

新能源乘用车变速箱轴承材料及热加工关键技术控制

浙江五洲新春集团股份有限公司技术中心主任王明舟

【摘要】 文章分析了新能源汽车性能与轴承性能的关系，比较了各种冶金质量轴承钢关键技术指标，分析了材料失效模式，提出了新能源变速箱汽车轴承选材原则，同时分析了热加工质量对新能源汽车轴承寿命影响，提出了性能源变速箱汽车轴承先进的热加工制造方式及对热加工质量的控制。

【关键词】 变速箱轴承；冶金质量；特殊过程；近净成形；控形控性；表面改性技术；

新能源乘用车变速箱轴承包括深沟球轴承、角接触轴承、四点接触轴承、圆锥滚子轴承、圆柱滚子轴承^[1]。



圆锥滚子轴承 圆柱滚子轴承 深沟球轴承 角接触球轴承 四点接触球轴承

新能源汽车轴承工作特性：高转速、高承载、低摩擦、低噪音、长寿命，为适应新能源汽车轴承工作特性，相对应轴承材料、热加工特性见表 1^[1, 2]。

表 1 新能源汽车轴承特性与轴承材料、热加工特性对应表

新能源汽车性能	对应轴承应具备性能	对应轴承材料、热加工性能		
		材料	锻造	热处理
响应速度快	高转速	高抗拉强度	无过热	表面高硬度
动力强劲，输出转矩增大	轴承所承受的接触应力、负荷增大	高屈服强度	无过烧	表面高耐磨性
免维护	长寿命，50 万公里甚至更长	高疲劳强度	无锻造裂纹	表面高而稳定残余奥氏体
		高耐磨性	无碳化物网状流线分布合理	工作面少、无屈氏体 表面少、无热处理缺陷

长续航里程	低摩擦、轻量化		控形控性	组织均匀细小
舒式性	低噪音			

为提高新能源汽车变速箱轴承寿命，在轴承结构上除采用计算机仿真软件进行模拟设计，对轴承滚道进行低摩擦优化设计，微观修形，减少因应力集中而导致的早期失效；模拟轴承内部应力云图，计算最大接触应力、摩擦力矩及刚度、效率、预紧力等技术参数外，更需控制决定轴承寿命的关键因素：材料、热加工工艺。

一、材料质量控制

新能源变速箱汽车轴承为中小型轴承，使用的棒料直径一般小于 80mm。从表 1 可以看出，随着轴承性能提高，需要更高的材料性能，因此对材料的冶金质量提出更高要求，见表 2。

表 2 材料冶金质量要求

轴承性能要求	材料性能	材料冶金质量要求	关键控制项目
高转速、高承载 、长寿命、轻量化、 精密化	抗拉强度	纯度极高化	氧、钛及微量元素
	高屈服强度	组织均匀化	带状、网状
	高疲劳强度	颗粒细小化	夹杂物、碳化物颗粒
	高耐磨性	质量一致化	过程稳定性

我国轴承常用材料为 GCr15，按冶金质量分为优质轴承钢、高级优质轴承钢、特级优质轴承钢，超高洁净轴承钢^[3, 4]，见表 3。

表 3 轴承钢冶金质量分级

冶金质量分级	标准
优质钢	GB/T18254-2016
高级优质钢	
特级优质钢	
超高洁净高碳铬轴承钢	GB/T38885-2020

对高碳滚动轴承钢棒材，其三大关键技术指标：

- 1、氧、钛含量及微量元素含量；
- 2、夹杂物级别；
- 3、碳化物均匀性级别包括网状、带状、液析级别

高碳铬 GCr15 轴承钢，按 GB/T182254-2016、GB/T38885-2020 标准，不同冶金质量，氧、钛含量及微量元素不同，见表 4，夹杂物级别、碳化物均匀性见表 5、表 6。

