

超大规格连铸圆坯开发助力大型轴承“绿色制造”

江阴兴澄特种钢铁有限公司

摘要：本文介绍了兴澄超大规格连铸圆坯的核心技术要点以及在大型轴承领域的应用与推广，兴澄利用“低氧低钙低残余有害元素纯净钢冶炼技术”、“高纯、高致密、匀质化连铸集成创新技术”等一系列关键控制技术实现 $\geq \Phi 1000\text{mm}$ 超大规格连铸圆坯生产过程的流场、温度场、磁场的精准耦合，改善了连铸低倍中心疏松、裂纹、表面裂纹问题，产品应用于风电主轴轴承和盾构主机轴承领域，替代进口产品，同时相对于模铸锭提升了 10-15% 的材料利用率，简化了锻造加工流程，降低能耗，实现绿色制造。

关键词：超大规格；连铸圆坯；轴承；绿色

1. 前言

随着国民经济向高质量全面深入发展，尤其是国家“3060”双碳战略目标的深度实施^[1]，催生清洁风能、超超临界火电、抽水储能发电、工程机械等行业都向着绿色低碳发展^[2-5]：风电机组大型化，尤其是海上风电普遍都是 6MW-28MW 的大型风机，使得风塔法兰、轴承套圈、齿圈等大型环锻件的规格也越来越大，直径普遍达到 $\Phi 6000-\Phi 12000\text{mm}$ 之间；超大功率超超临界火电机组所需的超大口径耐高温高压的无缝管直径最大达 $\Phi 1400\text{mm}$ ；抽水储能发电机转子的磁轭环单重 30-50 吨；工程机械的回转支撑、盾构机主轴承的直径也是达 $\Phi 4000-\Phi 10000\text{mm}$ ，这些大型产品，都需要高质量 $\geq \Phi 1000\text{mm}$ 超大直径、单重 30-50 吨的坯料，而这些坯料市场上当时只有模铸锭，由于模铸工艺生产效率低下，能耗高，成坯率比连铸工艺要低 10% 以上，导致生产成本很高，且不能大批量生产，甚至质量波动大，既不符合绿色低碳发展要求，更难以满足市场日益增长的需要，市场矛盾凸显，因此开发大规格、高质量、低成本、能大批量生产的坯料代替模铸锭，践行绿色低碳发展模式成为我国

钢铁行业的迫切需要。但随着连铸圆坯规格越大，开发技术难度也越大，兴澄特钢在植根连铸大圆坯近 20 年的研发生产，不断刷新世界连铸大圆坯记录^[6, 7]，目前最大规格 $\Phi 1320\text{mm}$ ，实现连铸大圆坯更大范围替代模铸，以便满足国家重大需求及绿色低碳发展需要。

2 超大规格连铸圆坯的核心技术要点

2.1 低氧低钙低残余有害元素纯净钢冶炼技术

超大规格连铸圆坯炼钢采用纯净钢冶炼路线，经过“KR-BOF-LF-RH-CCM”，使钢水中磷、硫、钛及五害元素控制在较低水平，并且采用转炉高拉碳、精炼强脱氧、RH 真空深脱氧、连铸全保护浇注相结合技术将全氧含量降到 15PPM 乃至 10PPM 以下，通过对夹杂物形成热力学研究和计算，结合三元渣系相图，设计出熔化温度、碱度、活度、黏度等都非常理想的渣系，确保夹杂物的上浮与吸附。在全流程调控的纯净钢冶炼新技术下生产的连铸大圆坯，确保了轴承高级别探伤要求及良好的力学性能和疲劳寿命。

2.2 高致密、匀质化连铸集成创新技术

随着连铸圆坯规格的扩大，坯料心部质量的控制难度随之上升，光靠以往的经验 and 简单的将工艺参数等比例调整是远远不够的，为获得中包与结晶器最优流场，将浇注过程流场、温度场、磁场科学匹配，使心部过热快速消散，降低横截面温度梯度，达到均匀凝固收缩，减少中心疏松、裂纹的目的，我们开展了超大断面圆坯中间包及结晶器 1:1 水模及数模试验。

