

贝氏体钢在轴承中的应用进展

雷建中¹⁾ 杨志南^{2),3)} 张福成^{2),3)}

1)(洛阳轴研科技股份有限公司)

2)(燕山大学 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室)

3)(燕山大学 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心)

摘要：从常规贝氏体轴承用钢的发展和纳米贝氏体轴承用钢两方面阐述了国内外贝氏体钢在轴承中应用的研究进展，重点介绍了纳米贝氏体钢在轴承中应用的研究成果。贝氏体轴承钢作为第二代轴承用钢，近年来在新钢种开发和应用上都有长足发展。而纳米贝氏体钢比常规下贝氏体钢具有更高的强度和韧性，具有更优异的滚动接触疲劳性能，使其具有广阔的应用前景。我国新研发纳米贝氏体轴承用钢纳入国家标准和行业标准中，进一步推动了纳米贝氏体轴承用钢的发展。

关键词：轴承钢；贝氏体；纳米结构；应用

轴承是保障机械设备平稳、安全运行的关键零部件。提高轴承使用性能和服役寿命，不仅是轴承设计者和制造者，更是材料研究者近年来重点所关注的问题。传统马氏体轴承具有较高的耐磨性和抗滚动接触疲劳性能，得到广泛的应用。然而，马氏体轴承韧性低，传统高碳铬轴承钢在马氏体淬火时表面形成残余拉应力，氢脆敏感性高，当轴承承受冲击载荷或使用环境恶劣时，马氏体轴承的使用寿命大幅降低[1]。因此，开发新一代高性能轴承钢具有非常重要的意义。贝氏体钢，作为第二代轴承用钢，以其比马氏体轴承钢高的韧性，表面残余压应力等优异的性能，近年来取得了长足发展[2, 3]。新开发的纳米贝氏体钢，在保留与相同碳含量马氏体相当硬度的同时，兼具更高的韧性，优异耐磨性和滚动接触疲劳性能 [4]，因而具有巨大的应用潜力。本文作者对国内外贝氏体轴承钢的发展及纳米贝氏体钢在轴承领域的研究进展及其应用潜力进行阐述。

1 国内外常规贝氏体轴承用钢的发展

直到二十世纪五十年代，研究人员开始传统高碳铬轴承钢贝氏体等温淬火技术的研

究，将其处理成下贝氏体组织。与低温回火马氏体组织相比，尽管其硬度略低，但是其韧性可以达到低温回火马氏体组织的 3 倍[2]，同时与相同温度回火处理的马氏体轴承相比，下贝氏体轴承具有更好的耐磨性、且表面处于压应力状态，有助于阻碍疲劳裂纹扩展，以及可实现无裂纹淬火等优点，因此很快率先在轧机轴承和铁路轴承上得到应用。随后的研究中发现下贝氏体轴承比马氏体轴承更适合于应用到恶劣的、润滑不良的环境。

近年来，国外贝氏体轴承用钢发展迅速，从最初的 100Cr6 轴承钢，现如今已经发展了多种用于贝氏体等温淬火处理的钢种，具体成分见表 1 [5, 6]。世界著名轴承制造企业，德国 FAG、瑞典 SKF、日本 NSK 等早已成功将贝氏体等温淬火工艺应用到铁路、汽车、轧机、矿山机械等受冲击载荷和润滑不良的轴承上。现在，国外轴承企业生产的高铁轴承也采用了 100Cr6 轴承钢贝氏体等温淬火工艺。

表 1 国外主要贝氏体轴承用钢平均化学成分（质量分数，%） [5, 6]

钢号	C	Si	Mn	Cr	Mo	S _{max}	P _{max}
100Cr6	0.97	0.25	0.35	1.50	-	0.025	0.030
100CrMo7	0.97	0.30	0.30	1.80	0.20	0.025	0.030
100CrMo7-3	0.97	0.30	0.70	1.80	0.30	0.025	0.030
100CrMo7-4	0.97	0.35	0.70	1.80	0.45	0.025	0.030
100CrMnMo8	0.97	0.50	0.90	1.90	0.55	0.025	0.030