表 4 不同冶金质量氧、钛含量及微量元素

冶金质量	化学成分													
	不大于													
	Ni	Cu	P	S	Ca	O	Ti	Al	As	AS+Sn+Sb	Pb	H2	Mo	
优质钢	0.25	0.25	0.02 5	0.02 0	-	0.0012	0.0050	0.05 0	0.04	0.04	0.075	0.002	-	0.01
高级优质钢	0.25	0.25	0.02 0	0.02 0	0.0010	0.0009	0.0030	0.05 0	0.04	0.04	0.075	0.002	-	0.01
特级优质钢	0.25	0.25	0.01 5	0.01 5	0.0010	0.0006	0.0015	0.05 0	0.04	0.04	0.075	0.002	-	0.01
超高洁净钢	0.25	0.25	0.01 5	0.00 6	0.0005	0.0005	0.0010	0.05	0.04	0.03	0.00 5	0.002	-	0.01

表 5 不同冶金质量夹杂物级别

冶金质量	A		B		C		D		Ds
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	
	合格级别/级，不大于								
优质钢	2.5	1.5	2.0	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	2.0 (38 μm)
高级优质钢	2.5	1.5	2.0	1.0	0	0	1.0	0.5	1.5 (27 μm)
特级优质钢	2.0	1.5	1.5	0.5	0	0	1.0	0.5	1.0 (19 μm)

超高洁净钢	1.5	1.0	1.0	0.5	0	0	1.0	0.5	0.5 (13 μm)
-------	-----	-----	-----	-----	---	---	-----	-----	-------------

表 6 不同冶金质量碳化物均匀性

冶金质量	公称直径 mm	网状		带状		液析					
		放大倍数	级别	放大倍数	级别	放大倍数	级别				
优质钢、高级优质钢	≤60	200	≤附录 A 第 7 级别图	100	3.0	100	2.0				
	>60~80			500	3.0			2.5			
特级优质钢	≤60			100	2.5			100	1.5		
	>60~80			500	2.5					2.0	
超高洁净钢	≤30,			200	≤附录 A 第 7 级别图			100	2.0	100	0
								500	1.0		
	>30~60	100	2.5			100	0				
		500	1.5								
	>60~80	100	3.0			100	0.5				
		500	2.0								

备注：放大 100 倍评定碳化物带状宽度，放大 500 倍，评定带状碳化物密度。

从上述表中可以看出，冶金质量不同，材料关键指标有很大区别，在设计产品时需根据轴承工况，选择不同级别的轴承材料。新能源汽车轴承宜选择特级优质轴承钢或超高洁净轴承钢。

高标轴承钢需对钢棒进行超声及涡流或漏磁探伤，按要求去除钢棒心部、表面的裂纹，提高轴承的可靠性。

材料失效模式分析，因材料原因导致轴承失效模式见表 7。

表 7 材料失效模式

失效模式	导致后果	防止措施
夹杂物超标	轴承疲劳失效	控制氧、钛含量；真空脱气；冶炼原料质量
网状碳化物超标	轴承冲击性能下降，脆性增加，导致沿晶开裂；降低耐磨性；早期疲劳剥落	轧制时，采用控轧控冷工艺，抑制网状碳化物析出

碳化物带状超标	化学成分偏析，导致轴承中碳化物分布不均；淬火组织超标，硬度不均，使机械性能不一致；增加过热敏感性，增加淬火裂纹风险；增大套圈热处理变形；带状碳化物易剥落，降低轴承疲劳寿命	浇注时控制过冷度，钢液波动；高温扩散退火；控制轧制比；
碳化物液析超标	热处理容易产生裂纹；使用过程中表面液析碳化物容易剥落，显著降低轴承的耐磨性；液析碳化物易导致疲劳失效	改进钢液结晶冷却过程；适当提高高温扩散退火温度与加热保温时间

二、热加工质量控制

新能源汽车轴承热加工包括轴承锻造与热处理两个特殊过程。

1、新能源汽车轴承锻造质量控制

锻造的三大质量问题：过热、过烧；折叠、裂纹；混料^[5]。

新能源变速箱汽车轴承的锻造多采用中频感应加热方式，为避免过热、过烧现象的发生，中频感应加热设备标准配：加热超温报警；三路自动分选；中频冷却水温、水压报警；温度实现闭环控制；温度测量采用红外线高温测量仪。折叠与裂纹涉及因素较多，折叠往往是毛刺压入导致，裂纹与过程温度控制有关；混料包括材质混料、炉批号混料、型号混料，与过程管理相关。锻造导致的质量问题见表 8。

