

我国轴承行业亟待解决的若干科技疑难问题

中国轴承工业协会总工程师 何加群

我国轴承行业存在诸多影响高质量发展的科技疑难问题，本文列举其中亟待解决的 9 个科技疑难问题，希望引起行业内有关人士的关注并着力研究解决，以促进行业的高质量发展。

一、应用真正的正向设计

这是大家都在说，但很多人未搞明白的问题。

我们都知道，正向设计是从概念→实物（亦即产品），逆向设计是扫描实物（产品）→获取实物（产品）几何模型→再按其设计制造实物（产品）。我们行业基本上都是逆向设计。最近几个科研院所和企业都说他们研制的高速动车组轴承是正向设计，实际上并不是真正意义上的正向设计。连载荷谱都没有，还不能轻言什么正向设计。

我们应该编制轴承正向设计规范（或指南），指导企业进行真正意义上的正向设计。指导企业首先采集并编制轴承载荷谱，根据轴承载荷、使用性能、寿命和可靠性要求，进行拟动力学仿真分析（目前我们还不具备动力学仿真分析能力），产品数字化建模，继而进行产品整体结构和微观结构的优化设计，包括材料和热处理的优选，各工作表面硬度和粗糙度的匹配，滚子和滚道型面凸度的确定，滚动体和滚道吻合率的优选，滚动体球基面与套圈挡边接触状态的优化，保持架运动稳定性和抗冲击能力、密封件的高可靠性和低摩擦力矩、润滑油脂的高效长寿命的确保，以及各项形位公差的规定。

高速动车组轴箱轴承瑞典 SKF、德国 FAG、日本 NSK、NTN 均在进行动力学仿真分析的基础上，进行正向设计。我国企业是在静力学分析的基础上，

正向设计和逆向设计相结合，完成高速动车组轴箱轴承产品设计。在设计中很大程度依据对国外轴承在我国应用情况的分析的资料，和对国外轴承在我国高铁应用中出现故障的轴承的失效形式的分析。设计的轴承成品可以做到“形似”，尚不能完全做到“神似”。对成套轴承和套圈、滚子、保持架的结构，虽然进行了研究，但对 b_m 值的确定、套圈和滚子工作面凸度修型和应力的关系、保持架的动态性能等，均未作深入研究。

额定动载荷和额定寿命计算中的 b_m 系数，直接影响轴承基本额定载荷 C_r 、 C_a 的计算值，从而对轴承基本额定寿命 L_{10} 的计算值产生很大的影响。GB/T6391-2001/ISO281:2007《滚动轴承额定动载荷和额定寿命》中规定：“ b_m 为当代常用优质淬硬钢轴承和良好加工方法的额定系数，该值随轴承类型和设计不同而异。”该标准规定，球轴承 $b_m=1.1\sim 1.3$ ，滚子轴承 $b_m=1\sim 1.15$ 。这个系数与钢材品质有很大关系，在当今已研发应用高等级轴承钢，如 GB/T18254-2016 规定的特级优质轴承钢、GB/T38885-2020 规定的超高洁净轴承钢，还有正在研发的高氮马氏体不锈钢等的情况下，GB/T6391 规定的 b_m 系数取值需要调整。现在，对 b_m 取值存在缺乏科学性的任意性。去年，鉴定一个企业的科技成果项目，一位资深专家问：“你们 b_m 值取多少？”回答：“1.5”，资深专家又问：“取 $b_m=1.5$ 的依据是什么？”回答不上来。说明这个项目 b_m 值是任意取的。这个问题具有普遍性。在高速动车组轴箱轴承的额定动载荷和额定寿命计算中也存在这个问题。这个问题的解决，需要我们与研制轴承钢的排头兵企业一起，经过充分的试验、验证，根据应用钢材的种类、冶炼方法、质量等级确定科学的 b_m 取值和取值方法，以科学地进行 b_m 取值。

高速动车组轴箱轴承的工作表面，包括内外套圈滚道、滚子工作表面的凸度修型，这似乎是已解决的向题，其实不然。现在业界公认的最佳型面是对数曲线凸度型面。对数曲线型面的设计似乎不太复杂，但如何通过磨加工、

