

减速器材料：工艺优化正当时

2025年05月15日

➤ **精密减速器是机器人的核心部件。**精密减速器在人形机器人的动力传输系统中扮演着至关重要的角色，是连接伺服电机与机器人关节的关键部件。其主要作用是将伺服电机输出的高转速、低扭矩的动力，转换为低转速、高扭矩的动力，以满足机器人关节对扭矩和转速的需求。

➤ **谐波减速器为主，精密行星减速器为辅。**精密减速器包括谐波减速器、RV 减速器、摆线针轮行星减速器、精密行星减速器等。随着移动机器人部分关节因体积、重量等边界条件限制，需要采用轻量化的技术路径，谐波减速器凭借体积小、质量小、减速比大、扭矩密度较高、轴向尺寸小等特点以及能在密闭空间、介质辐射的工况下正常工作等优点应用广泛；而精密行星减速器主要应用在精度要求较低的部位，其刚性更高、寿命更长且价格更便宜。

➤ **谐波减速器对材料要求更高。**谐波减速器通过柔性构件来实现机械传动，国内谐波减速器失效的主要表现为齿轮磨损后导致传动精度严重下降，这对柔轮和刚轮的材料性能提出了更高的要求，需要具有高韧性、高强度和高耐磨性。

➤ **柔轮：精冲技术有望降本增效。**由于长期连续承受交变载荷，发生周期性变形，柔轮应具有良好的韧性、强度以及优良的切削性能。可以通过优化柔轮结构参数、齿形参数和制造精度等措施，或改善材料的显微组织以及提高力学性能来提高柔轮的质量。精密冲压是在普通冲压工艺的基础上发展起来的一种物料加工方法，可以获得精密优质的零件，在汽车行业中已有成熟的应用。由于精冲工艺制板精度高、生产效率高、质量好、适合大批量生产产品，有望为柔轮等机器人材料降本增效。

➤ **刚轮：球墨铸铁轻量化替代。**为保证谐波减速器承载能力、服役寿命，柔轮材料采用的高强钢，其硬度通常高出与之啮合的刚轮 3-7HRC，因此刚轮往往更容易磨损，导致传动效果变差甚至减速器失效。球墨铸铁具有易切削、自润滑，耐磨的优异特性，在减重 5%~10% 的同时，球墨铸铁的硬度、耐磨性更强，在刚轮材料中是对传统合同钢的良好替代。

➤ **机器人放量在即，特钢需求迎来新的应用场景。**人形机器人量产在即，2025 年特斯拉计划生产数千台人形机器人，2027 年产量有望超过 50 万台。人形机器人自由度大增，特斯拉 Optimus 二代单台谐波减速器用量 16 个，而传统多关节机器人平均仅使用 3.5 个，谐波减速器需求有望大增。按照中期 100 万台、远期 1000 万台规模测算，谐波减速器用钢材市场规模分别为 19.15、191.5 亿元。按 20% 的技术替代率，精冲钢/球墨铸铁市场规模拉动分别为 3.83、38.3 亿元。

➤ **投资建议：**机器人放量有望对精冲钢、球墨铸铁等材料形成需求拉动，精冲钢行业推荐翔楼新材，翔楼新材未来产能将进一步提升，产品结构优化，我们预计公司 2025-2027 年归母净利润分别为 2.43、2.95 和 3.51 亿元，对应现价，PE 分别为 31/25/21 倍，维持“推荐”评级；球墨铸铁行业建议关注恒工精密。

➤ **风险提示：**人形机器人放量不及预期，材料应用不及预期，原材料价格波动风险等。

重点公司盈利预测、估值与评级

代码	简称	股价 (元)	EPS (元)			PE (倍)			评级
			2024A	2025E	2026E	2024A	2025E	2026E	
301160.SZ	翔楼新材	92.25	2.55	2.99	3.63	36	31	25	推荐

资料来源：Wind，民生证券研究院预测；

(注：股价为 2025 年 5 月 15 日收盘价)

推荐

维持评级

相关研究

1. 钢铁周报 20250511：宏观政策托底，钢材需求有望边际改善-2025/05/11
2. 钢铁行业 2024 年年报及 2025 年一季报总结：提振内需+严控产量，钢材供需格局“柳暗花明”-2025/05/08
3. 钢铁周报 20250504：粗钢限产预期再起，钢厂利润有望回升-2025/05/04
4. 钢铁周报 20250427：关税政策有所缓和，钢价企稳回升-2025/04/27
5. 钢铁周报 20250420：关税交易或已结束，期待国内宏观政策对冲-2025/04/20

目录

1 谐波减速器是人形机器人优选方案	3
1.1 精密减速器是机器人核心部件	3
1.2 人形机器人谐波减速器为主，精密行星减速器为辅	4
2 减速器材料：工艺优化正当时	7
2.1 谐波减速器对材料要求更高	7
2.2 柔轮：谐波减速器核心部件，精冲技术有望降本增效	9
2.3 刚轮：球墨铸铁轻量化替代	15
3 机器人放量在即，特钢需求迎来新的应用场景	17
4 投资建议及重点标的	20
4.1 投资建议	20
4.2 翔楼新材：立足精冲材料国产替代，高端产能逐步释放	20
4.3 恒工精密：一体化连铸球墨龙头，减速器材料布局初见成效	25
5 风险提示	27
插图目录	28
表格目录	28

1 谐波减速器是人形机器人优选方案

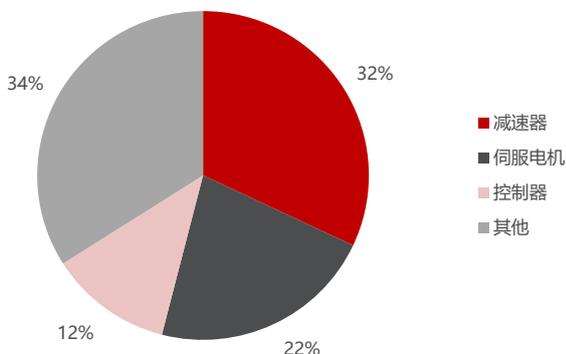
1.1 精密减速器是机器人核心部件

按照控制精度划分，减速器可分为一般传动减速器和精密减速器。一般传动减速器控制精度低，可满足机械设备基本的动力传动需求。精密减速器回程间隙小、精度较高、使用寿命长，更加可靠稳定，主要应用于机器人、数控机床等高端领域。

精密减速器主要用于降低转速和增加扭矩，是连接伺服电机与机器人关节的关键部件。其主要作用是将伺服电机输出的高转速、低扭矩的动力，转换为低转速、高扭矩的动力，以满足机器人关节对扭矩和转速的需求。在机器人的运动过程中，伺服电机以较高的转速运转，产生的扭矩相对较小，而机器人关节需要较大的扭矩来驱动肢体进行各种动作，如行走、抓取、搬运等。精密减速器通过齿轮的啮合传动，实现了转速的降低和扭矩的放大，使得机器人能够平稳、精确地完成各种复杂动作。

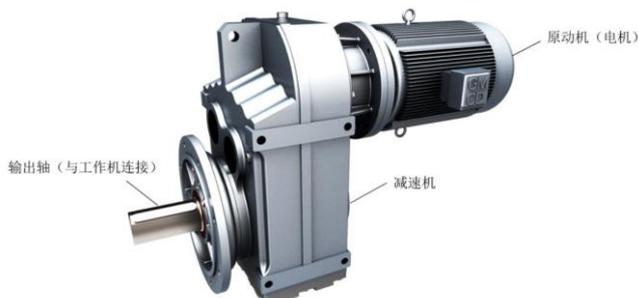
机器人的三大核心部件为减速器、伺服电机和控制器，成本占比分别为32%/22%/12%。减速器（减速机）是连接动力源和执行机构的中间机构，具有匹配转速和传递转矩的作用。伺服电机是能被应用于运动控制系统中的电动机，使物体的位置、方位、状态等输出被控量能够跟随输入目标（或给定值）而变化，它的输出参数，如位置、速度、加速度或转矩都是可控的。控制器的主要任务是控制机器人在工作空间中的运动位置、姿态和轨迹，操作顺序及动作的时间等，它同时具有编程简单、软件菜单操作、友好的人机交互界面、在线操作提示和使用方便等特点。

图1：工业机器人成本结构



资料来源：《工业机器人发展现状及分析》，电器工业，民生证券研究院

图2：减速器（减速机）的产品构造



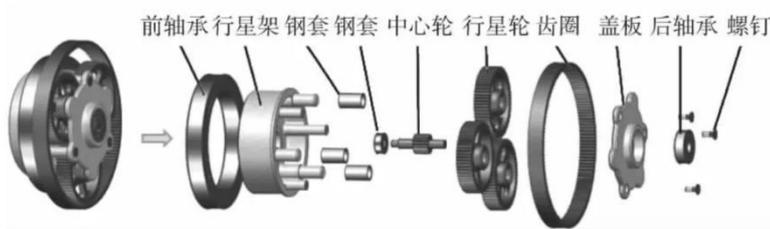
资料来源：国茂股份招股说明书，民生证券研究院

1.2 人形机器人谐波减速器为主，精密行星减速器为辅

精密减速器包括谐波减速器、RV 减速器、摆线针轮行星减速器、精密行星减速器等。

1. **行星齿轮减速器：体积小，但减速比低。**原理为单级齿轮减速。由中心的太阳轮、最外侧的外齿圈以及两者中间的行星轮组成。无框电机通过旋转轴与太阳轮相连并驱动其转动，行星轮在太阳轮的驱动下同时进行自转以及沿外齿圈的轨迹公转，行星轮的公转带动连结的行星盘输出动力。单级行星减速器的减速比较低，最大一般不超过 10，如果使用多级行星减速，能够有效增大减速比，但是会使得器件长度和重量增加，并且降低传动效率。