表 8 锻造质量问题原因分析

锻造质量问题	产生原因	防止措施
过热、过烧	机械磨损导致卡顿	定时维护，配置温度报警，三路分选。
	传送方式不可靠	夹棍式传送，配置温度报警，三路分选。
	返工产品形态各异，中频加热温度难以控制	采用电炉加热返工
毛刺产生折叠	热剪温度高，套筒与刀板间隙过大；切料刀板磨损	采用温剪工艺，对模具进行寿命管理

	镢饼形状呈马蹄形	提高作业技能或采用机器人作业
	冲孔模与冲头磨损，间隙过大产生毛刺	提高模具寿命；对模具进行寿命管理
	高温剪切下料重量误差大	采用温剪工艺，提高下料精度
	毛坯宽度或平行差过大	镢饼模寿命管理；保证料锻垂直放置
	偏心导致毛刺	调整模具中心
	碾压温度低	监控成形温度，调整冷却水流量
	碾压操作过快	采用机械手，数控辗扩机，减小人为误差
裂纹	成形温度过低或过热过烧	控制加热、成形温度
湿裂	成形冷却水过大，冷却温度超过相变温度形成贝氏体或马氏体	控制冷却水流量
	落下品碰到水形成裂纹	落下品报废
网状超标	停锻温度高，冷却慢	超过停锻温度 800℃，采用风冷或雾冷，700℃以下堆冷
混料	异材混料	棒料堆放区域划分，标识清楚，火花检查
	材料炉号混料	按规格、炉号放置，先进先出
	型号混料	设备周围清场；控制装料高度；检查料框

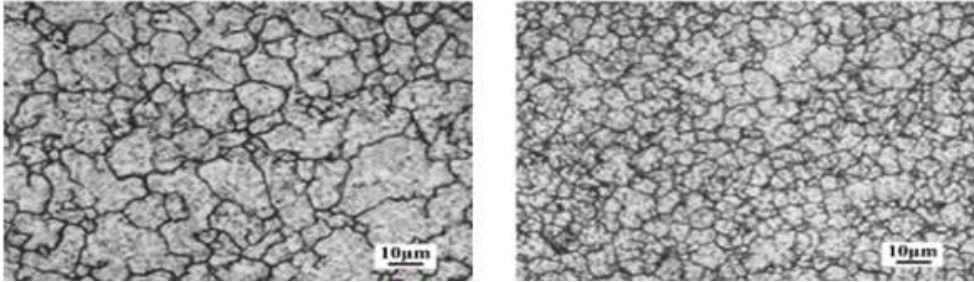
2、新能源汽车锻造先进工艺

1) 近净成形技术^[6]

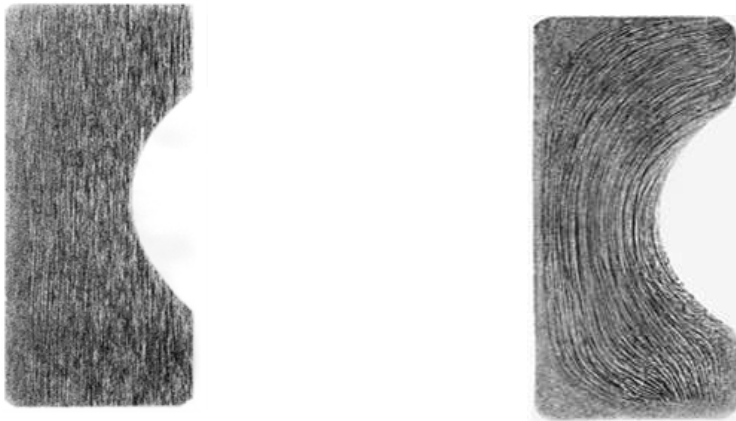
近净成形技术是将锻件与冷辗技术相结合，用于生产高端金属环形零件，是先进的毛坯制造技术，在常温下辗扩，它不仅尺寸精度高，节约原材料，节材率可达到 15%~30%，而且产品内在质量高，滚道流线分布合理，晶粒细化见图 1，轴承疲劳寿命提高见表 9，世界领先的轴承制造商均已采用这一技术，同时冷辗技术也受到国内轴承企业的重点关注。