图 1 为中间包水模的实物图与模拟测试过程记录图，通过对不同设计方案的中间包水模试验的参数分析，挑选死区少、RTD 曲线相对平滑、各流一致性好的中间包模型，图 2 为各流 RTD 曲线及出口纵截面温度分布云图。图 3 为结晶器水模和模拟测试过程记录图，图 4 为试验中不同类型浸入式水口模型的实物图和其在试验中反馈的液面波动曲线，根据试验记录数据与理论计算结果相对比，寻求最优解，达到优化连铸大圆坯中心质量，保持坯料高

纯净度的目标。

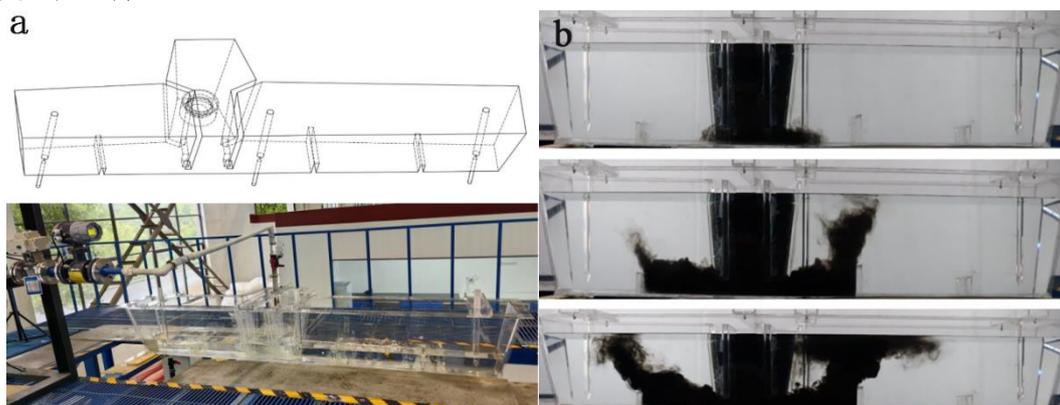


图 1 中间包水模的实物图 (a) 与模拟测试过程记录图 (b)

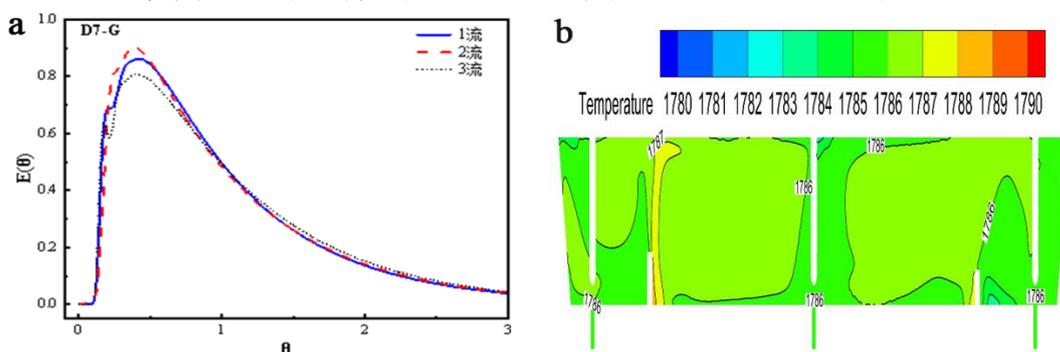


图 2 各流 RTD 曲线 (a) 及出口纵截面温度分布云图 (b)

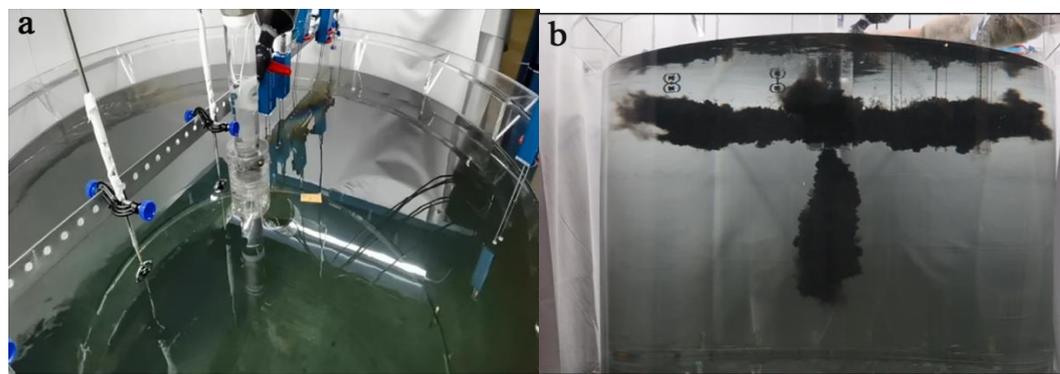


图 3 结晶器水模的实物图 (a) 与模拟测试过程记录图 (b)

