



电气设备

优于大市（维持）

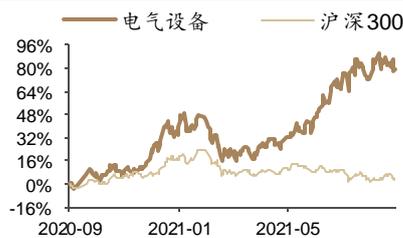
证券分析师

马天一
资格编号：S0120521050002
邮箱：maty@tebon.com.cn

研究助理

苏千叶
邮箱：suqy@tebon.com.cn
吴含
邮箱：wuhan3@tebon.com.cn
张家栋
邮箱：zhangjd@tebon.com.cn

市场表现



相关研究

- 《风电行业点评-风劲扬帆正当时，拥抱“十四五”风电需求确定性》，2021.9.16
- 《风电行业 2021 中报总结-成本下降招标高增，平价需求景气上行》，2021.9.14
- 《光伏行业 2021 中报总结-产业链博弈道阻且长，终端需求向好行则将至》，2021.9.6
- 《晶澳科技 2021 中报点评-Q2 业绩改善明显，产能扩张持续推进》，2021.8.24
- 《金杯电工 (002533.SZ)：新能源车扁线放量，产能快速扩张》，2021.7.30

新能源汽车扁线：尽享汽车电动化、电机扁线化双重红利

投资要点：

- **新能源车扁线电机大趋势。**扁线电机具有高能量效率、高功率密度、高集成度和低成本优势，有望快速替代传统圆线电机。扁线电机相比传统圆线槽满率提升 30pct，可在更小的铜线绕组和定子体积质量下实现相同电机功率，降低整车电耗同时提升续航，降低电池用量进而降低成本，同时更小电机体积有利于实现电驱系统多合一集成。同时，扁线绕线方式带来的低内阻提升电机能量转换效率，这也是改善整车续航和电池成本的重要因素。今年比亚迪、广汽等快速切换扁线电机，其他待上市潜在爆款车型蔚来 ET7、智己、极氪等也均采用扁线电机。
- **新能源车扁线有百倍市场空间。**根据测算，2020 年扁线电机的渗透率约为 10%，叠加新能源汽车渗透率约 5.4%，扁线电机的综合渗透率不到 1%。2021 年特斯拉换装国产扁线电机，电机性能进一步提升，引领电机扁线化风潮。未来新能源汽车取代传统燃油车，扁线电机取代传统圆线电机，扁线有百倍的市场空间。
- **新能源车扁线制备工艺分为三步：铜杆制备、扁导体制备、绝缘漆涂覆。**大部分企业外采铜杆，仅金杯电工自制铜杆具有成本优势；制备铜扁线有三种技术路线：连续挤压、拉丝成形、精轧成形。连续挤压工艺效率低，主要以拉丝和精轧工艺为主，技术路线各有优劣。绝缘失效是电机故障的主要失效模式之一，扁线的绝缘漆涂覆是关键工序，单层涂覆厚度不到 10 μ m，通常需要涂覆 10-30 层，如何保证 R 角处涂覆均匀、涂覆层偏心度控制、涂覆模具的一致性需要长期的技术积累。
- **800V 的扁线加工费更高，目前有厚漆膜和薄漆膜+PEEK 膜包两种技术路线。**800V 的电晕腐蚀出现概率增加，会对电机绝缘造成重大危害。厚漆膜工艺通过增加漆膜厚度、提升局部放电起始电压 PDIV 或耐电晕性能解决电晕腐蚀问题，但这通常会对其他性能造成影响。薄漆膜+PEEK 膜包工艺的综合性能碾压漆包产品，但存在专利和成本的瓶颈，塑料之王 PEEK 崛起之路道阻且长。
- **扁线电机有三条技术路线：Hair-pin、I-pin、S-winding。**三种技术路线都有各自优势，目前 Hair-pin 为主流，I-pin 以联合电子、博世为代表，S-winding 以博格华纳为代表。S-winding 对扁线的要求更高，加工费也更高。博格华纳凭借 S-winding 型绕组导线成型技术荣膺 2018 年《汽车新闻》杂志颁发的 PACE 大奖。长安汽车最新发布的蓝鲸 iDD 混合动力系统使用的就是 S-winding 电机。
- **投资建议：**预计 22-23 年是扁线渗透率快速提升期，已实现扁线量产的公司将充分享受第一波红利，重点推荐精达股份、金杯电工，建议关注长城科技、冠城大通。
- **风险提示：**扁线渗透率不及预期，新能源车销量不及预期，产能扩张不及预期。

行业相关股票

股票代码	股票名称	2020	EPS		PE		投资评级		
			2021E	2022E	2020	2021E	2022E	上期	本期
002533.SZ	金杯电工	0.34	0.48	0.67	15.60	15.81	11.36	买入	买入
600067.SH	冠城大通	0.21	/	/	17.44	/	/	暂未评级	暂未评级
600577.SH	精达股份	0.22	0.29	0.42	14.77	23.13	16.22	买入	买入
603897.SH	长城科技	0.98	2.38	3.19	18.25	20.03	14.93	暂未评级	暂未评级

资料来源：WIND，德邦研究所（长城科技盈利预测来自 Wind 一致预期，冠城大通无预测数据，其余来自德邦预测，数据截至 2021 年

10月14日收盘)

内容目录

1. 百倍市场空间，20年综合渗透率不足1%	8
1.1. 线材升级，带来扁线电机新事物	8
1.2. 渗透率展望，百倍市场空间	9
1.3. 行业发展驱动力，扁线电机的五大优势	10
1.4. 扁线电机应用的障碍正在逐个化解	13
2. 竞争格局：电动车扁线化带来集中度提升	17
2.1. 电磁线行业格局分散，竞争激烈	17
2.2. 扁线行业属于蓝海市场，目前仅四家公司量产	18
2.3. 新能源扁线产能及出货量：精达扩产最快	19
2.4. 研发及专利对比：精达和金杯领先	20
3. 铜杆加工：新能源车扁线对原材料铜杆要求高	21
3.1. 无氧铜杆的综合性能更优异	21
3.2. 自制铜杆有成本优势	22
3.3. 自制铜杆能实现废铜再利用，进一步降低成本	23
4. 铜扁线加工：拉丝、挤压、精轧三条技术路线	24
4.1. 连续挤压：生产效率低，应用较少	24
4.2. 拉丝成形：主流工艺路线，生产精度依赖于模具	25
4.3. 精轧成形：设备昂贵，不依赖模具，生产精度高	26
4.4. 三种工艺对比：拉丝为主流但依赖模具，精轧设备昂贵但性能更优	26
5. 绝缘涂覆：电磁线核心工艺，各家技术积累集中体现	29
5.1. 绝缘材料简介：车规级对耐热性能要求高	29
5.2. 涂覆精度依赖模具，将原有卧式涂覆设备改造成扁线立式涂覆设备难度大	30
5.3. 偏心度：各家技术积累的体现	32
5.4. R角变小，提升槽满率，对涂覆要求更高	35
6. 技术迭代：800V扁线与绕组成型技术路径	36
6.1. 新能源电机要求明显高于工业电机	36
6.2. 800V的扁线技术路径：厚漆膜VS PEEK，厚漆膜性能不佳但便宜	37
6.3. 绕组成型技术路径：Hair-pin占上风，长安iDD混动系统选择S-winding	41
7. 投资建议	46
7.1. 精达股份	46
7.2. 金杯电工	46

8. 风险提示 47

图表目录

图 1: 典型永磁电机组件	8
图 2: 典型永磁电机结构图	8
图 3: 整车对电机的主要需求	8
图 4: 扁线定子组件	9
图 5: 圆线定子组件	9
图 6: 扁线与圆线截面示意图	9
图 7: 扁线发卡示意图	9
图 8: 新能源汽车销量 (万辆)	10
图 9: 扁线电机渗透率	10
图 10: 电机损耗分解	11
图 11: 圆线/扁线截面示意图	11
图 12: 扁线/圆线电机槽满率示意图	11
图 13: 扁线电机与圆线电机高效区的对比	12
图 14: 动态油冷热管理技术	12
图 15: 特斯拉圆线电机、保时捷扁线电机连续 400m 加速	12
图 16: 圆线电机 Vs 扁线电机绕组端部对比	13
图 17: 上汽 8 层 hair-pin 扁线电驱动系统体积下降 50%	13
图 18: 华为七合一电驱	13
图 19: 趋肤效应	14
图 20: 邻近效应	14
图 21: 3D 打印铜线示意图	14
图 22: 3D 打印铜线样件	14
图 23: 保时捷 Taycan 电机细节图	15
图 24: 电驱生产线示意图	15
图 25: 电磁线分类	17
图 26: 2020 年全国电磁线竞争格局	17
图 27: 电磁线下游应用	17
图 28: 各企业电磁线业务占比 %	18
图 29: 各企业电磁线营收	18
图 30: 各企业电磁线营收增速	18
图 31: 各企业电磁线毛利率	19

图 32: 各企业电磁线单位加工费	19
图 33: 专利对比	20
图 34: 研发人员数量对比	20
图 35: 研发费用对比	20
图 36: 研发费用/营收占比对比	20
图 37: 浸涂法生产工艺	22
图 38: 无氧铜杆	22
图 39: 无氧铜杆与电解铜价格比较 (元)	23
图 40: 中国铜杆加工费平均水平 (元)	23
图 41: 电解铜与废铜价格比较	23
图 42: 扁铜线成型工艺流程图	24
图 43: 连续挤压原理图	24
图 44: 上引铜杆的连续挤压过程	24
图 45: 大拉工艺流程及产污环节图	25
图 46: 中拉工艺流程及产污环节图	25
图 47: 精轧机	26
图 48: 异形拉丝模具	27
图 49: 圆形拉丝模具	27
图 50: 精轧机	28
图 51: 拉丝机	28
图 52: 常见聚合物电介质材料及其耐温等级	29
图 53: 聚酯亚胺、聚酰胺酰亚胺和聚酰亚胺结构	30
图 54: 立式漆包机	31
图 55: 毛毡涂覆绝缘漆工艺	31
图 56: 模具涂覆绝缘漆工艺	31
图 57: 涂漆模具介绍	32
图 58: 涂漆模具	32
图 59: 某漆包线切面图	32
图 60: 漆包线偏心度示意图	32
图 61: 漆膜厚度对导线尺寸的影响示意图	34
图 62: 保驰捷 Taycan	37
图 63: Taycan 快充 SOC-功率曲线图	37
图 64: 脉冲电压	38

图 65: 电晕腐蚀	38
图 66: 扁线导体漆膜涂层分布	38
图 67: PEEK 化学方程式	39
图 68: PEEK 的应用	39
图 69: 各材料性能对比	40
图 70: 多层挤出与单层挤出	40
图 71: 本田 IMD 扁线示意图	40
图 72: 古河公司抗变频器浪涌绝缘电线	41
图 73: 圆线径向嵌套	42
图 74: 径向波绕组	42
图 75: 发卡示意图	42
图 76: Hairpin 绕组	42
图 77: I-pin 示意图	43
图 78: I-pin 绕组示意图	43
图 79: S-winding 扁线示意图	43
图 80: S-winding 扁线示意图	43
图 81: S-winding 扁线电机的定子示意图	43
图 82: 电装公司的 S-winding 扁线电机局部图	43
图 83: 长安汽车 iDD 混合动力系统	44
图 84: 精达股份归母净利润预估	46
图 85: 金杯电工归母净利润预估	47
表 1: 各畅销车型扁线电机使用情况	9
表 2: 实际有效电量与电机工作效率的关系	10
表 3: 各家公司扁线产能	19
表 4: 无氧铜杆性能优势	21
表 5: 铜杆工艺方法	21
表 6: 电阻受导体面积敏感度分析	27
表 7: 变频主驱动电机工艺尺寸控制精度 (mm)	28
表 8: 漆包线不同偏心度对击穿电压的影响	33
表 9: 漆包线不同偏心度对击耐刮擦性能的影响	33
表 10: 漆膜厚度对槽满率影响的分析	34

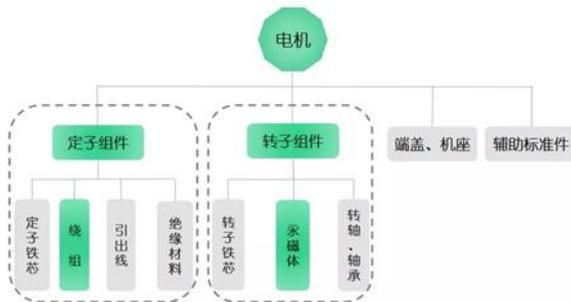
表 11: R角对槽满率影响的敏感度分析.....	35
表 12: 电动汽车用电机与工业电机的对比.....	36
表 13: 耐电晕漆包线涂层材料.....	39
表 14: 技术路线对生产的影响.....	44
表 14: 电机企业技术路线.....	45

1. 百倍市场空间，20 年综合渗透率不足 1%

1.1. 线材升级，带来扁线电机新事物

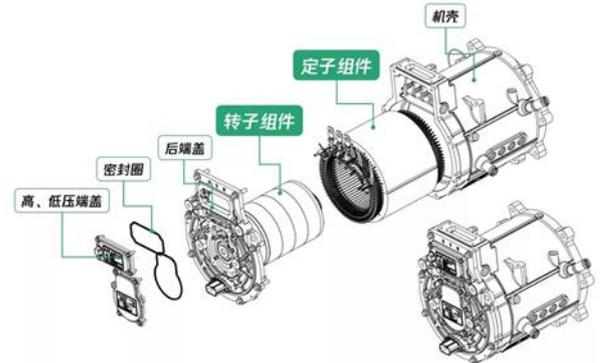
扁线应用于永磁同步电机的铜线绕组当中。以绝大部分新能源汽车采用的永磁同步电机为例，电机结构包括定子组件、转子组件、基座、端盖以及其他辅助标准件。定子组件包含了定子铁芯、铜线绕组、引出线和绝缘材料，一般与电机壳体固定。铜线绕组又区分为传统圆线绕组以及新型扁线绕组。转子组件包含转子铁芯、永磁体、转轴、轴承等部件，和输出转轴相连，带动齿轮驱动车辆行驶。

图 1：典型永磁电机组件



资料来源：电车资源，德邦研究所

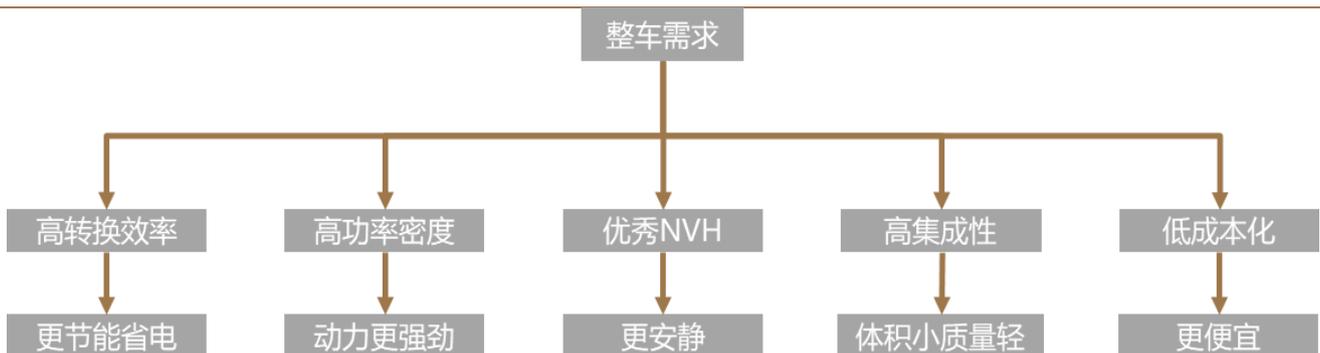
图 2：典型永磁电机结构图



资料来源：绿芯频道，德邦研究所

电机的发展始终围绕整车需求，扁线电机对传统圆线电机有碾压性的技术优势。新能源汽车目前处于快速发展时期，产品质量快速提升，消费者对整车性能要求越来越高。整车对电驱系统的主要需求包括：高效率，高功率密度，优秀 NVH，高集成性和低成本；扁线电机在这 5 个技术指标上均碾压传统圆线电机。

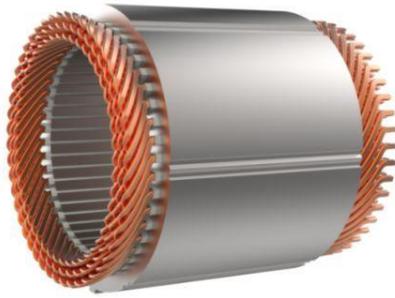
图 3：整车对电机的主要需求



资料来源：西安西玛电机公司官网，德邦研究所

电机绕组导线横截面积为四边形，与传统圆线电机差异明显。在扁线电机的定子组件制造过程中，需要把绕组做成发卡形状，通过插入方式安装入定子，故这种扁线电机又被称为发卡电机。

