



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Manufacturing—Review

高性能纳米贝氏体轴承用钢发展与展望

张福成^{a,b,*}, 杨志南^{b,*}

^a State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

^b National Engineering Research Center For Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 June 2018

Revised 8 October 2018

Accepted 7 November 2018

Available online 21 February 2019

关键词

轴承钢

纳米贝氏体

发展

应用

展望

摘要

轴承是几乎所有机械设备中最关键的零部件，能确保设备平稳运行，这对于高端装备尤为重要，如高速铁路客车和盾构机械等。随着技术的快速发展，对轴承质量的要求不断提高。轴承的制造水平直接反映一个国家钢铁冶金以及机械制造的水平。轴承钢的性能是决定轴承质量的关键因素。因此，开发更优异性能的轴承钢是材料研究领域与机械制造行业所共同追求的目标。国内外著名的轴承制造企业竞相开发新型轴承用钢。纳米贝氏体轴承钢是一类新开发的轴承钢，不仅具有高的强韧性，同时也表现出优异的耐磨性与抗滚动接触疲劳性能。近年来，中国学者在纳米贝氏体轴承钢方面的研究成果显著推动了这一领域的发展。在中国，纳米贝氏体轴承钢最先被用来制造大功率风电主轴轴承及其他重载轴承，表现出了优异的性能。因此，纳米贝氏体轴承钢和相关热处理技术首次被纳入国家标准和行业标准中。轴承行业认为纳米贝氏体轴承钢的开发具有划时代的意义，并称这种轴承为“第二代贝氏体轴承”。本文详细综述了纳米贝氏体轴承钢的发展，包括其优点和不足，并提出了下一步的研究方向。

© 2019 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

装备制造业通常是一个国家的战略性产业，体现一个国家制造业的核心竞争力。轴承是几乎所有机械设备中最关键的零部件，确保设备平稳运行。因此，轴承在快速发展的中国高端装备制造业中起着至关重要的作用。随着中国工业的快速发展，以及《中国制造2025》的全面推进，对轴承的要求变得愈加严苛，如长寿命、高转速、高稳定性。因此，在多项“十三五”发展规划中，如《钢铁工业调整升级规划（2016—2020年）》《装备制造业标准化和质量提升规划》，均明确指出要重点、优先发展高端轴承。

中国有近1400家轴承制造企业，包括洛阳LYC轴承有限公司、瓦房店轴承集团有限责任公司、哈尔滨轴承集团公司、上海人本轴承有限公司、浙江天马轴承集团有限公司等。在轴承销售量和产量方面，中国已经成为世界上最大的轴承制造国之一[1]。据统计，2017年1—11月，中国主要的122家轴承制造企业的轴承产量达到 4.758×10^9 套。然而，低端和中端轴承仍为主流产品；大部分高端轴承仍然依赖进口。中国高铁的制造水平已经达到世界领先水平，如图1(a)所示。然而，高速铁路客车用的关键轴承仍为进口。同样，在其他装备中的高端轴承也存在类似现象，如掘进机[2][图1(b)]、大功率风电机组主轴轴承等。这一短板极大地拖延了中国高

* Corresponding author.

E-mail address: zfc@ysu.edu.cn (F. Zhang), zhinanyang@ysu.edu.cn (Z. Yang).

[†] These authors contributed equally to this work.

端装备的国产化进程。

材料是所有零件的基础。因此，为了获得高质量的轴承，必须首先要考虑轴承钢的质量和性能。轴承钢的性能直接影响轴承的使用性能。因此，提高轴承钢的性能是材料研究者和轴承制造企业共同关注的目标之一。2009年，SKF公司与剑桥大学合作成立研究中心，其目的之一就是构思下一代的轴承用钢[3]。中心的主任为Harry Bhadeshia爵士，他与Caballero教授共同开发了纳米贝氏体钢[4]。这表明，世界著名轴承制造企业SKF意识到纳米贝氏体钢有用于制造轴承的潜力。近年来，针对纳米贝氏体轴承用钢的研究已取得了巨大的进展，尤其在中国。本文中，我们总结了纳米贝氏体轴承用钢的发展，并阐明了与传统轴承钢相比，纳米贝氏体轴承钢的优越性以及不足。最后，提出纳米贝氏体轴承钢的下一步研究方向。

2. 轴承钢的发展

轴承的应用至今已有数个世纪，其用料从最原始的木材与石头，到铜和铁，再发展到我们现在最熟知的钢铁。现在，钢铁是制造轴承最主要的材料。

2.1. 传统轴承钢的发展及优缺点

1905年诞生的高碳铬轴承钢GCr15，是应用最广泛的轴承制造材料，至今仍占据世界轴承钢总产量的80%以上份额[5]。为了提高轴承在具有冲击载荷工况下的使用寿命，进而开发了渗碳轴承钢，最典型的渗碳轴承钢为G20Cr2Ni4。这两类传统轴承钢是用量最大的轴承用钢。

传统轴承钢采用淬火+低温回火热处理工艺，获得高碳马氏体、少量的残余奥氏体和未溶渗碳体的混合组

织，如图2（a）所示。其优点是硬度高、具有较好的耐磨性和抗滚动接触疲劳性能，这些优异的性能使得马氏体轴承应用广泛。然而，马氏体轴承存在韧性低、氢脆敏感性高、高碳铬轴承钢在淬火时表面形成残余拉应力等缺点。当轴承的使用环境恶劣，或承受冲击载荷时，马氏体轴承的使用寿命大幅降低[6]。

1954年，研究人员开始对传统高碳铬轴承进行贝氏体等温淬火处理，获得下贝氏体组织轴承，组织形貌如图2（b）所示。与低温回火马氏体组织相比，下贝氏体组织尽管硬度略低，但是其韧性可以达到低温回火马氏体组织的3倍[7]。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优异的耐磨性和疲劳性能、表面处于压应力状态、有助于阻碍疲劳裂纹的扩展等优点，同时该工艺还可以实现无裂纹淬火[7, 8]。因此，下贝氏体轴承率先在轧机轴承和列车轴承上得到应用[9]。文献[10]中详细描述了下贝氏体轴承钢，因此本文不再重复。

2.2. 纳米贝氏体轴承钢的发展及应用

众所周知，纳米晶材料具有独特的力学性能，如高的强度和塑性[11]。近些年来，大量的研究者针对纳米晶开展研究[12, 13]。强塑性变形是获得纳米晶材料的主要方法[14, 15]，然而利用这种方法很难获得可以制造大尺寸结构件的大块体纳米晶材料。

纳米贝氏体钢可通过简单的热处理工艺获得，被称为第一块大尺寸纳米结构金属[16]，这种材料自从2001年被Caballero和Bhadeshia等开发出来后，就获得了广泛关注[4]。大量的研究证明，纳米贝氏体钢不仅具有与马氏体钢相当的硬度，同时表现出比传统下贝氏体钢更高的韧性。图3（a）给出了典型的纳米贝氏体组织。可以看出，贝氏体铁素体片条厚30~70 nm，其间分布着薄膜