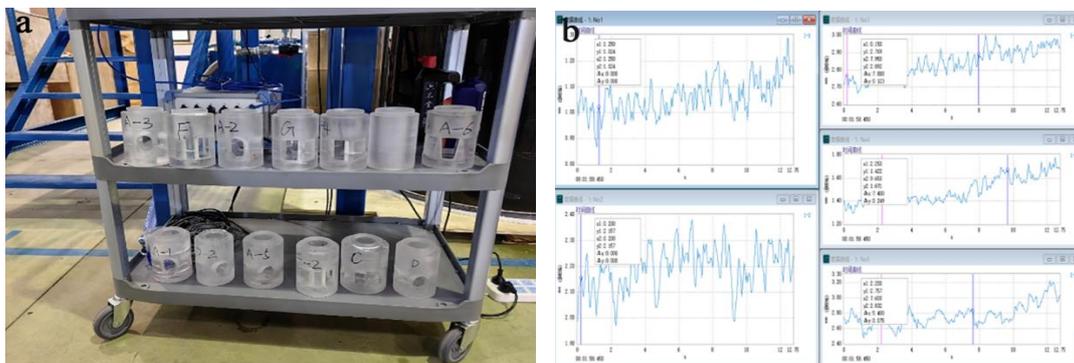


图 4 不同类型浸入式水口模型的实物图 (a) 和其反馈的液面波动曲线 (b)

通过对水模实验成果的应用，连铸大圆坯的低倍中心质量整体上得到了有效的改善，图 5 为水模试验前后的低倍图片对比，表 1 和表 2 分别为水模试验成果应用后的中心疏松与中心裂纹的评级统计，可以看出，经过 1: 1 水模与数模试验的开展，理论结合实际，挑选合适的中间包及水口类型，使得大圆坯低倍中心质量表现出高水平和高稳定性。

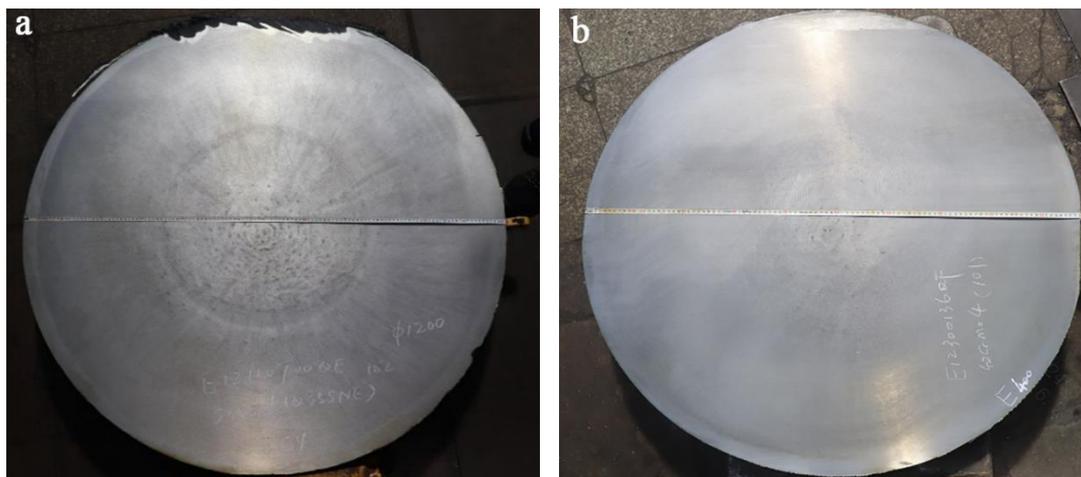


图 5 水模试验前 (a) 与水模试验成果应用后 (b) 的低倍图片

表 1 优化流场后的超大规格圆坯低倍中心疏松统计结果

名称	≥ Φ1000mm 中心疏松各级别占比 (%) (按 YB/T153-2015)						总计
	0 级	0.5 级	1 级	1.5 级	2 级	2.5 级	
42CrMo 系列	53	27	15	5	0	0	100
Q345E 系列	48	24	21	7	0	0	100

