上存在巨大差异的主要原因。3) 国际上首创通过对陶瓷材料表面微结构进行仿生设计改性，提升工程陶瓷材料整体抗热震阻力的新方法。本项成果为先进工程材料和结构的防热设计开辟了新思路。

鉴于本项成果的 8 篇代表性论文共被包括《Science》，《Nature Materials》和《Progress in Materials Science》等 SCI 重要刊物他人引用 428 次，引用者中包括 17 位国内外院士。因此，本项研究是生物材料微结构与力学性能关联和仿生应用领域的一项产生了重要国际学术影响的、有实质性重要进展的成果。

五、项目简介：

本项目探索新型材料力学行为，属固体力学与生物力学的交叉领域。生命物体在经历了长期的自然选择和进化后，所形成的独特微结构和相应的优异力学行为，为先进材料的仿生设计提供了新思路。本项目针对具有独特内部和表面微结构的生物承载构件：贝壳珍珠母和昆虫翅膜两类生物材料，研究了微结构的独特性及其导致的优异力学行为，并将其应用于指导现代高性能工程合成陶瓷材料

的内部和表面微结构设计。主要成果包括：

1) 在国际上首次实验证明贝壳珍珠母有机基质界面层中，存在纳米尺度的矿物桥，并确定了矿物桥在有机基质层中的结构特征和分布规律。研究成果为先进材料的仿珍珠母微结构设计奠定了基础，同时也为贝壳珍珠母是通过矿物桥连续生长、而不是传统上认为的钙离子外延沉积生长这一生物矿化理论，提供了直接的实物证据。三篇代表性论文被包括多位国内外院士在内的学者引用 200 余次，其中包括被美国布朗大学教授高华健（中国科学院外籍院士、美国工程院院士）和美国西北大学教授 H.D.Espinosa（俄罗斯工程科学院院士、欧洲科学院院士）等学者重点引用。

2) 率先确定了矿物桥对珍珠母优异力学性能的关键作用和规律，提出了珍珠母强韧性的矿物桥机制，该机制已成为目前国际公认的四种珍珠母强韧化机制之一；提出了珍珠母的“砖-桥-泥”结构模型，由此解释了传统仿珍珠母“砖-泥”结构的人工合成层状陶瓷材料，与珍珠母在强韧性上存在巨大差异的主要原因。该项研究成果为高强韧性先进工程材料的微结构设计提供了新的仿生模型。两篇代表性论文被 SCI 他人引用 200 余次，包括十二位国内外院士引用和评价。其中美国工程院和英国皇家工程院两院院士、美国 Lawrence Berkeley National Laboratory 的 R.O.Ritchie 教授等予以多次重点引用，其研究团队应用矿物桥机制研制出了超高强韧性合成材料。

3) 国际上首创通过对陶瓷材料表面微结构进行仿生设计改性，提升工程陶瓷材料整体抗热震阻力的新方法。本项成果为先进工程材料和结构的防热设计开辟了新思路。成果被国际著名刊物《Physical Review Focus》、《New Scientist》和《Focus》等迅速进行了专题报道，并收入 Springer 公司 2014 年出版的《Encyclopedia of Thermal Stresses》中，2015 年被选为国家自然科学基金委重大研究计划“近空间飞行器的关键基础科学问题”的重要进展之一。获得包括美国宾夕法尼亚大学教授 D.J.Green（世界陶瓷科学院院士，《J. Am. Ceram. Soc.》主编），哈尔滨工业大学韩杰才教授（中国科学院院士）和北京大学方岱宁教授（中国科学院院士）等多位中外学者的重点引用和评价。

鉴于“矿物桥使界面的连接性能增强，进而影响珍珠母的整体性能。”，“仿珍珠母微小无机晶片间的结构，被确认提高了断裂阻力。”，“在所有报道的方法中，表面改性方法已被证明是提高陶瓷热震阻力最有效的途径。”等客观评价，以及本项成果的 8 篇代表性论文共被包括《Science》、《Nature Materials》和《Progress in Materials Science》等 SCI 重要刊物他人引用 428 次，引用者中包括 17 位国内外院士。因此，本项研究是生物材料微结构与力学性能关联和仿生应用领域的一项产生了重要国际学术影响的、有实质性重要进展的成果。

六、客观评价：

(1) 巴西国家科学院院士、美国加州大学圣地亚哥分校 **M.A.Meyers 教授** 与其合作者在论文 (Progress in Materials Science, 2008, 53: 1-206.) 中对代表论文[1]和[6]的引用和评价：“宋等[123,124]报导了在晶片之间有大量的矿物桥的存在。矿物桥穿过多孔的有机层，并且在中部尤为集中。” ([123] Song F, *et al.* J.Mater.Res. 2002, 17:1567- 70 ; [124] Song F, *et al.* Biomaterials, 2003, 24:3623-3631.)