图1. 中国制造的高端装备示例。(a) 高速铁路客车；(b) 隧道掘进机。

状的残余奥氏体。2005年,中国学者Wang等[17]也开展了纳米贝氏体组织的研究工作。2008年,Zhang等[18]创造性地开发了一种在渗碳钢表层制备纳米贝氏体的方法。将渗碳钢在表层马氏体相变开始(martensite start, Ms)温度以上、心部Ms温度以下的较低温度进行等温处理,如图4所示。通过这种处理后渗碳钢的表层获得纳米贝氏体组织,心部为低碳马氏体组织,并表现出更高的耐磨性和更长的滚动接触疲劳寿命[19, 20]。Zhang等认为这项技术适用于制造高端轴承和齿轮等关键基础零部件,有利于提升中国轴承的制造水平。Bhadessia [8, 21]对这项技术给予高度评价,认为这项技术推动了纳米贝氏体渗碳硬化技术的发展。2014年,Solano-Alvarez等[22]进一步证明了纳米贝氏体钢适用于制造滚动轴承。

近年来,研究人员开发了多种适合于制造轴承的纳米贝氏体钢。图3(b)给出了纳米贝氏体轴承钢的典型组织结构。与图3(a)中的纳米贝氏体组织相比,纳米贝氏体轴承钢组织中含有一定量的残余渗碳体。表1汇总了近年来开发的纳米贝氏体轴承钢的成分[18, 22-

33],表中上半部分为渗碳轴承钢,下半部分为高碳全淬型轴承钢。为了获得纳米贝氏体组织,并抑制贝氏体相变过程中碳化物的析出,与文献[10]中列出的下贝氏体轴承钢相比,在纳米贝氏体轴承钢中含有更高含量的Si和Al合金元素。另外,添加Al元素还可以增加奥氏体与铁素体间的自由能差,达到加速贝氏体相变的效果[34, 35]。前期的研究还揭示了Al元素可以提高在恶劣服役条件下轴承的服役寿命,其原因是有效降低氢脆敏感性以及提高应力腐蚀抗力[36-38]。

G23Cr2Ni2Si1Mo渗碳纳米贝氏体钢和GCr15Si1Mo高碳纳米贝氏体钢已被用于制造大功率风电主轴轴承以及其他重载轴承,如图5所示。这些轴承表现出优异的性能,得到了轴承行业的认可。2016年,这两类纳米贝氏体轴承钢首次被纳入国家标准《GB/T 3203—2016 渗碳轴承钢》以及行业标准《YB/T 4572—2016 轴承钢 辗轧环件及毛坯》中[39, 40]。相关热处理被纳入《GB/T 34891—2017 滚动轴承 高碳铬轴承钢零件 热处理技术条件》中[41]。因此,现在纳米贝氏体轴承钢正逐渐被应用于轴承制造中。纳米贝氏体轴承钢及制造技术的开

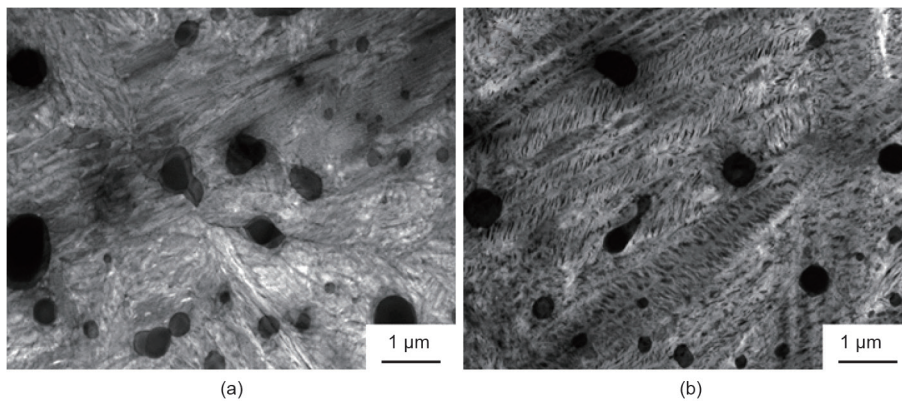


图2. GCr15钢不同工艺处理后获得的马氏体组织(a)以及下贝氏体组织(b)。

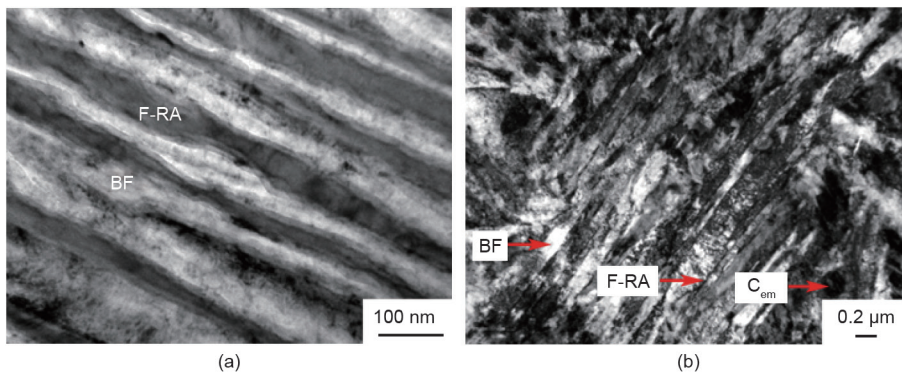


图3. 常规纳米贝氏体钢(a)和纳米贝氏体轴承钢(b)的典型组织照片(BF, F-RA和Cem分别代表贝氏体铁素体、薄膜状残余奥氏体以及渗碳体)。

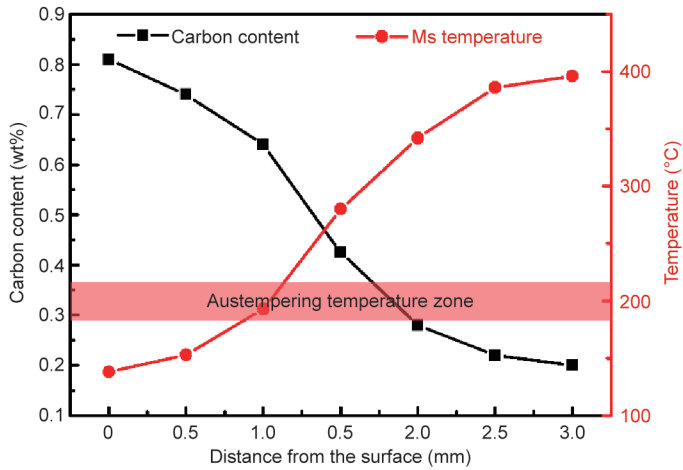


图4. 渗碳钢表层至心部随着深度增加碳含量的变化规律以及对应的Ms温度的变化规律。

发被认为是一项划时代的技术，这类轴承也被称为“第二代贝氏体轴承”。这些成果推动了中国轴承制造业的发展，也使中国在纳米贝氏体轴承的发展方面处于领先水平。

3. 纳米贝氏体轴承钢的优点及不足

与传统马氏体轴承钢和下贝氏体轴承钢相比，纳米贝氏体轴承钢具有明显的优点，如优异的力学性能、更高的耐磨性和更长的滚动接触疲劳寿命以及低的材料制造成本等。然而，纳米贝氏体轴承钢同样具有一些不足，如较长的转变时间。本部分详细综述了纳米贝氏体钢的优点及不足。