注：全部满足 1.5 级要求，且一级以内占 95% 以上。

表 2 优化流场后的超大规格圆坯低倍中心裂纹统计结果

名称	≥ Φ1000mm 中心裂纹各级别占比 (%) (按 YB/T153-2015)						总计
	0 级	0.5 级	1 级	1.5 级	2 级	2.5 级	
42CrMo 系列	63	21	16	0	0	0	100
Q345E 系列	58	25	17	0	0	0	100

注：全部满足 1.0 级要求。

3 超大规格连铸圆坯在轴承领域的应用

3.1 大型风电主轴轴承

风电主轴轴承是风机最关键零部件之一，不但要承受来自机头叶片、偏航系统以及自身重量很大的径向载荷，同时承受轴向载荷和冲击载荷，对材料轨道耐磨性、芯部冲击韧性都有很高的要求^[9]，目前该产品主要依赖进口，主要使用模铸锭或钢锭锻材来制造，生产效率低且成本高。兴澄通过对风电偏航、变桨轴承 42CrMo4 数据积累及不断研究，成功开发了改进版的 42CrMo4TT 产品，满足了客户各项性能要求，目前最大可生产 $\Phi 1200\text{mm}$ 规格。连铸大圆坯代替钢锭来生产大型风电主轴轴承不但降低了生产成本，同时也契合国家节能减排，绿色可持续发展的政策方向，图 6 为风电主轴轴承的剖面示意图和连铸圆坯锻件实物图。

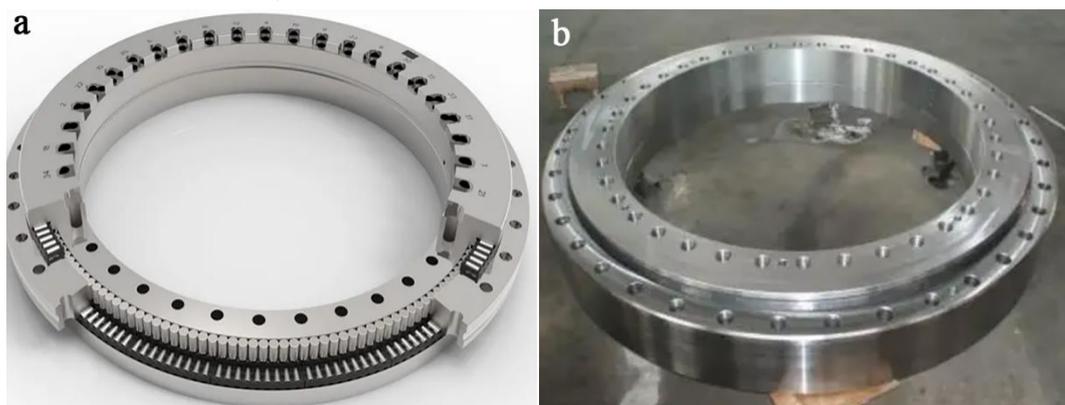


图 6 风电主轴轴承的剖面示意图 (a) 和连铸圆坯锻件实物图 (b)

由于风电主轴轴承的工作环境特殊，在产品全截面不同位置，各项指标均需满足设计要求，图 7 为性能检测取样位置示意图，产品开发初期，利用连铸大圆坯生产风电主轴轴承样件，并按图 7 所示进行全截面各位置取样，分别进行力学性能、冲击功、晶粒度等检测，表 3 至、4 为各项检测结果，图 8 为各取样位置晶粒度金相图片。其中力学性能与冲击功都展现出从表面至环件芯部逐渐降低的规律，但均能满足设计要求，个位置硬度检测偏差约为 30HBW，说明全截面硬度比较均匀。从金相图片可以看出，全截面不同位

