

工程塑料在人形机器人中的应用与介绍

陶永亮¹, 邱峰², 王旭丽³, 高廷文¹

(1. 重庆川仪工程塑料有限公司, 重庆 400712;

2. 重庆科技大学材料与新能源学院, 重庆 401331;

3. 重庆华数机器人有限公司, 重庆 400714)

人形机器人(Humanoid Robot)登上2025春晚舞台展现出令人瞩目潜力与魅力,被认为可能是人类历史上最大规模产业之一,其产品形态具有极高的适应性和实用性,能自然适应日常生活环境,人机互动自然性强,将在工业、服务、家庭等领域发挥作用,市场规模未来几年内将快速增长^[1]。人形机器人实现类人动作能力,需尽量降低自重,过大的重量会增加电机负载,影响运动灵活性、载重及续航表现。人形机器人常用轻量化材料铝合金、镁合金、工程塑料等。工程塑料具有优良的综合性能,刚性大、蠕变小、机械强度高,耐热性好,电绝缘性好,耐化学性好。可以替代金属作为工程材料使用^[2]。工程塑料作为高性能高分子材料核心品类,尤其是特种工程塑料凭借其耐高温、高强度、耐化学腐蚀等特性,已成为支撑人形机器人等战略产业关键基础材料。

1 人形机器人中塑料介绍与应用

1.1 人形机器人基本概念

1969年日本早稻田大学加藤一郎实验室研发出第一台以双脚走路的机器人^[3],是最早人形机器人雏形。21世纪人形机器人研究走出实验室,研发的电驱动ASIMO机器人具备智能交换、灵活操作、灵活走动等功能,结合视觉、触觉等多个传感器,可识别物体并进行适当精细操作,学习能力强,自主性较强等。2023年,特斯拉开发Optimus系列人形机器人快速迭代,基于AI技术和FDS(full self-driving全自动驾驶)芯片,通过端到端神经网络模型,实现任务级和动作级决策、复杂环境中物体、人脸、手势等识别。其全身压力计算和实现反馈机制,使机器人四肢运动灵

活、流畅和自然。人形机器人经历早期探索阶段、集成发展阶段、高动态发展阶段、直到今天智能化发展阶段的四个阶段。人形机器人作为融合人工智能、机器人学、控制工程和材料科学等多学科前沿技术集成平台,正迅速成为智能制造和人机协作领域重要研究方向。

1.2 人形机器人基本组成

人形机器人是融合机械设计、传感技术、控制算法等多领域技术的复杂系统,其组成可分为本体硬件、控制系统、感知交互模块三大核心部分,各部分协同实现类人运动与智能交互能力。

硬件是机器人实现物理动作载体,包括机械结构、驱动系统及关键零部件,需满足高自由度、轻量化与耐用性要求。分为头部、躯干、四肢(上肢、下肢)及末端执行器。驱动器采用伺服电机驱动,高精度场景结合谐波减速器,确保关节运动精度与扭矩输出。控制系统负责解析环境信息、规划运动路径并驱动执行机构,是机器人智能化核心。感知模块通过多传感器融合实现环境认知,交互系统则支持人机协作与远程操作,是机器人适应复杂场景的关键。

1.3 人形机器人应用塑料介绍

人形机器人是一门新型产业,工程塑料应用从使用上综合考虑。轻量化与高强度结合:需在降低机器人自重的同时保证结构稳定性,材料满足人形机器人强度需要,且轻量化。耐磨性与耐腐蚀性:关节、齿轮等运动部件耐受长期摩擦,材料适应高温环境下耐磨性好,抗腐蚀好。耐温与绝缘性:电机及电子元件周边材料需耐高温和绝缘,高流动性和尺寸稳定性材料用于精密电器部件,用于高温电绝缘场景。柔性与

仿生适配：皮肤及柔性部件需模拟人体触感，有机硅和热塑性弹性体用于柔软触感部件和仿生皮肤。人形机器人常用工程塑料有聚醚醚酮PEEK、聚酰亚胺PI、尼龙PA、聚苯硫醚PPS、PC/ABS合金、液晶聚合物LCP、超高分子量聚乙烯UHMW-PE等，其使用按价值比预测PEEK及复合材料占45%，电子级特种塑料PPS、LCP占30%，工程塑料PA、PC/ABS占20%，其他PI、UHMW-PE等占5%。

2 人形机器人应用工程塑料情况

2.1 PEEK

聚醚醚酮（Polyetheretherketone，简称PEEK）是在主链结构中含有两个醚键和一个酮键的重复单元所构成的高聚物^[4]，是聚芳醚酮一个材料系列^[5]，拥有半结晶态特点，具有耐高温、耐化学腐蚀等特性^[6]。聚醚醚酮是一种性能优异的特种工程塑料^[7]，具有耐高温、机械性能优异、自润滑性好、耐化学腐蚀、阻燃、耐剥离性、耐辐照性、绝缘性稳定、耐水解和易加工等^[8]优势。PEEK在人形机器人中应用较广，机器人膝关节、肘关节、腕关节等部位，齿轮、齿条、外壳和结构件等都用PEEK，承受高负载和频繁的冲击，通过添加碳纤维等增强材料进一步提高强度，可以有效减少摩擦和磨损，提高运动精度和寿命。PEEK重量轻有助于减轻机器人整体负载，降低能耗。PEEK具有良好的电绝缘性能和化学稳定性^[9]，能够为传感器提供稳定工作环境，避免电磁干扰和化学腐蚀对传感器性能影响。在压力传感器、触觉传感器等部件封装和固定中，PEEK得到了广泛应用。