图 4：扁线定子组件



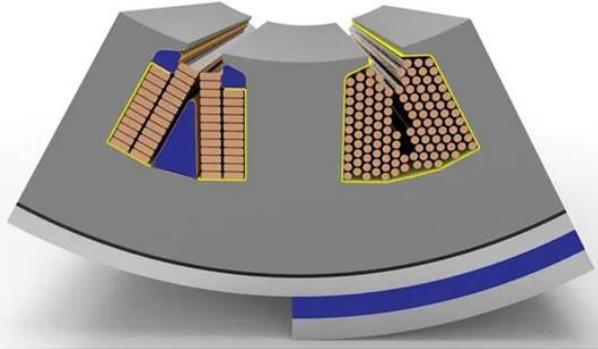
资料来源：搜狐汽车，德邦研究所

图 5：圆线定子组件



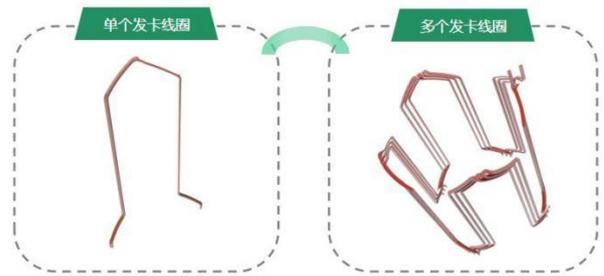
资料来源：搜狐汽车，德邦研究所

图 6：扁线与圆线截面示意图



资料来源：车云网，德邦研究所

图 7：扁线发卡示意图



资料来源：电车资源，德邦研究所

1.2. 渗透率展望，百倍市场空间

扁线电机渗透率快速提升。2021 年特斯拉换装国产扁线电机，带动渗透率大幅提升，扁线电机的趋势已经确定。

表 1：各畅销车型扁线电机使用情况

2020 年新能源汽车销量排名				2021 年 1-8 月新能源汽车销量排名			
排名	车型	销量/辆	漆包线	排名	车型	销量/辆	漆包线
1	特斯拉 (Model 3)	139925	圆线	1	宏光 mini EV	221492	圆线
2	宏光 MINI	119255	圆线	2	model 3	92631	圆线/扁线
3	宝骏 E 系列	47704	圆线	3	model y	59900	圆线/扁线
4	欧拉 R1	46774	圆线/扁线	4	比亚迪汉 EV	50707	圆线
5	埃安 (Aion S)	45626	圆线	5	理想 one	48176	圆线/扁线
6	全新秦 PRO EV	41621	圆线	6	奔奔 EV	45187	圆线
7	奇瑞 eQ	38214	圆线	7	Aion S	43543	圆线
8	理想 ONE	33186	圆线/扁线	8	比亚迪秦 Plus DMI	43077	扁线
9	比亚迪汉 EV	29073	圆线	9	奇瑞 eQ	42311	圆线
10	蔚来 ES6	27961	圆线/扁线	10	欧拉 R1	41760	圆线/扁线
11	宝马 5 系 PHEV	25692	圆线	11	小鹏 P7	31715	圆线
12	上汽名爵 EZS	23983	扁线	12	哪吒 V	27152	圆线
13	北京 EU 系列	23365	圆线	13	科莱威 CLEVER	24935	圆线
14	威马 EX5	22236	扁线	14	比亚迪宋 DM	24587	圆线
15	比亚迪唐 DM	20743	圆线	15	蔚来 ES6	24034	圆线/扁线

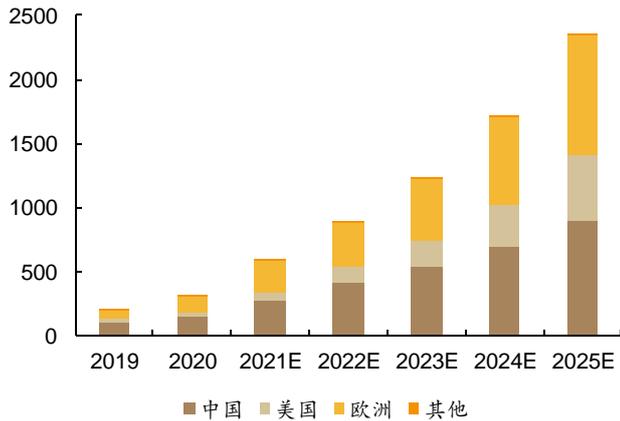
资料来源：公开资料整理，德邦研究所

众多潜在爆款车型使用扁线电机，预计 2025 年渗透率将快速提升至 95%。2021 年上海车展中，扁线电机大放异彩，众多高端车型均搭载扁线电机。比亚迪

的 DMI 车型和 e++ 平台全系都是扁线电机，大众 MEB、蔚来 ET7、智己 L7、极氪 001 等明星车型采用的都是扁线电机。

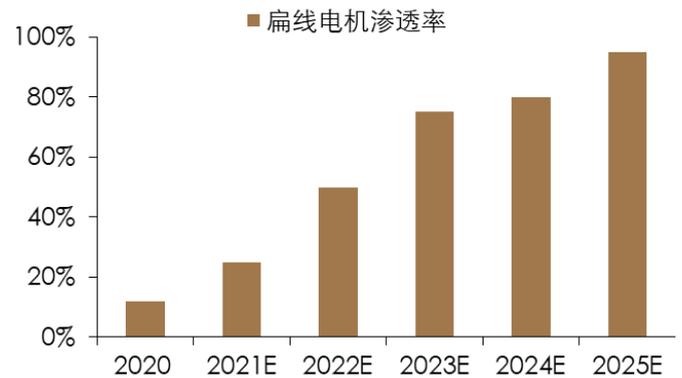
预估 2025 年新能源汽车全球销量 2367 万辆。根据《新能源汽车产业发展规划（2021-2035 年）》，目标到 2025 年新能源汽车销售渗透率达到 20% 左右，到 2035 年纯电动汽车成为新销售车辆的主流；根据新能源汽车近年来的产销状况，我们在此基础上预计中国新能源汽车销量 2025 年达到 896 万辆（渗透率 30%），全球销量 2367 万辆。

图 8：新能源汽车销量（万辆）



资料来源：中汽协，德邦研究所

图 9：扁线电机渗透率



资料来源：EV 世纪，乘联会，德邦研究所

扁线未来有百倍市场空间。根据测算，2020 年扁线电机的渗透率约为 10%，叠加新能源汽车渗透率约 5.4%，扁线的综合渗透率不到 1%。未来新能源汽车取代传统燃油车，扁线电机取代传统圆线电机，扁线有百倍的市场空间。

1.3. 行业发展驱动力，扁线电机的五大优势

优势一：高能量转换效率带来电池成本节约。

扁线电机能大幅度提升转换效率，降低电池成本。根据上汽绿芯频道评估，在 WLTC 工况，扁线电机比传统圆线电机的转换效率高 1.12%；在全域平均下，两者效率值相差 2%；在市区工况（低速大扭矩），两者效率值相差 10%。按照典型的续航 500km 的 A 级轿车（搭载 60kwh 电池包和 150kw 电机）计算，WLTC 工况下，搭载扁线电机的电池成本节约 672 元，市区工况下，电池成本节约 6000 元。

单车千元级别的成本节约对车企意义重大。以蔚来汽车为例，2021Q1 单车毛利 8417 元，单车净利仅 -2239 元。在新能源车和动力电池成本仍然偏高的情况，如何降低成本是车企的永恒追求，提高电机工作效率则是降本的有效途径之一。

表 2：实际有效电量与电机工作效率的关系

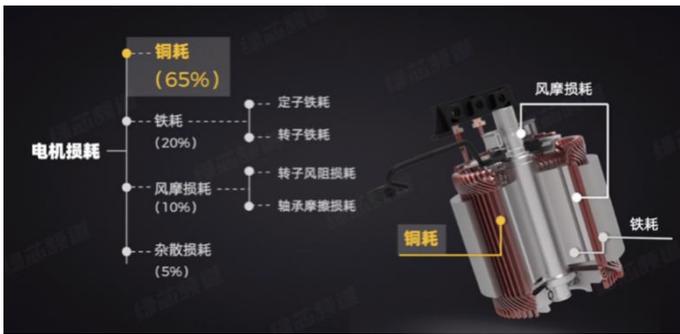
电池总电量 kwh	电机工作效率	实际有效电量 kwh	实际耗损电量 kwh	耗损电量成本/元
60.0	90%	54.0	6.0	6000
60.0	91%	54.6	5.4	5400
60.0	92%	55.2	4.8	4800
60.0	93%	55.8	4.2	4200

60.0	94%	56.4	3.6	3600
60.0	95%	57.0	3.0	3000

资料来源：德邦研究所，电池成本以 1 元/wh 计算
注：以续航 500km 的主流 A 级轿车为测算对象

铜耗降低带来扁线电机转换效率高于圆线。电机损耗的能源中，有 65%来自于铜耗，20%来自于铁耗，10%来自于风摩损耗，5%来自于杂散损耗。而铜耗来自于电流通过铜线时的电阻发热 $Q=I^2R$ ，当槽满率越高时，相同功率电机所需要的铜线更短，进而内阻降低，发热减少，铜耗降低。

图 10：电机损耗分解



资料来源：绿芯之友，德邦研究所

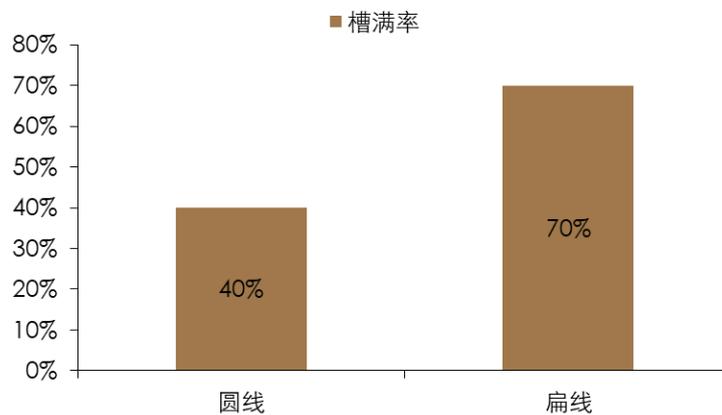
图 11：圆线/扁线截面示意图



资料来源：绿芯之友，德邦研究所

从理论上来说，圆线的槽满率一般在约 40%左右，而扁线则可以提升至 70%。由于圆线的截面为圆形，不可避免在导线间存在不规则缝隙，而扁线间的间隙更小，槽满率更高。

图 12：扁线/圆线电机槽满率示意图

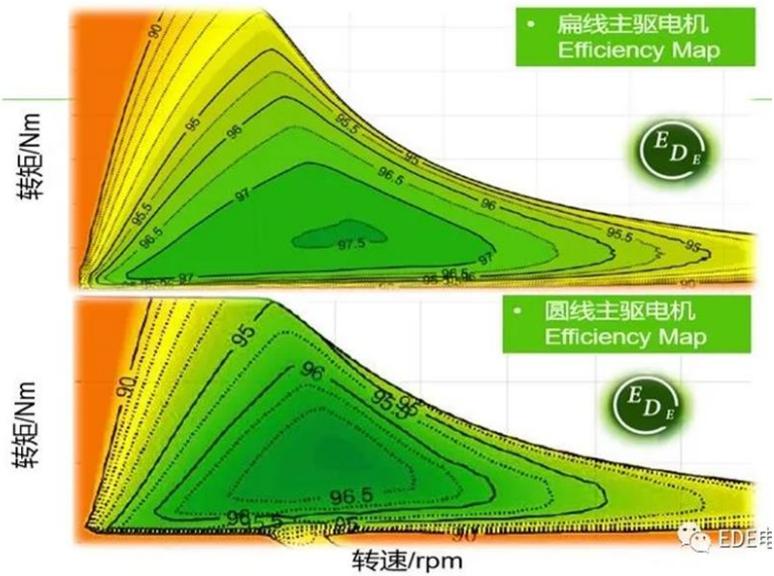


资料来源：沃克能源，诺元电机设备，德邦研究所

扁线电机的高效率区间比圆线电机高出许多，圆线电机的高效区一般要求是效率 >85% 的区间占比不低于 85%，被称为“双 85”。而扁线电机的效率 >90% 的区间占比不低于 90%，被称为“双 90”。

电机的效率与转速和扭矩相关，市区工况中出现的频繁启停工况属于低转速高扭矩工况，而这正是圆线电机的低效率区间，而扁线电机在该工况下的转换效率更高。

图 13：扁线电机与圆线电机高效区的对比

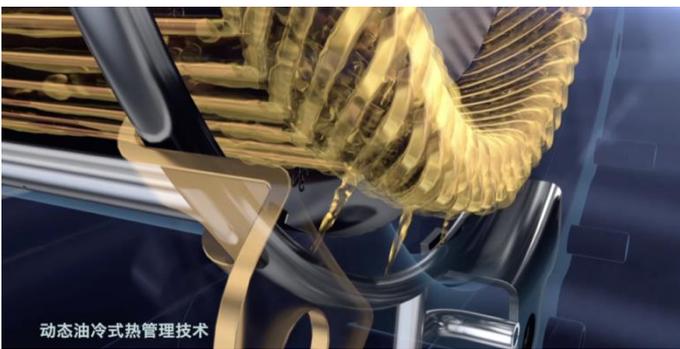


资料来源：EDE 电驱纪元，德邦研究所

优势二：散热性好，提升高温动力性

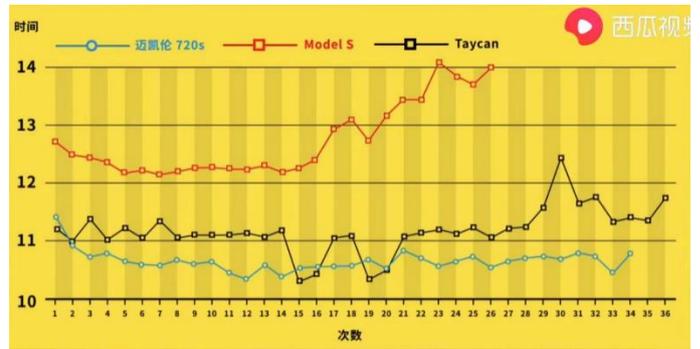
扁线电机散热性能好，温升相对圆线电机降低 10%。因扁线相对圆线更为紧密的接触，散热性提升，研究发现高槽满率下绕组间的导热能力是低槽满率的 150%。绕组在热传导能力上具有各向异性，轴向的热传导能力是径向方向的 100 倍。更低的温升条件下，整车可以实现更好的加速性能。

图 14：动态油冷热管理技术



资料来源：绿芯之友，德邦研究所

图 15：特斯拉圆线电机、保时捷扁线电机连续 400m 加速



资料来源：懂车帝，德邦研究所

优势三：高功率密度，整车动力更强劲。

电机的功率与铜含量成正相关，根据上汽绿芯频道评估，扁线电机槽满率提升，相同体积下铜线填充量增加 20-30%，输出功率有望提升 20-30%，整车动力更强劲。

国家政策层面倡导高电机功率密度。“十三五”规划中提出，新能源乘用车电机功率密度应满足 4.0kw/kg，高于当前圆线电机约 3.5kw/kg 的水平。在圆线电机功率密度提升进入困难模式的当前，发展扁线电机是必然之路，根据摩恩电气的公告显示，当前领先企业的扁线电机的功率密度约 4.5kw/kg。

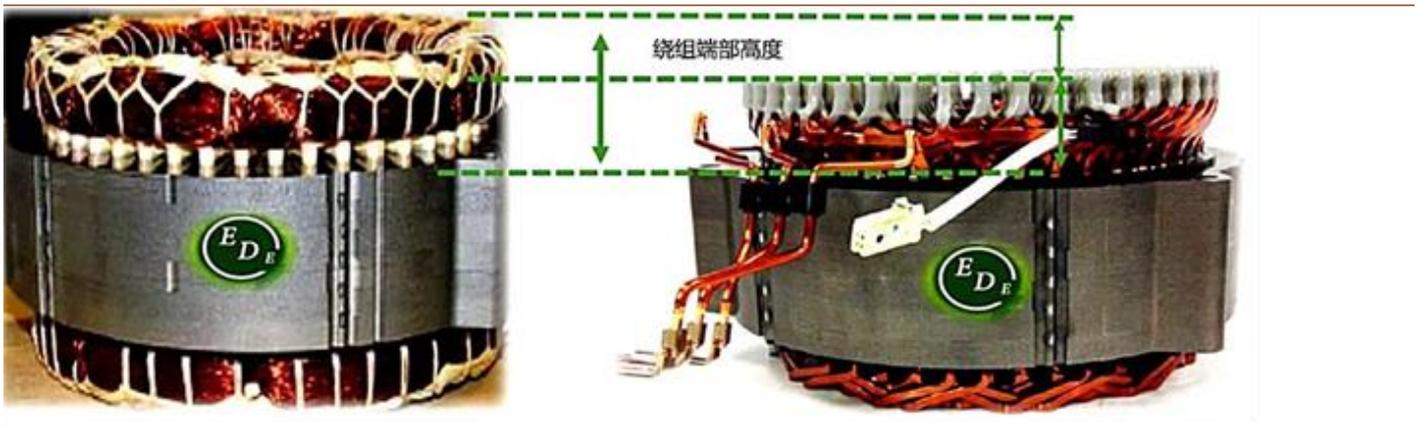
优势四：电磁噪音低，整车更安静。

扁线电机导线的应力比较大，刚性比较大，电枢具备更好的刚度，对电枢噪音具有抑制作用；可以取相对较小的槽口尺寸，有效降低齿槽力矩，进一步降低电机电磁噪音。

优势五：小体积带来高集成效率，契合多合一电驱发展趋势。

因扁线更高的槽满率，同功率电机铜线用量和对应定子较少，体积有望下降30%。此外，扁线电机因更为先进绕线方式带来更易裁剪的电机端部，与圆线电机相比减少15-20%的端部尺寸，空间进一步降低，实现电机小型化和轻量化。

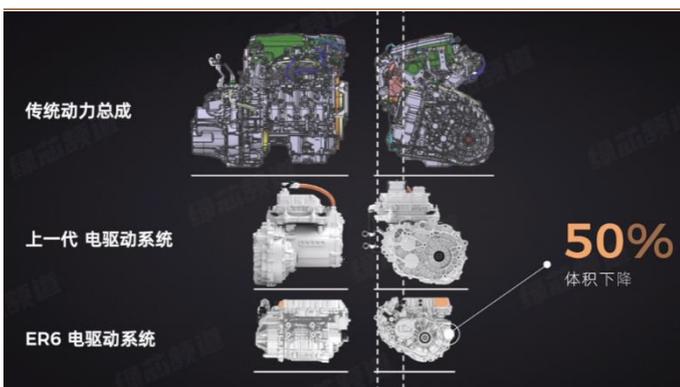
图 16：圆线电机 Vs 扁线电机绕组端部对比



资料来源：EDE 电驱纪元，德邦研究所

国内主流厂商大力推广扁线电机实现体积下降。上汽 ER6 的 8 层 hair-pin 扁线电驱动系统，比上一代圆线电驱动系统体积下降 50%。目前华为的七合一电驱包括：BCU 制动控制单元、PDU 电源分配单元、DCDC 低压直流电源转换器、MCU 微控制单元、OBC 车载充电器、电机、减速器。

图 17：上汽 8 层 hair-pin 扁线电驱动系统体积下降 50%



资料来源：绿芯之友，德邦研究所

图 18：华为七合一电驱



资料来源：易有料科技，德邦研究所

1.4. 扁线电机应用的障碍正在逐个化解

扁线拥有许多传统绕组不可比拟的优点，但同时扁线电机也有部分劣势，但总体而言瑕不掩瑜。随着技术的发展和渗透率的逐渐提升，扁线电机应用的障碍正在被逐个化解。

应用障碍一：“趋肤效应”、“邻近效应”明显，交流阻抗增大，高转速时转换效率降低。趋肤效应指当导体中有交流电或者交变电磁场时，导体内部的电流分布不均匀，且电流集中在导体的“皮肤”部分的一种现象。邻近效应指相互靠近的导体，通有交变电流时，每一根导体都处于自身电流产生的磁场中，同时还处于其他导体中电流产生的磁场中，这使得每个导体中电流分布都会受到邻近导体影响而不均匀现象。“趋肤效应”、“邻近效应”都会增加交流阻抗，交流阻抗增大，高转速时转换效率降低。