M.A.Meyers 教授和**新加坡工程院院士、新加坡国立大学 C.T.Lim 教授**与其合作者发表的论文 (Materials Science & Engineering C, 2009, 29: 2398-2410.) 中对代表性论文[1]和[6]的引用和评价：“宋等[28,29]实验发现在相邻层之间源于次表层晶片并延伸穿过有机基质的桥，证实了矿物桥的存在。”；“在宋等[28,29]测量结果的基础上，Meyers 等[27]估算出矿物桥的抗拉强度和数量，由此可能估算椎体（珍珠母）的断裂阻力。”；（[28] Song F, *et al.* J. Mater. Res. 2002, 17:1567-1570. [29] Song F *et al.* Biomaterials, 2003, 24: 3623-3631.）

(2) 日本学者、大阪大学 **N.Ueyama 教授**与其合作者在论文 (Chem. Commun., 2004, 8:996 -997.) 中对代表论文[6]的引用和评价：“宋等报道了矿物桥，它从一块文石砖穿过基质片层到达另一块文石¹⁰，他们提出了一个稍有缠绕的“砖-桥-泥”珍珠母结构，我们的 FE/TEM 分析结果支持在生物聚合物基质片层中矿物桥的存在。”（10. Song F, *et al.* J. Mater. Res. 2002, 17:1567-1570.）

(3) 中国科学院院士、中科院物理研究所汪卫华研究员对代表论文[3]的引用和评价 (Progress in Materials Science, 2012. 57: 487-656.)：“在含有大量裂纹的材料中，弹性模量与泊松比的关系作为裂纹密度的函数被给出[535,536]。对天然层状陶瓷的负泊松比效应进行研究，结果表明负泊松比效应使天然层状陶瓷具有良好的能量吸收性能，并使单位体积的体积应变能增加 1100%，变形应变能减少 44%。负泊松比效应使天然层状陶瓷在受拉的情况下抵抗变形的能力增加了一个数量级 [536]。”（[536] Song F, *et al.* Phys. Rev. Lett. 2008;100:245502.）

(4) 俄罗斯工程科学院院士、欧洲科学院院士、美国西北大学 **H.D.Espinosa 教授**与其合作者发表的论文(J.Mech.Phys.Solids, 2007, 55:306-337) 中对代表论文[7]和[8]的引用和评价：“局部硬化的另一个来源，在文献(Song and Bai, 2003)中提出，是由于横穿界面的矿物桥的存在”；“这是一种可能的珍珠母拉伸失效机制，在这一点上，有趣地注意到矿物桥看来集中于晶片的中央 (Song *et al.*, 2002)，而且不影响滑移区界面，它们可能增强核心区域并防止晶片脱层。”；“由此而论，值得注意的是纳米尺度的矿物桥，集中于晶片中央

(Song and Bai, 2002), 提供了在核心区域界面的必要拉伸强度。”(Song F, *et al.* J. Mater. Sci. Lett., 2002, 21:639-641.; Song F and Bai YL. J.Mater.Res. 2003, 18:1741-4.)

H.D.Espinosa 教授与其合作者在论文 (Progress in Materials Science, 2009. 54:1059-1100.) 对代表论文[8]的引用和评价: “界面处的第三个纳米级机制与文石矿物桥相关, 矿物桥使界面的连接性能增强, 进而影响珍珠母的整体性能 [46]。”; “因为这种机制是由晶片之间的界面所控制, 所以大量工作已聚焦于研究晶片之间的纳米尺度机制[17, 44-47]。” ([46] Song F, Bai YL. J.Mater.Res. 2003,18:1741-4.)

(5) 中国科学院外籍院士、美国工程院院士、美国布朗大学高华健教授与其合作者对代表性论文[8]的引用和评价 (J. Mech. Phys. Solids, 2012, 60:1400-1419): “实验 (Song et al., 2003; Barthelat and Espinosa,2007) 证明, 随着外部作用力的增加, 微孔将首先在初始无缺陷的有机相形成, 先于初始裂纹尖端。” (Song F, Bai YL, J. Mater. Res. 2003, 18:1741-1744.)

(6) 美国 Oak Bridge National Laboratory 著名学者 P.K.V.V. Nukala 教授与其合作者对代表性论文 [1] 的引用和评价 (Biomaterials, 2005, 26:6087-6098.): “宋等[15][16]提出文石晶片间矿物桥的存在结合有机聚合物胶质的模量损伤演化是导致珍珠母杰出韧性的主要机制。” ([15] Song F and Bai YL. J.Mater.Res. 2003, 18:1741-4.; [16] Song F, *et. al.* Biomaterials, 2003, 24, 3623-3631.)