表1 纳米贝氏体轴承钢的化学成分

No.	composition (wt%)											Ref.
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	Ni	Cu	W	N		
1	0.21	0.46	1.20	1.35	0.26	0.95	—	—	—	—	—	[23]
2	0.23	1.43	0.34	1.55	0.30	≤0.05	2.30	—	—	—	—	[24]
3	0.22	1.38	1.22	1.54	0.35	0.08	—	—	—	—	—	[25]
4	0.21	0.75	0.54	1.47	0.34	0.78	1.62	—	—	—	—	[26]
5	0.18	1.54	0.35	1.72	0.38	0.68	0.12	—	0.21	0.0065	—	[27]
6	0.19	0.57	1.77	1.37	0.33	1.35	0.42	—	—	—	—	[28]
8	0.40	0.32	0.65	1.54	0.25	0.99	0.20	0.16	—	—	—	[29]
9	0.35	1.30	0.95	1.31	0.018	0.04	0.14	0.15	—	—	—	[30]
10	0.97	0.57	—	1.52	0.22	0.85	—	—	—	—	—	[31]
11	1.15	0.58	0.21	1.42	—	0.65	—	—	—	—	—	[32]
12	1.05	1.20	0.26	1.50	0.38	0.04	—	—	—	—	—	[33]
13	1.05	1.51	0.26	1.54	0.35	0.03	—	—	—	—	—	[33]
14	0.99	0.83	0.24	1.54	0.35	0.97	—	—	—	—	—	[32]
15	1.26	0.49	0.49	1.56	—	1.37	—	—	—	—	—	[22]
16	0.80	1.51	2.03	0.22	0.377	0.057	1.05	—	—	—	—	[34]

C: Carbon; Mn: Manganese; Cr: Chromium; Mo: Molybdenum; Ni: Nickel; Cu: Copper; W: Tungsten; N: Nitrogen.



图5. 洛阳LYC轴承有限公司制造的大功率风电机组用主轴轴承 (a) 和偏航轴承 (b)。主轴轴承的外径和内径分别为3200 mm和2620 mm，偏航轴承的外径和内径分别为5107 mm和4420 mm。

3.1. 优点 I——优异的力学性能

硬度是轴承第一位性能指标，贝氏体轴承的要求是硬度不低于58 HRC。纳米贝氏体轴承钢组织内部高的位错密度，纳米尺寸和碳过饱和的贝氏体铁素体，细化碳化物的强化作用，以及合金元素的固溶强化作用等，这些作用综合起来确保纳米贝氏体轴承钢在较低的温度下等温处理之后具有高的硬度，如图6 (a) 所示[42]。

韧性是轴承的另外一个重要性能指标，尤其是对于应用在冲击载荷条件下的轴承。图6 (b) 给出了典型下贝氏体轴承钢GCr15SiMo和高碳纳米贝氏体轴承钢的韧性对比结果[42]。可以看出，在相同硬度条件下，纳米贝氏体轴承钢的韧性比GCr15SiMo钢的韧性高50%。另外，Zhao等[43]也揭示随着组织中纳米贝氏体含量的增加，改进的高碳铬纳米贝氏体轴承钢的韧性逐渐增加，如表2所示。Yang等[25]也发现低温等温处理可以提高渗碳轴承钢心部的韧性，与传统淬-回火工艺相比，韧性提高幅度达60%。这一结果也进一步表明纳米贝氏体轴承钢更适用于重载冲击载荷工况。

需要注意的是，图6和表2中所列出的韧性数据均来自于无缺口冲击试样结果。之前的研究表明，纳米贝氏体对预制裂纹非常敏感，导致缺口试样的韧性值非常低，为4~7 J [44, 45]。在裂纹形成之前，缺口位置因

机械加工过程中应力诱发生成新鲜马氏体，是缺口试样韧性低的主要原因[45]。在这些报道中，缺口都是在最终热处理之后加工。然而，对于含缺口的轴承，这些却都是在最终热处理之前加工的。因此，在这些轴承的缺口根部，几乎没有新鲜马氏体生成。这也是通常采用无缺口试样测试纳米贝氏体轴承钢韧性的主要原因。

3.2. 优点 II——优异的耐磨性

磨损是轴承失效的主要形式之一，尤其是在润滑较差的服役条件下。前期已有研究结果表明纳米贝氏体渗碳钢在硬度低于马氏体钢的情况下，仍然具有比马氏体钢更高的耐磨性[19, 28]。

图7给出了微观组织对高碳纳米贝氏体钢耐磨性的影响[43]，图中数据与表2中的数据相对应。可以看出，随着纳米贝氏体含量的增加，纳米贝氏体轴承钢的失重量逐渐减少，当纳米贝氏体含量达到60%和87%时，磨损损失重量非常接近。尽管含60%和87%纳米贝氏体组织的硬度略低于仅有2%纳米贝氏体组织的硬度，但前者的韧性远高于后者的韧性，如表2所示。因此，高的韧性使得前者具有更高的耐磨性。Miab等[46]同样发现提高纳米贝氏体钢的韧性和塑性可以进一步提高耐磨性。Leiro等[47]比较了不同硬度的纳米贝氏体钢与100Cr6轴

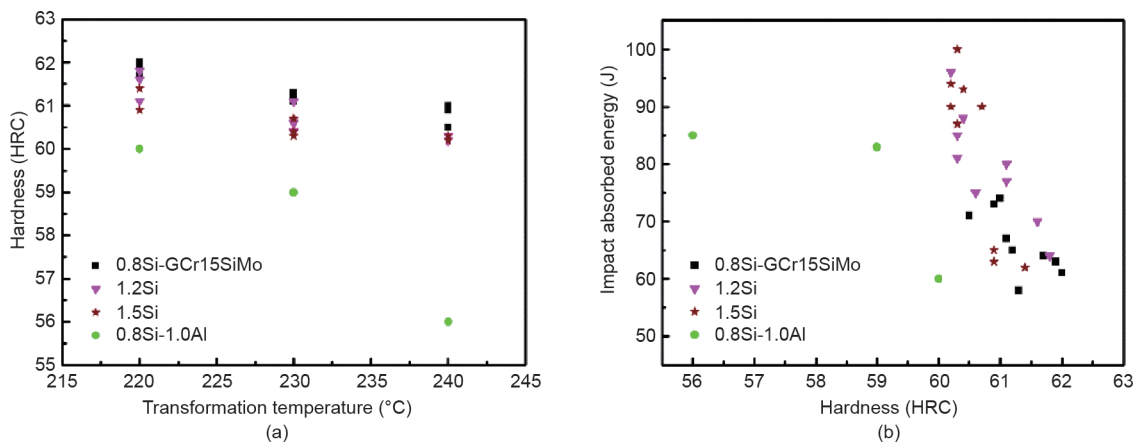


图6. 不同Si和Al含量高碳纳米贝氏体钢在不同温度等温处理后的硬度 (a) 和韧性 (b) [42] (注: 冲击试样均为无缺口试样)。

表2 改进高碳铬纳米贝氏体轴承钢随等温时间增加，各相的体积分数以及对应的力学性能[31, 43]

Hold time (h)	A_k (J)	Hardness (HRC)	UTS (MPa)	YS (MPa)	EL (%)	Volume fraction (%)			
						RA	NB	M	C_{em}
2	12	62.0	2277	2158	1.5	22.3	2.1	69.6	6.0
6	30	58.0	1614	890	2.0	45.3	40.8	7.4	6.5
12	52	61.0	1826	1180	2.6	29.5	60.2	3.5	6.8
72	66	61.3	2373	1697	3.5	7.2	86.6	0	6.2

A_k : toughness; UTS: ultimate tensile strength; YS: yield strength; EL: elongation; RA: retained austenite; M: martensite.