图 19：趋肤效应



资料来源：绿芯之友，德邦研究所

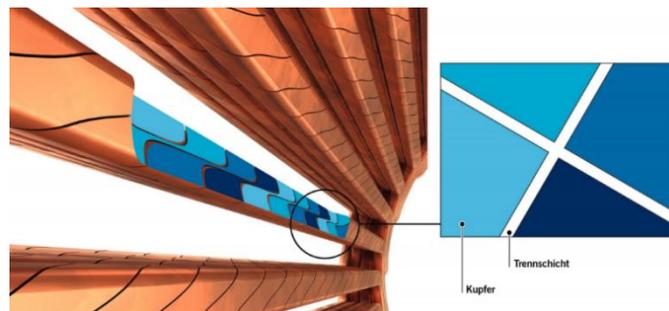
图 20：邻近效应



资料来源：绿芯之友，德邦研究所

“趋肤效应”并不影响扁线电机渗透率的快速提升，但工程师也已经有改善方案：1) 提高扁线的宽高比，间接增加扁线的比表面积；2) 减小导线尺寸，间接增加扁线的比表面积，但这同时也会降低槽满率，需要综合评估；3) 采用多档变速箱，降低电机转速，代表车型为保时捷 Taycan；4) 3D 打印铜线，导体尺寸和横截面可以任意变化，给了绕组设计极大的自由空间，该方案导致导体内的电分离结构，所述电分离结构用于限制涡流路径，因此电流密度被“强制”到剩余的导体横截面上，此外借助于 3D 打印可以实现任意连接的几何形状，不需要传统的绕组接头焊接工艺，该方案短期内无法实现量产。

图 21：3D 打印铜线示意图



资料来源：调皮的 JINX，德邦研究所

图 22：3D 打印铜线样件



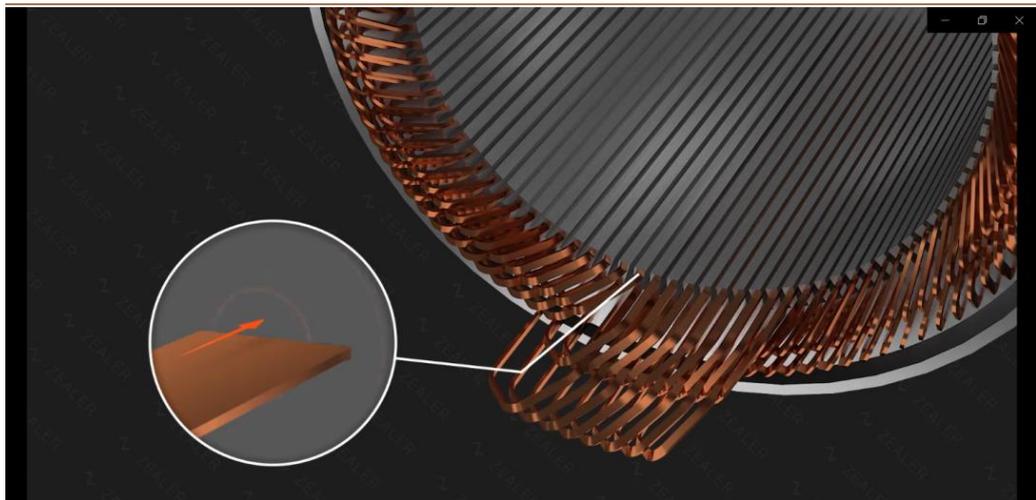
资料来源：调皮的 JINX，德邦研究所

应用障碍二：非标准化；不同车企的设计方案不一样，而定子是电机设计的核心，定子尺寸定型后，导线的线型、尺寸任意一点发生改变，都需要定制昂贵的工装模具，兼容性低，系列化难度高。

同一车企或电机企业的设计系列化趋势初现，以上汽 E2 架构为例，在设计之初就考虑了共线生产，三款不同功率的电机（150kw，180kw，250kw）适用于该架构上的所有车型，最大程度上实现模块化。**第三方电机的壮大也会改善系列化难度，**扁线电机的技术门槛和初始投资门槛远高于传统圆线电机，技术基础较

弱的车企只能广泛依赖于第三方电机厂商，第三方电机厂商的电机型号有限，也会成为市场上的主流产品。

图 23：保时捷 Taycan 电机细节图



资料来源：绿芯之友，德邦研究所

应用障碍三：扁线电机生产线投资额是圆线的 2-5 倍。扁线电机对产品的一致性要求高，技术难度大，需要投入精度较高的自动化伺服设备、焊接设备、Hair-Pin 线成形设备和工装模具等。

汽车电动化和电机扁线化的趋势已经确定，扁线电机逐渐成为资本宠儿。方正电机的年产 100 万台新能源汽车驱动电机项目，总投资 5 亿元人民币，项目达产后可新增销售收入 25 亿。

图 24：电驱生产线示意图



资料来源：绿芯之友，德邦研究所

应用障碍 4：对扁线要求高，扁线成本高、技术难度大。扁线的加工难度增大。1) 从圆形切换到矩形形状，导致铜线生产加工工艺更加复杂。2) 涂覆难度增大，扁平线 R 角处的漆膜涂覆非常困难，很难保证此处绝缘层的均匀性；绝缘涂层在烘干后会产生收缩，扁线是非均匀收缩，容易变形，需要改良使得 R 角处的涂覆厚度更厚；3) 扁线弯折成发卡后，R 角处应力集中，容易导致涂覆层破损；4) 对扁线的精度要求高，扁线截面积大、匝数少，单根导线不一致对整体性能的影响显著增大，对扁线的一致性要求高，复杂的加工成本使得扁线成本更高，也

使得扁线加工企业享受更高的技术溢价；5) 新能源汽车所使用的漆包线直接关系到整车运行稳定性，对电磁线厂家的质量控制流程、研发与工艺设计能力提出了很高的要求，需要对拉丝和包漆速度、拉丝与包漆的协调、拉丝模具配置、张力控制、涂漆模具配置、烘焙温度、绝缘漆粘度、工作环境等多个控制点的合理设计、严格控制。

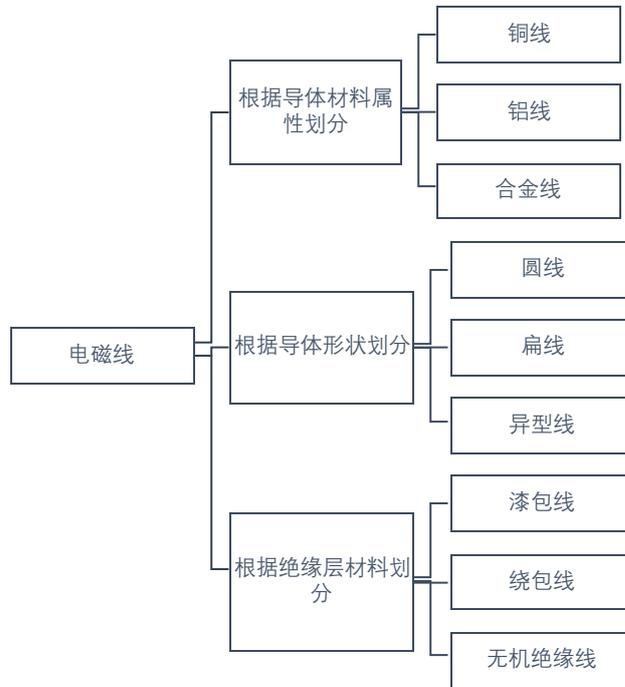
扁线的最大成本是原材料无氧铜杆，加工费在电机中的价值量并不高。稳定地供给合格的产品是与车企合作的关键，在原材料是主要成本的情况下，车企寻求加工费更低的供应商的动力并不高。

2. 竞争格局：电动车扁线化带来集中度提升

2.1. 电磁线行业格局分散，竞争激烈

扁线属于电磁线的一种。电磁线种类丰富，根据导体形状分为圆线、扁线以及异型线。

图 25：电磁线分类

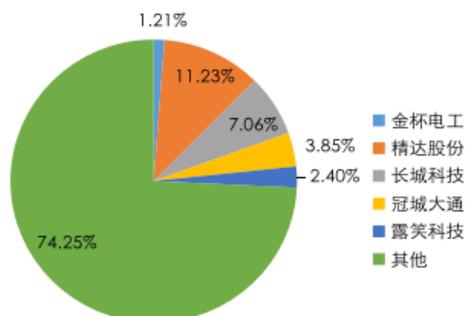


资料来源：公开资料，德邦研究所

电磁线市场竞争激烈，集中度很低。由于技术门槛低，下游客户分散，长尾效应显著。精达股份市占率第一，达到 11.23%，其次是长城科技（7.06%），冠城大通（3.85%），金杯电工仅占 1.21%

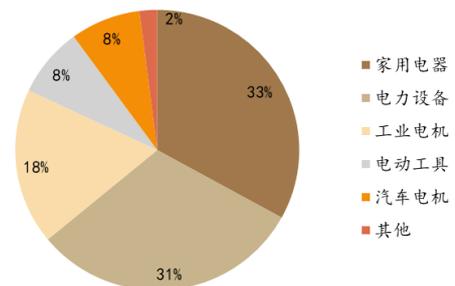
电磁线下游应用场景丰富，主要包括家用电器、电力设备、工业电机、汽车、电动工具等。其中，家用电器、电力设备、工业电机合计占比达到 82%，是最为主要的下游需求。家电业务经过多年的高速发展，已经步入稳定阶段，2019 年至今的行业增速基本维持在个位数。

图 26：2020 年全国电磁线竞争格局



资料来源：华经产业研究院，公司公告，德邦研究所

图 27：电磁线下游应用



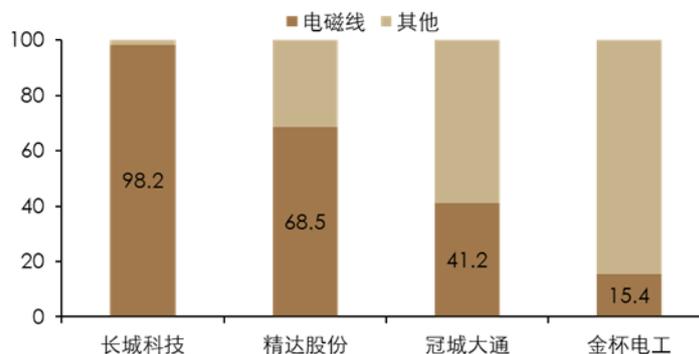
资料来源：长城科技招股说明书，德邦研究所

2.2. 扁线行业属于蓝海市场，目前仅四家公司量产

目前仅四家公司实现新能源汽车用扁线的量产：精达股份、长城科技、冠城大通和金杯电工。四家公司都拥有丰富的电磁线研发生产经验，在电磁线激烈的市场竞争中不断做大做强，属于电磁线领域的头部企业。

新能源扁线都被归类到电磁线业务当中。1)精达股份：电磁线业务占比 68.5%，贡献公司主要收入；2)长城科技：电磁线业务占比 98.2%，是最纯正的电磁线企业；3)冠城大通：房地产占比 55.8%，电磁线占比 41.2%。4)金杯电工：电磁线仅占 15.4%，电气装备用电线 38.5%，特种电线电缆 26.2%，电力电缆 11.8%。

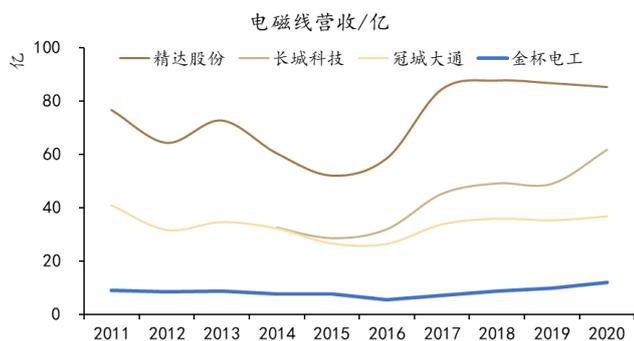
图 28：各企业电磁线业务占比%



资料来源：公司公告，德邦研究所

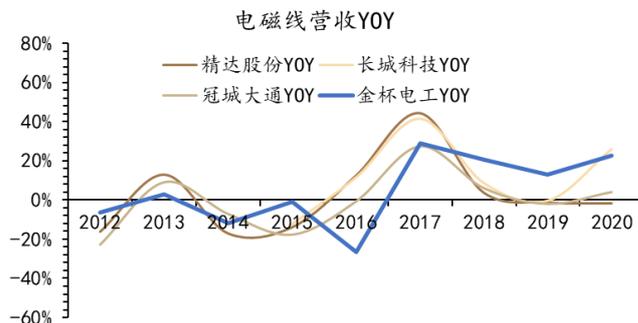
行业内公司营收差异较大，营收增长率基本保持一致。20 年精达股份电磁线营业收入 85.2 亿，长城科技 61.6 亿，冠城大通 36.6 亿，金杯电工 12.0 亿。营业增速方面，2015 年宏观经济出现下行压力，家电行业整体下滑，电磁线营收明显降低。2017 年家电下乡政策实施，各企业电磁线营收增长明显。2019 增长降低至个位数，2020 年铜价上涨，营业收入明显增长。

图 29：各企业电磁线营收



资料来源：公司公告，德邦研究所

图 30：各企业电磁线营收增速

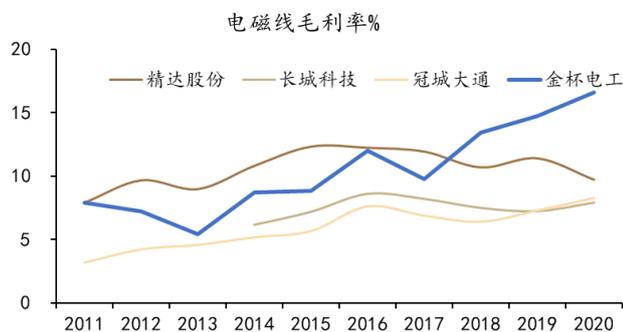


资料来源：公司公告，德邦研究所

金杯电工近年毛利率提升显著，其他三家基本保持稳定。金杯电工因为高附加值的高压特种线占比增加，近几年来毛利率不断提升，20 年达到 16.58%，领先于行业内其他公司。2020 年精达股份电磁线业务毛利 9.7%，长城科技为 7.9%，冠城大通为 8.3%。

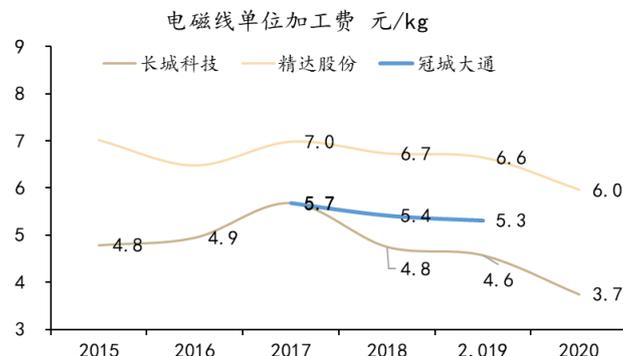
加工费整体呈下降趋势。精达股份 2020 年电磁线加工费约 6 元/kg，高于竞争对手长城科技和冠城大通，部分原因是精达股份高加工费的铝线占比更高。长城科技 2020 年加工费为 3.7 元/kg，冠城大通 19 年电磁线加工费约 5.3 元/kg。

图 31：各企业电磁线毛利率



资料来源：公司公告，德邦研究所

图 32：各企业电磁线单位加工费



资料来源：公司公告，德邦研究所
加工费 = (营业收入 - 原材料) / 产量，其他企业未透露电磁线原材料成本，冠城大通单位加工费数据来源于大通新材招股说明书

2.3. 新能源扁线产能及出货量：精达扩产最快

精达股份扩产速度最快，充分享受渗透率提升红利，预计 21 年形成产能 1.9 万吨/年，22 年形成产能 4.5 万吨/年。2019 年发行可转债募集 7.87 亿元，其中 3.3 亿元投向新能源产业及汽车电机用扁平电磁线项目，新建新能源扁线产能 3 万吨/年。21H1 新能源扁线出货 2045 吨，其中 Q2 出货约 1248 吨，环比提升 56%，展望全年预计出货超过 5000 吨，进入规模化放量期，良率进一步提升。

金杯电工扩产速度稍慢，23 年达到 2 万吨/年，25 年达到 5 万吨/年。2021 年 7 月公告投资 7.11 亿元新建新能源汽车电机专用电磁线产能 5 万吨/年。21H1 新能源扁线出货 700-800 吨，全年出货有望达到 2000 吨。

冠城大通电磁线子公司大通新材已经提交了 IPO 申请材料，IPO 项目包括年产 8 万吨漆包线绿色智能技术改造项目。招股说明书显示，2020 年 1-6 月新能源扁线出货 860 吨。

长城科技已公告产能 5.2 万吨。IPO 项目中包含 0.7 万吨新能源汽车用特种电磁线项目，8 月 26 日公告定增 15 亿，其中 8.3 亿元用于 4.5 万吨新能源汽车扁线。21H1 新能源汽车用扁线产量突破 1300 吨，并继续保持快速增长。

表 3：各家公司扁线产能

单位：万吨	2021E	2022E	2023E	2024E	2025E
精达股份	1.95	4.5	5	6	7
金杯电工	0.7	1.5	2	4.5	5
冠城大通	0.4	2	2	3	3
长城科技	0.7	2	3.5	5.2	5.2
总计	3.75	10	12.5	18.7	20.2