置取样，晶粒细小且分布均匀，其晶粒度评级均在 6.5-7.5 级，满足设计大于等于 6.0 级要求。

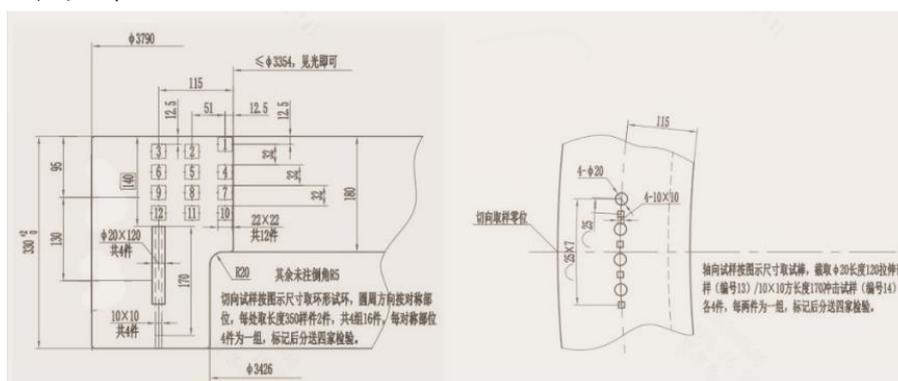


图 7 风电主轴轴承性能检测取样位置示意图

表 3 全截面不同位置力学性能和硬度检测结果

编号 位置	抗拉强度 Rm	屈服强度 Rp0.2	延伸率 A	断面收缩率 Z	硬度/ HBW
1	989	854	18	63	284
2	956	773	17.5	67	294
3	938	765	17	64	291
4	996	853	16	64	298
5	958	779	16	62	279
6	953	786	16.5	62	278
7	970	824	16	63	283
8	960	793	18	61	275
9	965	795	18.5	60	278
10	985	813	18	66	283
11	946	762	18.5	62	273
12	953	767	16.5	58	284

表 4 全截面不同位置冲击功检测结果

编号位置	冲击功 1	冲击功 2	冲击功 3	冲击功平均
1	73	67	69	70
2	45	38	36	40
3	29	33	35	32
4	60	49	47	52
5	32	34	29	32
6	29	31	30	30
7	49	64	57	57
8	33	32	28	31
9	35	34	36	35
10	68	66	65	67
11	61	43	54	53
12	27	29	34	30



1号 (7.5级)



3号 (7.0级)



4号 (7.5级)



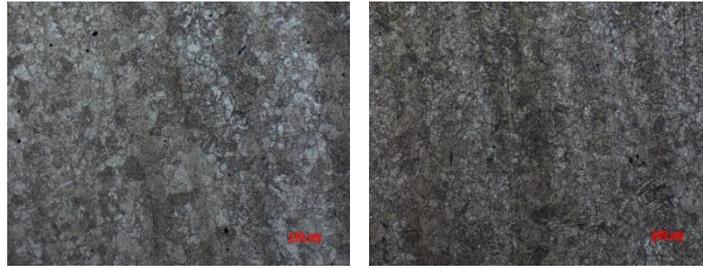
5号 (7.0级)



6号 (7.5级)



8号 (6.5级)



11号 (6.5级) 2号 (7.5级)

图8 全截面不同位置晶粒度评级金相图片

利用 EVA 方法，统计材料非金属夹杂物尺寸，自环件外表面皮下 12.5mm 位置取样，每个检测面积不小于 150mm²，6 个试样磨制 4 次得到 24 个面的数据，每道次磨下量大于 0.3mm。得到的 24 个面的最大夹杂物尺寸后输入预测模型（见图 9），预测出该炉钢可能存在的最大夹杂物尺寸，该产品检测 2 次检测结果为 40.2 μm、32.33 μm，该结果反应钢水纯净度很高，有助于提高轴承运行疲劳寿命。