超精加工，精确加工出符合设计的对数曲线型面，如何精确检测加工出的型面是否符合设计的对数曲线型面，这是需要解决、而目前没有解决的问题。而最大的问题是凸度值应该取多大，凸度位置应如何配置，是一个现在还没有完全解决的问题。凸度的位置和大小，不可以任意选定，应构建载荷谱，按载荷的性质、大小、分布，数字化建模，分析计算，从而得出凸度正确的坐标和大小数值。这项工作希望在这方面造诣很深的专家和企业家，充足发力，加以解决。

应建立保持架稳态分析模型和动力学分析模型，建立保持架运动方程和碰撞、冲击振动方程，研究保持架设计参数对其转动惯量、运动轨迹、运动稳定性、碰撞和冲击振动响应的影响的规律。通过以上分析研究，确定合理的设计参数，以保证保持架运动稳定性和抗冲击能力。

二、重新引入无限寿命设计概念

这个问题，杨晓蔚在《轴承》2013年12期上“滚动轴承的可靠性设计”一文中已作了详尽的论述。

由于滚动轴承中滚动体与滚道为点、线接触，接触应力水平较高，通常在2000 MPa左右，载荷条件恶劣时可达3000 MPa以上，同时应力循环数也较高。因此，轴承疲劳寿命主要按有限寿命要求进行设计。

在轴承工业发展初期，曾经提出过轴承无限寿命的概念并有所应用。这个概念认为：若轴承承受的载荷小于其载荷容量（滚动体与滚道之间的最大接触应力与材料规定强度相等时的轴承载荷），则轴承具有无限疲劳寿命，有可能永久使用。

但后来更多的理论认为：即使轴承安装正确、润滑良好、使用得当，但由于承受反复交变应力，最终也会由于疲劳而失效，不可能永远运转下去。因此，轴承寿命只可能是有限寿命。

瑞典 SKF 公司于 1984 年发表的新寿命理论又重新引入了轴承具有无限寿命的概念：在润滑、清洁度及其他运转条件理想的情况下，若轴承承受的载荷低于疲劳载荷极限 P_u ，将不会产生疲劳损坏，即轴承寿命是无限的。对于常规轴承钢， P_u 基于的接触应力约为 1500 MPa。

若接触应力低（小于 1500MPa）且运转条件理想时，轴承有可能达到无限寿命。

对于一般机械，寿命设计准则为：当其属于高周疲劳问题，即构件或系统承受的应力水平较低且应力循环数较高时（如传动轴、振动元件等），可进行无限寿命设计，其安全性由应力控制；当其属于低周疲劳占主导地位时，即构件或系统在高应力水平作用下工作且应力循环数较低时（如飞机结构、重型机械部件等），则应进行有限寿命设计，其安全性由寿命控制。

我们行业如何开展无限寿命设计，这是一个亟待研究解决的问题。

三、鲁棒性设计(robust design)

这是国际轴承业界近年来刚兴起的一种设计理念和实践。“鲁棒性”是英文 robust 或 robustness 的音译，意译则为强健性、稳健性、坚固性、耐用性。跨国轴承公司已推行这一理念并付之实践。如 SCHAEFFLER 的 X-life 圆柱滚子轴承，用 MPAX 黄铜实体保持架，就采用了“鲁棒性设计”，轴承更加耐受振动与冲击载荷，并适用于高速运转。NSK 最新推出的机床轴承就直接称为“robust”系列，不仅耐烧粘，而且具有耐磨损、抗疲劳等其他突出性能。SKF 对压缩机与泵类轴承的设计目标之一，就是提高其耐受非理想工况下的鲁棒性。NTN 针对风电齿轮箱轴承，“增强可靠的鲁棒性定制方案”已成技术准则。

我国对鲁棒性设计还未入门。

四、对高铁轴承应用钢材的质疑

跨国轴承公司研发应用了制造高速动车组轴箱轴承的专用钢材和相应的热处理工艺。

对于高速动车组轴箱轴承套圈，SKF 前期采用 SKF3（相当于 GCr15）高碳铬轴承钢，整体马氏体淬火+相应的高温回火。近年开发了专利贝氏体淬火钢 Xbite II 及相应的贝氏体淬火工艺；FAG 采用 100Cr6（相当于 GCr15）高碳铬轴承钢，贝氏体淬火；NTN 采用 SNCM420 相当于（G20CrNi2Mo）渗碳钢，渗碳+淬火。