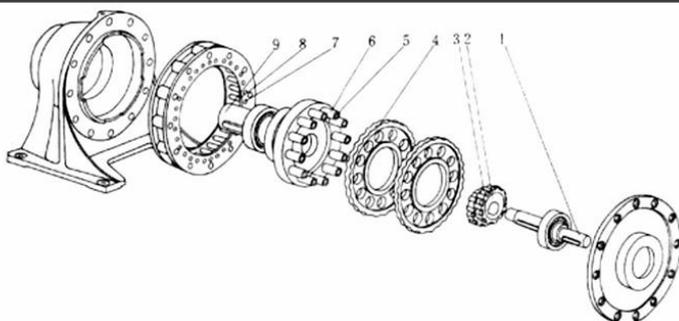
图3：精密行星减速器结构



资料来源：洪健等《一种高性能移动机器人一体化关节模组设计》，民生证券研究院

2. **摆线针轮减速器：高减速比，但体积偏大，不能高速。**组成包括高速轴、偏心轴承、两个摆线轮、针齿壳/针齿以及带销低速轴。当偏心轴承被高速轴带动旋转的时候，两个摆线轮被带动同时做自转以及沿针齿壳公转两种旋转运动，摆线轮带动带销低速轴一起转动，偏心轴每转一圈，摆线轮就转过一个针齿。摆线针轮减速器减速比较高，但由于偏心矩的存在，无法进行高速传动，于是诞生了 RV 减速器，使用行星+摆线双级减速，有效解决了行星减速比低、摆线不能高速的缺点，因此摆线减速器逐渐被 RV 减速器替代。

图4：摆线针轮减速器结构



注：1- 输入轴,2- 双偏心套,3- 转臂轴承,4- 摆线轮,5- 柱销,6- 柱销套,7- 针齿销,8- 针齿套,9- 输出轴.

资料来源：吴素珍《机器人关节传动用精密减速器研究进展》，民生证券研究院

3. **RV 减速器：摆线升级款，高减速比，体积仍然偏大。**结合了行星齿轮减速器和摆线针轮减速器的减速原理进行两级减速，解决了摆线减速器不能高速传动的缺点。第一级：依靠行星齿轮完成减速；第二级：行星齿轮的输出轴成为摆线针轮的输入轴，利用摆线针轮原理实现第二级减速。RV 减速器继承了摆线减速器高减速比、扭矩大的优点，但体积仍然偏大。

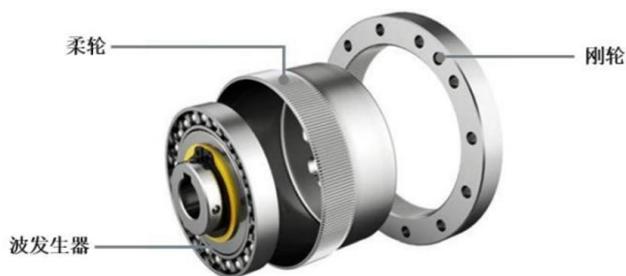
图5：RV 减速器结构



资料来源：吴素珍《机器人关节传动用精密减速器研究进展》，民生证券研究院

4. **谐波减速器：高减速比，小体积，但扭矩较低。**由波发生器、柔轮和钢轮组成。其中波发生器为椭圆形，柔轮为具有高抗扭刚性的带有外齿的薄壁齿轮，钢轮为带有内齿的刚性环。波发生器转动一圈时，柔轮只转过 2 个齿，因此谐波减速器减速比较高。同时，谐波减速器由于没有行星和 RV 的多个齿轮组合，体积相对更小。但是由于柔轮为柔性材料，其能承受的扭矩相对较小，且周期性的变形使得柔轮对材料性能的要求更高。

图6：谐波减速器结构



资料来源：绿的谐波招股说明书，民生证券研究院

在工业机器人领域，RV 减速器和谐波减速器各具特点，应用场景互补。在工业机器人领域，RV 减速器和谐波减速器应用最为广泛。RV 减速器传动效率高、输出扭矩大，适用于机器人的中机座、大臂、肩部等重负载部位，而谐波减速器体积小、重量轻、传动比和精密度高，适用于机器人的小臂、腕部和手部等轻负载部位。在工业机器人的应用上，两者各具特点，应用场景相辅相成。

在轻量化的人形机器人应用中，谐波减速器为主，精密行星减速器为辅。随着移动机器人部分关节因体积、重量等边界条件限制，需要采用轻量化的技术路径，谐波减速器凭借体积小、质量小、减速比大、扭矩密度较高、轴向尺寸小等特点以及能在密闭空间、介质辐射的工况下正常工作等优点，“无框电机+双编码器+力矩传感器+谐波减速器”这类方案得到越来越多的应用。而精密行星减速器，在精度要求较低的关节，凭借着高刚性、长寿命和更低的成本获得部分青睐。

表1：机器人常用减速器性能比较

指标	精密行星减速器	RV 减速器	谐波减速器
尺寸	小	大	小
重量	中	大	小
减速比	小	大	大
扭矩	大	大	小
精度	差	高	高
寿命	长	中	短
价格	便宜	贵	中等
应用场景	精度要求低的关节	重负载的大关节	主体各关节

资料来源：绿的谐波招股说明书，民生证券研究院

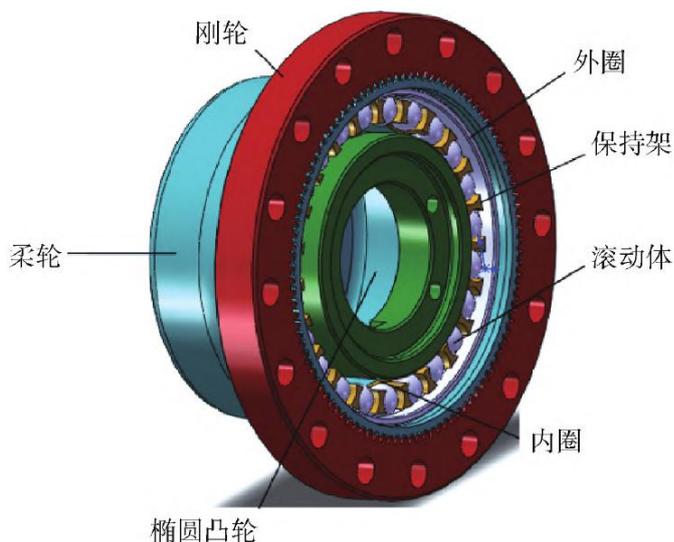
注：标红色为优势指标

2 减速器材料：工艺优化正当时

2.1 谐波减速器对材料要求更高

谐波减速器由刚轮、柔轮和波发生器三个部件构成。谐波减速器由带有内齿圈的刚性齿轮（刚轮）、带有外齿圈的柔性齿轮（柔轮）、波发生器三个基本构件组成，波发生器内部为椭圆凸轮，外部为外圈、内圈、滚动体和保持架构成的柔性轴承。在其运行中，波发生器使柔轮产生可控的弹性变形波，通过柔轮与刚轮的错齿运动，实现运动和动力的传递。谐波传动技术通过柔性构件实现机械传动，精密度较高，因此广泛应用于机器人领域。

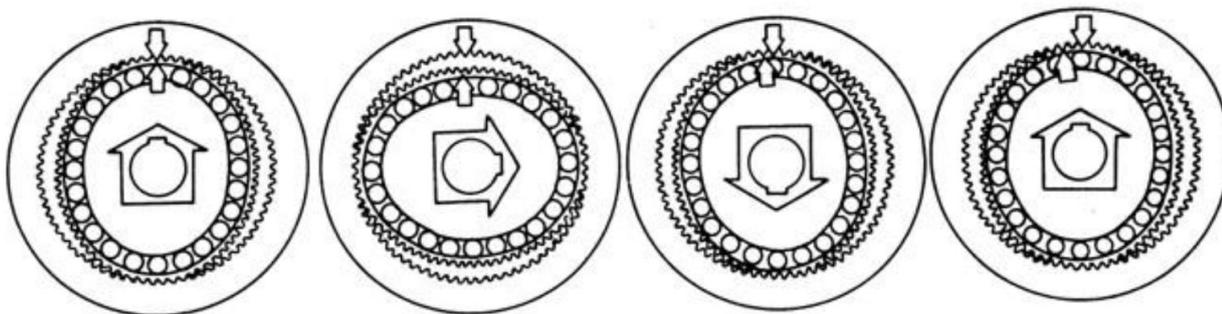
图7：谐波减速器结构



资料来源：李军宁等《谐波减速器柔性轴承动力学仿真与润滑特性》，民生证券研究院

谐波传动技术突破了机械传动采用刚性构件的模式，使用了一个柔性构件来实现机械传动。其工作原理通常采用波发生器主动、刚轮固定、柔轮输出形式，当波发生器装入柔轮内圆时，迫使柔轮产生弹性变形而呈椭圆状，使其长轴处柔轮齿插入刚轮的轮齿槽内，成为完全啮合状态；而其短轴处两轮轮齿完全不接触，处于脱开状态，当波发生器连续转动时，迫使柔轮不断产生变形并产生了错齿运动，从而实现波发生器与柔轮的运动传递。谐波减速器中波发生器转动一周时，柔轮向相反方向转过两个齿的角度。