我国在上世纪八十年代开始对轴承的贝氏体处理展开研究。1985 年，洛阳轴承研究所与重庆轴承总厂合作，证明了贝氏体轴承比马氏体轴承更适合于应用到铁路货车上 [7]，据此原铁道部规定：机车轴承套圈必须进行贝氏体淬火处理。1991 年，大连轴承厂开始将等温淬火技术应用到 42330、42426 型机车轴承上，并取得了良好的效果 [8]。随后研究人员发现传统高碳铬轴承钢不能充分发挥贝氏体淬火工艺的全部优点，逐渐开始了适合贝氏体淬火的新型轴承钢研究，如 GCr18Mo 钢、GCr15SiMo 钢、ZWZ12 和 ZWZ14 钢等。1997 年 6 月以后，国内铁路机车轴承开始全面采用贝氏体淬火的 GCr18Mo 钢 [9]。

2 纳米贝氏体轴承用钢

2002 年，英国剑桥大学 Harry Bhadeshia 教授团队开发了硬贝氏体钢 [10]，他们将高碳、高硅钢在低温下等温转变，获得的由纳米尺度贝氏体铁素体板条和板条间的富碳残余奥氏体薄膜组成的组织，称为硬贝氏体组织，如图 1，其硬度接近碳含量相当的马氏体的硬度，极限抗拉强度可以达到甚至超过 2.3GPa，断裂韧性可达 40MPa·m^{1/2}。这种钢从组织尺寸角度也可称为纳米贝氏体钢。

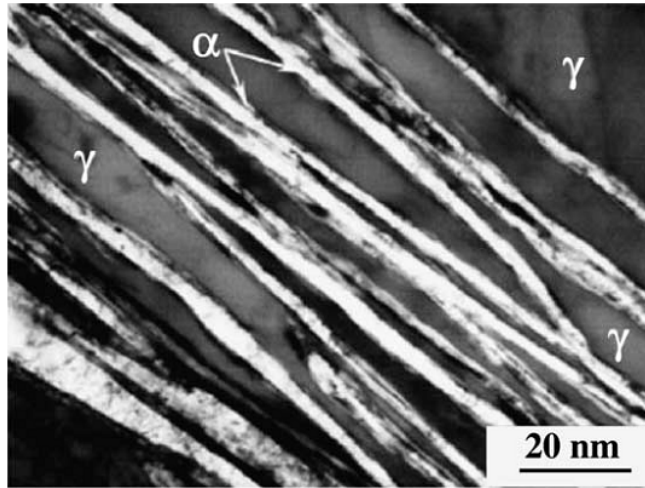


图1 高碳高硅钢在 200°C 等温 15 天获得的纳米贝氏体组织[10]

近年来，材料研究者和轴承生产企业意识到纳米贝氏体钢拥有在轴承上应用的巨大潜力，瑞典 SKF 公司与 Harry Bhardeshia 教授的团队合作，于 2009 年在剑桥大学设立技术研究中心，其目的之一就是开发新一代的轴承用钢及其制备技术 [11]。

我国在 2005 年开始针对纳米贝氏体钢开展研究。燕山大学张福成等人研究发现 Al 元素具有降低材料氢脆敏感性的作用 [12, 13]，有利于轴承在受潮环境下的应用，结合 Al 元素有效促进贝氏体相变、抑制碳化物析出等有利效果，近年来相继开发了多种性能优异的含铝纳米贝氏体轴承用钢 [14-19]。2008 年，张福成等人在国内外率先开发了表面为高碳纳米贝氏体而心部为低碳马氏体组织的含硅铝渗碳钢及其制造技术 [14]，表层组织结构如图 2 所示，成分如表 2 所示。在同样的接触应力下，这种纳米贝氏体钢的滚动接触疲劳寿命比马氏体渗碳钢提高一倍以上 [15]。Harry Bhadeshia 教授在综述性文章《Steels for Bearings》中高度赞誉这项技术，认为它推动了渗碳硬化技术的发展 [4]。