承钢的耐磨性，发现尽管纳米贝氏体钢的硬度较低，但是具有相对较高的耐磨性，如图8所示。纳米贝氏体比马氏体更高的韧性是其具有更高耐磨性的主要原因。

3.3. 优点 III——更高的滚动接触疲劳寿命

滚动接触疲劳是轴承最主要的失效形式。因此，新材料的滚动接触疲劳性能优劣直接决定其是否适合应用在轴承中。Zhang等[20]最先对比了纳米贝氏体渗碳钢与马氏体渗碳钢的滚动接触疲劳性能，他们发现纳米贝氏体渗碳钢的滚动接触疲劳寿命几乎是马氏体钢的两倍。纳米贝氏体组织中薄膜状的残余奥氏体有效释放疲劳裂纹尖端的应力集中，与超细组织一起，促使纳米贝氏体渗碳钢表现出高的滚动接触疲劳寿命[20]。Solano-Alvarez等[22]发现，在滚动接触疲劳过程中，纳米贝氏体钢中的疲劳裂纹连续分叉，延长了疲劳裂纹的扩展路径，从而提高了疲劳寿命。这些结果直接证明了纳米贝氏体钢具有优异的滚动接触疲劳寿命。然而，上

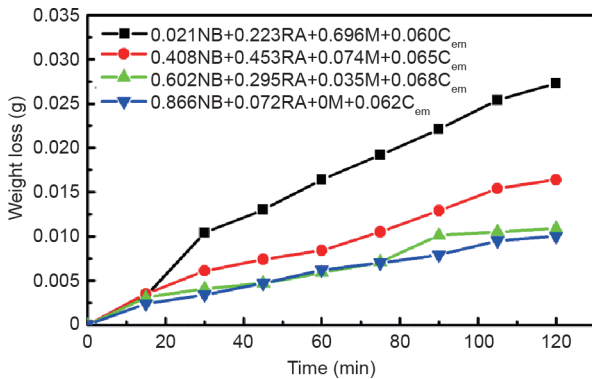


图7. 200℃等温不同时间获得不同纳米贝氏体含量纳米贝氏体轴承钢的耐磨性[43]。NB, RA, M和 C_{em} 分别代表纳米贝氏体、残余奥氏体、马氏体和渗碳体。

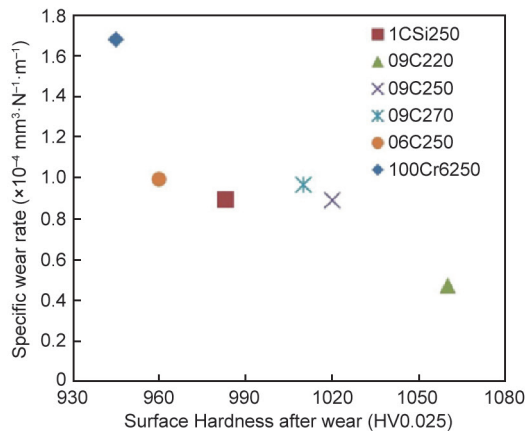


图8. 纳米贝氏体钢与100Cr6钢耐磨性对比[47]。除了100Cr6250，其他所有试样均为纳米贝氏体钢。

述研究中的纳米贝氏体钢中均无残余渗碳体。

含有残余渗碳体的纳米贝氏体轴承钢，依然具有优异的滚动接触疲劳性能。Liu等[33]发现含有20%（体积分数）纳米贝氏体试样的疲劳寿命几乎是相同材料不含纳米贝氏体试样的3.3倍，如图9所示。高韧性的纳米贝氏体组织被认为是疲劳寿命显著提高的主要原因。由于纳米贝氏体组织具有高韧性特性，可以有效地释放疲劳过程中在残余渗碳体或非金属夹杂物与基体界面位置的应力集中，显著延迟疲劳裂纹的萌生。同时，如前面所述，纳米贝氏体组织还能够释放疲劳裂纹尖端的应力。这些积极作用使得纳米贝氏体轴承钢具有优异的滚动接触疲劳寿命。Zhang等[10]近期研究发现：与传统马氏体和下贝氏体轴承钢相比，纳米贝氏体轴承钢表现出更高的滚动接触疲劳寿命。G23Cr2Ni2Si1Mo纳米贝氏体渗碳轴承钢的额定疲劳寿命比G20Cr2Ni4马氏体渗碳轴承钢的疲劳寿命提高2.1倍，GCr15Si1Mo全淬型轴承钢的额定疲劳寿命比GCr15SiMo钢提高106%，如图10所示。另外，还可以看出G23Cr2Ni2Si1Mo纳米贝氏体渗碳轴承钢的疲劳寿命要优于GCr15Si1Mo钢。G23Cr2Ni2Si1Mo渗碳钢组织中更细的渗碳体、更高的残余压应力以及更多的稳定残余奥氏体是其具有更优疲劳性能的主要原因[48]。因此，纳米贝氏体优异的滚动接触疲劳性能确保了其在轴承上的巨大的应用潜力。

传统轴承中的渗碳体尺寸通常为1~2 μm。近年来，很多轴承制造企业都在尝试通过细化渗碳体来提高轴承的疲劳寿命。细化的渗碳体可以有效钉扎奥氏体的晶界，进一步细化奥氏体，最终达到双细化的目的。然而，双细化工艺比较复杂，增加轴承制造成本，因此双细化