图8：谐波减速器结构



资料来源：绿的谐波招股说明书，民生证券研究院

谐波减速器材料大部分为特钢材料。典型刚轮、柔轮分别使用合金结构钢 40CrMo、40CrNiMoA 进行生产，波发生器中内外圈和滚动体分别使用高碳铬轴承钢 ZGCr15、GCr15 进行生产，凸轮使用优质碳素结构钢 45#进行生产，保持架使用聚酰胺 PA66 进行生产。

表2：谐波减速器典型材料

部件	材料	类别	弹性模量/GPa	泊松比	
刚轮	40CrMo	合金结构钢	212	0.28	
柔轮	40CrNiMoA	合金结构钢	209	0.295	
波发生器	内外圈	ZGCr15	高碳铬轴承钢	207	0.3
	保持架	PA66	聚酰胺	2.6	0.35
	滚动体	GCr15	高碳铬轴承钢	217	0.29
	凸轮	45#	优质碳素结构钢	210	0.269

资料来源：李军宁等《谐波减速器柔性轴承动力学仿真与润滑特性》，民生证券研究院

国内谐波减速器失效的主要表现为齿轮磨损后导致传动精度严重下降，这对柔轮和刚轮的材料性能提出了更高的要求。国内的谐波减速器产品主要的失效形式表现为齿轮磨损后导致传动精度严重下降。国外产品主要失效形式为柔性轴承的破坏，而不是齿轮副磨损失效。从微观结构来分析，柔轮失效的主要原因是局部微裂纹和尺寸精度的变化，其根本原因是晶粒和铁氧体相的不合理。

2.2 柔轮：谐波减速器核心部件，精冲技术有望降本增效

2.2.1 谐波减速器核心部件，性能及工艺要求较高

柔轮材料应具有良好的韧性、强度以及优良的切削性能。由于长期连续承受交变载荷，发生周期性变形，柔轮材料的选择对于谐波齿轮传动的质量至关重要，是否采用性能良好的适宜材料以及进行相应的热处理在很大程度上影响着柔轮的使用寿命。除此之外，柔轮筒壁厚较薄，所以柔轮材料应具有良好的韧性、强度以及优良的切削性能，中碳低合金钢 40CrNiMoA、40CrA、42CrMo 等常作为柔轮材料。

表3：柔轮材料成分（单位：%）

合金牌号	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
40CrNiMoA	0.37-0.44	0.5-0.8	0.17-0.37	0.6-0.9	1.25-1.65	0.15-0.25
42CrMo	0.38-0.45	0.5-0.8	0.17-0.37	0.9-1.2	-	0.15-0.25
40CrA	0.37-0.44	0.5-0.8	0.17-0.37	0.8-1.1	-	-

资料来源：国标 GB/T 3077-2015，民生证券研究院

表4：柔轮材料力学性能

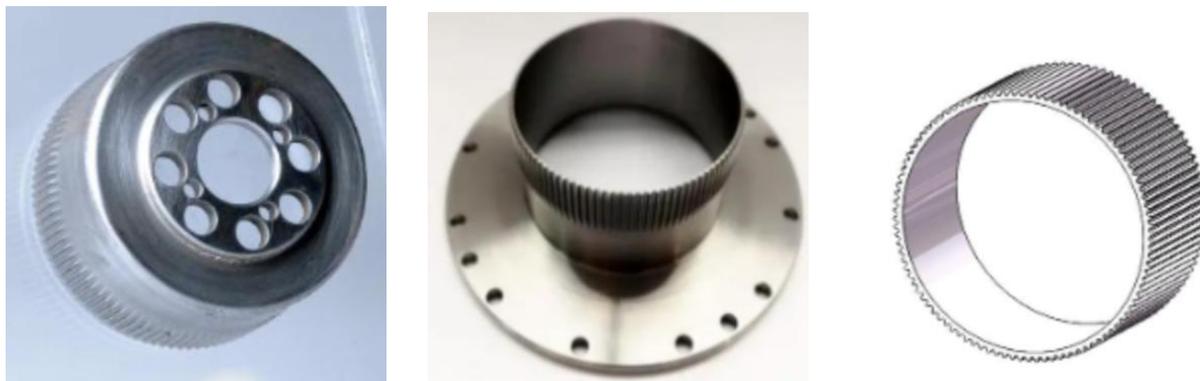
合金牌号	抗拉强度/Mpa	屈服强度/Mpa	断后伸长率/%	断面收缩率/%	冲击吸收能/J
40CrNiMoA	980	835	12	55	78
42CrMo	1080	930	12	45	63
40CrA	980	785	9	45	47

资料来源：国标 GB/T 3077-2015，宁林新等《首钢合金结构钢 40CrA 力学性能预报控制模型的开发与应用》，民生证券研究院

一方面，可以通过优化柔轮结构参数、齿形参数和制造精度等措施来提高柔轮的质量。

柔轮结构常见的有杯状、帽状和圆筒型。杯状和帽状柔轮的齿廓位于柔轮的一侧，另一侧为杯底或帽盖。杯底和帽盖的变形性差，与齿廓变形不一致，导致柔轮壁厚薄，齿形小，承载能力弱，容易产生棘齿现象；但同时，杯底或帽盖的法兰盘在承受大负载的情况下，拥有更好的稳定性和耐用性。圆筒型柔轮整体齿廓相同且呈空心圆筒状，使整个柔轮变形具有一致性，更容易变形，可实现高壁厚下变形，因此可以增大其壁厚和齿高，从而使其具有高刚度，并增加其传递扭矩的能力，改善棘齿现象。

图9：常见柔轮类型

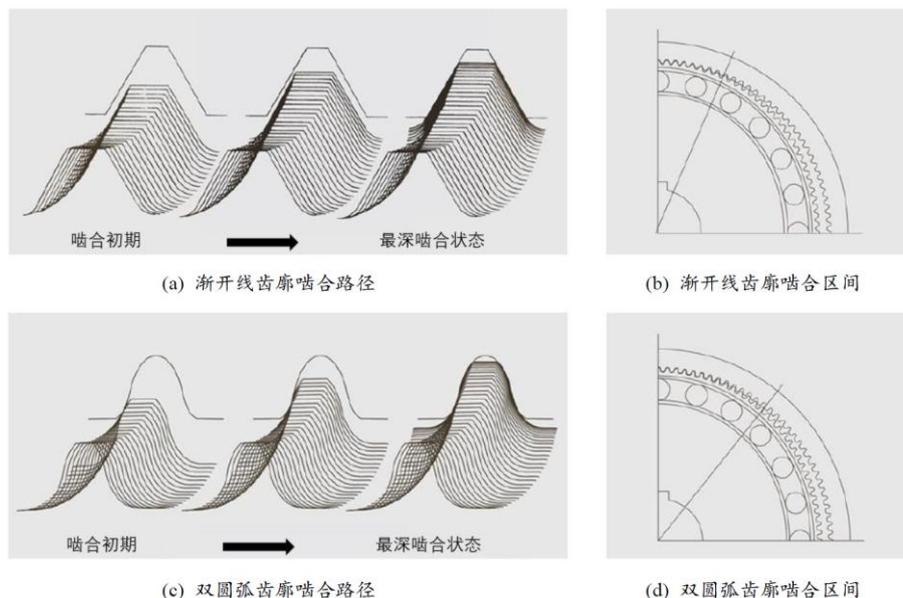


资料来源：叶雯莉《基于圆筒型柔轮的谐波减速器设计与分析》，民生证券研究院

注：从左至右依次为杯状、帽状和圆筒型柔轮

目前柔轮多为双圆弧齿廓。柔轮齿廓最早为直线型，直线齿廓在传动时能够保持固定的传动比，但由于柔轮轮齿存在法向变形，直线齿廓不能保证良好的传动性能。之后，渐开线齿廓被广泛应用，渐开线齿廓较为简单，且综合性能较好。但是渐开线齿廓仍然存在不足，负载状态下容易出现尖点啮合，同时渐开线齿廓啮合不连续，干涉非常明显。目前，双圆弧齿廓是应用较多的改良版本，其齿啮合数更多，更有利于提高承载能力和实现连续啮合，保证运行的平稳。

图10：渐开线齿廓与双圆弧齿廓啮合路径对比

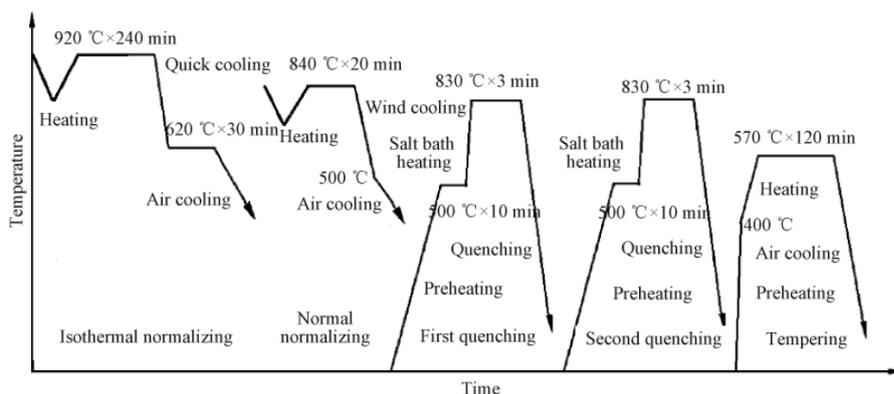


资料来源：杨斌《谐波减速器柔轮的力学特性仿真与试验研究》，民生证券研究院

另一方面，可以通过改善材料的显微组织以及提高力学性能来提高柔轮的质量。

为了使柔轮的显微晶粒更细、力学性能更强，通常要在锻后进行复杂的热处理加工。柔轮制造过程中需要经过多次的热处理：热模锻→等温正火→普通正火→粗车→两次淬火→高温回火→半精加工→去应力退火→精加工→滚齿→喷丸强化。经过较高温度的等温正火、较低温度的普通正火和盐浴加热的两次淬火，柔轮的奥氏体晶粒尺寸可以细化到 7.1 μm ，特定范围内的高温回火可以使柔轮同时具有较高的硬度和强塑积。