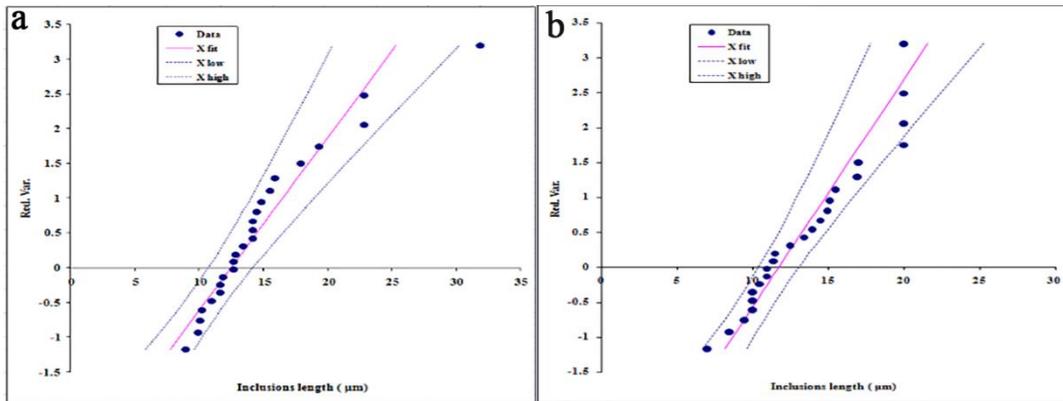


图9 EVA 检测模型及拟合曲线

3.2 大型盾构机主轴承

盾构机是地下掘进盾构施工中的主要施工机械，它在防止软基开挖面崩塌或保持开挖面稳定的同时，可在机内安全地进行隧洞的开挖和衬砌作业，目前在我国的城市地铁、过江公路隧道、跨海隧道等大型隧道工程项目中得到了广泛的应用。盾构机轴承是盾构机的关键、核心部件^[10]，尤其是主轴承被视为盾构机的核心，长期以来一直依赖进口，国外产品长期技术垄断。

目前盾构机向着大型高效、智能化、多功能、长寿命、高可靠性、定向

准确的方向发展。兴澄在该领域创新开发超大规格连铸圆坯代替模铸或电渣生产轴承钢坯，连铸工艺对钢水中夹杂物多级过滤能获得相对模铸更洁净的钢水，且圆柱型坯料相对锥形钢锭在锻制轴承套圈时更是“近终型”，还能减少下游锻造环节工序，所以大圆坯连铸在提高钢水洁净度的同时还可提效降本，实现绿色制造。

图 10 为盾构机主轴承用 $\Phi 1200\text{mm}$ 连铸圆坯的低倍图片，兴澄通过“连铸集成创新技术”生产出高纯净度、高致密度、高均质化的成熟产品，获取国内电渣材、国外材（未知工艺）与兴澄连铸大圆坯三种盾构机主轴承材料进行 ASPEX 扫描对比分析，结果显示兴澄连铸材优于国外材，稍逊于国内电渣材，如图 11 所示。表 5 为兴澄生产的连铸大圆坯制成盾构机主轴承的性能检测数据，波动较小且均能满足产品设计要求。同时对国外材料和兴澄材料在接触应力 4500MPa 条件下进行疲劳试验，试验结果如图 12 所示，兴澄材料最终结果拟合： $L_{10}=3.36 \times 10^7$ 、 $L_{50}=1.00 \times 10^8$ ，国外材料最终结果拟合： $L_{10}=1.33 \times 10^7$ 、 $L_{50}=7.07 \times 10^7$ ，兴澄材料疲劳寿命是国外材料疲劳寿命的 2.5 倍。兴澄连铸大圆坯制造盾构机主轴承各项质量指标稳定且能够满足标准要求，纯净度和疲劳性能还优于某些国外材。