资料来源：公司公告，德邦研究所

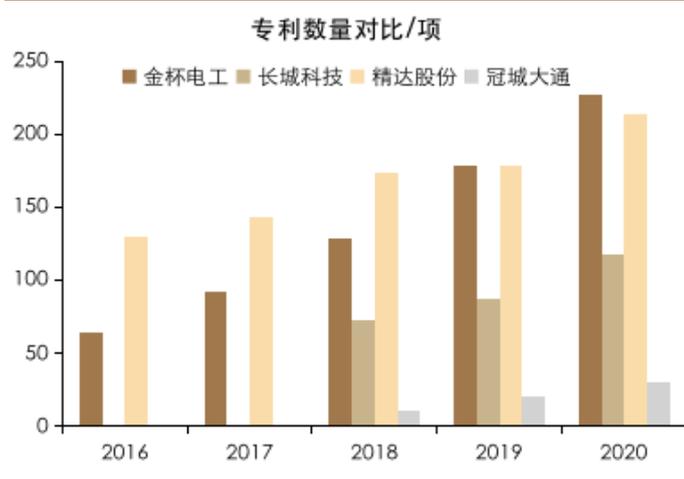
备注：金田铜业新能源车用漆包扁线已进入小批量验证阶段。

2.4. 研发及专利对比：精达和金杯领先

金杯电工和精达股份专利数量最多。扁线技术含量高，前期投入大，根据公告资料显示，截止至 2020 年金杯电工专利数量 227 个，精达股份 214 个，长城科技 118 个，冠城大通 30 个。

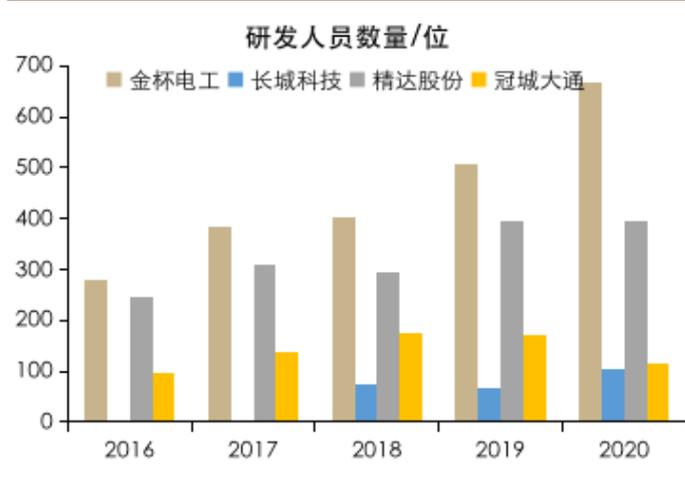
金杯电工研发人员数量远超同行。截止至 2020 年，金杯电工研发人员 668 人，长城科技 106 位，精达股份 396 位，冠城大通 114 位。

图 33：专利对比



资料来源：公司公告，德邦研究所

图 34：研发人员数量对比



资料来源：公司公告，德邦研究所

金杯电工、精达股份近三年研发费用投入较高，长城科技研发投入增速很快。扁线技术含量高，前期投入大，早期高强度研发投入，现阶段充分享受技术溢价。

金杯电工研发费用高于同行。长城科技、精达股份、冠城大通 20 年研发费用占营收比例分别为 2.42%、1.21%、1.18%，金杯电工 20 年研发费用占营收比例为 3.26%，金杯专注于研发更好更新的技术，五年来研发费用/营收比例均超过 3%，领先于同行。

图 35：研发费用对比



资料来源：公司公告，德邦研究所

图 36：研发费用/营收占比对比



资料来源：公司公告，德邦研究所

3. 铜杆加工：新能源车扁线对原材料铜杆要求高

3.1. 无氧铜杆的综合性能更优异

部分车企要求以无氧铜杆制备新能源汽车扁线。扁线原材料铜杆分为低氧杆和无氧杆，氧含量低于 450PPM 为低氧铜杆，氧含量低于 20PPM 为无氧铜杆。二者皆应用在电磁线领域。

无氧铜杆的韧性、加工性、电阻率和外观皆优于其他铜杆。1) 普通铜杆中往往有相当部分的氧化铜杂质，会对材料的韧性产生负面影响，而品质优良的无氧铜杆中几乎没有杂质的存在，具有优良的韧性；2) 优良的无氧铜杆组织均匀、晶体粗大，不但克服了普通铜杆中最常见的多孔性缺陷，还拥有着在所有线径里最为优越的可拉性。与无氧铜杆相比，普通铜杆有着难以拉制低于 0.5mm 以下细丝的缺点，因此无氧铜杆有着更优异的加工性；3) 用无氧杆制作的扁线电阻更小，应用于电机时，发热情况优于低氧杆。4) 此外，无氧铜杆的外觀光洁，表面圆整，没有毛刺、裂纹、起皮及夹杂缺陷，而低氧杆因为氧含量的原因，在焊接过程中，容易产生飞溅，而无氧杆却没有此类现象，因此，无氧杆更加受到扁线电机制造厂家的欢迎。

表 4：无氧铜杆性能优势

	韧性	加工性	电阻率	外观
无氧铜杆	几乎没有杂质，具有优良韧性	组织均匀、晶体粗大，可拉性优越，可以拉制低于 0.5mm 以下细丝	电阻更小，发热情况较轻	光洁，表面圆整
低氧铜杆	含有氧化铜杂质，对韧性产生负面影响	具有多孔性的缺陷，难以拉制低于 0.5mm 以下细丝	电阻更大，发热情况严重	有毛刺、裂纹、起皮及夹杂缺陷

资料来源：51 有色，公开资料，德邦研究所

铜杆的生产方式有连铸连轧法、上引连铸法、浸涂成型法和回线轧制法。不同生产工艺所生产的铜杆含氧量、外观电导率等有所不同，主流的生产工艺为浸涂法和上引法。

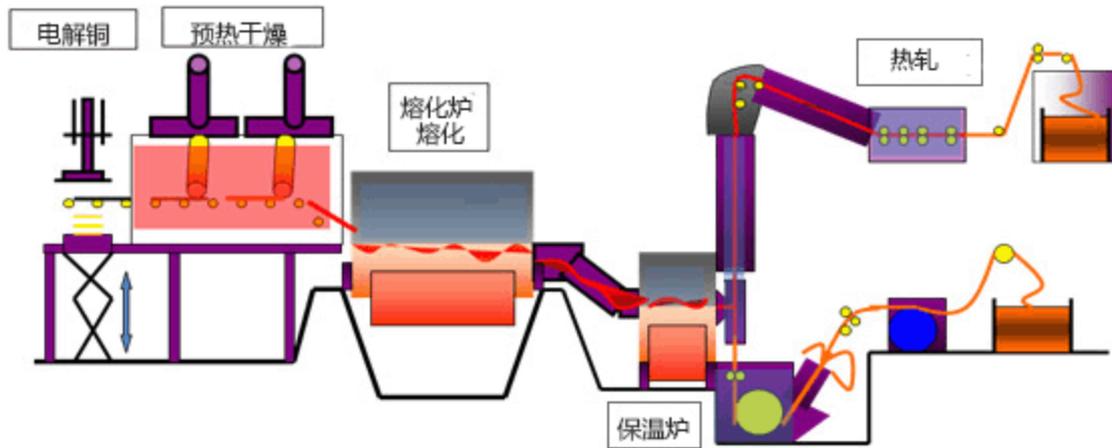
表 5：铜杆工艺方法

铜杆工艺方法	产品	电导率	含氧量	铜杆圈重
浸涂成型法	大长度光亮无氧铜杆	101~102%IACS	20ppm 以下	3.5~10 吨
上引冷轧法	大长度光亮无氧铜杆	101~101.6%IACS	10ppm 以下	2 吨
连铸连轧法	大长度光亮低氧铜杆	101~102%IACS	200~300ppm	5 吨
回线轧制法	短长度有氧化皮黑铜杆	99.5~100.5%IACS	200~500ppm	86~136 公斤

资料来源：51 有色，德邦研究所

1、浸涂成型法：铜杆含氧量 20ppm 以下，铜杆圈重 3.5~10 吨。浸涂成型利用冷铜杆吸热能力，用一根较细冷纯铜芯杆（或称种子杆），垂直通过一只能保持一定液位高低铜水池，使铜水与该移动种子杆表面铜融合在一起，并逐步凝固结合成较粗铸造状态铜杆，然后经冷却、热轧、冷却、绕制成圈，整个过程封闭、有惰性气体保护下进行。

图 37：浸涂法生产工艺



资料来源：富通昭和线缆杭州有限公司官网，德邦研究所

2、上引冷轧法：铜杆含氧量 10ppm 以下，铜杆圈重 2 吨。它是利用一种管式铜套（即石墨结晶器）其下端伸入并浸没在熔化铜液面下，上端与真空泵连通，开始时将结晶器内空气抽出，真空作用下，使管内产生负压，铜液虹吸引向上，并在引升器附近很快凝固成光亮铸锭。

两种生产工艺各有优劣。上引冷轧法设备投资小，厂房布置灵活，可在同一机器上生产不同规格、品种的铜材，但难以实现规模化，适合小型企业；浸涂成型法生产效率高，过程机械化，适合大型企业规模生产。

3.2. 自制铜杆有成本优势

富通昭和线缆杭州有限公司是重要的无氧铜杆生产商之一，公司成立于 2011 年，目前富通集团股份有限公司持股 51%，昭和电线电缆系统株式会社持股 49%。采用浸涂法生产各种规模的无氧铜杆。

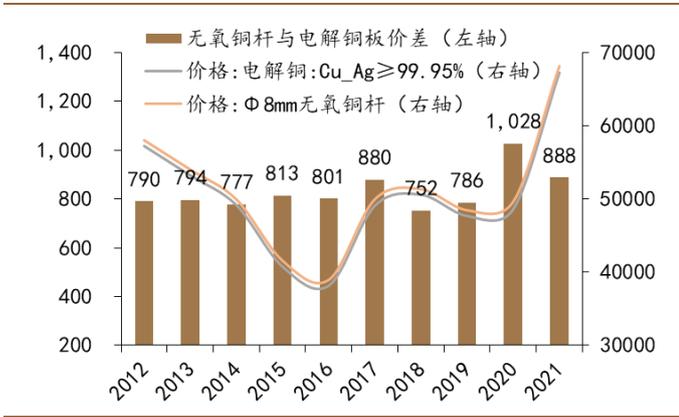
图 38：无氧铜杆



资料来源：中金网，德邦研究所

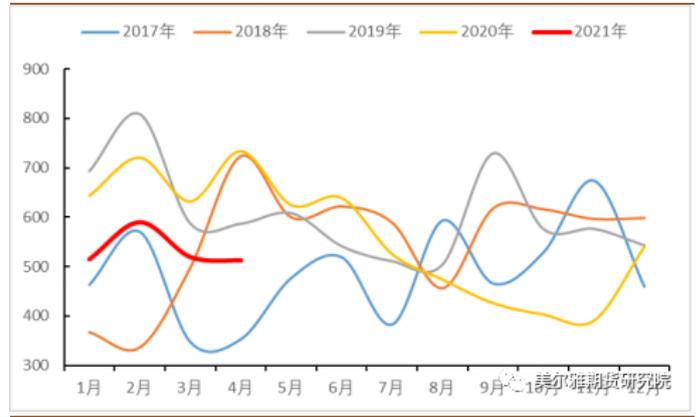
自制无氧铜杆节约成本。国内扁线生产商大部分外购无氧铜杆，少部分自制。常规无氧铜杆的采购成本与电解铜的价格差异在 900 元左右，而新能源车使用的无氧铜杆要求更高，价格差异更大。而采用上引法生产无氧铜杆的加工费在 500 元左右，自制无氧铜杆有利于降低成本。

图 39：无氧铜杆与电解铜价格比较（元）



资料来源：wind，德邦研究所

图 40：中国铜杆加工费平均水平（元）

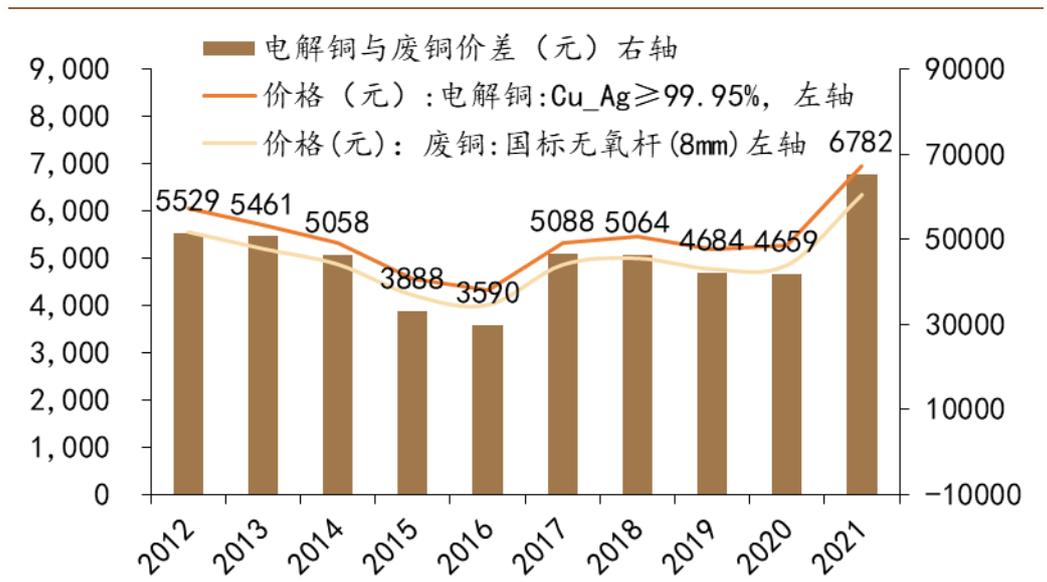


资料来源：美尔雅期货研究所，德邦研究所

3.3. 自制铜杆能实现废铜再利用，进一步降低成本

漆包线生产过程中，不可避免的存在部分废品，自制铜杆有助于实现废铜再利用，进一步降低成本。在上引法生产程序中增加精炼工序，利用上引法工频炉溶炼生产过程中产生的废铜线，一样可以生产出优质铜杆，品质上也能达到下游对电阻率的需求。当电解铜与废铜价差涨至一定程度时，利用废铜重新制杆的成本优势将体现，下图显示的是不含税的价差，可以看到随着铜价的攀升，电解铜与废铜价差体现出废铜再利用优势明显。

图 41：电解铜与废铜价格比较

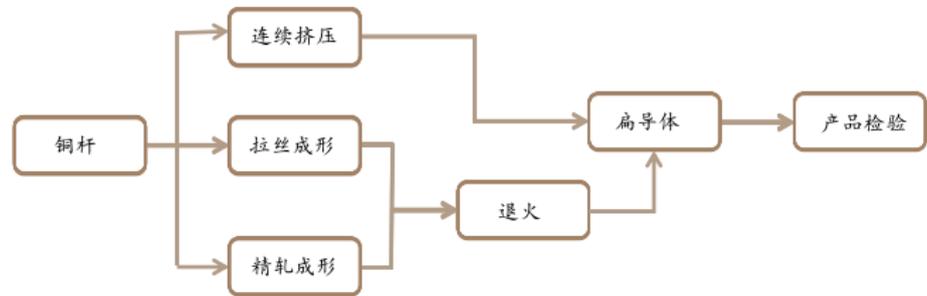


资料来源：wind，德邦研究所

4. 铜扁线加工：拉丝、挤压、精轧三条技术路线

新能源汽车扁铜线制作方法有三种：**连续挤压**、**拉丝成形**、**精轧成形**。扁铜线尺寸的加工要求宽高比大，尺寸要求精度高。目前的主流工艺路线为**拉丝成形**、**精轧成形**。关键工序工艺设计如下：

图 42：扁铜线成型工艺流程图



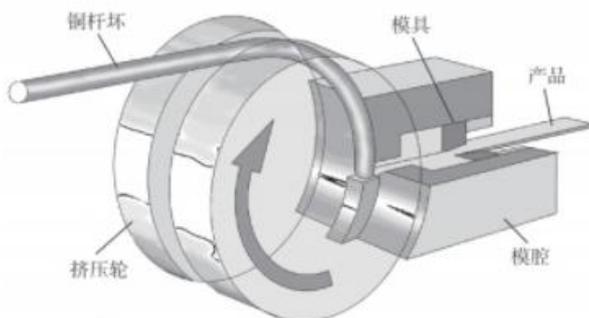
资料来源：新能源汽车电磁线装置用绕组扁线技术研究，德邦研究所

4.1. 连续挤压：生产效率低，应用较少

连续挤压技术的工作原理：模腔位于挤压轮侧面，坯料在旋转挤压轮的带动下进入挤压腔内，在轮槽摩擦力的作用下，坯料温度升高压力加大，达到一定值后便从模孔中挤出，形成产品。

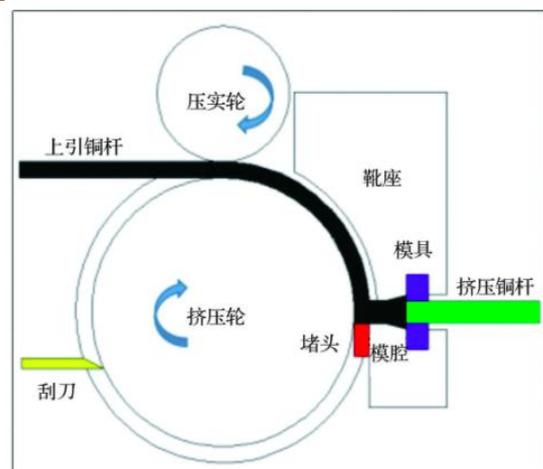
铜扁线连续挤压工作流程：一根上引法生产的无氧铜杆，在表面清洁的条件下，由坯料放线盘放出，经过矫直后直接送入连续挤压机。坯料进入挤压轮轮槽时，在槽壁的摩擦力作用下被曳引到由挤压轮和模腔形成的挤压腔内，由于挡料块阻止了铜杆继续前进，在摩擦力产生的高压和高温作用下，金属通过模口挤出形成铜扁线型材。通过挤压机后挤压成铜扁线产品，但此时温度较高，所以在挤压机的产品出口处有防氧化装置和冷却系统。最后经由计米、涂油和摆臂等装置由收排线机收卷成盘。