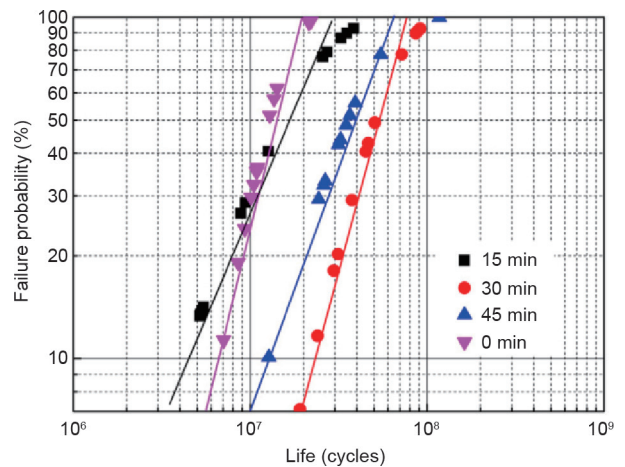


图9. 270℃等温不同时间试样的滚动接触疲劳性能P-N曲线[33]。等温30 min曲线即为含20%纳米贝氏体组织试样的曲线。

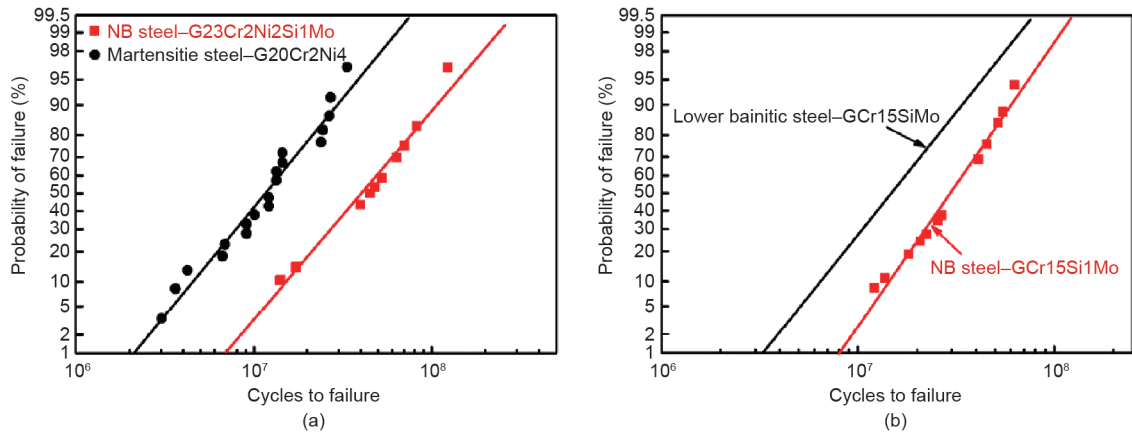


图10. 渗碳轴承钢 (a) 和高碳轴承钢 (b) 的滚动接触疲劳性能[10]。

工艺至今未得到应用。而对于纳米贝氏体轴承钢，其成分中的高Si元素含量，能有效阻止渗碳体长大，从而获得细小的渗碳体，无需额外的处理工艺即可达到双细化的目的，从而有利于疲劳寿命的提高。

3.4. 优点 IV——低成本

原材料的成本几乎占轴承成本的一半，因此原材料的价格至关重要，尤其是对民品轴承。G20Cr2Ni4钢是应用最广泛的渗碳轴承钢，为保证马氏体组织的韧性，其成分中含有大量的昂贵金属元素Ni，大幅度增加材料的成本。表1中所示的纳米贝氏体轴承钢中的Ni含量显著低于G20Cr2Ni4钢。对于纳米贝氏体轴承钢，贝氏体铁素体内无硬质碳化物析出以及超细的组织结构和一定量的残余奥氏体，可以保证材料具有高的韧性。一些研究结果也表明贝氏体的韧性与淬-回火钢材的韧性相当，甚至达到价格昂贵的马氏体时效钢的水平[25, 49]。因此，纳米贝氏体轴承钢在原材料成本方面比传统渗碳轴承钢更有优势。

3.5. 不足——长时间的等温处理工艺

轴承钢的碳含量（质量分数，%）通常高于0.8%，即使去除残余渗碳体内固溶的碳含量，基体的碳含量也高于0.6% [8]。同时，为了获得纳米贝氏体组织以及保证高的硬度，需要对轴承钢在较低的温度进行等温处理。根据Bhadeshia [16]的计算结果，对于碳含量（质量分数，%）为0.6%的钢，低温等温时贝氏体相变的孕育期将近2.8 h。有报道指出，纳米贝氏体轴承钢需要在200 °C等温90 h以上才能够完成贝氏体转变过程[50]。Wasiluk等[28]在渗碳钢热处理过程中发现，在250 °C等温48 h后仍有14.28%（体积分数）的残余奥氏体存在。

Zhang等[43]发现高碳纳米贝氏体轴承钢等温72 h后有7%（体积分数）的残余奥氏体。长的等温转变时间显著降低了生产效率，这是限制纳米贝氏体轴承钢广泛应用的最主要难题。因此，开发快速纳米贝氏体相变工艺至关重要。

4. 纳米贝氏体轴承钢的下一步研究方向

4.1. 开发短周期热处理工艺

如上所述，长时间等温处理显著降低轴承生产效率。因此，开发短周期的热处理技术至关重要。研究人员针对这方面已经开展了大量的研究工作。在钢中添加Al或Co元素，可以扩大自由能差，增加相变驱动力，从而加速贝氏体相变[51, 52]。有研究表明细化奥氏体晶粒尺寸可以为贝氏体铁素体提供更多的形核位置，从而达到加速贝氏体相变的目的[52]。然而，增加Al元素会提高钢内夹杂物的含量，恶化材料的性能。我们的前期研究发现，在含Al钢中添加少量的N元素，可以有效缩短贝氏体相变的孕育期，缩短比例达到50%，整体转变时间缩短30%，如图11所示。AlN诱发异质形核很可能是这一促进效果的原因。另外，在贝氏体相变之前引入部分的马氏体也可以有效缩短转变时间[53]。然而，近期研究结果发现，在纳米贝氏体钢中，尽管引入部分马氏体可以有效缩短孕育期，但是对整体相变时间的影响几乎可以忽略[54]。也有研究发现引入较大的应力可以为相变增加额外的机械驱动力，从而加速贝氏体相变[55, 56]。然而，这一效果在低温转变时影响较小[55]。另外，在轴承热处理过程中引入应力非常困难。

过冷奥氏体强度是影响贝氏体铁素体尺寸的主要因素[57]。在相变过程中，由于未转变奥氏体内的C含量

逐渐提高, 导致其强度逐渐增加, 稳定性逐渐提高[58], 这必然导致后期贝氏体相变困难。因此, 我们前期提出一个纳米贝氏体轴承钢等过冷奥氏体强度这一概念。当第一阶段等温温度下相变达到最大转变速度这一临界点, 如图12所示, 升高温度至第二阶段等温, 在第二阶段等温温度下, 未转变过冷奥氏体的强度与最初转变前过冷奥氏体的强度相同。这样, 快速转变状态得以继续保持, 如图12 (a) 所示。通过这种方式, 将整体相变时间缩短至10 h以内。透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM) 观察发现, 通过这一新工艺处理后, 贝氏体铁素体的尺寸仍为纳米级别, 统计结果表明平均尺寸为88 nm, 略高于直接等温处理后的83 nm。同时, 经过等强度工艺处理后, 纳米贝氏体轴承钢的硬度达到59.6 HRC, 满足轴承应用的要求。