图 10 盾构机主轴承用 $\Phi 1200\text{mm}$ 连铸圆坯的低倍图片

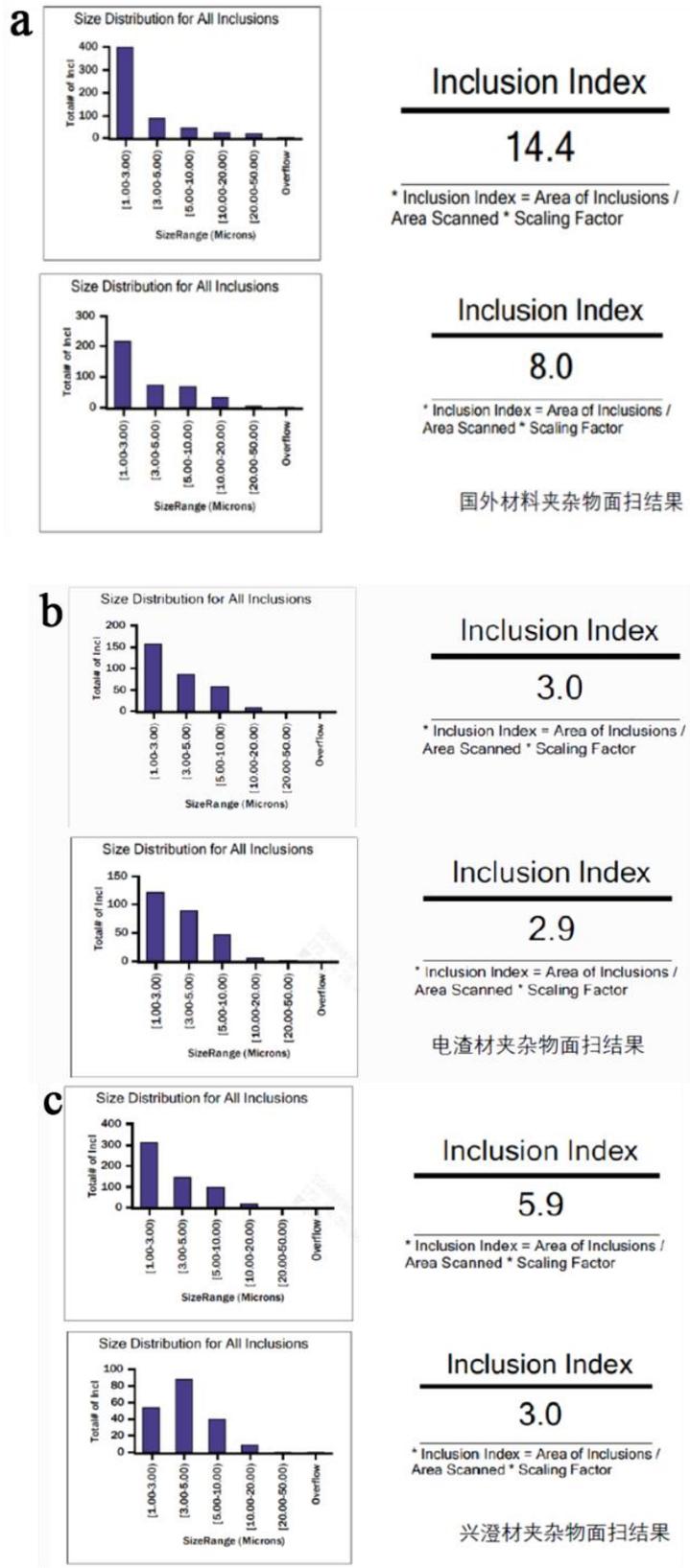


图 11 盾构机主轴承国外材料

(a)、国内电渣材料 (b)、兴澄连铸大圆坯材料 (c)

ASPEX 扫描对比分析结果

表 5 盾构机主轴承用兴澄连铸大圆坯材料力学性能检测结果

来样日期	材质	炉号	试样 编号	材料力学性能								
				抗拉 强度 (Mpa)	屈服 强度 (Mpa)	延伸 率(%)	断面 收缩 率(%)	冲击功			平均 值	
								试验温 度(℃)	1	2		3
2018.10.05	42CrMoE	E11802312QW	18-2504	870	725	21.5	66	20	130	128	125	128
2018.10.10	42CrMoE	E11802312QW	18-2549	907	757	19.5	57	常温	110	112	115	112
2018.11.29	42CrMoE	E11802312QW	18-3002	924	785	21	63	常温	110	112	118	113
2019.01.17	42CrMoE	E11802312QW	19-0181	950	815	21.5	65	常温	116	118	120	118
2019.05.29	42CrMoE	E11802312QW	19-1382	903	760	21	67	20	122	125	130	126
2019.05.29	42CrMoE	E11802312QW	19-1382	934	785	19	56	20	110	112	112	111
2019.06.09	42CrMoE	E11802312QW	19-1561	965	837	19.5	64	常温	102	108	108	106
2019.06.11	42CrMoE	E11802312QW	20-1848	916	770	20	59	20	101	101	102	101
2021.01.21	42CrMoE	E11802312QX	21-0297	934	804	18	64	20	107	118	108	111