图 43：连续挤压原理图



资料来源：铜及铜合金连续挤压技术的研究和应用，德邦研究所

图 44：上引铜杆的连续挤压过程



资料来源：连续挤压铜杆常见的问题及预防措施，德邦研究所

连续挤压技术的优点：1) 采用连续挤压生产铜扁线，铜坯料在挤压模口前的温度可达 600℃ 以上，压力高达 1000MPa 以上，而且为三向压应力。在这种高温、高压条件下，铜坯料的原始内部缺陷，如气孔等可以在连续挤压过程中消除。2) 由于连续挤压铜扁线仅需一道工序即可将铜盘条直接挤压成铜扁线成品，使得铜扁线表面不会产生毛刺等表面缺陷，铜扁线具有良好的表面质量。3) 由于采用单一的坯料，仅需要简单更换模具就可以生产各种规格的铜扁线产品，且不需要退火，因此生产周期非常短，可实现“当天交货”，而不需要库存和准备各种规格的坯料，大大缩短了生产周期，减少资金的占用，提高了材料利用率和成品率，特别适合于多品种、小批量的铜扁线的生产。4) 模具材料和结构可保证产品具有较高的尺寸精度，不仅可以达到国家标准的要求，而且保证了同批产品具有相同的尺寸。5) 整条生产线采用的先进计算机控制系统，生产过程可自动监测和运行，实现了自动化生产，降低了操作工人的劳动强度。

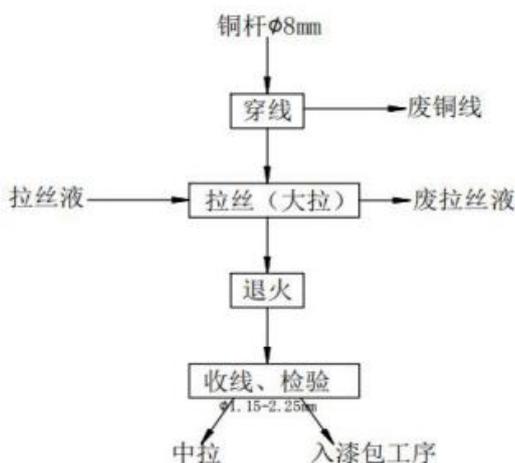
连续挤压工艺因生产效率低，目前并未广泛应用于新能源车扁线领域。

4.2. 拉丝成形：主流工艺路线，生产精度依赖于模具

拉丝成形工艺原理：拉丝工艺是一种金属压力加工过程，在外力作用下使金属强行通过模具，金属发生塑性变形，横截面积被压缩、长度增加，并获得所要求的横截面形状和尺寸的加工方法。

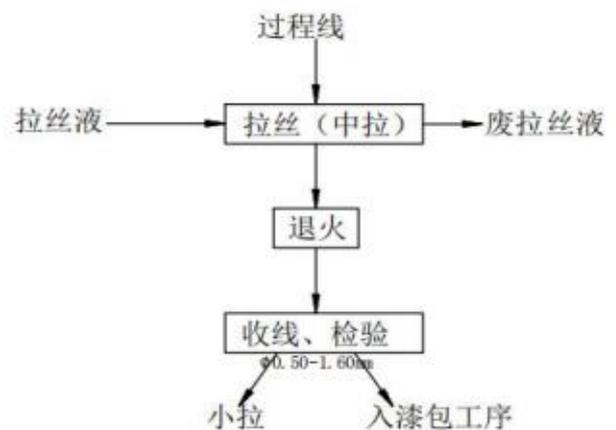
拉丝工艺流程：1) 穿线：将导线从卷线盘放出，依次穿过放线架、各级拉丝模具、退火设备、收线铁轴。穿拉丝模具时用配套设备将导线打磨，使线径变小易于穿过拉丝机各级模孔。2) 拉丝：指将线胚通过多级模孔，在一定压力作用下，发生塑性变形，使截面变小而长度增加的过程，由拉丝机塔轮轴带动逐级拉拔。拉丝过程中拉丝液起润滑、冷却和清洗作用。3) 拉丝后须进行连续退火，使在冷拉过程中因晶格变化而变硬的导线经一定温度加热，消除内部应力及缺陷，提高延伸率，使之恢复到拉丝前的物理及机械性能，有利于后续工序的进行。4) 收线、检验：将各线径规格的导线定尺复绕于收线铁盘上，作为漆包规格线或拉丝过程线，每轴规格线全检外观、尺寸，过程线另检伸长率。

图 45：大拉工艺流程及产污环节图



资料来源：冠城大通环评报告，德邦研究所

图 46：中拉工艺流程及产污环节图



资料来源：冠城大通环评报告，德邦研究所

拉丝工艺的的优点：1) 拉制可以得到尺寸精确、表面光洁及断面形状复杂的制品。2) 拉制品的生产长度可以很长，直径可以很小，并且在整个长度上断面完全一致。3) 拉制能提高产品的机械性能。

4.3. 精轧成形：设备昂贵，不依赖模具，生产精度高

精轧机的工作原理：电机提供动能，液压传动系统改变力矩和动力，通过轧辊和行程运动来对工件进行重复的轧制，最终达到所需要的尺寸和形状。轧机广泛应用于钢铁、有色等行业。

精轧机的优势：先进的精轧工艺具有提升传统拉丝和挤压两种工艺的优点，克服两种传统工艺的不足。精轧机生产的裸线完全可以做到：1) 裸线通过轧辊轧制而成，外观质量可以达到镜面；2) 导体金相组织结构均匀，导电率优于国标，机械性能良好；3) 裸线尺寸根据设定偏差自动调节，尺寸精确控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内，具有记忆和锁定功能，批次间不存在产品尺寸影响电阻平衡，不依赖模具，适用范围广；4) 生产过程运行平稳、噪音低、振动小、生产效率高、设备能耗低、自动化程度高；使用该设备生产的产品质量完全能满足高档电磁线质量要求。

图 47：精轧机



资料来源：REDEX 官网，德邦研究所

4.4. 三种工艺对比：拉丝为主流但依赖模具，精轧设备昂贵但性能更优

“连续挤压法”和“拉丝法”依靠模具成型，模具的尺寸均一性对扁线绕组电阻有着极大影响，从而影响扁线性能，模具存在磨损必须定期更换。“连续挤压法”和“拉丝法”有一个共同的特点：型都是通过模具来保障的。连续挤压法区别拉丝法的地方为模具的工作温度在 $450\sim 550^{\circ}\text{C}$ 之间，无法用聚晶模(人工钻石模)来进行生产。由于不能用聚晶材质作为挤压模具，每一个挤压模具的生产重量都不会超过58吨(拉丝法聚晶模寿命一般在80-100吨)。

扁线定制化程度高，对模具迭代速度要求高。扁线因有长宽两个尺寸维度，

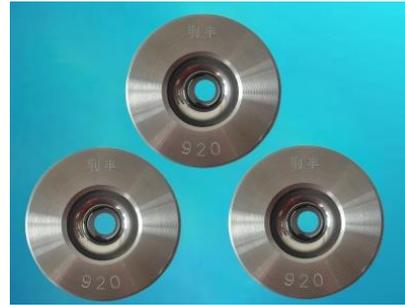
具备高度定制化特性，而圆线仅有半径一个参数，标准化程度更高。拉丝模具是拉丝机的核心零部件且必须定期更换，保证不同批次模具的一致性在保证产品质量的关键，自产模具有利于提高产品质量。精达股份模具子公司聚芯智造成立于08年，已申请新三板挂牌，是公司的核心资产，主要为内部配套模具，保证公司产品质量稳定，也有部分模具产品出口。目前公司持股84.51%，员工持股平台持股15.49%，已实现核心管理层绑定。金杯电工也有模具加工中心，实现模具自制。

图 48：异形拉丝模具



资料来源：钳做且百货店，德邦研究所

图 49：圆形拉丝模具



资料来源：蓝天科技 776 的小店，德邦研究所

模具使用过程中存在磨损，导体尺寸不一致会对绕组的电阻平衡造成影响，模具必须定期更换，且模具一致性要求高。虽然聚晶模具表面硬度高，但在长期的使用过程中模具依旧存在磨损，模具的孔径尺寸会缓慢变大，造成导体尺寸变化，进而影响导体电阻。车用电机对扁线的每米电阻差异率要求较高，进而对模具精度要求更高。

表 6：电阻受导体面积敏感度分析

导体尺寸变化 mm	0	0.010	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040
导体窄边尺寸 mm	2.5	2.510	2.520	2.525	2.530	2.535	2.540
导体宽边尺寸 mm	4	4.010	4.020	4.025	4.030	4.035	4.040
R 角弧度 mm	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
导体面积 mm ²	9.86	9.93	9.99	10.03	10.06	10.09	10.12
电导率							
$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	0.01724	0.01724	0.01724	0.01724	0.01724	0.01724	0.01724
长度 m	1	1	1	1	1	1	1
电阻 mΩ	1.7480	1.7365	1.7252	1.7196	1.7140	1.7084	1.7028
电阻变化率%	/	-0.66%	-1.30%	-1.63%	-1.95%	-2.27%	-2.58%

资料来源：德邦研究所

计算方法：电机绕组的电阻与导线的截面积成反比： $R = \rho \cdot l / S$ （ ρ 为绕组电阻率， l 为导线长度， S 为导体的截面积）。

精轧成形不依赖模具，铜扁线尺寸精度较高。精轧法进行导体加工，尺寸控制是一个离散量，不是使用模具成型时的趋势量。轧制成型过程是尺寸反馈给计算单元，传动机构调整轧辊间距纠正尺寸，尺寸在一个很小的范围内变化，结合 SPC 等控制方法，绕组扁线的导体尺寸精度提高。

精轧机的设备成本远高于拉丝机，目前只有金杯电工以精轧的技术路线为主。金杯电工精轧机来自于 REDEX group，REDEX 是法国知名的设备供应商，在扁线精轧机领域处于行业领导者的地位。采购国外设备时间周期较长，扩产速度较慢。

图 50：精轧机



资料来源：金杯电工官网，德邦研究所

图 51：拉丝机



资料来源：佳成科技官网，德邦研究所

表 7：变频主驱动电机工艺尺寸控制精度 (mm)

	厚度	宽度	R 角半径
控制目标值	1.95	3.75	0.65
拉丝精度	±0.03	±0.05	±0.16
挤压精度	±0.03	±0.05	±0.16
控制精度	±0.015	±0.02	±0.1

资料来源：新能源汽车电磁装置用绕组扁线技术研究，德邦研究所

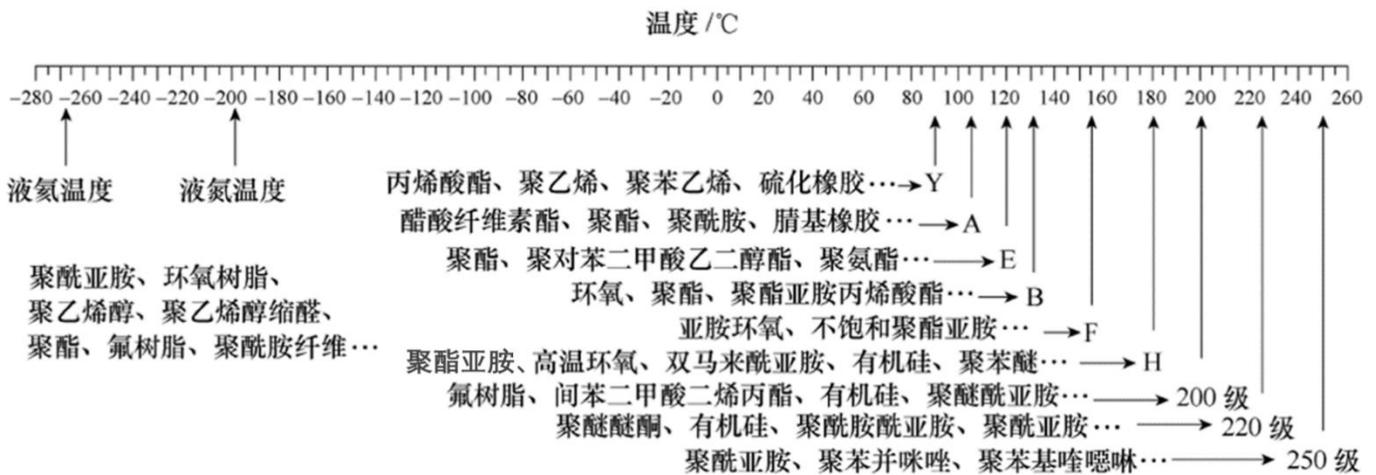
5. 绝缘涂覆：电磁线核心工艺，各家技术积累集中体现

5.1. 绝缘材料简介：车规级对耐热性能要求高

绝缘膜性能优劣对扁线性能有决定性影响。漆包扁线由裸导线和包覆在其外的绝缘漆膜两部分组成，通过涂线后绕成线圈再浸涂粘结树脂使各匝导线粘结在一起，绝缘漆性能的优劣、工艺裕度的大小和质量的稳定都会影响扁线的性能。

电动汽车驱动电机用绝缘材料和绝缘系统提出了更高的要求：1) 应具有优异的耐电晕性能（因存在高频脉冲电压、电晕腐蚀）、2) 优异的电气绝缘性能（因额定电压较民用电压 220V 有所提升）、3) 优异的机械性能尤其是高粘结强度（因存在强振动）、4) 高的耐热性（设计的耐热等级为 ≥ 180 ）、5) 高导热（功率密度大，电机发热严重）、6) 耐 ATF 油或水（采用内油冷及水冷散热冷却技术）、7) 无卤阻燃（降低着火危险性）、8) 耐高低温冲击（适应气温变化）等。

图 52：常见聚合物电介质材料及其耐温等级



资料来源：耐高温聚合物电介质材料的研究与应用进展，德邦研究所

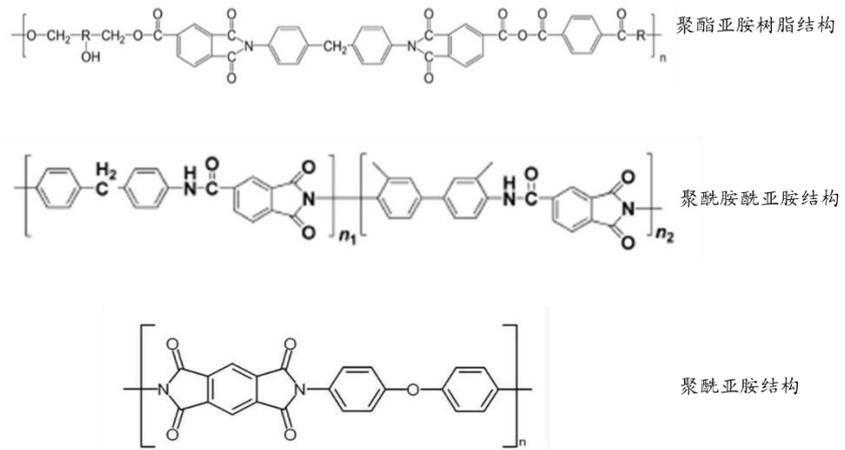
车规级新能源汽车用扁线对耐热性要求高，主要采用耐温 $\geq 180^\circ\text{C}$ 的聚酯亚胺漆包线漆、聚酰胺酰亚胺漆包线漆、聚酰亚胺漆包线漆这三种耐高温绝缘材料进行漆包。

聚酯亚胺漆具有较好的电气性能和机械强度，且耐热冲击和耐软化击穿。在 180 级及以上复合涂层漆包线制造中作为底漆涂层的主要材料，在高附着和耐氟利昂的家用电器中得到广泛应用。

聚酰胺酰亚胺漆耐热性高，不仅漆膜硬度和非软化性很大，并且对导体粘合力较高，最先得到产业化，可在 210°C 下长期使用。用于耐高温电机电气电子元件的线圈绕组，被用作电磁线的绝缘涂层。

聚酰亚胺漆耐热性能优异，同时能够耐老化，耐高压电击穿等。其主要运用于绝缘漆覆包电磁线，或作为耐高温涂料应用于电气行业、航空航天、石油管道等。

图 53：聚酯亚胺、聚酰胺酰亚胺和聚酰亚胺结构



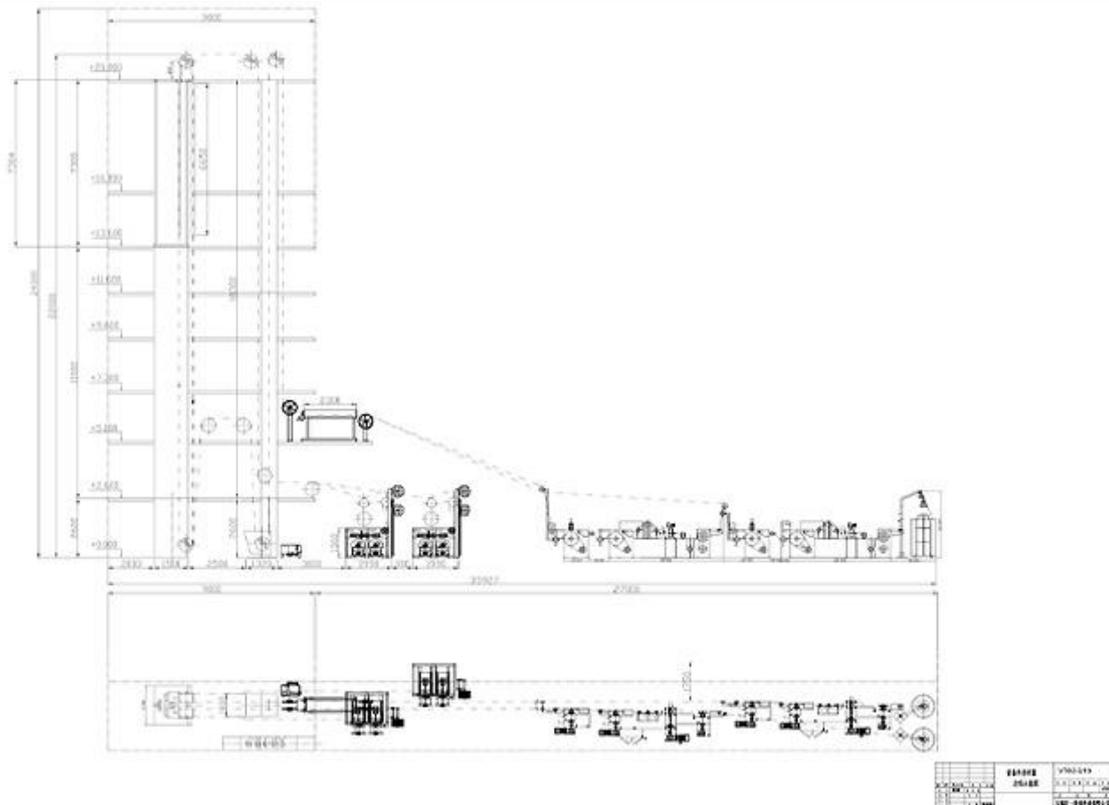
资料来源：公开资料，德邦研究所

5.2. 涂覆精度依赖模具，将原有卧式涂覆设备改造成扁线立式涂覆设备难度大

绝缘涂覆设备厂商主要有三家：无锡苏意电工设备有限公司，无锡巨一同创科技有限公司，无锡市梅达电工机械有限公司。

将原有卧式涂覆设备改造成扁线涂覆设备难度大，都采用新购设备方式扩产。涂覆设备可大致分为两种，卧式涂覆设备和立式涂覆设备，其中扁线涂覆主要以立式涂覆设备为主，在对漆膜均匀度要求不高的非车规级电磁线中，以卧式涂覆设备为主。主要原因是卧式设备中，绝缘漆由于自身重力会向下流动，影响漆膜均匀性。卧式涂覆设备的优点是生产能耗更低、设备成本更低，在对漆膜均匀度要求不高的非车规级电磁线中应用广泛。