尽管已经开发出来一些缩短贝氏体相变时间的工艺, 这些工艺的适用性还需要轴承行业的进一步验证。

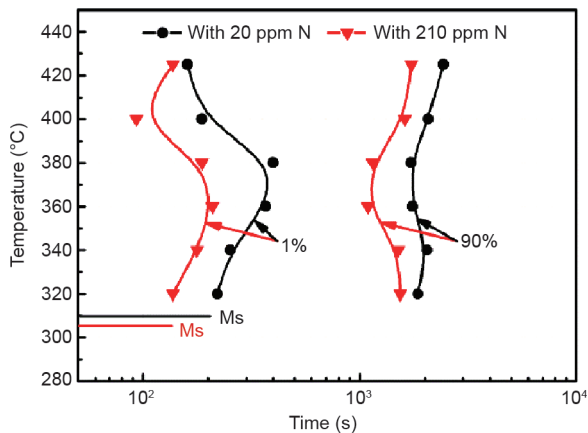


图11. N元素对含Al钢过冷奥氏体等温转变 (time, temperature, transformation, TTT) 曲线的影响。

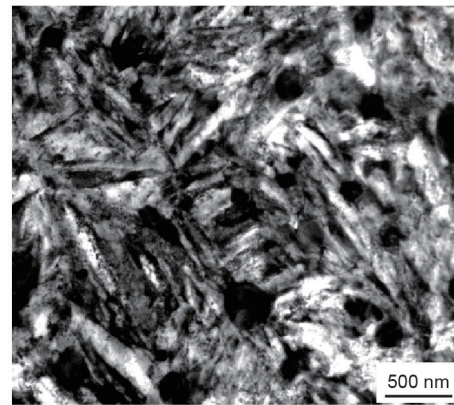
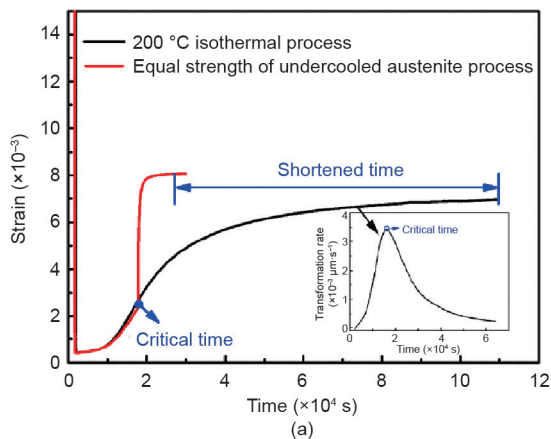


图12. (a) 纳米贝氏体轴承钢在200 °C等温的相变动力学曲线 (黑色线) 以及通过等强度工艺处理的相变动力学曲线 (红色线); (b) 新工艺处理后的TEM照片。实验材料的化学成分 (质量分数, %): 0.8C-1.6Cr-1.4Si-0.6Mn-0.3Ni-0.2Mo。

虽然等强度工艺已经将整体相变时间缩短至10 h以下, 然而这一时间仍然长于下贝氏体轴承热处理的4~6 h。因此, 为纳米贝氏体轴承钢开发短热处理周期工艺仍然是主要目标。贝氏体相变过程中的两个阶段——孕育期和转变阶段, 应该分开来考虑, 以实现缩短相变时间。

另外, 也可以从原材料的成分角度出发, 设计一种快速相变的纳米贝氏体轴承钢。微合金化处理或者引入与铁素体具有高共格度的第二相, 如VN, 也是一种潜在方法。Garcia-Mateo等[59]发现低碳钢中析出V(C, N)可以大幅度提高晶内形核与晶界形核的比值, 有效地提高针状铁素体的形核速率。众所周知, B元素可以延迟贝氏体相变, 然而, He等[60]发现添加B元素的低碳钢中, 过冷奥氏体经变形处理后, 贝氏体相变速率得到全方位的加速。值得注意的是, 微合金化处理或引入第二相颗粒的前提是不能够恶化材料的性能。第二相颗粒的选型与控制需要进一步深入的研究。

4.2. 研究纳米贝氏体轴承钢在不同工况条件下的适用性

截至目前, 纳米贝氏体钢的发展也仅有17年的历史, 纳米贝氏体轴承钢发展的时间尚不足10年。近年来, 纳米贝氏体轴承钢优异的性能已经吸引了轴承行业的关注。然而, 轴承的服役条件差异很大, 不同设备、不同工况条件下包含很多不同的因素, 如不同转速、冲击载荷、润滑条件、温度以及其他因素。传统轴承经过多年大量的实践, 已经基本探索出不同轴承的适用条件, 而纳米贝氏体轴承由于发展时间短, 不同工况下的适用性未得到深入的认识和了解。因此, 需要开展纳米贝氏体轴承钢在不同工况下的适用性研究, 来揭示其适用工况和不适用工况。然而, 研究人员开展这一项研究挑战性

巨大。首先，需要大量台架实验来模拟轴承真实的使用工况，才能真正地验证其适用性。而这需要搭建专门的实验平台，如可测试纳米贝氏体轴承在某些有碎屑条件下的疲劳寿命的平台。实际应用是最重要、最具有说服力的测试，可以直接反映出它的适用性。而这些测试需要轴承行业、其他装备制造行业以及国家的大力支持。

4.3. 建立专门的纳米贝氏体轴承钢数据库及标准

专门的数据库对一种新材料的应用至关重要。传统高碳铬轴承经过将近120年的发展和应用，应用技术已经逐渐趋于完善。然而，新发展的纳米贝氏体轴承钢数据明显不足，如纳米贝氏体轴承在不同工况下的应用情况、使用寿命、失效机理、不同尺寸轴承的最佳制备工艺等。这些数据的统计要基于大量的应用与追踪研究，应尽早收集，统计分析。另外，轴承材料在实际应用中的表现，如在使用过程中微观结构的演变、力学性能的变化等，这些应与实验室研究结果结合起来，最终建立实验室结果与实际应用表现关联体系。

纳米贝氏体轴承钢的微观组织和力学性能与传统轴承钢的截然不同，评价标准也应有所区别。尽管现在已经有两类纳米贝氏体轴承钢被纳入国家和行业标准[39–41]，但仍亟需建立专门的纳米贝氏体轴承钢的评价标准体系，指导纳米贝氏体轴承钢的生产。由于先前渗碳轴承钢全部为马氏体组织，因此这一新的评价标准体系对渗碳纳米贝氏体轴承钢尤为重要。

4.4. 加深纳米贝氏体轴承钢的基础研究

材料的基础理论研究结果为其应用提供关键基础。因此，加深纳米贝氏体轴承钢基础理论研究至关重要。如前所述，纳米贝氏体组织的发现和提出尚且不足20年，纳米贝氏体轴承钢的发展和应用更不足10年。尽管现在已经开展了大量关于纳米贝氏体轴承钢方面的研究工作，仍有许多基础科学问题需要进一步研究和解答。关于贝氏体最关键的科学问题是其相变机制。至今两种相变机制同时存在：无扩散学派[21]和扩散学派[61]。揭示贝氏体相变的本质将是材料研究领域一项重要的成果。

纳米贝氏体轴承钢内残余奥氏体的作用亟需深入研究。众所周知，残余奥氏体的存在有利于提高材料的力学性能，如韧性。然而，如果轴承组织内部残余奥氏体的稳定性较低，则会导致轴承尺寸稳定性差。纳米贝氏体轴承钢内由于高碳含量、高硅含量，以及低温等温处

理工艺，使得组织中含有比传统马氏体轴承和下贝氏体轴承中更多的残余奥氏体[22, 24]。由于在相变过程中贝氏体铁素体内无碳化物析出，使得更多的碳原子扩散进入到相邻的残余奥氏体中，这使得残余奥氏体更为富碳，从而稳定性更高。然而，有研究表明纳米贝氏体轴承钢在滚动接触疲劳过程中仍有一定量的残余奥氏体转变为马氏体[22, 62]。这一少量的转变对轴承尺寸稳定性的影响以及对服役性能的影响尚不清晰。另外，如何有效地控制纳米贝氏体轴承钢中残余奥氏体的稳定性也是值得深入研究的基础科学问题。

另外，也有很多其他基础科学问题需要研究，包括贝氏体铁素体和残余奥氏体的协同作用机制及对综合性能的影响规律；纳米贝氏体轴承钢在高转速或重载条件下的疲劳失效机制；轴承钢中微合金元素的作用机制，如N、V等；纳米贝氏体轴承在服役过程中微观结构内元素（如C等）的再分配以及对服役性能的影响等。尤其是，近年来快速发展的高端微观结构表征设备，也会为传统材料提供更多、更新的信息，这也为对传统观点进行再思考提供了很好的机会。