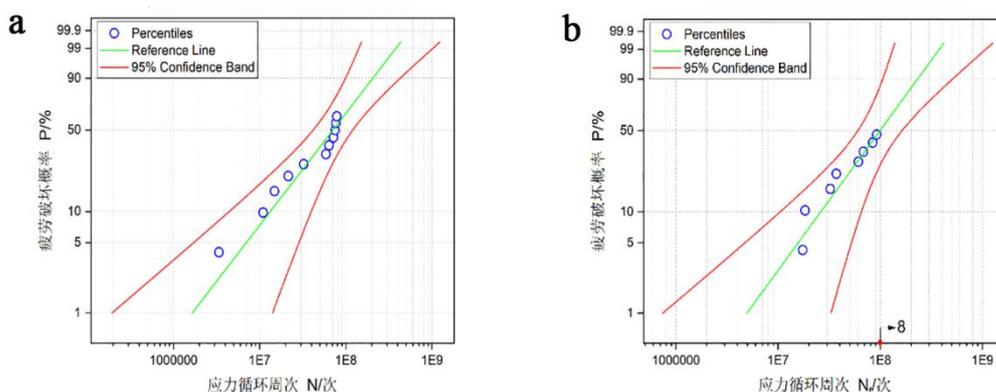


图 12 盾构机主轴承国外材料

(a) 和兴澄连铸大圆坯材料 (b) 滚动接触疲劳试验结果

4 结论

(1) 兴澄特钢凭借多年的连铸圆坯生产、开发经验，利用“低氧低钙低残余有害元素纯净钢冶炼技术”、“高纯、致密、匀质化连铸集成创新技术”等一系列连铸圆坯关键控制技术，实现 $\geq \Phi 1000\text{mm}$ 超大规格连铸圆坯生产过程的流场、温度场、磁场的精准耦合，改善了连铸低倍中心疏松、裂纹及表面裂纹的问题，同时最大限度发扬连铸夹杂物控制及高效浇注的优势。

(2) 兴澄超大规格连铸圆坯产品通过创新的成分设计、冶炼全流程控制及浇注工艺创新而提高洁净度，使得钢的强韧性更好、耐疲劳性能及机械性能更合理，在风电轴承和盾构机轴承领域得到应用，实现高档次特殊钢的国产化替代进口，同时相对于模铸锭提升了 10-15% 的材料利用率，简化了锻造加工流程，提高钢水洁净度的同时还可增效降耗，实现绿色制造。

参考文献:

[1] 聂子勋. 我国实现双碳战略的阶段性目标及路径[J]. 商业经济研究, 2023(23): 181-183.

[2] 赵靓. 企业家论坛一: 双碳时代下的风电技术发展前景[J]. 风能, 2023(11): 47-49.

[3] 余金虎. 以变革促发展——探究“双碳”背景下火电发展新挑战和新对策[J]. 中国设备工程, 2023(17): 251-253.

[4] 张博庭. 认清水电在实现“双碳”中的重要作用[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2024(002): 016.

[5] 王刚. “双碳”加速工程机械新能源“井喷式”爆发还有多远[J]. 建设机械技术与管理, 2022, 35(1): 2.

[6] 刘谦, 李峰, 蔡燮鳌. R12m 弧形连铸机生产大截面特殊钢圆坯的工艺实践[J]. 连铸, 2009(2): 4.

[7] 罗维. 中冶京诚与兴澄特钢合作的 $\Phi 1000\text{mm}$ 圆坯连铸项目热试成功[J]. 上海金属, 2012(1): 1.

[8] 周开明, 董娟. 弧形连铸机生产 S355NL/Q355NE 钢 $\Phi 1200\text{ mm}$ 连铸圆坯的工艺实践[J]. 特殊钢, 2023, 44(1): 5.

[9] 刘亚枫, 薛玉君, 李济顺, 等. 风电主轴轴承试验机轴系性能仿真分析[J]. 轴承, 2022(11): 8-12..

[10] 张涛. 盾构机主轴承力学性能分析及结构参数优化[D]. 中南大学, 2023.