图 54：立式漆包机



资料来源：巨一同创官网，德邦研究所

目前绕组扁线涂覆绝缘漆工艺有两种方法，其中新能源汽车用扁线基本采用模具法：

毛毡法：利用羊毛毡的虹吸现象将漆液涂覆在扁导体表面。新能源汽车电磁装置受到高频和车载体积的影响，宽高比更大。将绝缘涂层和载流导体很好的结合到一起，并使 R 角漆膜厚度均匀一致，提高绕组线的 BDV(Breakdown Voltage) 值，达到绕组线绝缘层具有很均匀的介电性能。

模具法：可以提高漆液粘度，使漆液尽快从液体状态蒸发掉溶剂进入黏流态，进一步快速加温(320~360°C)进入玻璃态，绝缘层快速完成了交联固化，减少从液态到黏流态的流平时间，抑制 r 角处绝缘漆受液体表面张力影响的流平，从而达到使绝缘层分布均匀体现最好的介电性能。

图 55：毛毡涂覆绝缘漆工艺



资料来源：新能源汽车电磁装置用绕组扁线技术研究，德邦研究所

图 56：模具涂覆绝缘漆工艺

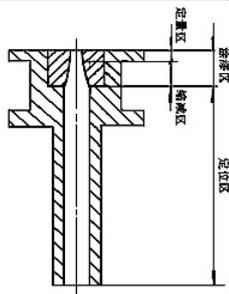


资料来源：新能源汽车电磁装置用绕组扁线技术研究，德邦研究所

R角的存在使得扁线的涂覆难度更高。漆包圆线上漆时，漆液经过模具涂覆到圆形截面的导体上是两个同心圆，圆线的上漆时液体表面张力均匀，只需保障圆线的导体圆度，漆包圆线的绝缘层就非常均匀。扁线的涂漆过程中受其矩形截面及漆液表面张力影响，漆液在液体湿润性作用下，在r角和直线段相切位置的漆液更容易被直线面拉走，形成不均匀的漆膜，造成r角部分涂覆绝缘漆困难，使漆膜的介电性能出现薄弱点。

漆模具主要由两部分构成，涂漆区和定位区。在涂漆区镶有用耐磨材料制成的模芯，在模芯的内形结构中又可分为缩减区和定量区。缩减区的作用是去除多余的漆液，定量区的作用是控制每道涂漆的挂漆量，以满足涂漆工艺要求。涂漆模具定位区的作用是保证涂漆模具轴心与导线同轴，避免偏心和涂漆不均，同时使回漆远离模架，避免漆液溢流到模具上部，影响涂漆质量。

图 57：涂漆模具介绍



资料来源：漆包圆线涂漆配模计算的探讨，德邦研究所

图 58：涂漆模具

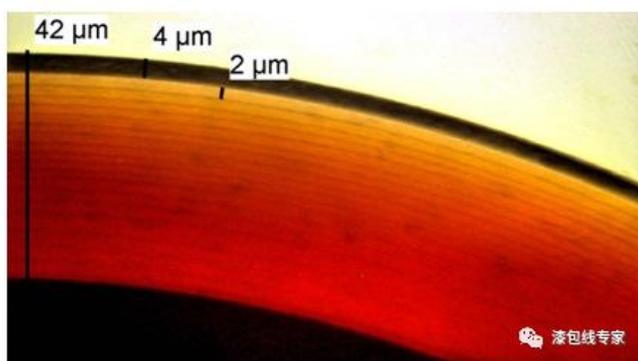


资料来源：精达商城，德邦研究所

5.3. 偏心度：各家技术积累的体现

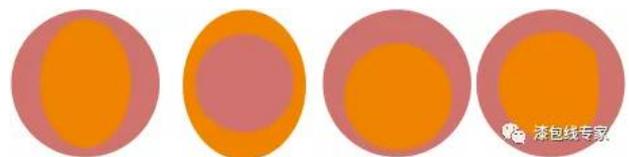
偏心度是漆包线的关键指标，对漆包线各方面性能都会有影响，也是各家技术积累的体现。漆膜分布的不均匀性常以偏心度来表示，其值即为垂直于圆导体某一截面上的最大漆膜厚度与最小漆膜厚度之比。一般的检测方式取漆包线任意N个点，测量每个点的绝缘层厚度，偏心度=绝缘厚度最大值/绝缘厚度最小值。

图 59：某漆包线切面图



资料来源：旺材电机与电控，德邦研究所

图 60：漆包线偏心度示意图



资料来源：旺材电机与电控，德邦研究所

漆膜偏心度过大对电气性能有影响，导致击穿电压值分散性大。漆包线击穿电压是漆包线在工作条件下经受电压负荷的能力。漆包线漆膜的特性及漆膜厚度和击穿电压的关系是： $V \propto t$ ，其中： V 为击穿电压值， t 为漆包线漆膜厚度，击穿电压测试是先将漆包线扭绞制样然后测试电压值，如果漆包线漆膜偏心，同一截面上四周漆膜厚度不均匀，当漆包线漆膜较薄面绞合在一起，这时虽然漆膜达到

一定的厚度，但在此处的绝缘容易被击穿，反之则击穿电压值很高。因此，漆包线漆膜偏心度大给漆包线耐压性带来了较为明显的影响，导致了漆包线击穿电压值分散性大。

表 8：漆包线不同偏心度对击穿电压的影响

样本编号	最大漆膜厚度 mm	最小漆膜厚度 mm	偏心度	击穿电压值 kV
1	0.061	0.038	1.61	6.0-12.2
2	0.059	0.04	1.48	7.5-11.8
3	0.054	0.04	1.35	8.0-11.4
4	0.05	0.041	1.22	9.5-11.9
5	0.046	0.04	1.15	10.2-11.6

资料来源：漆包线漆膜偏心产生的原因及对漆包线性能的影响，德邦研究所

漆膜偏心度过大对漆膜连续性影响。漆膜连续性检测方法是测量一定长度下漆包线漆膜的针孔数。影响漆包线绝缘连续性的因素较多，漆膜偏心是其中之一，漆包线漆膜偏心导致漆包线绝缘层厚薄不均。当涂漆不均匀，特别是第一道漆膜涂得太薄处易使导体氧化，影响漆膜附着性，太厚处又会使漆膜内部的溶剂挥发不充分，交联度差，漆膜的弹性差和附着性能下降，易造成脱漆现象而影响漆膜连续性产生针孔。

漆膜偏心度对漆包线机械性能的影响。漆包线漆膜的耐刮性能反映的是漆膜抗机械刮伤的强度，当漆膜涂覆不均时，在漆膜薄的地方易产生铜线的氧化，而氧化层使漆膜的附着力大大下降，这样漆包线在做耐刮试验的时候，漆膜会被刮针成块地撕破、带走，而形成短路，造成较低的耐刮数据；在漆膜较厚的地方，如上述又会因漆膜的弹性差和附着性能下降而影响漆膜的耐刮性。漆包线漆膜偏心度大对漆包线耐刮性能影响尤为明显的是漆包线三个面（漆包圆线每次旋转 120°，共旋转两次）的往复刮漆次数相差很大。

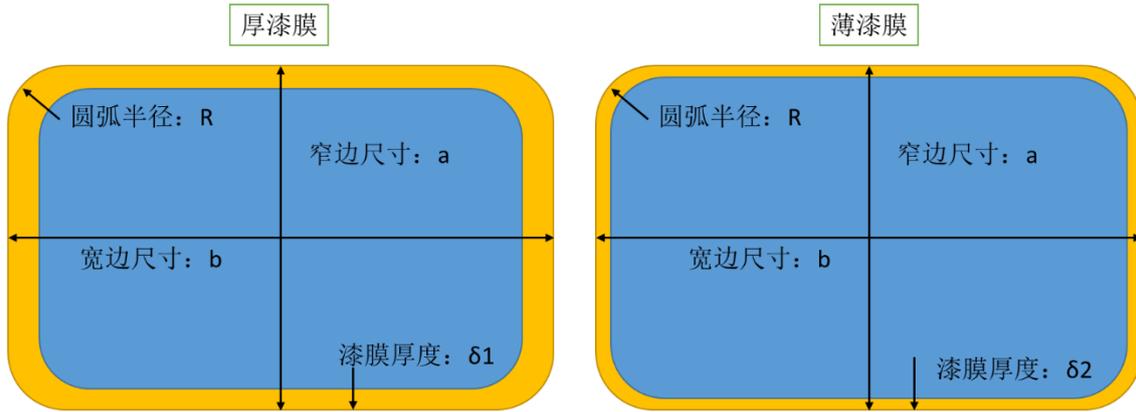
表 9：漆包线不同偏心度对耐刮擦性能的影响

样本编号	最大漆膜厚度 mm	最小漆膜厚度 mm	偏心度	往复刮漆次数/次		
1	0.061	0.038	1.61	282	185	36
2	0.059	0.04	1.48	290	239	74
3	0.054	0.04	1.35	301	159	96
4	0.05	0.041	1.22	283	202	169
5	0.046	0.04	1.15	265	202	193

资料来源：漆包线漆膜偏心产生的原因及对漆包线性能的影响，德邦研究所

偏心度过高导致绝缘性能不达标，若通过提高漆膜厚度改善绝缘性能会牺牲槽满率，如何平衡槽满率与绝缘性能是各家的工艺 knowhow。通过漆膜厚度对槽满率影响的敏感度分析，当单边漆膜厚度由 0.08mm 增加至 0.16mm 时，槽满率将由 70%降低至 66.3%。槽满率是电机的关键性指标，将影响电机转换效率、散热效果、功率密度等。

图 61：漆膜厚度对导线尺寸的影响示意图



资料来源：德邦研究所绘制

表 10：漆膜厚度对槽满率影响的分析

单根导线	漆膜厚度	mm	0.08	0.1	0.12	0.14	0.16
	导线窄边尺寸	mm	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	导线宽边尺寸	mm	4	4	4	4	4
	R 角弧度	mm	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	导体面积	mm ²	9.35	9.22	9.10	8.97	8.85
	漆膜面积	mm ²	0.48	0.60	0.72	0.84	0.95
	总面积	mm ²	9.83	9.83	9.82	9.81	9.80
定子绕组	槽数	pcs	48	48	48	48	48
	层数	pcs	8	8	8	8	8
	导线总数量	pcs	384	384	384	384	384
	导体总面积	mm ²	3590	3541	3493	3445	3398
	槽总面积	mm ²	5129	5129	5129	5129	5129
	槽满率	%	70.0%	69.1%	68.1%	67.2%	66.3%

资料来源：德邦研究所测算

5.4. R角变小，提升槽满率，对涂覆要求更高

降低R角弧度也有助于增加槽满率。槽满率是电机企业孜孜不倦的追求目标，根据测算，当R角由0.8mm降低至0.3mm时，槽满率提升0.9%。

表 11：R角对槽满率影响的敏感度分析

单根导线	漆膜厚度	mm	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
	导线窄边尺寸	mm	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	导线宽边尺寸	mm	4	4	4	4	4	4
	R角弧度	mm	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
	导体面积	mm ²	9.35	9.35	9.35	9.35	9.35	9.35
	漆膜面积	mm ²	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
	总面积	mm ²	9.83	9.83	9.83	9.83	9.83	9.83
	槽数	pcs	48	48	48	48	48	48
	层数	pcs	8	8	8	8	8	8
定子绕组	导线总数量	pcs	384	384	384	384	384	384
	导体总面积	mm ²	3590	3602	3613	3622	3630	3635
	槽总面积	mm ²	5129	5129	5129	5129	5129	5129
	槽满率	%	70.0%	70.2%	70.4%	70.6%	70.8%	70.9%

资料来源：德邦研究所测算

降低R角同时对扁导线的生产工艺和绝缘漆涂覆有更高的要求。电磁线的原材料铜杆在经过拉伸后其截面会自然形成圆形，而扁线则需要依靠专业的模具或精轧成形，R角越小，对设备的精度要求越高。扁线生产成为发卡状的过程中需要弯折且R角处的漆膜出现拉伸，漆膜厚度降低。在“趋肤效应”的作用下，R角越小的地方，电场强度越高，而该处的漆膜又最薄，从而成为薄弱点，R角降低增加了R角处出现电晕腐蚀的概率。实际有效的绝缘能力是由最薄处决定的，R角越小，越能体现出企业的加工精度高。

6. 技术迭代：800V 扁线与绕组成型技术路径

6.1. 新能源电机要求明显高于工业电机

电机是电动汽车唯一的动力源，承受着复杂的运行环境及工况，造成对扁线的质量要求远高于传统工业电机。虽然两者的分类及控制的理论和方法相同，但用于电动汽车的电机通常要求频繁起停，快速动态响应，低速恒转矩运行且过载能力强，转速变化范围宽，在充分满足汽车运行功能的同时还应满足行驶时的舒适性，适应环境的能力等。电动汽车电机所用驱动器相比于工业用电机的驱动器来说，在尺寸、工作环境、可靠性、功率密度、冷却方式等方面有较大差异，对电动汽车电机驱动技术的基本要求总结如下：

1) 严格的体积要求和重量要求：普通工业电机对于体积尺寸和重量没有这么严格的要求，一般以满足工业目标为第一目的。电动汽车不同，尺寸和重量决定了汽车的动力性能和驾驶体验，直接影响产品的质量。所以电动汽车电机的难点就在于提高功率重量密度和功率体积密度，要求电机质量轻、体积小的同时追求高功率。

2) 独特的转矩特性：启动或低速时要求超高转矩，将汽车速度以最快的方式泵升至期望速度。一般工业电机并没有这么高的启动速度要求。同时高速时需要提供足够的功率，使得汽车可以高速巡航。

3) 宽调速范围：车用电机最高转速可能是电机基速的4倍甚至更高。目前电动汽车普遍只使用固定档的齿轮组，这要求电机的调速范围越宽越好。以特斯拉的 Model S 基本款为例，电机最高转速能达到 18000 转/分钟，这对于电力电子调速器来说是一个非常大的考验。

4) 全范围转换效率要求：工业电机基本都处于额定工况中运行，固定转速、功率、环境等。而车用电机作为汽车的唯一动力源，需要应对汽车复杂多样的运行工况，对全范围的转换效率要求极高。

5) 高安全性，任何情况下都应确保具有高度的安全性，尤其是失效模式下可控。

6) 低噪声：包括电磁噪声和音频噪声，满足车辆电磁兼容性和驾驶舒适性需要。

表 12：电动汽车用电机与工业电机的对比

	电动汽车用电机	工业电机
封装尺寸	要求质量轻，体积小	尺寸及质量受限较小
工作温度	环境温度变化范围大(-40~105℃)	环境温度适中(-20~40℃)，静止应用
振动环境	振动剧烈	振动较小
启动性能	启动或低速时要求超高转矩，将汽车速度以最快的方式泵升至期望速度。	启动速度要求很低
输出性能	输出性能与运行工况和电器边界条件相关程度高、较难明确定义	明确定义了输出性能，如：25kw，2000rpm，系统输入闲置较为宽松
可靠性	很高，以保证乘用者安全	较高，以保证生产效率
冷却方式	通常为水冷或油冷(体积小)	通常为风冷(体积大)
控制性能	精确的力矩控制，动态性能较好	多为变频调速控制，动态性能较差
功率密度	较高	较低

效率	要求工作范围高效率	只要要求额定工作点效率高
性价比	极高	一般

资料来源：伺服与运动控制，德邦研究所

6.2. 800V 的扁线技术路径：厚漆膜 VS PEEK，厚漆膜性能不佳但便宜

800V 被认为是下一代电动车必经之路，2019 年保时捷发布全球首款 800V 车型 Taycan。现代 E-GMP5、奔驰 EVA、通用第三代纯电动平台以及大众 Trinity，都选择了 800V 电压平台。吉利 SEA 浩瀚平台、广汽、奇瑞、上汽等车企都在规划 800V 的方案，800V 成为车企新一轮竞争的制高点。

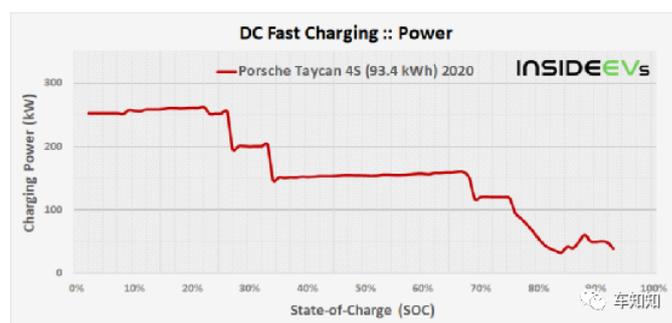
800V 的核心优势是快充性能提升明显。800V 电压平台搭配 350kW 超级充电桩所能实现的充电速度，不仅比目前常见的 120kW 直流快充桩要快上很多，更逐步接近传统燃油车在加油站加油的使用体验，尤其对于没有家用充电桩安装条件、充电依赖公共充电设施的用户来说是一大利好。Taycan 支持 800V 直流快充，最大充电功率 250kw，在 22.5 分钟内能从 5% 充到 80% 的电量。在补能焦虑依旧困扰电动车发展的背景下，如何比拼补能速度成为新的焦点，800V 在这方面具有得天独厚的优势。

图 62：保时捷 Taycan



资料来源：汽车之家，德邦研究所

图 63：Taycan 快充 SOC-功率曲线图



资料来源：知化小编，德邦研究所

800V 能显著降低高压线束线径，减少发热，降低质量，节约线束成本。电压等级从 400V 提高至 800V，根据最简单的 $P=UI$ ，在输出相同功率的情况下，800V 系统所传输的电流就更小，线缆线径和重量就可以降低，节省线束的成本及安装空间。