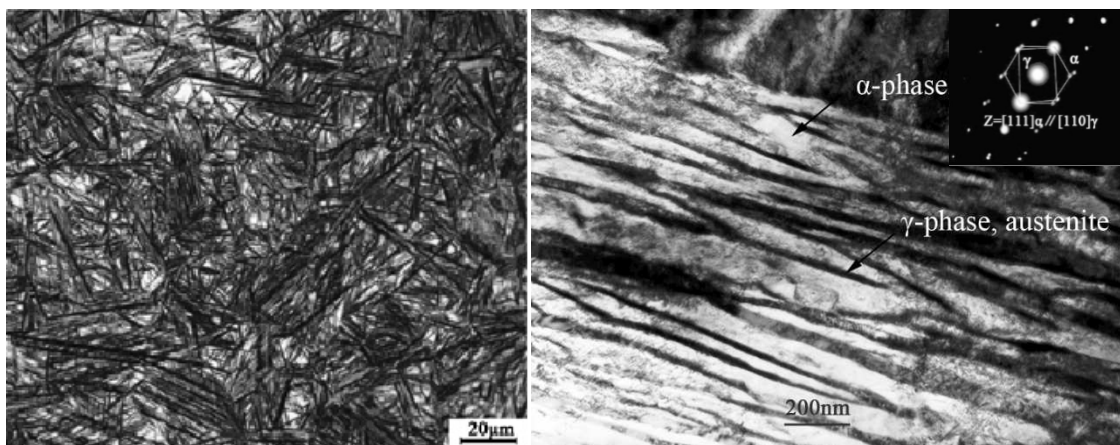


图2 20CrMnMoSiAl 纳米贝氏体渗碳钢表层的金相组织照片（左）和透射下组织照片（右）

表 2 燕山大学张福成教授团队研发纳米贝氏体轴承用钢的化学成分（质量分数，%）

钢号	C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	S _{max}	P _{max}
20CrMnMoSiAl	0.21	0.46	1.20	1.35	0.26	0.95	0010	0.015
G23Cr2Ni2Si1Mo	0.20~	1.20~	0.20~	1.35~	0.25~	≤0.05	0.010	0.015
	0.25	1.50	0.40	1.75	0.35			
G23Cr2Ni2SiMoAl	0.20~	0.90~	0.20~	1.35~	0.25~	0.30~	0.010	0.015
	0.25	1.20	0.40	1.75	0.35	0.50		
GCr15SiAl	1.15	0.58	0.21	1.42	-	0.65	0.010	0.015
GCr15SiMoAl	0.90~	0.30~	--	1.50~	0.15~	0.80~	0.010	0.015
	1.10	0.60		1.80	0.25	1.20		
GCr15SiMoAl-1	0.95~	0.60~	0.20~	1.45~	0.25~	0.40~	0.010	0.015
	1.15	0.90	0.40	1.75	0.35	1.00		
GCr15Si1Mo	0.95	1.20~	0.20~	1.40	0.30	≤0.05	0.010	0.015
	1.05	1.50	0.40	1.70	0.40			

近几年，张福成等人又开发出两种纳米贝氏体轴承用钢，其一为，G23Cr2Ni2Si1Mo 渗碳轴承钢，材料经低温等温处理后表层组织形貌如图 3 左图[19]，平均贝氏体铁素体板条厚度为 68nm；这种钢具有比传统 G20Cr2Ni4A 钢更优异的滚动接触疲劳性能，如图 4，经过等温处理后心部低碳马氏体组织的韧性较油淬处理提高 33%。其二为 GCr15Si1Mo 高碳轴承钢，热处理后纳米贝氏体组织如图 3 右图所示，其滚动接触疲劳寿命显著优于 GCr15SiMo 钢，如图 4 所示。洛阳 LYC 轴承有限公司采用这两种材料制造出 6MW 风电主轴轴承，外形尺寸达 3200mm，是目前国内最大的风电机组主轴轴承，其中 G23Cr2Ni2Si1Mo 钢用于制造轴承圈，GCr15Si1Mo 钢用于制造轴承滚动体。现在，这两种钢成功纳入到我国新修订的标准《GB/T 3203 渗碳轴承钢》和新制定冶金行业标准《YB/Txx 轴承钢 辗轧环件及毛坯》中，受到了国内各大特钢厂和轴承制造企业的关注，预计将有广阔的市场前景。