2.2 PI

聚酰亚胺（Polyimide，简称PI）是分子结构主链中含有酰亚胺结构高分子聚合物^[10]，高性能PI主链大多以芳环和杂环为主要结构单元。PI具有最高阻燃等级，良好的电气绝缘性能、机械性能、化学稳定性、耐老化性能^[11]、耐辐照性能，介电常数3.4，介电损耗仅 10^{-3} ，属F至H级绝缘，使用温度范围-269~400℃内不会发生显著变化^[12-13]，被誉为“21世纪最有希望工程塑料之一”。

PI在人体机器人应用较多，PI在保证强度前提下，密度略高于PEEK但强度高出40%，用于轻量化结

构件，使机械臂壁厚减至0.8 mm，整体减重25%。PI作为柔性基底材料，PI与碳纳米管、石墨烯等结合，用于柔性传感器与电子皮肤，可集成压力、温度、湿度等传感器，提升机器人对环境微弱变化的感知能力。PI长期使用温度达300℃，低摩擦系数0.17~0.25，即高温负载下磨损量仅为传统PEEK材料1/3，可做关节与齿轮件，关节维护周期从600 h延至2 000 h。

PI作为柔性电路板（FPC）核心材料，用于控制系统与柔性线路，PI用于机器人关节处，提升信号传输效率和关节响应速度，类似机器人神经系统。PI可集成多种传感器电路，用于环境感知与多功能集成，检测接触力，震动等环境特性，并通过纳米复合技术赋予导电、自修复等功能。

2.3 PA

尼龙，学名聚酰胺（Polyamide，简称PA），是分子主链上含有重复酰胺基团的热塑性树脂总称^[14]，包括脂肪族PA、脂肪-芳香族PA和芳香族PA^[15]，是五大工程塑料中产量最大、品种最多、用途最广的品种^[16]。PA机械强度高，韧性好，抗张强度高，摩擦系数低，耐磨性好，自润性佳，热性能好等特点，满足对人形机器人轻量化、力学性能、耐磨损性等要求，PA凭借其多样化性能，在关节、结构件、外壳等核心件有应用潜力。

2.3.1 PA66

PA66（聚酰胺66）以优异的力学性能和耐高温特性，成为人形机器人高负荷部件首选材料之一。密度约 1.14 g/cm^3 ，可降低整体重量以提升运动灵活性和能效，抗拉强度达70~120 MPa，确保结构稳定性。PA66用于频繁运动的关节和机械臂骨架，采用玻纤增强提升耐磨性和寿命。PA66熔点约260℃，热变形温度超262℃，适应高温环境，易加工，可用编织尼龙外壳，实现轻量化与抗冲击性结合。

2.3.2 PA612

PA612具有柔韧性、自润滑性及耐化学性特点，主要用于动态部件和防护结构。用在关节连接件上凭借低摩擦系数和耐磨性，减少关节活动时的能量损耗，确保运动顺畅，延长部件寿命。可注塑成复杂形状防护外壳，兼具柔韧性与抗冲击性，碰撞时保护内部电子元件。

2.3.3 PA12

PA12具有优异绝缘性、弹性及耐疲劳性特点，用于内部线缆护套，具有高绝缘性能，防止电路短路，保障电子系统稳定运行。用于密封件，利用其弹性和密封性，阻挡灰尘、水分进入机器内部，用于关节轴承、电机接口等需要防护的部位。

PA覆盖了人形机器人从结构承重到精密防护的多维度需求。随着材料改性技术（玻纤增强、合金化）发展，PA在机器人轻量化与功能集成中作用将进一步凸显。

2.4 PPS

聚苯硫醚（Polyphenylene Sulfide，简称PPS）是一种综合性能优异的热塑性特种工程塑料。工业化生产中采用在极性溶剂中，使用对二氯苯和无水硫化钠通过缩合反应制得聚苯硫醚，其中极性溶剂选择N-甲基吡咯烷酮（NMP）^[17]、六甲基磷酰三胺（HMPA）或N-甲基己内酰胺^[18]。PPS是含硫芳香族聚合物，线型PPS在350℃以上交联后成热固性，而支链型结构PPS则为热塑性塑料。PPS是高结晶度、硬而脆聚合物。纯PPS相对密度为1.3。具有出色的阻燃性，氧指数高达44%以上，PPS属于高阻燃材料。