800V 平台下电晕腐蚀出现概率增加，电晕腐蚀会对电机绝缘造成重大危害。电晕放电 (corona discharge) 是指气体介质在不均匀电场中的局部自持放电，是最常见的一种气体放电形式。通常发生在在曲率半径很小的尖端电极附近，如绕组出槽口处、绕组绝缘层内部等。电晕即气隙放电，部分能量转换为光、热、声、电磁等，会造成 1) 热效应局部温度升高，绝缘老化等；2) 机械损坏，大量带电离子“电子和正负离子”以高能量和高速度撞击，造成绝缘层机械强度降低、局部放电区域绝缘层出现麻点、麻坑、孔眼等绝缘失效问题；3) 化学损坏，气体局部放电形成臭氧，臭氧化学性质不稳定，易生成二氧化氮，再与水蒸气反应生成硝酸，腐蚀绝缘层。

图 64: 脉冲电压

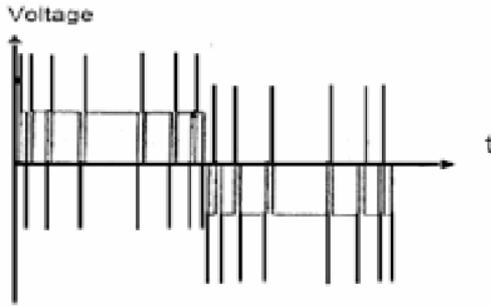


图 2 脉冲电压

资料来源: 耐高温聚合物电介质材料的研究与应用进展, 德邦研究所

图 65: 电晕腐蚀

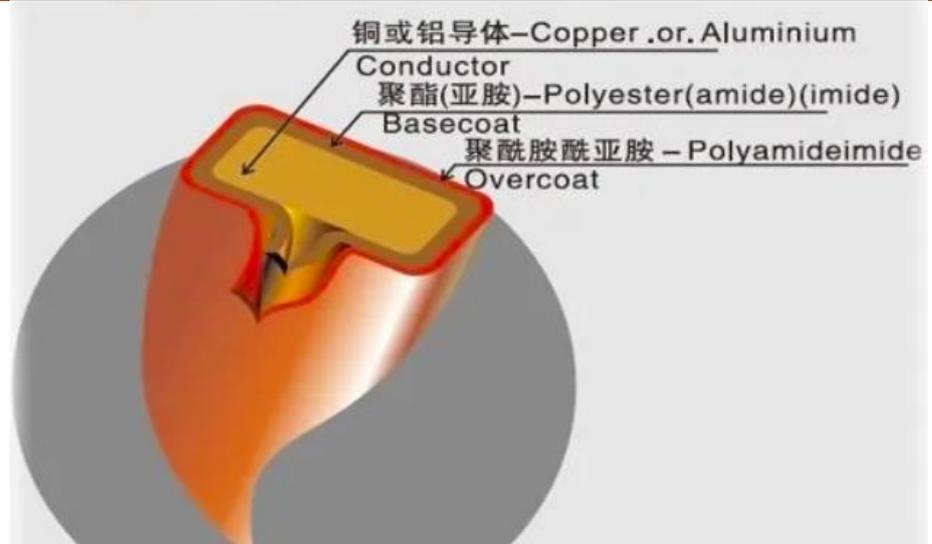


资料来源: 搜狗百科, 德邦研究所

要满足 800V 的技术要求, 主要通过两种技术路线: 1) 厚漆膜工艺, 2) 薄漆膜+PEEK 膜包工艺;

提升漆膜厚度是最简单有效的途径, 漆包线的绝缘性能与漆膜厚度成正比, 现在主流的新能源扁线的结构是: 内层为铜扁线导体, 根据扁线性能要求和使用领域不同, 铜扁线导体外涂设有二层或者三层绝缘漆膜, 漆膜具体包括底漆层、耐电晕漆层和面漆层。第一层为聚酯亚胺或者聚酰胺酰亚胺漆膜, 第二层为耐电晕漆膜, 第三层为聚酰胺酰亚胺或者聚酰亚胺漆膜。

图 66: 扁线导体漆膜涂层分布



资料来源: EDE 电驱纪元, 德邦研究所

根据精达股份杨思伟的讲话, 厚漆膜工艺解决电晕腐蚀主要有以下 3 条路线:

1) 提高漆包线的局部放电起始电压(Partial Discharge Inception Voltage, PDIV)值: 使漆包线的 PDIV 值高于电机运行中的过冲电压, 保证不会因为局部放电而发生绝缘损耗现象。高压电机用的漆包线, 通常采用介电常数低的 PI 漆膜, 因为 PDIV 和介电常数呈反比关系, 介电常越低 PDIV 值越高。另外还可以增加漆膜厚度, 从而达到提高 PDIV 值。目前精达股份可以做到双边膜厚 320 μ m, PDIV 可达 2300Vp 以上。

2) 提高漆包线的耐电晕性能：过提高漆包线的耐电晕性能来增加漆膜的寿命。它是通过延长破坏通道路径，耐电晕层可以作为放电阻挡层，降低局部放电漆膜侵蚀；有利于空间电荷的扩散，抑制空间电荷的积聚。

3) 兼顾 PDIV 和耐电晕性能：用 PI+P(AI) 耐电晕的涂层，这样漆包线不但具有耐电晕性能同时还兼具高 PDIV 的特性，目前精达股份漆膜厚度可达 320μm，常温可以达到 2200Vp 以上。

表 13：耐电晕漆包线涂层材料

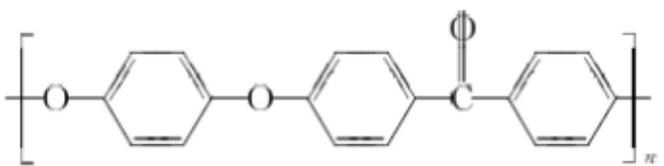
名称	涂料	性能
纳米粒子改性的 H 级及以上级耐电晕漆包圆线	其涂层结构为：底涂层为纳米粒子改性聚酯亚胺耐电晕涂层，面涂层为聚酰胺酰亚胺涂层	综合性能优异
聚酰胺酰亚胺单涂层耐电晕漆包线	高附着性的聚酰胺酰亚胺结合无机纳米粒子复合技术	优异的耐电晕性能，耐 ATF 油、耐高温性能

资料来源：电动汽车驱动电机用绝缘材料现状与发展趋势，德邦研究所

厚漆膜工艺有以下缺陷：1) 由于漆包线生产方式为多道涂覆+重复烘烤，为使漆膜达到指定的厚度，需要对原有漆包机进行改造，将几个机头合并在一起才能连续生产。改造后的漆包机产能下降，产品的单位能耗上升，同时排出的废气也大量增加。2) 工艺繁琐，产品需要经过三十次以上的涂覆烘烤过程，行线过长，要调整部分工艺参数：一方面，因生产中烘烤次数过多，易造成漆膜固化过度，损伤漆膜，从而影响产品性能，产品偏心度也比一般产品大。另一方面，产品在生产过程中漆包线多次往复经过导轮，也必定会对漆层造成损伤，造成产品质量下滑。3) 上述超厚型漆膜的设计是出于满足驱动电机线圈耐高电压和高 PDM 的目的，但漆膜过厚会对其他性能产生负面影响；包括但不限于出现漆膜柔韧性下降、驱动电机线圈绕制过程中漆膜易开裂、不能满足某些驱动电机长期在恶劣的工作环境(如高温环境)下使用等状况，从而给漆包线生产厂家及使用客户带来诸多困扰。

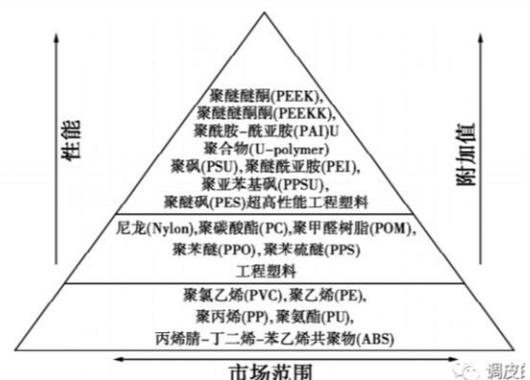
薄漆膜+聚醚醚酮 (PEEK) 被认为是驱动电机领域的终极绝缘方案。塑料之王 PEEK 具有优良的综合性能，在许多特殊领域可以替代金属、陶瓷等传统材料。该塑料的耐高温、自润滑、耐磨损、耐电晕腐蚀和抗疲劳等特性，使之成为当今最热门的高性能工程塑料之一，它主要应用于航空航天、汽车工业、电子电气和医疗器械等领域。

图 67：PEEK 化学方程式



资料来源：调皮的 jinx，德邦研究所

图 68：PEEK 的应用



资料来源：调皮的 jinx，德邦研究所

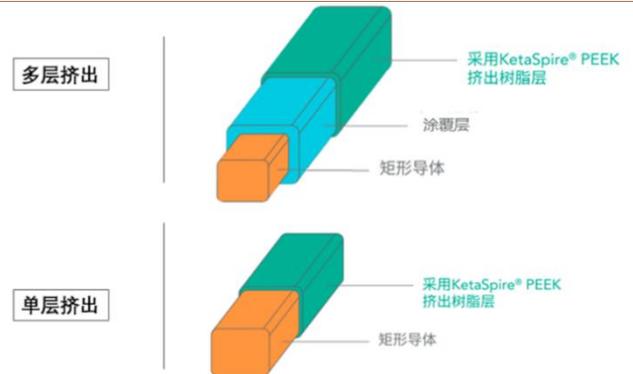
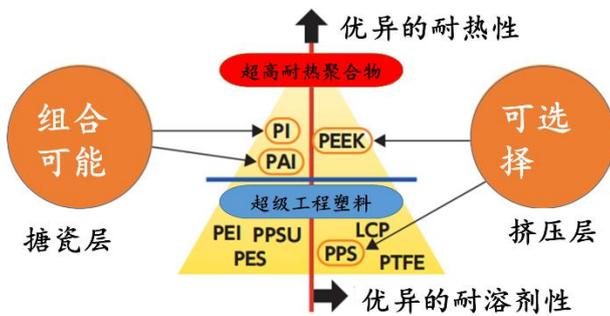
PEEK 的综合性能碾压漆包产品，电机的使用环境越严苛，PEEK 的优势越

明显, PEEK 的优势包括: 1) 耐高低温, 持续使用温度达 260°C, 低温可耐受 -100°C; 2) 化学性能极为稳定, 各种常见溶剂中只有硫酸可溶解破坏它; 3) 耐水、海水、蒸汽, 低渗透性, 低吸湿性, 长期放置在湿热条件下仍能保持结构及性能稳定; 4) 在熔融状态下具有良好的流动性, 凝固后具有优异的机械性能和尺寸稳定性, 使其可以通过挤出工艺一次性加工成型达到要求, 降低了产品的加工难度和成本; 5) 在较宽的频率和温度范围内保持良好的电气特性, 完全满足电磁线绝缘要求; 6) 无毒无污染, 加工过程中产生的废料可完全回收, 减少成本的同时环保清洁; 7) 优异的介电强度, 超高的 PDM 值; 8) 优异的稳定性, 在长时间使用中, 性能衰减程度小。

PEEK 材料适合单层挤出, 实现更高的功率密度。 PEEK 多层挤出指的是挤出到涂覆层之外, 可显著提高绝缘性能; 单层挤出指的是直接挤出到铜线上, 无需粘接层。单层挤出可实现更薄的导线结构, 从而实现更高的导线密度, 从而提高驱动电机的功率密度和槽满率。

图 69: 各材料性能对比

图 70: 多层挤出与单层挤出

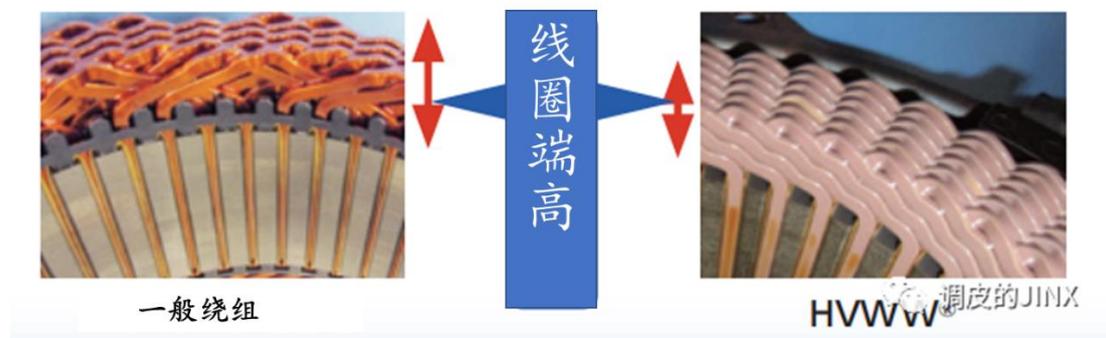


资料来源: 调皮的 jinx, 德邦研究所翻译

资料来源: AutomobilNachricht, 德邦研究所

PEEK 已经应用在电驱领域中, 代表性产品为本田 IMMD 驱动电机, 采用古河电工提供的 HWWW 高压线, 与漆包线相比, PEEK 采用挤出工艺可以获得更大的壁厚和更好的同心度, 带来的就是更高的 PDIV 值和尺寸一致性。此外由于 PEEK 耐磨性能好, 铜线之间预留的安装尺寸更小, 能够实现更高的紧凑度, 从而提升槽满率。

图 71: 本田 IMD 扁线示意图



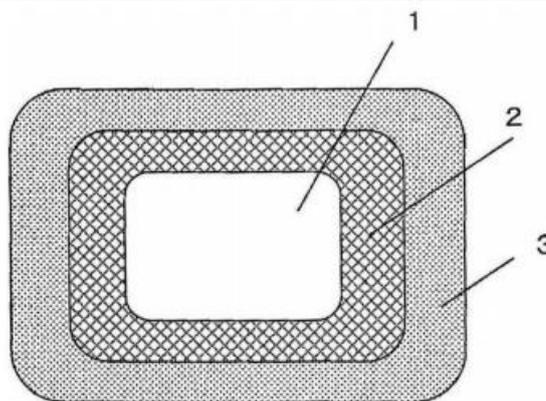
资料来源: 调皮的 jinx, 德邦研究所翻译

PEEK 的大规模应用主要难点: 1) 专利限制, 2) 成本高昂

1) 专利限制: PEEK 应用的关键专利归日本古河电气工业株式会社所有。该

发明提供一种抗变频器浪涌绝缘电线，其在无损高温下的绝缘性能的情况下可使绝缘层厚膜化、并具有较高的局部放电起始电压与优异的耐热老化特性。其中，在导体 1 的外周具有至少 1 层漆包烧结层 2，在漆包烧结层 2 的外侧具有至少 1 层挤出被覆树脂层 3，漆包烧结层 2 与挤出被覆树脂层 3 的合计厚度为 50 μm 以上，漆包烧结层 2 的厚度为 60 μm 以下，挤出被覆树脂层 3 的厚度为 200 μm 以下，挤出被覆树脂层 3 在 25 $^{\circ}\text{C}$ ~250 $^{\circ}\text{C}$ 的拉伸弹性模量的最小值为 100MPa 以上，将漆包烧结层 2 与挤出被覆树脂层 3 合在一起的绝缘层的相对介电常数在 25 $^{\circ}\text{C}$ 为 3.5 以下、在 250 $^{\circ}\text{C}$ 为 5.0 以下，漆包烧结层 2 在 250 $^{\circ}\text{C}$ 的相对介电常数(ϵ_1')与挤出被覆树脂层 3 在 250 $^{\circ}\text{C}$ 的相对介电常数(ϵ_2')的关系满足(ϵ_2'/ϵ_1')>1。挤出被覆树脂层为热塑性树脂的层，作为形成挤出被覆树脂层的热塑性树脂，例如可以挤出聚醚醚酮(PEEK)。若采用这些热塑性树脂，则与上述厚度、合计厚度、以及相对介电常数、相对介电常数及在 25 $^{\circ}\text{C}$ ~250 $^{\circ}\text{C}$ 的拉伸弹性模量的最小值的比相互作用，从而局部放电起始电压更进一步提高，低温下直至高温下的机械特性及高温下的绝缘性能也高度地维持，而且耐热老化特性也更进一步提高。

图 72：古河公司抗变频器浪涌绝缘电线



资料来源：中华人民共和国国家知识产权局，授权公告号：CN 104170024B，申请日：2013.10.29，德邦研究所

中国企业也在研发 PEEK 相关产品。2021 年 6 月 11 日精达股份的发明专利（一种 PEEK 电磁线的加工工艺）获得授权。该发明提供一种结构合理而使用可靠便捷的 PEEK 电磁线的加工工艺，其工艺控制点较少且步骤简化程度高，无需额外对漆包机进行改造，同时大幅度减少了废气废液的排放，降低能耗；按照该发明所提供的漆包线生产工艺所加工出的 PEEK 漆包线，具备了表面硬度大、耐刮擦、耐化学试剂、耐高温高压及能适应各种恶劣工作环境工作的优势，能满足现有厂家及客户对 PEEK 漆包线的生产加工及使用需求。

2) 成本高昂：PEEK 高昂的成本是阻碍其大规模应用的重要因素之一，PEEK 的综合性能和优势碾压其他产品，但同时采购成本高昂，预计未来将首先应用在 1) 使用环境恶劣，对性能要求高的车型；2) 对成本敏感度低的豪华车型。

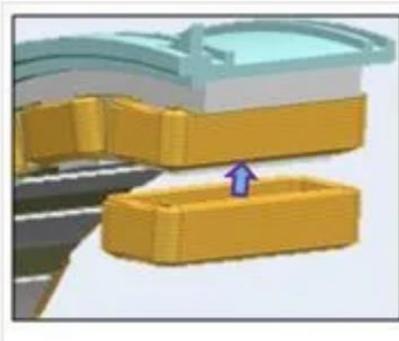
6.3. 绕组成型技术路径：Hair-pin 占上风，长安 iDD 混动系统选择 S-winding

根据联合电子的文章，从驱动电机定子绕组技术的发展历程看，可以将其划分为第一代径向嵌装绕组技术与第二代轴向嵌装绕组技术。

第一代绕组技术：径向嵌装绕组。径向嵌装绕组是指将铜导体绕制成型后，沿定子铁芯齿部的极靴口将绕组从径向方向装配进铁芯槽内。从 1888 年开始，工业电机上应用的主流绕组技术均为径向嵌装绕组，初期绕组技术以分布式圆线径向嵌装绕组为主，1942 年又逐渐衍生出集中式圆线径向嵌装绕组，随后到 1995 年发展出集中式扁线绕组以及分布式波绕扁线绕组。