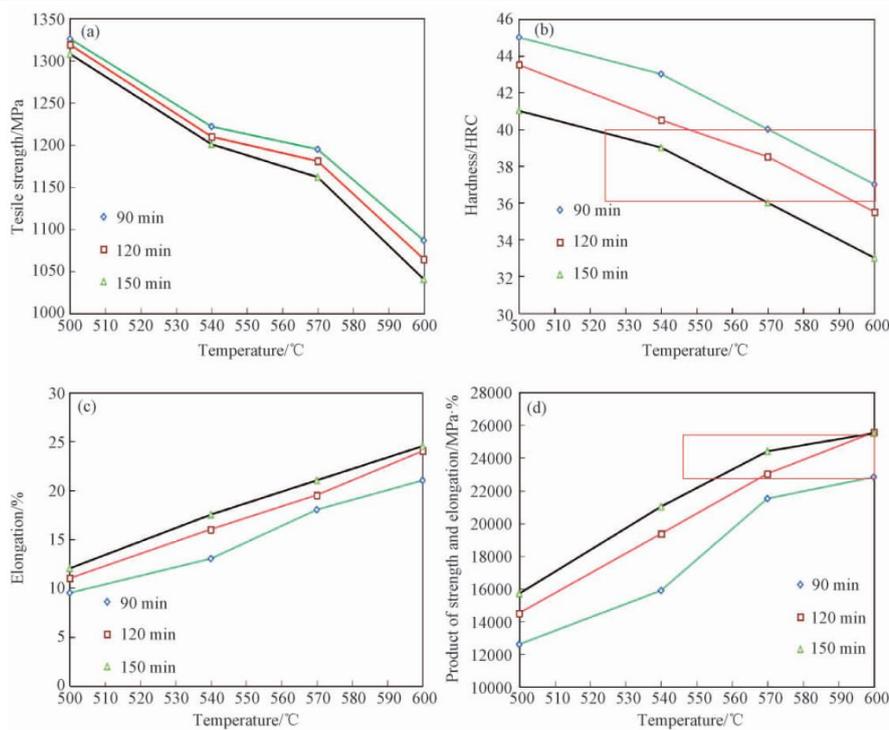
图11：柔轮热处理工艺曲线



资料来源：陈正周《热处理对 40CrNiMoA 钢柔轮显微组织和力学性能的影响》，民生证券研究院

注：Isothermal normalizing 等温正火；Normal normalizing 普通正火；Quenching 淬火；Tempering 高温回火

图12：柔轮回火工艺对钢力学性能的影响



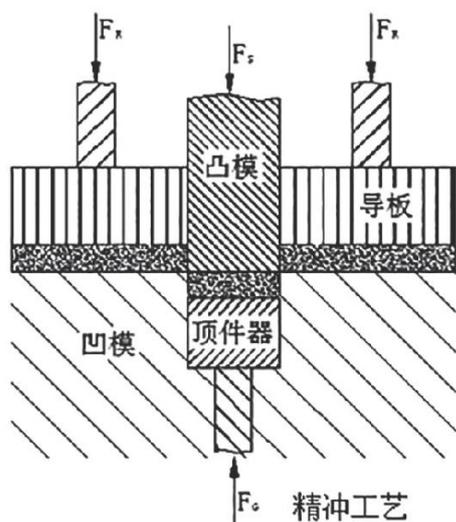
资料来源：陈正周《热处理对 40CrNiMoA 钢柔轮显微组织和力学性能的影响》，民生证券研究院

注：(a) 抗拉强度 (b) 硬度 (c) 伸长率 (d) 强塑积

2.2.2 精冲技术有望降本增效

精密冲压是在普通冲压工艺的基础上发展起来的一种物料加工方法，可以获得精密优质的零件，在汽车行业中已有成熟的应用。精密冲压通过提高导向精度，减小凹凸模间隙，增加反向压力和V形环压边圈等工艺措施，造成在强烈的三向压应力状态条件下，实现精密冲压或精密冲压与其他成形工艺复合的工序，获得精密冲压件。汽车工业是精冲零件推广应用的重点领域，在发达国家，精冲零件在汽车行业的应用占60%以上，国内目前约占50%左右。

图13：精冲工艺示意图



资料来源：杨世旭《准精冲与精冲工艺的优劣分析》，民生证券研究院

精密冲压与普通冲压最本质的区别在于精冲在冲裁时能有效避免板材撕裂的发生。由于采用精冲加工的零件具有冲裁面光洁、尺寸精度高、平面度高等优点，所以经过去毛刺处理后可直接进行装配。无需普通冲压后所需的切、削、磨、矫平等其他加工工序，节省了大量辅助设备的投资以及人力、物力、运营成本等，不仅提高了生产效率，更重要的是避免了各工序的精度损失，保证了批量生产零件的重复精度和生产可靠性。随着精冲技术的发展与成熟，精冲钢应用领域也将不断拓展，下游应用行业的增长为精冲钢带来持续稳定的市场需求，未来精冲钢将具备较大的市场空间与广阔的市场前景。

表5：精冲工艺与传统锻造、铸造及机加工工艺的对比情况

生产 工艺	具体生产工艺	优点	缺点
精冲 工艺	利用冲压机械的力量以及使用模具作为金属成形工具，对金属板材、带材等施加外力，产生冲压分离或塑性变形效果，从而达到零件的尺寸、形状和性能要求	<ul style="list-style-type: none"> 产品质量稳定，尺寸形态等精密度高，表面粗光洁度高 一次成型，通常无需后续机械加工工序，生产周期短，生产效率高，单位能耗低，可应用于大批量生产 可适用于复合多维成型加工 	<ul style="list-style-type: none"> 原材料质量要求较高 受冲压设备限制，仅适用于厚度小于15mm的零部件生产 材料利用率相对较低
锻造 工艺	利用锻压机械对金属坯料施加压力，使其产生塑性变形以获得一定性能、形状、尺寸的锻件，具体分为热锻、温锻、冷锻等	<ul style="list-style-type: none"> 产品机械性能优于同材料铸件 产品内部组织结构良好 	<ul style="list-style-type: none"> 产品成型形态有限，不适用复杂形态的零件加工； 设备要求高、投入大 生产周期长，工序较为复杂，生产效率低
铸造 工艺	将金属熔炼成符合一定要求的液体并浇进铸模中，经冷却凝固后得到预定形状、尺寸、性能的铸件	<ul style="list-style-type: none"> 可生产形状复杂的零件，尤其是具有复杂内腔结构的铸件 原材料来源广泛，价格低廉，如废钢、废件等 	<ul style="list-style-type: none"> 机械性能较差，内部组织粗大 工序复杂，生产周期长，生产效率低；工序影响因素多、质量稳定性差 产品精密度较低
机加 工艺	通常指普通金属切削加工，通过车、铣、刨、磨等机械进行切削制造	<ul style="list-style-type: none"> 加工精度高 可适用于去毛刺、钻孔、表面处理等二次加工 	<ul style="list-style-type: none"> 适用于小批量金属制品加工 生产效率较低，成本较高 产品成型形态有限

资料来源：翔楼新材招股说明书，民生证券研究院

精密冲压材料要求较高。用于精冲的材料，因为要在材料晶体间有效传递压应力以抑制裂纹，需要被加工材料具有良好的塑性、低屈强比和高延伸率；需要具有良好的组织结构，在恒定的压力条件下产生均匀的抑制作用；一般太硬的材料组织结构比较粗大（比如马氏体），需要抗拉强度在 600MPa~700MPa 以下。因此，选取材料时可以依据下面三个条件选择：

- 材料的含碳量小于 0.35%时，可直接精冲。
- 材料的含碳量（碳当量）为 0.35%~0.7%时，需进行球化退火。
- 可以选择高强度微晶粒合金钢。

未来使用精密冲压特殊钢材料将会成为趋势。由于精冲工艺制板精度高、生产效率高、质量好、适合大批量生产产品，尤其对于精密件更具优势，因此精密冲压工艺普遍用于各电子、通讯、汽车、机械、军工、电机电器、仪器仪表、医疗器械、航天、新能源、自动化装备和家电产品制造领域。下游重点行业众多，对于精密冲压特殊钢材料需求将会不断增长。