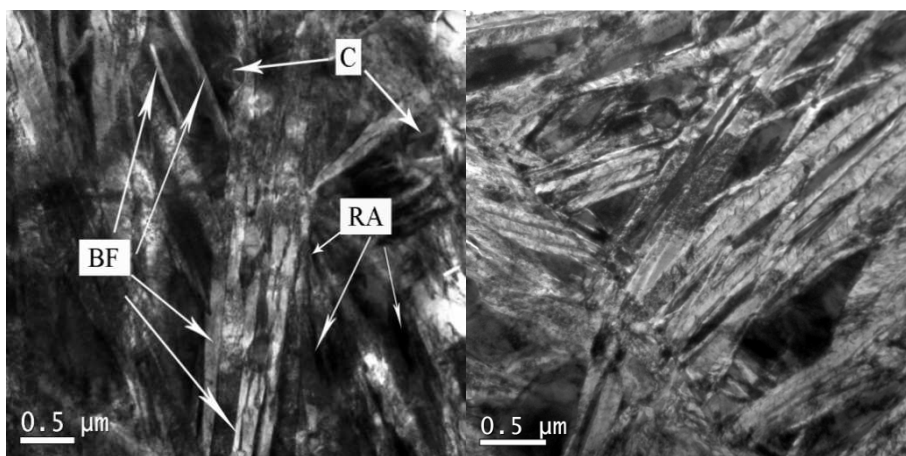


图 3 G23Cr2Ni2Si1Mo 钢渗碳热处理后表层纳米贝氏体组织（左）和 GCr15Si1Mo 纳米贝氏体组织（右）

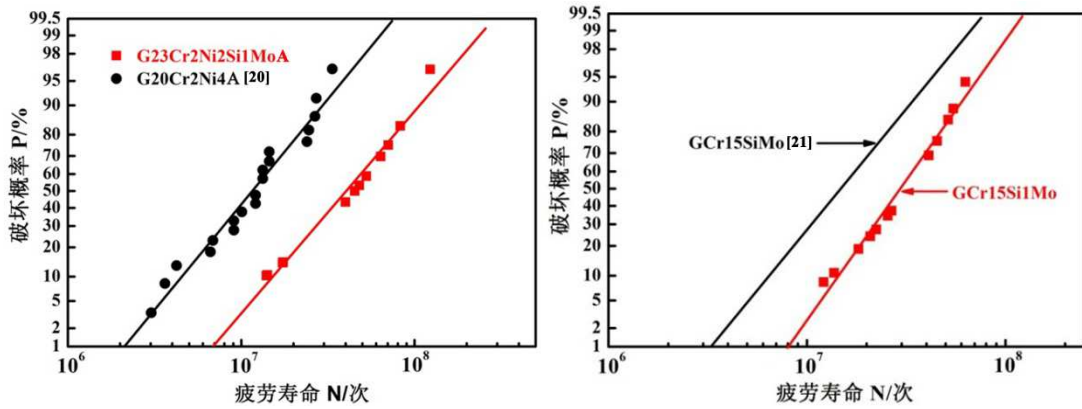


图 4 接触疲劳寿命对比

2014 年, Harry Bhadeshia 等人通过对滚动接触疲劳机理的研究, 进一步证明了纳米贝氏体组织在滚动轴承上应用的可行性[22]; 同时, 他们发现纳米贝氏体轴承钢在滚动接触疲劳过程中, 组织中的块状残余奥氏体容易转变为马氏体, 在与贝氏体铁素体的相界面处形成微裂纹, 而在微裂纹附近的薄膜状残余奥氏体则非常稳定。因此控制纳米贝氏体组织中残余奥氏体的形态, 消除块状残余奥氏体, 进一步提高残余奥氏体的稳定性可以保证轴承在服役过程中的尺寸稳定性, 这是纳米贝氏体轴承用钢值得研究的重点内容之一。柳永宁等人也进一步证明了在保证硬度的前提下, 纳米贝氏体组织有利于提高材料的滚动接触疲劳寿命[23]。