对于高速动车组轴箱轴承滚子，SKF 采用 SKF3 高碳铬轴承钢，马氏体淬火，较高的淬火温度，较低的回火温度；FAG 采用 100Cr6 高碳铬轴承钢，马氏体淬回火，正常的淬火温度，较高的回火温度；NTN 采用 SUJ2（相当于 GCr15）高碳铬轴承钢，马氏体淬回火，正常的淬火温度，较高的回火温度。

我国企业对制造高速动车组轴箱轴承的钢材未作深入研究，对跨国轴承公司采用不同的钢材，不同的热处理工艺的机理并未真正掌握。

制造高速动车组轴箱轴承内外圈的钢材，欧系（SKF、FAG）轴承是采用高碳铬轴承钢，日系（NSK、NTN）轴承是采用渗碳轴承钢。我国现在研制的国产高速动车组轴箱轴承采用日系技术路线——渗碳轴承钢。对于欧系、日系二条技术路线各有什么优势、劣势，我们为什么要采用日系技术路线，应该研究清楚。

高速动车组轴箱轴承套圈采用 G20CrNi2MoA 渗碳轴承钢，国铁集团重大专项“高速动车组轴箱轴承关键技术研究”项目组拟定的技术条件中规定：“钢应采用真空自耗重熔（VAR）或炉外精炼（RH）方法冶炼”，即冶炼方法电渣重熔和真空脱气二种方法均可采用，只要能达到规定的技术要求。

但业界还是偏向应用电渣重熔钢，这可能是一种惯性思维。因为从 1978

年起，我国铁路货车轴承“滑改滚”（滑动轴承改滚动轴承），一直应用电渣重熔钢，实践证明效果良好。为突破偏向应用电渣重熔钢的惯性思维，应回顾一下历史。1978年从日本引进铁路货车轴承设计制造技术，引进的技术文件上规定制造轴承内外圈的渗碳轴承钢冶炼方法为“真空脱气”，因当时国内制造铁路货车轴承的钢材的定点生产厂家没有真空脱气冶炼技术，只有电渣重熔冶炼技术，铁道部只得将技术条件上冶炼方法改为“真空脱气（或电渣重熔）”。过了一段时间，电渣重熔钢使用效果良好，国内真空脱气冶炼技术还没有发展起来，铁道部又将冶炼方法改为“电渣重熔（或真空脱气）”，后来干脆把（或真空脱气）去掉，改为“电渣重熔”。如当时像现在这样，国内特钢厂真空脱气冶炼技术得到长足发展，就不必要作这样的改动。日本现在一直采用真空脱气冶炼方法，根本没有电渣重熔这一说。

确实，电渣重熔钢有的性能，如冲击韧性优于真空脱气钢，大冶特钢对不同冶炼方式生产的渗碳轴承钢 G20CrNi2MoA 进行同等条件下的对比试验，用电渣重熔法冶炼的冲击功 125J，而用真空脱气法冶炼的冲击功为 97J。但经过大的技术改进，兴澄特钢研发的用真空脱气法冶炼的高等级铁路轴承用钢 G20CrNi2MoA，冲击功已达到电渣重熔钢的水平，有的性能如氧含量还优于电渣重熔钢。

在二种冶炼方法生产的渗碳轴承钢都能满足高速动车组轴箱轴承长寿命、高可靠性的要求的情况下，是不是一定要采用冶炼耗电量得多，从而成本和价格也高得多的电渣重熔钢，这应该是我们要研究和解决的重要问题。

五、是否一定要用渗碳钢

这里提出一项需深入研究的重要技术变革——用 42CrMo4 无软带淬火取代 G20CrNi4Mo (A) 渗碳淬火制造风电主轴轴承

风电机组双列圆锥滚子主轴轴承国际国内轴承业界通行的技术路线是用

渗碳轴承钢 G20CrNi4Mo (A) 渗碳淬火制造。

我国轴承行业应用的渗碳轴承钢有 6 种：G20CrMo (A)、G20CrNiMo (A)、G20CrNi2Mo (A)、G20CrNi4Mo (A)、G10CrNi3Mo (A)、G20Cr2Mn2Mo (A)。