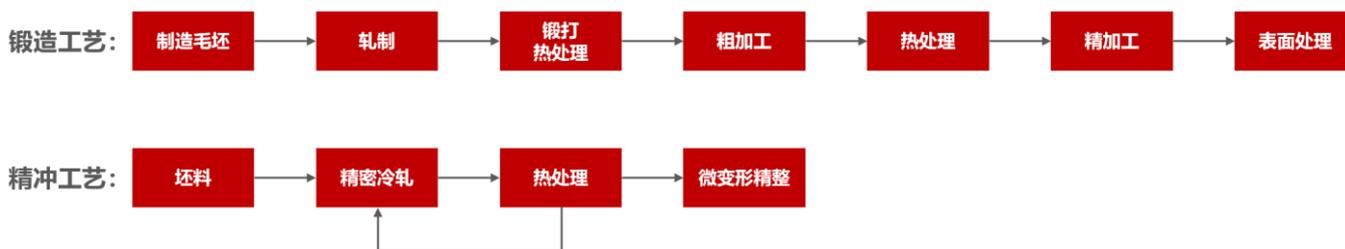
表6：下游主要行业应用

下游行业	精冲特殊钢材料应用
汽车零部件	变速箱、发动机、座椅、离合器、汽车安全带、轴承、法兰盘、凸轮盘、各种拨叉、锁扣板、棘轮、刹车蹄片、棘爪齿板等
电气产品	发电机转子、电器开关、阀板、变压器壳体、风电蝶形弹簧、电动工具、开关机构、限位块等
轨道交通	传动齿轮、空调阀片、减震弹簧、座椅、排气法兰等
通用机械	纺织机械、磨床、锯床、链轮传动、阀板、冷却系统等
精密仪器	指针、齿轮传动机构、弹簧、发条等
航空航天	精密齿轮、电器元件、液压作动装置、发射系统等

资料来源：翔楼新材招股说明书，民生证券研究院

传统柔轮生产工艺为锻造工艺。生产步骤为：(1) 制造毛坯，再对毛坯进行轧制，打碎柔轮内部的晶界组织；(2) 对轧制后的零件进行锻打和热处理，调整柔轮的内部组织结构，使得柔轮内部组织逐渐趋近于均匀化，并逐渐获得较好的硬度；(3) 对零件进行粗加工；(4) 再对零件进行热处理，使零件内部组织均匀细化；(5) 对零件进行精加工；(6) 对零件进行表面处理。

图14：柔轮生产工艺对比



资料来源：来福谐波《弹性柔轮的制作工艺》，翔楼新材招股说明书，民生证券研究院

注：精冲工艺暂未批量应用于柔轮生产，仅作为工艺流程对比

与锻造工艺相比，精冲工艺在产品质量、加工精度、生产周期、生产成本等多方面具有显著优势。精冲工艺通过一次成形就可以得到尺寸精度高，断面质量好的零部件，精冲零部件不产生撕裂带、无毛刺，省去了下游再次拉矫平整的过程。精冲产品的一致性更高，提高了零件的互换性，减少了装配时的测量选配，保证产品的一致性。锻造工艺相对更长，需要多次成形，因此生产效率也比精冲更低，单位能耗更高。

精冲技术有望为柔轮等机器人材料降本增效。谐波减速器柔轮的材料性能及工艺精细度要求较高，借助汽车精冲钢的成功经验，国内精冲钢领域的龙头翔楼新材已开始研发柔轮等机器人材料的精冲工艺替代，公司已完成了初步的技术论证，如果材料研制成功，柔轮生产成本将明显降低，生产效率大幅提升，有助于机器人零部件企业降本增效。

2.3 刚轮：球墨铸铁轻量化替代

摩擦磨损导致传动效果变差是导致谐波减速器失效的主要原因之一。主要表现为传递效率和传动精度降低，噪声和振动增加，通常发生于柔轮和刚轮的啮合中。由于柔轮直筒型薄壁的结构设计以及循环弹性变形的服役状态，为保证谐波减速器承载能力、服役寿命，柔轮材料采用的高强钢，其硬度通常高出与之啮合的刚轮3-7HRC，这给刚轮的耐磨性提出考验。

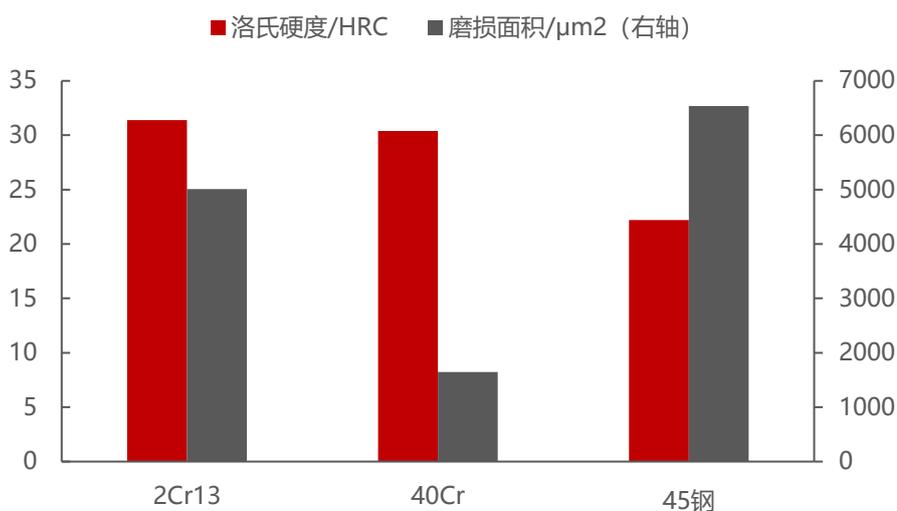
目前国产谐波减速器刚轮的材料为40Cr、45钢等，特殊情况下采用2Cr13不锈钢。40Cr中碳合金钢与45钢在热轧状态下性能相近，且45钢切削性能更好，处于经济性考虑，45钢多运用在对服役性能要求一般的工况。40Cr相较于45钢的淬透性更优秀，经调质后用于制造承受中等负荷工作的机械零件，适用常温下几乎所有刚轮的服役。2Cr13不锈钢具有抗腐蚀、力学性能优异等优点，是空间摩擦副齿轮常用的候选材料，但在民用谐波减速器刚轮的制造中应用较少。

表7：刚轮合金成分（单位：%）

合金牌号	C	Si	Mn	P+S	Cr	Ni
2Cr13	0.18	0.63	0.65	0.012	13	0.5
40Cr	0.38	0.21	0.7	0.018	1	0.2
45钢	0.45	0.24	0.62	0.023	0.15	0.15

资料来源：穆晓彪等《材质对谐波减速器刚轮的耐磨性能影响》，民生证券研究院测算

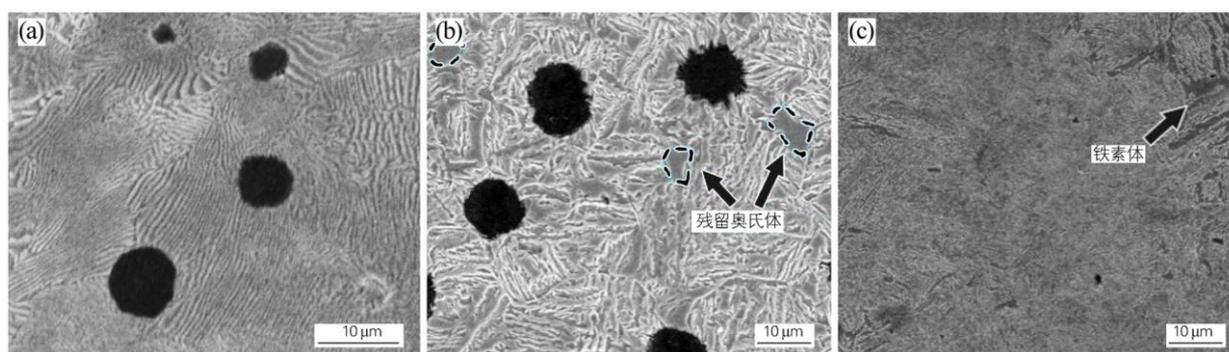
图15：刚轮合金性能对比



资料来源：穆晓彪等《材质对谐波减速器刚轮的耐磨性能影响》，民生证券研究院

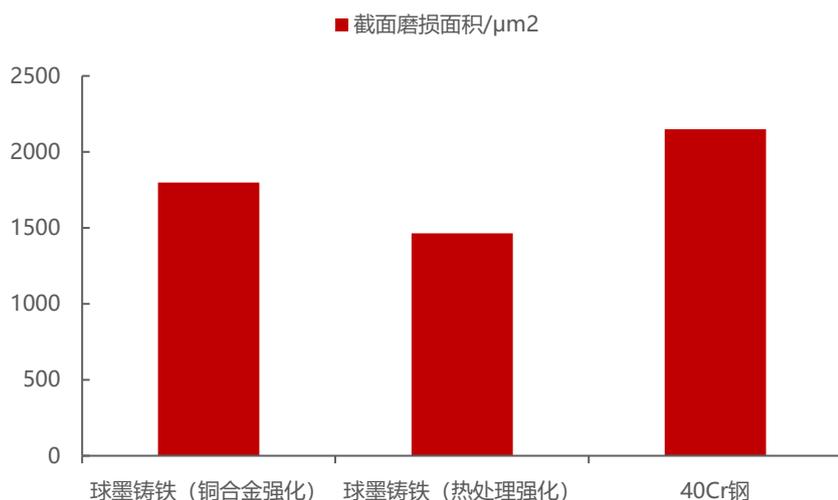
球墨铸铁具有易切削、自润滑、耐磨的优异特性，在刚轮材料中实现对合金钢替代。哈默纳克在谐波减速器上仍处于领先地位，其刚轮材料为球墨铸铁。球墨铸铁相较于上述材料，具有易切削、自润滑，耐磨的优异特性，并且基体组织中石墨球的存在，减重可达5%~10%，可为谐波减速器精度保持能力和轻量化提供支持。由于石墨的润滑作用，球墨铸铁的摩擦因数低于40Cr钢，表现出更优异的耐磨性。40Cr钢在磨损后具有更深的犁沟深度，且表面起伏较大，光洁度较差，更易导致刚轮精度不足。