对于热处理工艺, 纳米贝氏体轴承用钢的主要特点是等温温度更低, 所以需要等温时间较长, 无疑增加了轴承的制造成本; 如何通过合金元素的合理调整, 结合热处理工艺的调整, 缩短纳米贝氏体组织的制备周期, 是材料学者值得研究的问题。

3 结束语

随着我国工业的高速发展, 以及国家重大战略“中国制造 2025”的启动, 作为机械装备中最为关键的基础零部件之一, 高端轴承及其制造技术的开发具有重要的意义。贝氏体轴承用钢以其比马氏体轴承用钢更高的韧性和有利的表面残余压应力, 已经逐渐替代马氏体轴承钢被用于高铁、盾构机等轴承的制造中。纳米贝氏体钢组织中细小的组织结构, 高稳定性的残余奥氏体, 保障了纳米贝氏体钢的高强韧性、优异的耐磨损性能和抗滚动接触疲劳性能, 因此, 纳米贝氏体轴承用钢具有广阔的应用前景。新研发纳米贝氏体轴承用钢纳入国家标准和行业标准中, 将进一步推动纳米贝氏体轴承用钢的发展。

致谢: 本论文得到国家 863 项目(2012AA03A504)和国家自然科学基金项目(51471146)支持, 在此表示感谢。

* 雷建中：硕士，教授级高级工程师，洛阳轴研科技股份有限公司技术中心副主任

参考文献：

- [1] 张增歧, 常保良, 梁华, 等. 轴承, 1998 (2): 24-28.
- [2] 张增歧, 刘耀中, 樊志强. 材料热处理学报, 2003, 23: 57-60.
- [3] 江涛, 梅亚莉, 雷建忠, 等. 轴承, 1998 (3): 15-18.
- [4] Bhadeshia H K D H. Prog. in Mater. Sci., 2012, 57: 268-435.
- [5] Sourmail T, Smanio V. Acta Mater. 2013, 61: 2639-2648.
- [6] Steels for bearing production from Ovako. [http://www.ovako.com/Global/Downloads/Product information/Ovako_Group/EN/Steels%20for%20Bearings%20from%20Ovako.pdf](http://www.ovako.com/Global/Downloads/Product%20information/Ovako_Group/EN/Steels%20for%20Bearings%20from%20Ovako.pdf).
- [7] 刘耀中, 江涛. 轴承, 1994 (9): 32-36.
- [8] 宋广顺, 葛继平, 戴雅康. 机车车辆工艺, 1995, 5: 1-5.
- [9] 赵艳英. 内燃机车, 2001 (1): 28-32.
- [10] Caballero F G, Bhadeshia H K D H, Mawella K J A, et al. Mater. Sci.Tech. 2002, 18: 279-284.
- [11] SKF University Technology Centre, <http://www.msm.cam.ac.uk/skf/index.html>.
- [12] 闫志刚, 张福成, 张朋, 等. 机械工程材料, 2012, 36: 31-35.
- [13] Li Y G, Chen C, Zhang F C. Ad. Mater. Sci. Eng., 2013, 382: 6-13.
- [14] Zhang F C, Wang T S, Zhang P, et al. Script. Mater., 2008, 59: 294-296.
- [15] Zhang P, Zhang F C, Yan Z G, et al. Mater. Sci. Forum, 2011, 675-677: 585-588.
- [16] 张福成, 王天生, 杨志南, 等. 中国 ZL 201210399526.2.
- [17] Zhao J, Wang T S, Lv B, et al. Mater. Sci. Eng. A, 2015, 628: 327-331.
- [18] Zhao J, Zhao T, Hou C S, et al. Materials and Design, 2015, 86: 215-220.
- [19] Wang Y H, Yang Z N, Zhang F C, et al. Mater. Sci. Eng. A., 2016, in press.
- [20] 吴祥民, 杨玉模, 董玉雪, 等. 轴承, 2001(7): 29-30.
- [21] 闫光成, 叶健熠. 轴承, 2006(9): 21-22, 46.
- [22] Solano-Alvarez W, Pickering E J, Bhadeshia H K D H. Mater. Sci. Eng. A, 2014, 617: 156-164.
- [23] Liu H J, Sun J J, Jiang T, et al. Script. Mater. 2014, 90-91: 17-20.