使用最多的二种。一种是 G20CrNi2Mo (A)，用于制造货车轴承，未来国产高速动车组轴箱轴承也用这种渗碳轴承钢制造。另一种是 G20CrNi4Mo(A)，用于制造冶金轧机轴承和风电主轴轴承。

渗碳轴承钢经过渗碳淬火加工，可以获得很高的表层强度硬度和很好的心部组织韧性，非常适合于制造承受重载荷、冲击载荷的铁路轴承和冶金轧机轴承。

但是，渗碳轴承钢价格贵、加工费用高，尤其是需要表面深层渗碳的特大型轧机轴承和风电主轴轴承，需要用适合深层渗碳的 G20CrNi4Mo (A) 制造，这种 G20CrNi4Mo (A) 渗碳轴承钢价格昂贵（价格是高碳铬轴承钢的 3 倍），同时，深层渗碳要在 900℃ 以上高温加热 200 多小时，不仅要耗费大量电能，而且表层易产生有害的粗大碳化物（要费很大的劲才能消除），还会产生不易矫正的变形，而使工件报废，造成很大的损失。

这项从国外引进的技术，一直困扰着我国轴承厂家，一些专家多渠道寻找解决办法。一种办法是外径 $\varnothing 440 \sim \varnothing 800\text{mm}$ 的冶金轧机轴承，用强度、韧性优于 GCr15、GCr15SiMn 的 GCr18Mo，进行下贝氏体淬火，取代 G20CrNi4Mo (A) 渗碳淬火，制造冶金轧机轴承，这项技术改进已取得成功，并推广应用。但双列圆锥滚子风电主轴轴承超出了这个尺寸范围，无法应用这项技术。

我国轴承行业有二家轴承企业以“敢于第一个吃螃蟹”的精神，用中碳合金钢 42CrMo4（添加 Ni 等微量合金元素，优化合金成份），进行无软带表面淬火和激光表面淬火，取代 G20CrNi4Mo (A) 渗碳淬火，制造双列圆锥滚子风电主轴轴承，大大降低了材料费用和加工费用。希望我国轴承行业有关

专家和企业密切关注、积极参与这一技术进程，深入研究这一替代是否可以满足风电主轴轴承的工况所要求各项性能（强度、耐磨性、冲击韧性、疲劳寿命等）。深入研究这项技术，如在风电主轴轴承应用成功，可否移植到冶金轧机轴承，这项技术如能在风电主轴轴承和冶金轧机轴承的制造上成功应用，将会产生巨大的经济效益和社会效益。

六、稀土轴承钢的推广应用价值

稀土被称为“工业维生素”。

上世纪八十年代，我国曾一度出现过研发和应用稀土钢的热潮，但因加什么稀土，加多少，怎么加等技术瓶颈未突破，效果时好时坏，一度出现的稀土钢热，由热变冷。

李依依院士率领的中科院金属材料加工模拟研究团队，经过十年的努力，在钢中杂质形成机理的研究上取得突破，开发了商用稀土合金纯净化制备技术和钢中加入稀土的特殊加入技术，有望突破应用稀土冶炼高品质轴承钢的技术瓶颈。

李依依院士领导的团队研发稀土轴承钢的情况：

（1）原理

在轴承钢中加稀土铈 Ce、镧 La，每吨钢加 100 克~200 克，费用 10~20 元。

效果：

①纯净度——减少夹杂物 60%，细化夹杂物，软化夹杂物，较少点状不变形夹杂物 DS。

②均质性——使夹杂物分布均匀，各向同性，减少偏析，提高冲击功，减少机加工、热处理变形。

（2）试验情况

天马轴承集团公司和中科院金属所合作，进行了稀土轴承钢冶炼轧制工业性试验和用稀土轴承钢制造轴承的冷加工、热加工工艺试验。试验结果显示，用加入稀土冶炼的轴承钢制造的轴承，热处理变形显著减小，强化疲劳试验寿命和冲击功大幅提高。