图16: 球墨铸铁和40Cr钢的显微组织



资料来源: 邵洙浩等《谐波减速器刚轮用材质摩擦磨损性能分析》，民生证券研究院
注: (a) 球墨铸铁 (铜合金强化); (b) 球墨铸铁 (热处理强化); (c) 40Cr钢。

图17: 球墨铸铁和40Cr钢的耐磨性对比



资料来源: 邵洙浩等《谐波减速器刚轮用材质摩擦磨损性能分析》，民生证券研究院

3 机器人放量在即，特钢需求迎来新的应用场景

工业机器人正在快速发展。根据国际机器人联合会，2023 年全球工业机器人装机量已经达到 54 万台，相比 2015 年的 25 万台翻倍增长。而我国的增速明显更快，国家统计局显示，我国 2024 年工业机器人产量达到了 53 万台，同比增长 40%。

图18：工业机器人全球装机量情况



资料来源：IFR，民生证券研究院

图19：我国工业机器人产量情况



资料来源：国家统计局，民生证券研究院

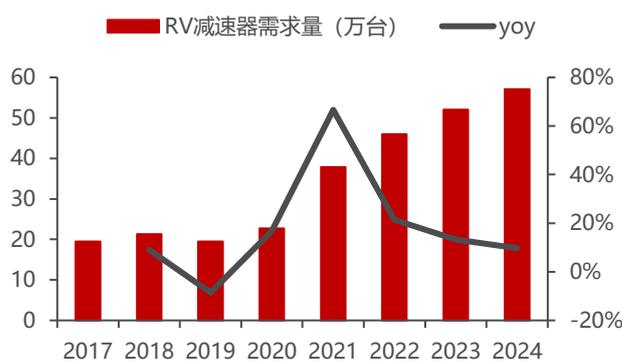
工业机器人带动减速器需求增加。根据 GGII 数据，2020-2024 年，中国工业机器人产量快速增加，带动 RV 减速器需求量由 22.72 万台增长至 57.05 万台，4 年 CAGR 为 25.9%，谐波减速器需求量由 29.57 万台增长至 79.55 万台，4 年 CAGR 为 28.1%。随着机器人向小型化、高精度方向发展，谐波减速器因体积小、精密度高优势应用场景不断拓展，2024 年工业机器人用谐波减速器与 RV 减速器需求比 1.4:1。

图20：中国工业机器人用 RV 减速器需求量



资料来源：GGII，民生证券研究院

图21：中国工业机器人用谐波减速器需求量



资料来源：GGII，民生证券研究院

人形机器人量产在即。根据马斯克在 CES 采访中表示，特斯拉计划在 2025 年生产数千台人形机器人 Optimus，若一切顺利，2026 年计划将产量提高至 2025 年的 10 倍，即大约 5 万到 10 万台，2027 年进一步提高 10 倍，也就是 50 万台到 100 万台。

人形机器人自由度大幅增加。根据绿的谐波招股说明书，多关节机器人平均使用谐波减速器 3.5 个，协作机器人一般使用谐波减速器 6-7 个，SCARA 和 DELTA 机器人一般使用谐波减速器 3 个。传统工业机器人的自由度一般为 2-6 个，而特斯拉人形机器人执行器达 40 个，仅手部就有 11 个自由度。谐波减速器体积小、质量轻、灵活性强，人形机器人的出现有望带来谐波减速器需求的大幅增加。

表8：不同类型机器人谐波减速器单位用量

机器人类型	谐波减速器单位用量 (个)
协作机器人	6-7
多关节机器人	3.5
SCARA 机器人	3
DELTA 机器人	3

资料来源：绿的谐波招股说明书，民生证券研究院

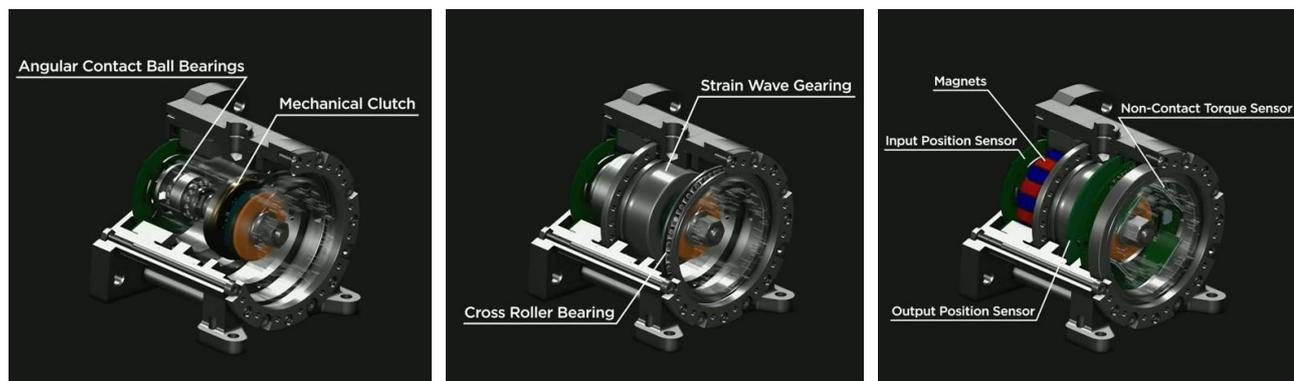
谐波减速器需求有望大增。以特斯拉 Optimus 为例，Optimus 一代需要使用 14 个旋转执行器，Optimus 二代增加了颈部的 2 个自由度，需要 16 个旋转执行器，每个旋转执行器由无框电机、谐波减速器、力矩传感器和离合器组成，每台机器人共需 16 个谐波减速器。

表9：Optimus 二代旋转执行器/减速器数量

关节	旋转方向	旋转自由度	减速器数量 (个)
颈部	俯仰+偏航	2*1	2
肩部	俯仰+偏航+滚动	3*2	6
腕部	滚动	1*2	2
腰部	偏航+滚动	2*1	2
髋部	偏航+滚动	2*2	4
合计		16	16

资料来源：特斯拉，民生证券研究院

图22: Optimus 旋转执行器示意图



资料来源: Tesla AI DAY 2022, 民生证券研究院

精冲钢、球墨铸铁应用前景广阔。按照绿的谐波公开数据测算, 单个谐波减速器的材料成本约为 342 元, 钢材成本 120 元。若按照每台机器人 16 个谐波减速器进行测算, 100 万台、1000 万台规模下减速器用钢材的市场规模分别为 19.15 亿元、191.5 亿元。假设 20% 的钢材使用精冲钢、球墨铸铁进行替代, 100 万台、1000 万台规模下对应市场规模拉动分别为 3.83 亿元、38.3 亿元。

表10: 谐波减速器用钢材市场规模测算

规模假设	100 万台	1000 万台
谐波减速器单价 (元)		1500
毛利率		41%
材料成本占比		39%
钢材占材料比		35%
单件减速器钢材价值量 (元)		120
单台机器人钢材价值量 (元)		1915
减速器钢材市场规模 (亿元)	19.15	191.5

资料来源: 绿的谐波招股说明书, 民生证券研究院测算

表11: 精冲钢、球墨铸铁市场规模拉动测算 (单位: 亿元)

技术替代率	100 万台	1000 万台
5%	0.96	9.58
10%	1.92	19.15
15%	2.87	28.73
20%	3.83	38.31
25%	4.79	47.89
30%	5.75	57.46

资料来源: 绿的谐波招股说明书, 民生证券研究院测算

4 投资建议及重点标的

4.1 投资建议

机器人放量有望推动精密减速器需求大幅上升，精冲钢、球墨铸铁等材料相比传统减速器材料具有性能、成本优势，有望实现材料替代，需求前景广阔。

精冲钢行业重点推荐**翔楼新材**，翔楼新材未来产能将进一步提升，产品结构优化，我们预计公司 2025-2027 年归母净利润分别为 2.43、2.95 和 3.51 亿元，对应 5 月 15 日收盘价，PE 分别为 31/25/21 倍，维持“推荐”评级；

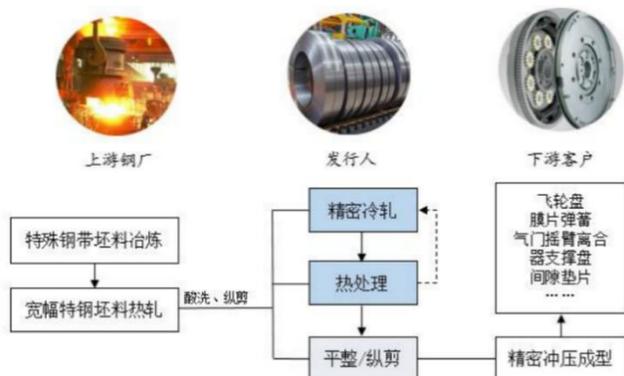
球墨铸铁行业建议关注**恒工精密**，恒工精密是国内球墨铸铁高端连铸的龙头企业，已在部分减速器核心部件中实现批量应用，有望成为新的增长点，进一步提升公司的业绩和市场份额。

4.2 翔楼新材：立足精冲材料国产替代，高端产能逐步释放

公司是专注于定制化精密冲压特殊钢材料领域的高新技术企业。公司通过自主研发与技术创新，深耕精密冲压特殊钢材料细分领域，以区别于大型钢厂市场容量大、可实施规模化、标准化生产的特点，可直接满足诸多细分领域小批量、定制化的市场需求，从而与大型钢厂在产品和工艺上形成优势互补与差异化竞争，盈利能力稳步提升。