表 9 高速锻造+冷辗对产品性能的影响

性能	高速锻+冷辗	热辗扩	棒料直接车加工
热处理后晶粒度	10.5	9.5	8~8.5
疲劳寿命	2125 小时	1578 小时	635 小时
金属流线	有致密层、流线明显、连续	形成流线、但不明显	无流线形成



传统晶粒冷辗扩晶粒



传统流线冷辗扩流线

图 1 冷辗晶粒度与金属流线

2) 控形控性技术

锻造自动化，减少人为误差，保证锻件质量一致性与稳定性。

高速锻造：自动加热、自动剪切，机械手自动传递，自动成形，自动冲孔、分离，实现快速锻打，速度可达 120 次/min,适用于大批量中小轴承、汽车零部件的锻造

多工位步进梁：采用热模锻设备，在同一台设备上完成压饼、成形、分离、冲孔等工序，工序之间传递采用步进梁，适用于中型轴承锻造，生产节

拍 10~15 次/min。

机器人代替人：根据锻造工序，多台压机连线，压机之间产品传递采用机器人传递，适用于中大型轴承或齿坯锻造，生产节拍 4~8 次/min；

机械手代替人：改造现有锻造连线，采用简易机械手代替人，操作简单，投资少，适用于小型企业自动化改造。

3) 控锻控冷技术^[7]

双“细化”：精确的温度控制，防止锻件过热、过烧；细化晶粒；

控制锻后冷却速度，防止出现网状（见图 2），细化组织，提高轴承疲劳寿命。

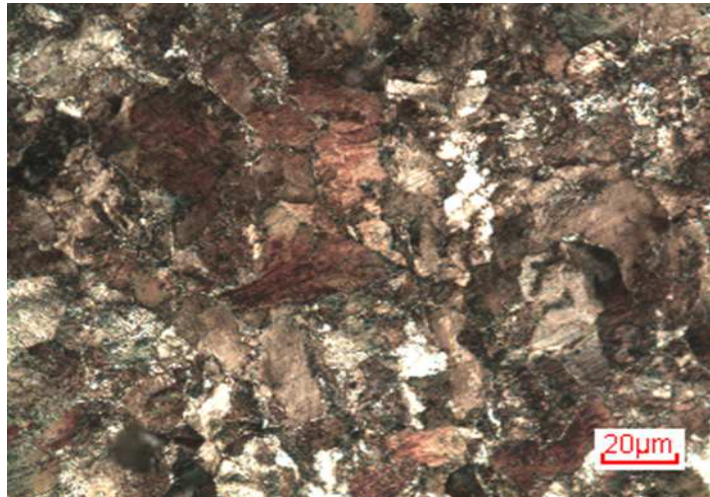


图 2 轴承钢控锻控冷后组织，无网状碳化物

4) 保护气氛，余热利用技术

近净成形工艺毛坯尺寸精密，加工留量少。高速锻造后，锻件退火必须在保护气氛下进行球化退火，降低脱碳层，高速锻造锻件，保护气氛下产品脱碳见图 3、图 4。



图 3 高速锻件表面脱贫碳层

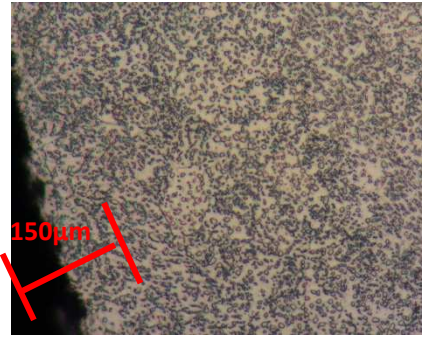


图 4 保护气氛下脱贫碳层

5) 球化退火余热利用技术

轴承钢 650℃球化退火完成后，从 650℃冷却至 200℃出炉（见工艺曲线图 5），通常情况下这部分热量被白白浪费，将这部分释放的热量用来加热刚进炉膛的室温冷料，从而达到节能目的（见图 6），能耗达到 150~160kw. h/吨,比传统退火节能达 40%以上。