(7) 美国工程院院士、英国皇家工程院院士、美国 Lawrence Berkeley National Laboratory 的 R.O.Ritchie 教授与其合作者在多篇国际著名期刊上对代表性论文[1]的引用和评价: 1) (Science, 2008, 322: 1516-1220.) “...层间纳米粗糙度的阻力(10), 在纳米尺度文石的塑性变形(11), 扮演粘弹性胶作用的有基层(12), 和矿物桥的存在(2,13) —— 所导致的韧性是显著的。” ((13) Song F, *et. al.* Biomaterials, 2003, 24, 3623-3631.); 2) (Adv. Mater., 2009, 21: 2103 -2110.): “提出的模型包括(i)..., (ii)..., (iii)..., 和(iv)在微米尺度上, 存在于矿物层间的文石矿物桥的破坏 [22,29]。” ([29] Song F, *et al.* Biomaterials, 2003, 24, 3623-3631.); 3) (Nature Materials, 2015, 14(1): 23-36.) “...晶片的纳米粗糙度造成的滑移阻力²⁶, 文石在纳米尺度的塑性变²⁷, 晶片间的有机层起到的黏弹性连作用²⁸, 矿物桥的存在^{13,29}, 以及对某些特定的珍珠母在微观尺度下晶片的交错叠加³⁰。”(29. Song F, *et. al.* Biomaterials, 2003, 24, 3623- 3631.)

(8) 美国 Lawrence Berkeley National Laboratory 材料学家 A.P. Tomsia 教授与其合作者对代表性论文[1]的引用和评价 (Science, 2006, 311: 515-518.):

“最后，一些枝状晶跨过层间的通道，即仿珍珠母微小无机晶片间的结构，这种结构被确认提高了断裂阻力(17)。” ((17) Song F, *et al.* Biomaterials, 2003, 24, 3623–3631.)

(9) 美国麻省理工学院 L.J.Gibson 教授与其合作者对代表论文[4]和[5]的引用和评价 (Journal of Insect Physiology, 2015, 74:10-15.)：“纳米压痕可以在单次测试中获得模量和硬度，并且在评价大量昆虫翼膜的力学性能中获得成功。宋等发现蝉(Magicicada)和蜻蜓(Libellula basilinea McLachlan)翼的平均杨氏模量分别为 3.72 ± 0.33 GPa 和 2.85 ± 0.23 GPa (mean \pm s.d.)，而硬度值分别为 0.21 ± 0.72 GPa 和 0.14 ± 0.04 GPa (Song et al., 2004, 2007)”；“由于翼层间结构和成分的差异，每一层展现出不同的力学性能是可能的。的确，在压痕测试中，宋等(2004)证明材料参数 P/S2 (这里 P 为压头压力，S 为接触刚度)随着压痕深度增加，他们将这种效应归因于基底与翼膜的粘合。”；“虽然由于失水导致力学性能发生变化，宋等(2007)发现在活的与死的翼膜的模量相差 4%、硬度相差 29%；在这种情况下，活的与死的翅膀的平均值属于标准误差范围内。” (Song F. *et al.* J. Exp. Biol. 2004, 207:3035–3042.; Song F. *et al.* Mater. Sci. Eng. A, 2007, 457:254–260.)

(10) 中国科学院院士、吉林大学任露泉教授与其合作者对代表性论文[5]的引用和评价 (Science China - Technological Sciences, 2013, 56:884-897.)：“蜻蜓翅膀的膜分为三层。...在飞行中，这种结构可以提高膜的抗弯曲和抗扭曲性能，同时使翼细胞能够沿各个方向抵抗荷载，进而使蜻蜓在飞行过程中保持稳定[70, 71]。”，“蜻蜓的翅膀可以保持良好的疏水性，在雨滴的强烈冲击下仍能保证蜻蜓的飞行能力（如图 9c[73]和 d[71]）。” ([71] Song F, *et al.* Mater. Sci. Eng. 2007, 457:254–260.)

(11) 世界陶瓷科学院院士，《Journal of the American Ceramic Society》主编、美国宾夕法尼亚大学教授 D.J.Green 在《Physical Review Focus》(2 April, 2010, 25:12) 中对代表性论文[8]的成果评价：“这项实验发现是‘非凡的’(‘remarkable’)”。

(12) 中国科学院院士、哈尔滨工业大学韩杰才教授及其合作者对代表论文[2]的引用和评价 (J.Mater.Chem.A, 2015 3:2199-2206.)：“最近，宋等证明通过表面改性在表面引入一层薄空气层将提高热震阻力。总之，在所有报道的方法中，表面改性方法已被证明是提高陶瓷热震阻力最有效的途径¹¹。” (11. Song F, *et al.* Phys. Rev. Lett. 2010, 104:125502.)