但是，业内对是否应该推广应用轴承钢冶炼时加入稀土的技术，存在着不同的意见，主要因为：

(1) 轴承钢冶炼加入稀土的冶炼工艺路线与我国特钢企业现行的冶炼轴承钢工艺路线不同，特钢企业要改变工艺路线，难度很大。

(2) 由于稀土是很活跃的元素，加入稀土，易腐蚀炼钢炉炉壁。冶炼轴承钢加入稀土，炉壁使用寿命要缩短一半。

(3) 轴承钢冶炼时，加入稀土，易堵塞水口。这是最难以解决的问题。

(4) 冶炼时加入稀土，最佳加入量很难控制，加少了达不到应有效果，加多了，产生相反效果。

因此，业内有一种意见以为，如果其他冶炼工艺路线可以达到同样的效果，未必要采这一冶炼方法。

希望对这一问题进行深入研究，以期对轴承钢冶炼时加入稀土这一技术，要不要推广应用，在什么范围内应用，达成共识，避免投资失误。

七、对残余奥氏体的再认识

刘耀中、左传付在《轴承材料及热处理技术》一书中的“轴承零件淬回火后的残余奥氏体”一文对这一问题做出了详尽的论述。

轴承零件常规热处理后，不可避免地存在一定量的残余奥氏体，一般高碳铬轴承钢的残余奥氏体量为6%~15%（体积分数）。

由于残余奥氏体是质软且不稳定的组织，一旦钢中含量多，硬度就会降低，耐磨性变差。轴承在室温存放时，其残余奥氏体转变为马氏体和贝氏体，

体积增大。理论计算每转变 1%的残余奥氏体，其长度尺寸增大 0.01%。从硬度、耐磨性和尺寸稳定性方面考虑，淬回火后，残余奥氏体的含量越少越好。

但是，近年来，业界对残余奥氏体有新的考量，即考虑残余奥氏体对力学性能的有利影响。与马氏体相比，残余奥氏体硬度低，易变形，韧性及塑性高。一方面，残余奥氏体的存在可以改善表面的接触应力状态，降低应力集中，使疲劳裂纹源不易形成，尤其是在污染润滑条件下，这种作用更显著。另一方面，裂纹扩展时与残余奥氏体相遇，奥氏体易于发生变形并产生诱发相变，吸收裂纹扩展能量并延缓裂纹尖端应力集中，使裂纹扩展速率减慢或终止扩展，韧性提高，也可以提高疲劳寿命。因此，研究表明，适量高的残余奥氏体对提高轴承的接触疲劳寿命是有利的，当残余奥氏体量低于 10%，具有最好的接触疲劳寿命。

对于具体的轴承零件，残余奥氏体量的多少，应视轴承的具体工况和性能要求而定。主要应考虑轴承的尺寸精度要求。

仪器仪表轴承等微小型轴承，工作时承受的载荷较轻且平稳，其失效形式主要是因尺寸精度的丧失，或振动、噪声超标，极少因疲劳剥落或其他破坏形式而失效。对于这类尺寸精度要求高的轴承，零件淬回火后残余奥氏体量越少越好，其稳定性越高越好。

冶金轧机轴承、大型电机轴承等承受较重载荷，且常常承受大的冲击载荷的中型、大型、特大型轴承，轴承的失效形式多为疲劳剥落，有时还会出现套圈或滚动体开裂。这类轴承要求具有较高的承载能力和一定的韧性。而对尺寸精度要求则处于第二位。其零件淬回火后应适当保留一定量的残余奥氏体，以提高轴承的接触疲劳寿命。

所需残余奥氏体量的获取，要通过调整淬回火的温度、保温时间等热处理工艺参数达到。（另文详述）

日本 NSK 公司采用自行开发的 STP (Super-TP) 钢和 HTP (Hi-TF) 钢制造风机增速器轴承。增速器在工作过程中，齿轮磨损产生的微小金属颗粒，在轴承工作表面形成压痕，压痕边缘形成高的应力集中，成为疲劳源，导致剥落，缩短轴承使用寿命。NSK 公司开发的用中碳合金钢碳氮共渗的 STF 和 HTF 钢，通过严格控制碳氮共渗工艺，使零件表面得到较多的稳定的残余奥氏体（约 30~35%）和大量细小的碳化物、碳氮化物。后者可保证表面的硬度和耐磨性，使压痕不易形成；前者可以降低压痕的边缘效应，阻止疲劳源的形成和扩展，从而大大提高轴承在如风力发电机增速器这样的在污染润滑工况下的使用寿命。这方面，洛阳轴承研究所已进行了汽车变速器轴承应用这项技术的研发工作，并取得初步成果。我国轴承行业应研究在风力发电机增速器轴承如何应用这项技术。