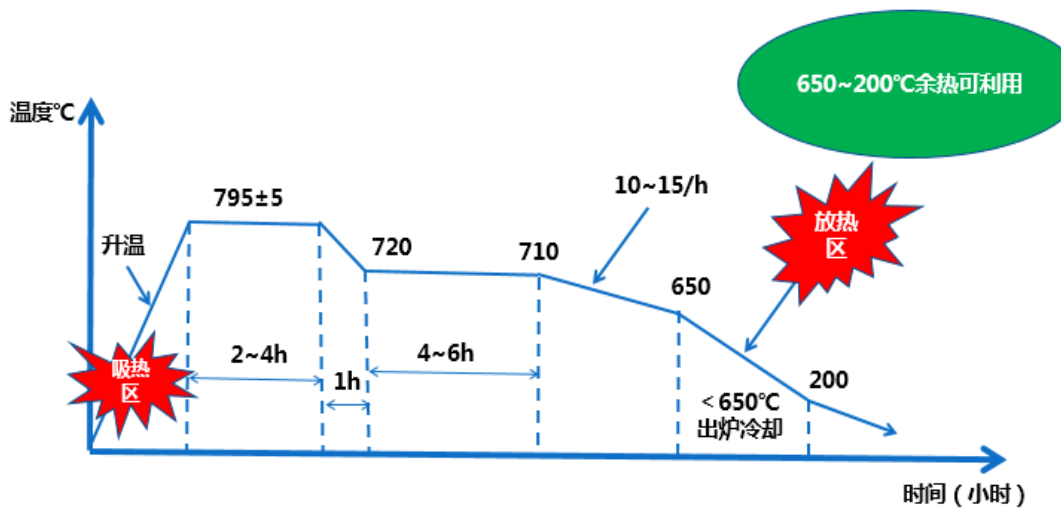


图 5 典型的高碳铬轴承钢等温球化退火工艺曲线

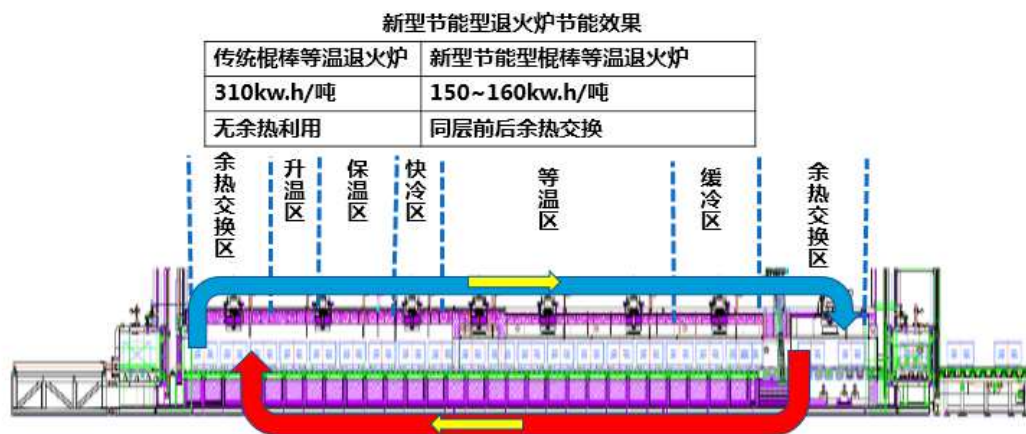


图 6 高碳铬轴承钢等温球化退火余热利用原理

3、新能源汽车轴承先进热处理工艺

根据新能源汽车工况：变速箱轴承需在高速、高承载、长寿命、低摩擦、低噪音下工作，同时轴承的工作环境比较恶劣，轴承在运行过程中，变速箱内存在很多的金属碎屑，会在轴承工作表面形成压痕，引起应力集中，成为疲劳源。故要求热处理后产品得到高硬度、高耐磨性，高强韧性配合的独特性能，尤其是工作表面。而硬度与韧性是一对矛盾，高硬度往往伴随高脆性，轴承设计时希望轴承工作面有一层坚硬、耐磨组织，提高裂纹萌生的门槛值；同时又有高的韧性，提高裂纹扩展功，阻止裂纹扩展。奥氏体是面心立方结构，硬度低韧性高，是阻止裂纹扩展的理想组织，从而提高轴承的疲劳寿命，因此在表面获得高硬度、高耐磨性的同时，希望得到高的残余奥氏体组织，但表面残余奥氏体含量提高又会影响表面硬度，而且奥氏体是不稳定相，轴承工作时在外力、一定温度作用下，残奥会发生分解转变为马氏体。由于转变的马氏体没有回火，故会发生微裂纹的风险，同时残奥转变会使轴承尺寸发生变化，最终导致轴承失效，因此过高的残余奥氏体也是不利的，为此 GB/T34891-2016 标准中规定，常规回火残余奥氏体 $\leq 15\%$ 。但 15%残余奥氏体不足以提高新能源变速箱轴承的疲劳寿命，表面需得到 20%以上的残余奥氏体，才能起到残奥的有利作用，要求残余奥氏体必须稳定，又不能影

响硬度，仍需保证高的耐磨性，这需要对轴承表面进行特殊热处理工艺----复合热处理表面改性技术。

1) 轴承表面改性技术

为获得长寿命、高可靠性、免维护的高性能轴承，符合新能源变速箱轴承的工况，需对全淬透性高碳铬轴承钢制轴承套圈表面进行特殊热处理即高碳铬轴承钢碳氮共渗复合热处理^[8]。

2) 氮对扩渗层的影响