5. 结论与展望

5.1. 结论

纳米贝氏体轴承钢已受到轴承行业的高度关注，尤其是一些国际著名轴承制造企业的关注。近年来中国的科研水平和创新能力得到显著的提升，中国学者在这方面的科研成果同样体现出“中国速度”。中国学者在纳米贝氏体轴承钢方面的研究成果已经处于领先水平。纳米贝氏体轴承钢已经被轴承企业采用，来制造高端轴承，并且现在已经被纳入中国的国家标准和行业标准中，显著推动其应用。然而，由于开发时间尚短，纳米贝氏体轴承钢中仍有一些问题需要进一步研究解决。

5.2. 展望

随着针对纳米贝氏体轴承钢开展的研究工作的不断深入，越来越多的轴承企业关注到这种高性能新材料。随着研究的不断深入，包含纳米贝氏体轴承服役性能以及实验室数据的数据库将会建立并不断完善，纳米贝氏体轴承钢的专有标准也会建立，纳米贝氏体轴承钢的不足之处也会被克服。这些不足也包括纳米贝氏体轴承相关的工程问题。另外，一些基础科学问题也需进一步思考和研究，如纳米贝氏体轴承钢中残余奥氏体的稳定

性，及其对轴承尺寸稳定性的真实影响规律；残余渗碳体的作用以及在纳米贝氏体轴承钢中的必要性；纳米贝氏体轴承在高转速或重载条件下的疲劳机制；疲劳失效过程中的微观结构演变机制等。近年来快速发展的高端微观结构表征设备会为研究人员揭示出更多新的信息，也为对这些基础科学问题的再思考和解决提供了更好的契机。毫无疑问，纳米贝氏体轴承钢会成为制造高端轴承的材料之一，如中国高铁用的轴承。

致谢

本研究工作得到了国家高技术研究发展计划（863计划）（2012AA03A504）、国家杰出青年基金项目（50925522）、国家自然科学基金项目（51471146）、中国博士后面上项目（2018M631762）以及河北省青年拔尖人才项目（BJ2018056）的支持，在此表示感谢。

Compliance with ethics guidelines

Fucheng Zhang and Zhinan Yang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Huo DM, Xiao BG. Current situation and development prospect of bearing steel production. *Sichuan Metall* 2015;37(1):61–4,70. Chinese.
- [2] Jiao Y. We have to use others' bearing on our own TBM. *Sci Technol Daily* 2018. Sect. 3:4. Chinese.
- [3] SKF University Technology Centre [Internet]. Cambridge: University of Cambridge. Available from: <https://www.maxwell.cam.ac.uk/maxwellcommunity/member-groups/skf-university-technology-centre>.
- [4] Caballero FG, Bhadeshia HKDH, Mawella KJA, Jones DG, Brown P. Very strong low temperature bainite. *Mater Sci Technol* 2002;18(3):279–84.
- [5] Hirohide S. Bearing steels. Beijing: Metallurgical Industry Press; 2003. Chen HZ, translator. Chinese.
- [6] Zhang ZQ, Wang YL. The application of bainite austempering technology in rolling mill bearing. *Bearing* 1998;2:24–8.
- [7] Zhang GH, Zhang ZC, Wu KM. Progress of research on composition design and heat treatment process of high carbon chromium bearing steel. *Special Steel* 2017;36:9–13. Chinese.
- [8] Bhadeshia HKDH. Steels for bearings. *Prog Mater Sci* 2012;57(2):268–435.
- [9] Liu YZ, Jiang T. Austempering of GCr15 steel and its application in railway rolling bearing. *Bearing* 1994;9:32–6. Chinese.
- [10] Zhang FC, Yang ZN, Lei JZ, Pang BT, Wang ML. Application progress of bainite steel in bearings. *Bearing* 2017;1:54–64. Chinese.
- [11] Lu K, Lu L. Progress in mechanical properties of nanocrystalline materials. *Acta Metall Sin* 2000;36(8):785–9. Chinese.
- [12] Hu J, Shi YN, Sauvage X, Sha G, Lu K. Grain boundary stability governs hardening and softening in extremely fine nanograined metals. *Science* 2017;355(6331):1292–6.
- [13] Zhou X, Li XY, Lu K. Enhanced thermal stability of nanograined metals below a critical grain size. *Science* 2018;360(6388):526–30.
- [14] Zhang F, Feng X, Yang Z, Kang J, Wang T. Dislocation-twin boundary interactions induced nanocrystalline via SPD processing in bulk metals. *Sci Rep* 2015;5(1):8981.
- [15] Liu XC, Zhang HW, Lu K. Strain-induced ultrahard and ultrastable nanolaminated structure in nickel. *Science* 2013;342(6156):337–40.
- [16] Bhadeshia HKDH. The first bulk nanostructured metal. *Sci Technol Adv Mater* 2013;14(1):014202.
- [17] Wang TS, Li XY, Zhang FC, Zheng YZ. Microstructures and mechanical properties of 60Si2CrVA steel by isothermal transformation at low temperature. *Mater Sci Eng A* 2006;438–440:1124–7.
- [18] Zhang FC, Wang TS, Zhang P, Zheng CL, Lv B, Zhang M, et al. A novel method for the development of a low-temperature bainitic microstructure in the surface layer of low-carbon steel. *Scr Mater* 2008;59(3):294–6.
- [19] Zhang P, Zhang FC, Yan ZG, Wang TS, Qian LH. Wear property of lowtemperature bainite in the surface layer of a low carbon steel. *Wear* 2011;271(5–6):697–704.
- [20] Zhang P, Zhang FC, Yan ZG, Wang TS, Qian LH. Rolling contact fatigue property of low-temperature bainite in surface layer of a low carbon steel. *Mater Sci Forum* 2011;675–677:585–8.
- [21] Bhadeshia HKDH. Nanostructured bainite. *P Roy Soc Lond A* 2010;466:3–18.
- [22] Solano-Alvarez W, Pickering EJ, Bhadeshia HKDH. Degradation of nanostructured bainitic steel under rolling contact fatigue. *Mater Sci Eng A* 2014;617:156–64.
- [23] Zhang P, Zhang FC, Wang TS. Preparation and microstructure of hard bainite in surface layer of carburized 20CrMnMoAl steel. *Acta Metall Sin* 2011;47:1038–45. Chinese.
- [24] Wang YH, Yang ZN, Zhang FC, Wu D. Microstructures and mechanical properties of surface and center of carburizing 23Cr2Ni2Si1Mo steel subjected to lowtemperature austempering. *Mater Sci Eng A* 2016;670:166–77.
- [25] Yang ZN, Zhang FC, Ji YL, Wang YH, Lv B, Wang M. Notably improved mechanical properties via introducing a short austempering treatment on lowcarbon martensite steel. *Mater Sci Eng A* 2016;673:524–9.
- [26] Wang YH. Chemical component design, microstructure and properties control of nanobainitic steels used for high-power wind power bearing [dissertation]. Qinhuangdao: Yanshan University; 2017. Chinese.
- [27] Yang ZN, Zhang FC. A kind of bearing steel with high impact resistance and its heat treatment process. China patent CN 201610280071.0. 2016 Apr 29. Chinese.
- [28] Wasiluk K, Skolek E, Świntnicki W. Microstructure and properties of surface layer of carburized 38CrAlMo6–10 steel subjected to nanostructurization by a heat treatment process. *Arch Metall Mater* 2014;59(4):1685–90.
- [29] Skolek E, Wasiak K, Świntnicki WA. Structure and properties of the carburized surface layer on 35CrSiMn5–5–4 steel after nanostructurization treatment. *Mater Technol* 2015;49(6):933–9.
- [30] Zhang FC, Wang TS, Yang ZN, Wang YH, Kang J, Zheng YZ. The overall hard bainite bearing steel and its manufacturing method. China patent CN 201210399526.2. 2013 Mar 6. Chinese.
- [31] Zhao J. Microstructure and mechanical properties of nanostructure bainite used for bearings [dissertation]. Qinhuangdao, Chinese: Yanshan University; 2013. Chinese.
- [32] Zhao J, Zhao T, Hou CS, Zhang FC, Wang TS. Improving impact toughness of high-C-Cr bearing steel by Si-Mo alloying and low-temperature austempering. *Mater Des* 2015;86:215–20.
- [33] Liu HJ, Sun JJ, Jiang T, Guo S, Liu Y. Improved rolling contact fatigue life for an ultrahigh-carbon steel with nanobainitic microstructure. *Scr Mater* 2014;90–91:7–20.
- [34] Yan ZG, Zhang FC, Zhang P, Zheng CL, Liu FC, Zhang M. Influence of aluminium content on carburization dynamics and kinetics of bainite transformation in steel. *Mater Mech Eng* 2012;36:31–5.
- [35] Hu F, Wu KM, Zheng H. Influence of Co and Al on bainitic transformation in super bainitic steels. *Steel Res Int* 2013;84:1060–5.
- [36] Li YG, Chen C, Zhang FC. Al and Si influences on hydrogen embrittlement of carbide-free bainitic steel. *Adv Mater Sci Eng* 2013;11:382060.
- [37] Lv B, Zhang ZM, Yang ZN, Zhang FC, Zheng CL, He YR. A higher corrosion resistance for a bainitic steel with Al instead of Si. *Mater Lett* 2016;173:95–7.
- [38] Hollox GE, Hobbs RA, Hampshire JM. Lower bainite bearings for adverse environments. *Wear* 1981;68(2):229–40.
- [39] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 3203–2016: Carburizing steels for bearing. Chinese standard. Beijing: Standards Press of China; 2017.
- [40] Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. YB/T 4572–2016: Bearing steel rolling ring and blank. Chinese industry standard for black metallurgy. Beijing: Metallurgical Industry Press; 2017.
- [41] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 34891–2017: Rolling bearings—parts made from high-carbon chromium bearing steels—specifications for heat treatment. Chinese standard. Beijing: Standards Press of China; 2017.
- [42] Zhao J, Hou CS, Zhao G, Zhao T, Zhang FC, Wang TS. Microstructures and mechanical properties of bearing steels modified for preparing nanostructured bainite. *J Mater Eng Perform* 2016;25(10):4249–55.
- [43] Zhao J, Wang TS, Lv B, Zhang FC. Microstructures and mechanical properties of a modified high-C-Cr bearing steel with nano-scaled bainite. *Mater Sci Eng A* 2015;628:327–31.
- [44] Garcia-Mateo C, Caballero FG. Ultra-high-strength bainitic steels. *ISIJ Int* 2005;45(11):1736–40.
- [45] Fielding LCD, Jones NG, Wslsh J, Van Boxel S, Blackmur MS, Lee PD, et al. Synchrotron analysis of toughness anomalies in nanostructured bainite. *Acta Mater* 2016;105:52–8.
- [46] Miab SA, Avishan B, Yazdani S. Wear resistance of two nanostructural bainitic steels with different amounts of Mn and Ni. *Acta Metall Sin* 2016;29:587–94.