八、表面淬火技术的优选

风电轴承中偏航变桨轴承、三排滚子主轴轴承的套圈用 42CrMo4 制造进行表面淬火，目前行业里应用了几种不同的表面淬火工艺，需深入研究，优选最佳表面淬火工艺。

现在国内外风电轴承产业通行的工艺路线是电磁感应表面淬火。感应器产生的电磁感应在工件内产生涡流而加热，随之喷淋淬火介质进行淬火。这种淬火方法有一大缺陷，即扫描感应加热路径的末端与起点重叠时，会使起点已淬火的部位回火，产生一个软带。在使用时，软带处易受到磨损，导致早期破坏。

为解决这个问题，国际上开发了无软带感应淬火工艺和装备。新强联回转支承股份有限公司已率先从国外引进无软带淬火工艺和装备。这种工艺使用的装备有二个加热淬火组件，每个组件由预热感应器、加热感应器和淬火介质喷淋器组成。这二个加热淬火组件绕着要淬火的轴承滚道表面向相反方

向移动,扫描要淬火的滚道表面加热淬火。每个组件扫描加热淬火半圈滚道。在起始区和结束区,二个组件紧靠着加热滚道,且旋转平台带动工件摆动,这样就可以保证在起始区和结束区各个部位,包括二个组件交界处都加热到相同的淬火温度,喷淋淬火后不会产生软带。

目前我们行业还有一家风电轴承表面热处理采用完全不同工艺路线的企业——北京京冶轴承股份有限公司(京冶轴承)。这家企业应用自己研发的风电轴承激光表面淬火技术(亦称激光相变硬化技术)已有十多年的历史。这项技术被列入国家“863”计划项目,并获国家科技发明二等奖。

这项技术的基本原理是高能量高密度的激光束快速照射要淬火的工件表面,使其要硬化的部位瞬间吸收光能并立即转化为热能,使激光作用区温度急剧上升。此时,冷态基体与加热区之间有很大的温度梯度,一旦停止激光照射,加热区的金属急冷而淬火,产生硬化。据京冶轴承介绍,这种工艺进行的表面淬火,马氏体晶体细,位错密度高,硬度高,耐磨性好,变形小甚至无变形,无须回火,淬火区获得压应力不易产生裂纹。可根据需要调整硬化层深度,无需冷却介质,无废气废水排放,低碳环保。

九、两个加工难题的破解

有两个貌似简单的“小儿科”的问题,实际上很难解决的问题,需要发力解决。

一是车加工轴承套圈滚道,车加工产生的铁屑的断屑问题。由于断屑困难,难以排屑,必须操作者用铁钩从加工区钩出。一些企业想在车床应用机器人,就是因为这个问题未解决,机器人的应用迟迟未能实现。沈阳机床研发的、想靠其起死回生的“i5”数控车床,研发了包括高压水刀在内的多种断屑方法,均未成功,以至原先应用机器人的设想未能实现。希望目前正在想方设法解决这个问题的企业不要气馁,咬咬牙,坚持下去,总能找到解决

办法。

二是实体铜保持架去毛刺的方法。实体铜保持架孔加工后，会留有毛刺。小毛刺可以通过振动光蚀、抛丸等方法去除，大毛刺通过机械、化学的方法无法去除，只能人工用手锉去除毛刺。有一次，我陪同一位跨国轴承公司的高管参观我所在的工厂。这位高管在铜保持架锉毛刺工部停留很久，看得很仔细，我问他们的工厂有没有代替人工锉毛刺的方法，他耸耸肩：“没有。和你们一样干。”现在，国内瑞谷科技进行了用小机器人铣毛刺的试验，希望能够成功。还有没有别的办法，需要行业里相关专家和企业研究。