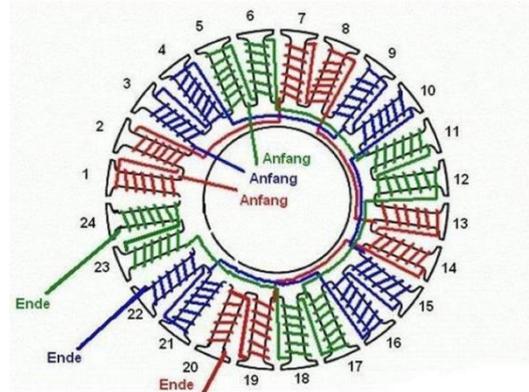
径向嵌装绕组难以适应自动化生产。径向嵌装式绕组技术由于其铁芯槽口极靴形状的结构设计受限，会直接影响到电机的峰值/持续特性以及 NMH 性能，此外在生产工艺上往往还需要手工介入调整，难以实现高节拍（60s 以内）的自动化生产。

图 73：圆线径向嵌套



资料来源：旺材电机与电控，德邦研究所

图 74：径向波绕组

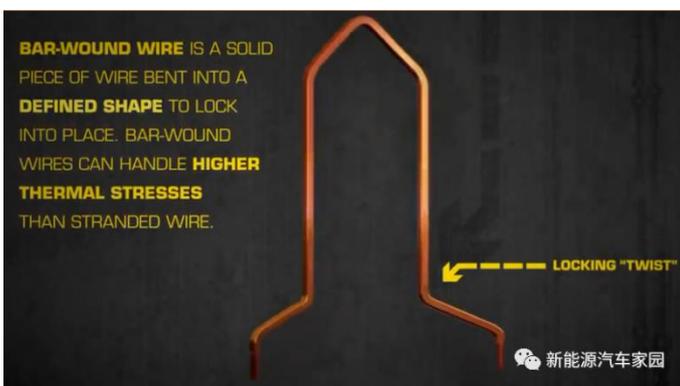


资料来源：电工学习网，德邦研究所

第二代绕组技术：轴向嵌装绕组。从 1958 年开始，随着绕组技术的进一步成熟，第二代轴向嵌装绕组技术开始进入市场应用，初期的轴向嵌装绕组也主要应用在大中型工业电机中。轴向嵌装绕组是指将半成型或者未经预成型的扁铜线导体，沿定子铁芯的端面槽口将绕组从轴向方向装配进铁芯槽内。

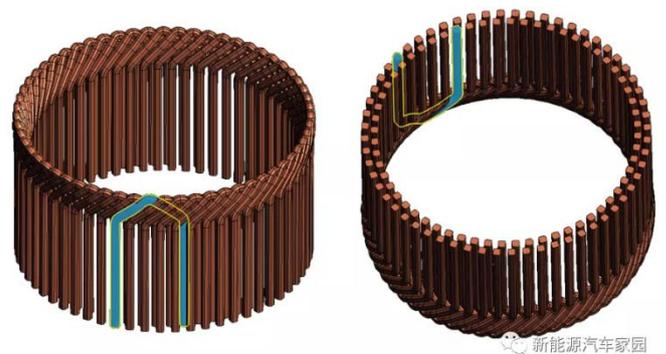
轴向嵌装绕组的第一个技术分支：Hairpin 绕组。Hairpin 绕组凭借其优异的功率，扭矩与效率性能迅速占领主流技术市场。Hairpin 绕组可以大大减少绕组嵌装所需的装配预留空间和导体间隙，其槽满率可以达到 70% 左右。

图 75：发卡示意图



资料来源：NEVHome，德邦研究所

图 76：Hairpin 绕组

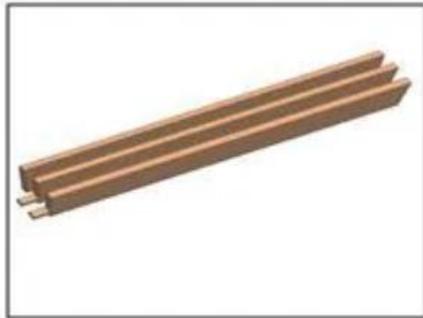


资料来源：NEVHome，德邦研究所

轴向嵌装绕组的第二个技术分支：I-Pin 绕组。I-Pin 绕组无需预成型且为单槽装配，可以进一步降低绕组的装配预留空间，其槽满率可以达到 74% 左右（以

联合电子目前已批产的 I-pin 产品为例), 具有更为优异的功率, 扭矩与效率性能。缺点是焊接工艺繁琐, 端部尺寸较大。

图 77: I-pin 示意图



资料来源: 旺材电机与电控, 德邦研究所

图 78: I-pin 绕组示意图

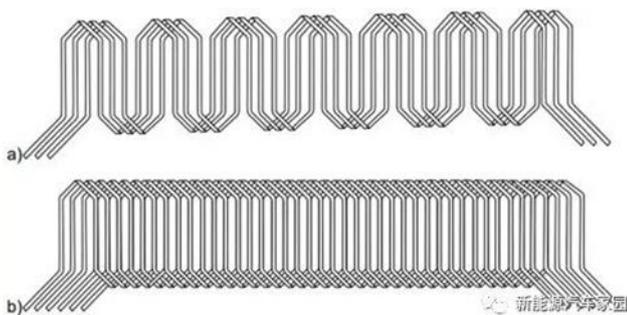


资料来源: 旺材电机与电控, 德邦研究所

轴向嵌装绕组的第三个技术分支: S-winding 绕组。S-winding 绕组具有众多优势: 1) 成型后两头端部无需焊接, 端部空间尺寸更小; 2) 更加优秀的 NVH 性能, 减少了转矩脉动 (即随着电机轴旋转而导致的转矩输出周期性增加和减少) 从而实现更平稳的运行; 3) 更出色的冷却效果。

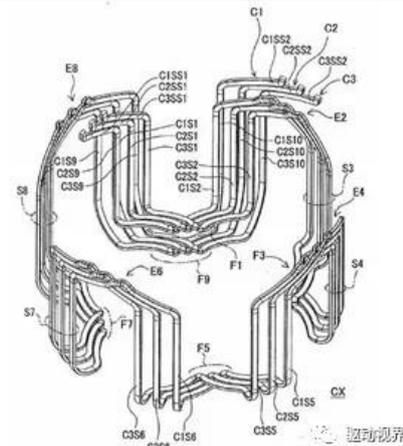
2018 年博格华纳凭借性 S-winding 型绕组导线成型技术荣膺《汽车新闻》杂志颁发的 PACE 大奖。该方案尤其适用于安装空间有限的 P2 混合动力汽车, S-winding 绕组比集成绕组定子短 30% 左右, 而扭矩密度提高了 50% 以上。

图 79: S-winding 扁线示意图



资料来源: NEVHome, 德邦研究所

图 80: S-winding 扁线示意图



资料来源: 驱动视界, 德邦研究所

图 81: S-winding 扁线电机的定子示意图

图 82: 电装公司的 S-winding 扁线电机局部图



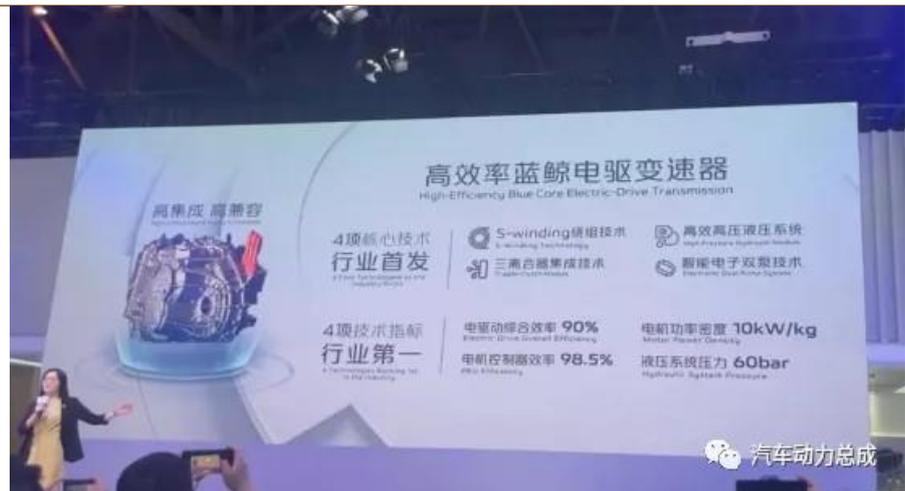
资料来源：NEVHome，德邦研究所



资料来源：驱动视界，德邦研究所

2021年6月长安汽车最新发布的蓝鲸 iDD 混合动力系统采用 S-winding 绕组。搭载该系统的 SUV 车型 UNI-K PHEV 的匮电油耗仅为 5L/100km，其核心零部件蓝鲸电驱变速器采用的就是 S-winding 绕组，电驱动综合效率 90%；电机控制器最高效率超过 98.5%，电机功率密度达到 10kW/kg，液压系统压力高达 60bar。官方宣称，蓝鲸 iDD 系统最高传递效率达到 97%，系统综合扭矩最大可达 590 牛·米，百公里加速最快 6 秒+，最高车速可达 200km/h。

图 83：长安汽车 iDD 混合动力系统



资料来源：汽车动力总成，德邦研究所

不同技术路线对生产设备及工艺的影响极大，绕组生产步骤大致分为：插头、线成型、扭头、切平、焊接等。Hair-pin 在各步骤的生产工艺难度适中，而 S-winding 在线成型加工步骤上难度极高，但在焊接、端部高度等方面存在优势。

表 14：技术路线对生产的影响

	Hair-pin	I-pin	S-winding
插头	中	简单	简单
线成型	中	简单	复杂（一体成型）
扭头	中	复杂	简单（一体成型）
切平	base	~base	~base
焊接	中	复杂	简单
包络尺寸	base	~base	~base
端部高度	中	高	低
端部外径	base	~base	~base

资料来源：公开资料整理，德邦研究所

目前的技术路线仍然以 hair-pin 工艺技术路线为主，I-pin 以联合电子、博世为代表，S-winding 以博格华纳为代表。

表 15：电机企业技术路线

电机企业	技术路线	配套车型
博格华纳	Hair-pin, S-winding	威马 Ex5/6, 戴姆勒、理想 one 捷豹路虎、长安
通用	Hair-pin	Voltec
日本电装	Hair-pin	Prius
华域电动	Hair-pin, 集中绕组	荣威 ER6
联合电子	Hair-pin, I-pin	蔚来 ES6、ES8、大众 ID6
天津松正	Hair-pin, 集中绕组, S-winding	
蜂巢易创	Hair-pin	欧拉 R1
大众	Hair-pin	大众 ID4
宝马	Hair-pin	宝马
特斯拉	Hair-pin	Model 3

资料来源：各公司官网，德邦研究所

7. 投资建议

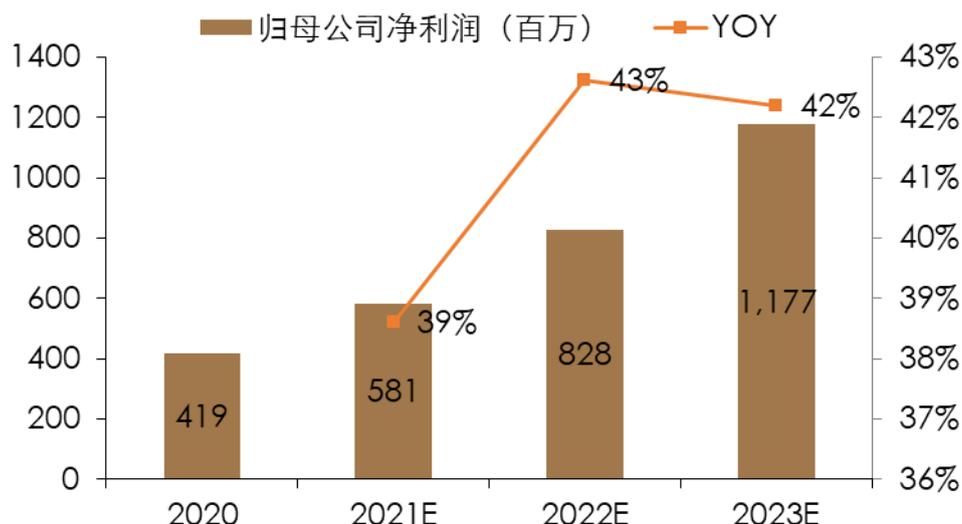
7.1. 精达股份

公司简介：国内特种电磁线龙头，深耕行业三十余年。公司是国内唯一一家销量达 20 万吨电磁线企业。产品广泛运用于家用电器、汽车电机包括新能源汽车电机、工业电机、变压器、电动工具、微特电机、电子、通讯、交通、电网等领域，满足国内外不同客户的需求。

公司竞争优势：1) 公司产能基地布局合理，拥有铜陵、江苏、天津和广东四个基地，就近配套客户，响应度快，节省运输费；2) 深刻绑定大客户，扩产速度快，充分享受渗透率快速提升第一波红利；3) 利润增长点丰富，除新能源扁线业务外，子公司恒丰特导利润增速喜人，模具子聚芯智造三板挂牌，有望复制恒丰特导模式驶向利润快车道。

公司业绩预测：我们预计 2021 年营业收入 181 亿，归母净利润 5.8 亿元，2022 年营业收入 174.5 亿，归母净利润 8.3 亿元，2023 年营业收入 86.6 亿，归母净利润 11.8 亿元。

图 84：精达股份归母净利润预估



资料来源：公司公告，德邦研究所预测

7.2. 金杯电工

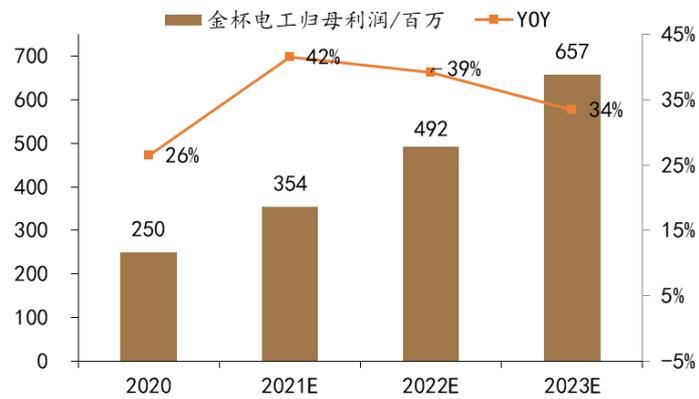
公司简介：国内电线电缆领域领军企业，深耕电磁线领域二十余年。公司于 2010 年上市，是中部地区最大的电线电缆制造企业和国内领先的特高压输变电设备、高压电机、新能源汽车驱动电机用电磁线制造企业。

公司竞争优势：1) 公司多年来一直从事扁电磁线的生产研发，切入新能源扁线业务技术跨度小；2) 公司传统主业包含高压输变电设备，公司在高压绝缘方面技术底蕴丰厚，未来整车电压平台提升至 800V，公司的在高压绝缘方面的技术积累有助于拓展新客户；3) 公司研发投入高，专利数量多，电磁线业务毛利率远超

同行。

公司业绩预测：我们预计 2021 年营业收入 90 亿，归母净利润 3.54 亿元，2022 年营业收入 94 亿，归母净利润 4.92 亿元，2023 年营业收入 03 亿，归母净利润 6.57 亿元。

图 85：金杯电工归母利润预估



资料来源：公司公告，德邦研究所预测

8. 风险提示

扁线渗透率不及预期，新能源车销量不及预期，产能扩张不及预期。

信息披露

分析师与研究助理简介

马天一，德邦证券研究所电力设备与新能源行业高级分析师，天津大学化工硕士，中南大学冶金工程本科，锂电池材料研发背景，3年以上电动车行业研究经验，擅长行业技术趋势和生意本质的解读，专注于从产业角度挖掘投资机会。

苏千叶，德邦证券研究所电力设备与新能源行业分析师，中南大学冶金工程本硕，在上汽新能源从事动力电池开发工作4年，深刻了解动力电池的技术发展路线，动力电池厂商的产品性能、价格等，专注于新能源汽车领域的掘金机遇。

吴舍，德邦证券研究所电力设备及新能源行业研究助理，伦敦国王学院金融硕士，中山大学金融学士，主要覆盖风电光伏板块。

分析师声明

本人具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告。本报告所采用的数据和信息均来自市场公开信息，本人不保证该等信息的准确性或完整性。分析逻辑基于作者的职业理解，清晰准确地反映了作者的研究观点，结论不受任何第三方的授意或影响，特此声明。

投资评级说明

	类别	评级	说明
1. 投资评级的比较和评级标准： 以报告发布后的6个月内的市场表现为比较标准，报告发布日后6个月内的公司股价（或行业指数）的涨跌幅相对同期市场基准指数的涨跌幅；	股票投资评级	买入	相对强于市场表现20%以上；
		增持	相对强于市场表现5%~20%；
		中性	相对市场表现在-5%~+5%之间波动；
		减持	相对弱于市场表现5%以下。
2. 市场基准指数的比较标准： A股市场以上证综指或深证成指为基准；香港市场以恒生指数为基准；美国市场以标普500或纳斯达克综合指数为基准。	行业投资评级	优于大市	预期行业整体回报高于基准指数整体水平10%以上；
		中性	预期行业整体回报介于基准指数整体水平-10%与10%之间；
		弱于大市	预期行业整体回报低于基准指数整体水平10%以下。

法律声明

本报告仅供德邦证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。

本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入可能会波动。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。

市场有风险，投资需谨慎。本报告所载的信息、材料及结论只提供特定客户作参考，不构成投资建议，也没有考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需要。客户应考虑本报告中的任何意见或建议是否符合其特定状况。在法律许可的情况下，德邦证券及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券并进行交易，还可能为这些公司提供投资银行服务或其他服务。

本报告仅向特定客户传送，未经德邦证券研究所书面授权，本研究报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。如欲引用或转载本文内容，务必联络德邦证券研究所并获得许可，并需注明出处为德邦证券研究所，且不得对本文进行有悖原意的引用和删改。

根据中国证监会核发的经营证券业务许可，德邦证券股份有限公司的经营经营范围包括证券投资咨询业务。