- [47] Leiro A, Vuorinen E, Sundin KG, Prakash B, Sourmail T, Smanio V, et al. Wear of nano-structured carbide-free bainitic steels under dry rolling-sliding conditions. *Wear* 2013;298–299:42–7.
- [48] Wang Y, Zhang F, Yang Z, Lv B, Zheng C. Rolling contact fatigue performances of carburized and high-C nanostructured bainitic steels. *Materials* 2016;9(12):960.
- [49] Caballero FG, Bhadeshia HKDH, Mawella KJA, Jones DG, Brown P. Design of high strength bainitic steels: part 2. *Mater Sci Technol* 2001;17(5):517–22.
- [50] Zhang P. Microstructure and mechanical properties of nanostructure bainite in surface layer of alloy steel [dissertation]. Qinhuangdao: Yanshan University; 2011. Chinese.
- [51] Zhu KY, Mager C, Huang MX. Effect of substitution of Si by Al on the microstructure and mechanical properties of bainitic transformation-induced plasticity steels. *J Mater Sci Technol* 2017;33(12):1475–86.
- [52] Garcia-Mateo C, Caballero FG, Bhadeshia HKDH. Acceleration of lowtemperature bainite. *ISIJ Int* 2003;43(11):1821–5.
- [53] Gong W, Tomota Y, Harjo S, Su YH, Aizawa K. Effect of prior martensite on bainite transformation in nanobainite steel. *Acta Mater* 2015;85:243–9.
- [54] Chu CH, Qin YM, Li XM, Yang ZN, Zhang FC, Guo CH, et al. Effect of two-step austempering process on transformation kinetics of nanostructured bainitic steel. *Materials* 2019;12(1):166.
- [55] Hase K, Garcia-Mateo C, Bhadeshia HKDH. Bainite formation influenced by large stress. *Mater Sci Technol* 2004;20(12):1499–505.
- [56] Shipway PH, Bhadeshia HKDH. The effect of small stress on the kinetics of the bainite transformation. *Mater Sci Eng A* 1995;201(1–2):143–9.
- [57] Singh SB, Bhadeshia HKDH. Estimation of bainite plate-thickness in low-alloy steels. *Mater Sci Eng A* 1998;245(1):72–9.
- [58] Yang ZN, Chu CH, Jiang F, Qin YM, Long XY, Wang SL, et al. Accelerating nanobainite transformation based on a new constructed microstructural predicting model. *Mater Sci Eng A* 2019;748:16–20.
- [59] Garcia-Mateo C, Cornide J, Capdevila C, Caballero FG, Garcia de Andres C. Influence of V precipitates on acicular ferrite transformation part 2: transformation kinetics. *ISIJ Int* 2008;48(9):1276–9.
- [60] He BB, Xu W, Huang MX. Effect of boron on bainitic transformation kinetics after ausforming in low carbon steels. *J Mater Sci Technol* 2017;33 (12):1494–503.
- [61] Zhang CY, Chen H, Zhu KY, Zhang C, Yang ZG. Effect of Mo addition on the transformation stasis phenomenon during the isothermal formation of bainitic ferrite. *Metall Mater Trans A* 2016;47A(12):5670–4.
- [62] Yang ZN, Ji YL, Zhang FC, Zhang M, Nawaz B, Zheng CL. Microstructural evolution and performance change of a carburized nanostructured bainitic bearing steel during rolling contact fatigue process. *Mater Sci Eng A* 2018;725:98–107.