碳氮共渗时，固溶在奥氏体中的氮会明显降低 AC1 温度，(奥氏体相开始形成)，并使共析点向下移动，扩大奥氏体区范围，碳、氮进入基体后，两者在奥氏体中的溶解度互相产生影响，可在轴承渗层获得富氮马氏体，并形成氮化物、碳氮化合物新相，大大增加耐磨性，同时残奥明显增加，由于氮的溶入使残奥稳定性也显著增加。

3) 碳氮共渗层对轴承性能的影响

①提高共渗层淬硬性，获得富氮(碳)马氏体，具备更优良的耐磨性；②表面渗层获得很高的含氮残余奥氏体含量，提高抗裂纹萌生、扩展的能力，提高疲劳寿命；③含氮残余奥氏体提高了残奥的稳定性；④获得新相组织：氮化物、碳氮化合物，进一步提高耐磨性；⑤获得很高的残余压应力，可获得更高温度下稳定的残余应力；

4) 高碳轴承钢碳氮共渗主要控制技术指标

①共渗层深度；②表面硬度，基体硬度；③渗层表面缺陷：空隙、晶界氧化、脱贫碳、屈氏体网；④表面自由铁素体；⑤表面无碳化物层深度；⑥共渗层均匀性；⑦渗层氮含量、碳含量；⑧共渗层碳化物/碳氮化合物尺寸大小及形貌⑨共渗层、心部基体屈氏体级别；⑩共渗层、心部基体马氏体级别；⑪共渗层、心部基体残余奥氏体含量；

结束语

高碳铬滚动轴承钢制轴承套圈进行表面碳氮共渗复合热处理是一项先进的热处理技术，适用于恶劣工况下工作的轴承，同时也适用于节能减排小型化趋势下工作的轴承，可以显著提高轴承的疲劳寿命。

【参考文献】

- 1、《滚动轴承新能源汽车减速器用轴承轴承》标准会议交流资料；
- 2、中国轴承行业材料技术委员会第七届年会交流资料；
- 3、GB/T18254-2016《高碳铬轴承钢》；
- 4、GB/T《GB/T 38885-2020 超高洁净高碳铬轴承钢通用技术条件》；
- 5、《轴承套圈锻造》洛阳轴承研究所；
- 6、《一种轴承滚道流线控制近净成形工艺的制作方法》武汉理工大学专利号 21009040；
- 7、郭浩等《控锻控冷工艺对 GCr15 轴承钢力学性能的影响》，《金属热处理》2020.第 11 期；
- 8、《高氮碳氮共渗》工艺控制和仪表 2017.4；
- 9、赵兴新等《高碳轴承零件表面化学热处理工艺》重庆长江轴承工业有限公司，专利号 200510057410.0