公司下游面向零部件精冲企业。精密零部件制造企业对钢材性能要求较高，零部件精冲用材料如果尺寸和力学性能不稳定，精冲时会增加模具损耗，降低精冲效率，增加废品率。此外，下游零部件精冲企业对材料需求往往具有小批量、个性化特征，与大型钢厂规模化生产存在矛盾。因此，需要专业精密冷轧与热处理企业为下游应用企业提供专业化服务。公司与下游客户的定价机制参考原材料市场价格，在原材料价格上涨的背景下，公司能够在一定程度上将原材料价格上涨的影响传导给下游客户，维持相对稳定的利润空间。

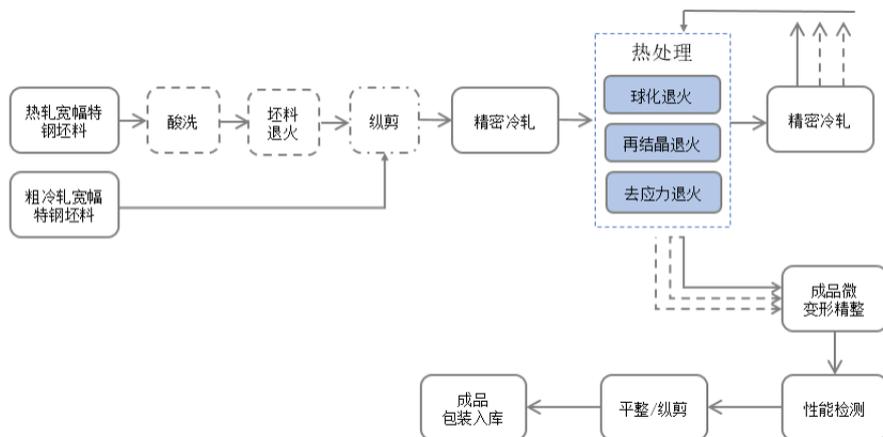
图23：精密冲压特殊钢生产链



资料来源：翔楼新材招股说明书，民生证券研究院

精密冷轧和热处理为公司核心工艺环节。公司产品主要以热轧宽幅特钢坯料为原材料，通过酸洗、纵剪、精密冷轧和热处理工艺实现特殊规格、特定厚度精度、表面质量以及特殊力学性能等要求，最后经平整、纵剪等工序满足客户所需的规格尺寸，其中精密冷轧和热处理为公司核心工艺环节，而热处理工艺又是公司提升产品附加值的主要阶段，属于公司生产工序中最为核心的环节。

图24：精密冲压特殊钢生产流程



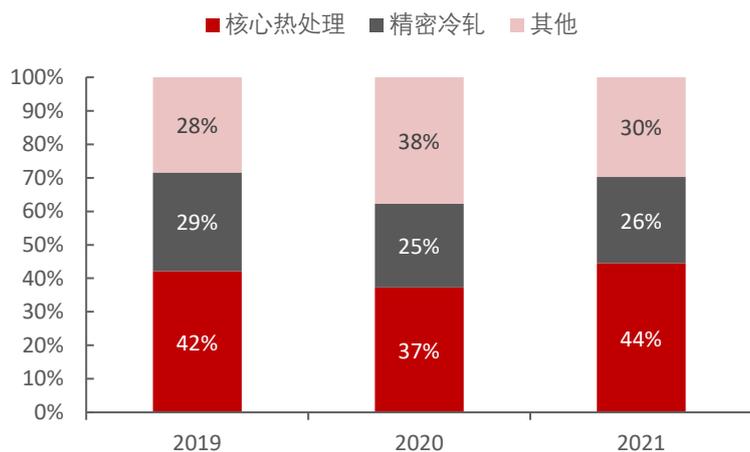
资料来源：翔楼新材招股说明书，民生证券研究院

热处理加工是决定材料力学性能（球化率、屈服强度、抗拉强度、硬度等）的关键工艺环节，是达成定制化性能需求的核心工序。其中，球化退火为公司实现下游客户精冲需求的关键热处理工艺：公司通过球化退火改变材料的内部组织结构，实现特殊钢材料渗碳体的细粒状均匀分布，提升材料剪切表面的光洁度，以达成高质量的精冲工艺。

表12：不同产品性能要求对应的生产过程

产品要求		精密冷轧	核心热处理	纵剪等其他工序
产品规格	产品厚度	√		
	产品宽度			√
力学性能及显微组织	抗拉强度		√	
	屈服强度		√	
	延伸率		√	
	材料硬度		√	
	球化率		√	
	晶粒度		√	
	晶间氧化层		√	
	脱碳层		√	
	表面质量	粗糙度/平整度	√	

资料来源：翔楼新材招股说明书，民生证券研究院

图25：翔楼新材制造成本分项占比


资料来源：翔楼新材招股说明书，民生证券研究院

公司联合产业链上下游，针对下游客户新产品需求展开合作研发。公司在下游客户新产品或新项目启动早期即参与介入，在充分识别并了解客户对材料性能要求后结合现有工艺技术与经验，提出原料显微组织、成分及性能要求等，由上游合作企业宝钢股份完成材料的冶炼、热轧，公司负责精密冷轧、热处理工艺技术开发，并最终生产出符合客户要求的产品。在科学研究、产品开发、人员培训等方面，公司与上海应用技术大学开展全面合作，上海应用技术大学针对公司技术难题和攻关项目推荐合适的新技术、新工艺，双方共同组建人才培训基地和科研实验基地。

表13：不同客户应用不同的定制化工艺

牌号	下游应用	客户	尺寸规格	技术要求	工艺路线
51CrV4	弹簧卡箍	慕贝尔	薄规格	对材料组织均匀性要求较高，需采用多次退火，以及较高的轧制压下率和较高退火温度	球化退火-冷轧-球化退火-冷轧-再结晶退火
			厚规格		球化退火-冷轧-球化退火
	膜片弹簧	法雷奥	-	对材料的屈服强度及零部件成品抗疲劳性能要求较高	球化退火-平整
		法斯特	-	由于客户工艺设备等原因，常规材料容易导致零部件成品衰减力过大、抗疲劳性能不足，需对材料性能进行改进	球化退火-冷轧-再结晶退火-平整

资料来源：翔楼新材招股说明书，民生证券研究院

公司与上游龙头炼钢企业合作稳定，利用自身优势提高与其合作粘性，降低了经营风险，为持续盈利创造空间。2020年-2023年6月，公司前五大供应商的采购金额占采购总额比重超过70%。公司原材料主要为宝钢股份生产的宽幅特钢坯料。宝钢股份作为国有龙头钢铁企业，建有上海宝山、武汉青山、湛江东山、南京梅山等主要制造基地，能充分保证产品质量与供货稳定性，是汽车及零部件企业重要的指定材料供应商之一。公司深入了解宝钢股份各牌号钢种性能，并通过科学合理的冷轧与热处理工艺路线设计，可定制出下游汽车零部件客户所需的精密冲压材料。此外，公司与宝钢股份建立了联合工作室，为共同开展汽车零部件精冲材料应用技术研究提供了便利条件。

表14：公司合作研发情况

合作单位	合作内容	权利义务划分约定	保密措施
宝钢梅钢	建立“宝钢股份梅山基地-翔楼新材联合工作室”，共同开展汽车零部件精冲材料应用技术研究	宝钢梅钢侧重相关材料设计制造，公司侧重冷轧及球化退火组织工艺、精冲成形及热处理研究。	双方在联合工作过程中获得的对方技术秘密或商业秘密未取得对方书面同意不得透露给第三方
上海应用技术大学	双方在科学研究、产品开发、人员培训等校企产学研方面开展全面合作	上海应用技术大学针对公司在工业生产、技术改造、技术引进中急需解决的技术难题和攻关项目推荐合适的新技术、新工艺；双方共同组建人才培养基地和科研实验基地。	由双方共同合作研发的科研成果、工艺及产品等皆为双方营业机密所保护，不得泄露，不得单独转让第三方

资料来源：翔楼新材招股说明书，民生证券研究院

把握需求释放机遇，积极扩张产能。2024年公司产能为18万吨，产能规模属于国内同行业第一梯队。安徽新厂“年产精密高碳合金钢带4万吨项目”已于2025年4月底投产，年内有望释放产能4万吨。2024年8月20日，公司使用自有资金对安徽项目追加投资4亿元，追加投资后，安徽项目的整体产能预计提升至15万吨。远期来看，安徽和苏州两个工厂将能提供合计30万吨产能。公司将通过超薄规格精密合金钢带生产线建设，为客户提供更高尺寸规格精度和力学

性能要求的特殊钢产品，并推动公司工艺技术进步，完善公司柔性生产布局。该项目实施将帮助公司提升核心竞争力、巩固细分领域行业地位。

致力于市场技术前沿。公司联动产业链上下游，投资购置了各类先进的专用生产设备及精密检测仪器，拥有自主研发的特种工艺与技术，并拥有自己的专利。公司生产的精密冲压新材料可用于多种零部件的一次成形，能够显著降低下游客户生产成本，并凭借稳定可靠的质量获得了许多国内外知名企业的认可，并在汽车安全系统、汽车动力系统材料等领域实现了进口替代。

机器人材料研发中，精冲替代助力降本增效。公司积极开拓机器人核心零部件材料，包括谐波减速器中的柔轮、齿轮，以及行星减速器中的太阳轮、行星轮、内齿圈等。目前，部分产品已完成开模，部分已进入测试阶段，柔轮材料研发进度已完成 60%，后续会根据客户认证的反馈进行进一步调整。