(13) 中国科学院院士、北京大学方岱宁教授及其合作者对代表论文[2]的引用和评价 (Materials & Design, 2012, 37: 211-214.)：“宋等通过仿生纳米肋提高陶瓷

抗热震阻力，该方法已被证明非常有效[16]。”（[16] Song F, *et al.* Phys. Rev. Lett. 2010, 104:125502.）

七、代表性论文专著目录

序号	论文专著 名称/刊名 /作者	影响 因子	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表 时间 年月 日	通讯 作者	第一 作者	国内作 者	SCI 他引 次数	他 引 总 次 数	知识 产权 是否 归国 内所 有
1	Structural and mechanical properties of the organic matrix layers of nacre/Biomaterials/ F. Song, A.K. Soh, and Y.L. Bai	8.387	2003 年, 24 卷, 3623-3631 页	SEP 2003	Soh AK	Song F	Song F., Bai YL.	163	227	是
2	Enhanced thermal shock resistance of ceramics through biomimetically inspired nanofins/Physical Review Letters/ F. Song, S.H. Meng, X.H. Xu, and Y.F. Shao	7.645	2010 年, 104 卷, 125502 页	MAR 26 2010	Song F	Song F	Song F., Meng SH., Xu XH., Shao YF.	30	41	是
3	Effect of a negative Poisson ratio in the tension of ceramics/Physical Review Letters/ F. Song, J.B. Zhou, X.H. Xu, Y. Xu, and Y.L. Bai	7.645	2008 年, 100 卷, 245502 页	JUN 20 2008	Song F	Song F	Song, F., Zhou JB., Xu XH., Xu Y., Bai YL.	35	42	是

4	Microstructure and nanomechanical properties of the wing membrane of dragonfly/Materials Science & Engineering A/ F. Song, K.W. Xiao, K. Bai, and Y.L. Bai	2.647	2007 年, 457 卷, 254-260 页	MAY 25 2007	Song F	Song F	Song, F., Xiao KW., Bai K., Bai YL.	61	73	是
5	Experimental studies of the material properties of the forewing of cicada (Homóptera, Cicádidae)/Journal of Experimental Biology/ F. Song, K.L. Lee, A.K. Soh, F. Zhu and Y.L. Bai	2.914	2004 年, 207 卷, 3035-3042 页	AUG 2004	Soh AK	Song F	Song, F., Lee KL., Zhu F., Bai YL.	31	58	是
6	Microstructure and Characteristics in the Organic Matrix Layers of Nacre/Journal of Materials Research/ F. Song, X.H. Zhang, and Y.L. Bai	1.579	2002 年, 17 卷, 1567-1570 页	JUL 2002	Song F	Song F	Song, F., Zhang XH., Bai YL.	43	81	是
7	Microstructure in a biointerface/Journal of Materials Science Letters/ F. Song, X.H. Zhang, and Y.L. Bai	2.302	2002 年, 21 卷, 639-641 页	APR 15 2002	Song F	Song F	Song F., Zhang XH., Bai YL.	10	21	是

8	Effects of Nanostructures on the Fracture Strength of the Interfaces in Nacre/Journal of Materials Research/ F. Song and Y.L. Bai	1.579	2003 年, 18 卷, 1741-1744 页	AUG 2003	Song F	Song F	Song, F. Bai YL.	55	81	是
合 计								428	624	

八、主要完成人情况

宋凡：第一完成人，研究员，中国科学院力学研究所

对本项目主要学术贡献：从研究项目的选题、实验方案制定、解决关键实验技术问题、理论建模、模型计算、结果分析，到项目申请、撰写研究论文等，全程负责并参与所有研究工作。包括对本项目所有《重要科学发现》（（1）-（5））的主要贡献，是本项目 8 篇代表性论文的第 1 作者和其中 6 篇论文的通讯作者。

白以龙：第二完成人，研究员/院士，中国科学院力学研究所

对本项目主要学术贡献：

本项目从选题、实验方案制定、解决关键实验技术问题、理论建模、模型计算、结果分析，到项目申请、撰写研究论文等所有研究工作全程参与。包括对本项目所有《重要科学发现》（（1）-（5））的贡献，在本项目 8 篇代表性论文中是其中 7 篇论文的合作者。

九、完成人合作关系说明

从 1997 年 9 月至 2000 年 12 月，第一完成人作为第二完成人的博士后，在其指导下开始展开珍珠母微结构及其力学行为的研究；2001 年 1 月至 2005 年 5 月，第一完成人作为第二完成人研究团队的成员，对珍珠母和昆虫翼的微结构及其力学行为展开合作研究；从 2005 年 5 月至今，第一完成人研究小组与第二完成人研究团队合作，共同研究生物材料及其力学行为。