表15：谐波减速器材料研发情况

主要研发项目名称	项目目的	项目进展	拟达到的目标	预计对公司未来发展的影响
谐波减速器柔轮冲压加工用材料探索	开发出适用于谐波减速器柔轮冲压加工精冲材料	研究阶段	新产品工艺改进	新产品、新工艺可进一步提升公司技术水平和核心竞争力

资料来源：翔楼新材公告，民生证券研究院

盈利预测与评级：翔楼新材未来产能将进一步提升，产品结构优化，具有经营稳健性，我们预计公司 2025-2027 年归母净利润分别为 2.43、2.95 和 3.51 亿元，对应现价，PE 分别为 31/25/21 倍，维持“推荐”评级。

风险提示：原材料价格波动风险，行业周期波动风险，供应商集中度高的风险。

表16：翔楼新材盈利预测与财务指标

项目/年度	2024A	2025E	2026E	2027E
营业收入（百万元）	1,485	1,800	2,195	2,589
增长率（%）	9.7	21.2	21.9	18.0
归属母公司股东净利润（百万元）	207	243	295	351
增长率（%）	3.1	17.2	21.4	19.1
每股收益（元）	2.55	2.99	3.63	4.33
PE（现价）	36	31	25	21
PB	4.5	4.1	3.7	3.3

资料来源：Wind，民生证券研究院预测；（注：股价为 2025 年 5 月 15 日收盘价）

4.3 恒工精密：一体化连铸球墨龙头，减速器材料布局初见成效

恒工精密作为国内高端连铸材料的龙头企业，是少数掌握了连续铸铁核心技术并能够为装备核心部件制造提供一站式服务的高新技术企业。目前，公司形成了“一项核心产品和工艺、两项核心应用领域”的“一体两翼”的业务格局，致力于为高端装备制造客户提供“一站式解决方案”。“一体”指高质量连续铸铁件的生产能力，“两翼”分别是连续铸铁件在空压机领域的批量应用和在液压装备领域的批量应用，是国内外诸多知名高端装备制造企业的战略合作伙伴。公司的水平连续球墨铸铁件国内市场占有率 63%，排名第一，全球市场占有率 19%，排名第二。

先进连铸球墨工艺性能优异。公司连续铸造工艺区别于传统铸造的砂铸工艺，采用先进的水平连续铸造工艺，克服了传统铸造工艺材质不均匀、产品缺陷率高的缺点，保证了产品的致密性和良品率；在此基础上，通过在铁水中添加稀土合金等材料对铁水中所含碳元素进行球化处理，使其形成球状石墨，有效地提高了铸铁的机械性能，特别是提高了强度及塑性，可广泛应用于下游机械装备制造行业。

表17：连续铸铁件与锻钢件及砂铸件对比

连续铸铁件与锻钢件对比	连续铸铁件与砂型铸件对比
密度较锻钢轻，降低了单位体积材料成本	有效避免了砂型铸造气孔、砂眼、裂纹等缺陷
对加工刀具的磨损小	大幅度提升作业效率
切削速度比锻钢快	节省了砂型铸造占成本比重较高的模具成本支出
有效避免锻钢毛刺对自动化生产的影响，大幅提高加工效率	提升了材质的一致性，降低了对加工刀具的损耗
较锻钢的综合成本低	较砂型铸件的综合成本低

资料来源：恒工精密公告，民生证券研究院

公司的主要产品分为精密机加工件及连续铸铁件。公司营业收入主要来源于空压设备、液压装备、传动设备等领域，主要产品包括转子、液压阀块、导向套等，可广泛应用于空压设备、工程机械、注塑设备、传动装备等行业领域。公司在聚焦现有成熟业务领域的基础上，不断尝试进入新的细分领域，依托技术和产品创新挖掘新的产品增量和业绩增长点。

表18：恒工精密主要产品

产品类别	行业	应用领域	产品简介
精密机加工件	空压件	空压机、制冷机	主要为螺杆转子和真空泵转子等产品，广泛应用于空气压缩机、工业制冷机及真空泵制造领域
		真空泵	
	液压装备件	柱塞泵	主要为柱塞泵、液压阀、活塞、马达定子等产品，广泛应用于注塑机、工程机械等各类装备的液压系统
		液压油缸	
连续铸铁件	传动装备件	输送辊	主要为输送辊，广泛运用于各种传动装备
		减速机部件 (RV 减速机)	主要为减速机摆线轮、行星架座等产品，应用于工业机器人 RV 减速机
	球墨铸铁件	减速机部件 (谐波减速机)	主要为谐波刚轮，应用于谐波减速机。
		-	球墨铸铁件基体中的自由石墨呈球状或团状，并根据基体组成的不同，呈现出不同的强度与延伸率，形成不同的材质规格。球墨铸铁的强度及塑性相比灰铸铁有较大的提高，适用于多种机械设备零部件的制造与加工
灰铸铁件	-	灰铸铁件基体中的石墨成片状或块状，其因断裂时断口呈暗灰色，故称为灰铸铁。灰铸铁的强度、塑性都低于球墨铸铁，但具有优良的减振性、低缺口敏感性和高耐磨性	

资料来源：恒工精密公告，民生证券研究院

机器人减速器材料研发初见成效。公司掌握的高刚度、高耐磨性、轻量化的连续球墨铸铁材料替代锻钢和砂铸件，适配减速器核心部件（RV/谐波），兼具低成本、高寿命、易加工及散热优势。目前机器人主要产品包括 **RV、谐波减速器核心部件、人形机器人上下肢结构件**等。其中 RV、谐波减速器核心部件主要是针齿壳、行星架、行星座、谐波减速器刚轮等，均为减速器核心工作部件。RV 减速器部件采用连续铸造工艺快速实现材料替代，并在核心客户北京智同取得批量应用，正在逐步拓展工艺链和开拓其他客户；谐波减速器刚轮已经在国内多家相对头部减速器企业通过验证并开始小批量交付。

“材料+加工+模组”的全链条布局。公司通过与智同等战略客户在材料和加工工艺方面的深度合作，不断延伸工艺链条，提升附加值；通过与智元机器人等建立股权合作，深度绑定战略客户，逐步介入人形机器人核心零部件领域。公司通过设立产业基金布局人形机器人产业，与投资项目深度互动，整合上下游资源，联合开发机器人关键材料、精密加工工艺、减速器部件、关节模组等方式，延伸至高附加值环节。

5 风险提示

1) 人形机器人放量不及预期。目前人形机器人尚未量产，倘若人形机器人放量进度较慢，机器人带来的特钢、球墨铸铁等材料需求也会受到影响。

2) 材料应用不及预期。人形机器人尚在商业化落地前期阶段，仍有较大的技术变更可能性。技术的具体定型，将决定相关材料的应用及用量，对特钢、球墨铸铁等材料需求将产生较大影响。

3) 原材料价格波动风险。钢铁波动或影响厂商对该材料的选择，导致对特钢、球墨铸铁等材料需求产生较大影响。

插图目录

图 1: 工业机器人成本结构	3
图 2: 减速器 (减速机) 的产品构造	3
图 3: 精密行星减速器结构	4
图 4: 摆线针轮减速器结构	4
图 5: RV 减速器结构	5
图 6: 谐波减速器结构	5
图 7: 谐波减速器结构	7
图 8: 谐波减速器结构	8
图 9: 常见柔轮类型	10
图 10: 渐开线齿廓与双圆弧齿廓啮合路径对比	10
图 11: 柔轮热处理工艺曲线	11
图 12: 柔轮回火工艺对钢力学性能的影响	11
图 13: 精冲工艺示意图	12
图 14: 柔轮生产工艺对比	14
图 15: 刚轮合金性能对比	15
图 16: 球墨铸铁和 40Cr 钢的显微组织	16
图 17: 球墨铸铁和 40Cr 钢的耐磨性对比	16
图 18: 工业机器人全球装机量情况	17
图 19: 我国工业机器人产量情况	17
图 20: 中国工业机器人用 RV 减速器需求量	17
图 21: 中国工业机器人用谐波减速器需求量	17
图 22: Optimus 旋转执行器示意图	19
图 23: 精密冲压特殊钢生产链	21
图 24: 精密冲压特殊钢生产流程	21
图 25: 翔楼新材制造成本分项占比	22

表格目录

重点公司盈利预测、估值与评级	1
表 1: 机器人常用减速器性能比较	6
表 2: 谐波减速器典型材料	8
表 3: 柔轮材料成分 (单位: %)	9
表 4: 柔轮材料力学性能	9
表 5: 精冲工艺与传统锻造、铸造及机加工工艺的对比情况	13
表 6: 下游主要行业应用	14
表 7: 刚轮合金成分 (单位: %)	15
表 8: 不同类型机器人谐波减速器单位用量	18
表 9: Optimus 二代旋转执行器/减速器数量	18
表 10: 谐波减速器用钢材市场规模测算	19
表 11: 精冲钢、球墨铸铁市场规模拉动测算 (单位: 亿元)	19
表 12: 不同产品性能要求对应的生产过程	22
表 13: 不同客户应用不同的定制化工艺	23
表 14: 公司合作研发情况	23
表 15: 谐波减速器材料研发情况	24
表 16: 翔楼新材盈利预测与财务指标	24
表 17: 连续铸件与锻钢件及砂铸件对比	25
表 18: 恒工精密主要产品	26