PPS被应用于人形机器人结构件、传动系统及防护部件，关节连杆是连接关节并保障运动顺畅性，PPS高强度、耐磨损，维持长期稳定性；人形机器人机械臂与驱动轮起着承载负荷、高精度传动的重要作用，PPS优异具有尺寸稳定性，能在高温高湿环境下保持电性能稳定^[19]。

人形机器人动力中心壳体（电池盒、电机壳）需耐热、阻燃、保护其内部元件，PPS耐热性与阻燃性能够避免高温风险。人形机器人防护层（外壳、护板等），PPS相比传统金属减重可达60%，机械强度接近钢材，对酸、碱等腐蚀性物质耐受性强，且具备优异的电绝缘性，能够很好地保护内部元件免受外界侵蚀。PPS通过碳纤维增强等改性技术，可用于躯体、四肢骨架，实现减重40%以上，提升机器人灵活性。

2.5 PC/ABS

PC/ABS合金是由聚碳酸酯（Polycarbonate，简称PC）与丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物（Acrylonitrile Butadiene Styrene，简称ABS）等采用接枝共聚方

法共混改性而成的工程塑料，结合了两种材料优势弥补各自缺陷。具有高冲击强度、加工性能优良、耐候性及尺寸稳定性特征，应用于汽车、家电等领域。为提升PC与ABS界面相容性，添加相容剂马来酸酐接枝POE、聚苯乙烯马来酸酐接枝共聚物（SMA）^[21]等，以优化合金综合性能。

PC/ABS合金常温冲击强度是纯PC的3~4倍，经120℃、140h老化处理后仍保持PC的2倍以上；室外曝露2年，拉伸强度和弯曲强度几乎不变。熔融黏度较PC降低1/3，成型温度更低，残余应力小，制品颜色均匀，适用薄壁、流程长件生产。耐候性优于纯PC，冲击强度在户外暴露后仍显著高于纯PC。

软银NAO机器人采用PC/ABS制造外壳及结构部件。PC/ABS耐热性和加工流动性使其能够满足机器人复杂形状部件成型需求，同时提供可靠的结构支撑和抗冲击保护。深开鸿与乐聚机器人推出教学人形机器人外壳采用铝合金与PC/ABS塑胶材质复合设计。PC/ABS部分主要承担外壳轻量化与造型灵活性需求，配合铝合金增强结构强度，实现1.73kg轻量化机身。PC/ABS有高冲击强度与刚性，可承受机器人运动中动态载荷，在关节连接件和外壳防护中表现突出。

PC/ABS熔体流动性优异，适合注塑成型面部外壳、传感器支架，其耐温性（热变形温度110~135℃）和耐紫线性，适应室内外场景使用。表面处理兼容性，可直接进行喷涂、电镀等表面装饰工艺，满足机器人外观个性化需求。

2.6 LCP

液晶聚合物（Liquid Crystal Polymer，简称LCP）是一种介于固体结晶和液体之间的中间状态聚合物，其分子排列具有一维或二维有序性，在熔融态时呈现液晶性^[22-23]，是一种新型热塑性高分子材料。LCP分子结构中包含刚性苯环结构，具备优异的耐热性、耐化学药品性和机械^[24]强度。LCP具有异常规整纤维状结构特点，用玻璃纤维、碳纤维等增强远远超过其他工程塑料^[25]。其中介电常数（10GHz）2.9，损耗因数（10GHz）0.0025，熔化温度（DSC）330℃，吸水率（23℃，24h）0.04%等数据，LCP凭借高强度、耐热性、低吸水率、优异电绝缘性等综合性能，成为人形机器人核心零件关键材料支撑。

LCP在人形机器人有着应用场景。LCP高耐热性（连续使用温度 $>220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）适应机器人伺服电机等部件高温工作环境，避免热变形导致性能衰减。高耐热性和尺寸稳定性使其成为机器人伺服电机连接器首选材料，保障精密电子元件在复杂工况下稳定运行。LCP电绝缘性与低介电常数，用于高速连接器上为信号与电连接桥梁，在机器人系统内外数据传输中发挥关键作用，保障高频信号传输效率。LCP满足人工肌肉对轻量化与柔韧度需求，模拟人类肌肉收缩与伸展，助力机器人实现精细自然动作，用于制造电子皮肤，提升机器人环境感知能力。适用于生产高精度、高可靠性的压力传感器、温度传感器等关键感知部件，支撑机器人的精准控制与交互。LCP低吸水性率与尺寸稳定性，确保在潮湿环境或长期运行中部件精度不受影响，LCP耐气候性、耐辐射性^[26]，适应露天环境使用，提升机器人运动控制准确性。LCP熔点较高，具有较好的流动性，能够通过注塑成型，相比金属材料减少机器人本体重量，若用玻璃纤维、碳纤维等增强，性能更远超其他工程塑料，提升续航能力，满足结构承载需求。

2.7 UHMW-PE

超高分子量聚乙烯（UHMW-PE）是一种分子量在100万以上的线性结构聚乙烯材料，具有超高强度、耐磨损、耐低温等优异性能，被广泛应用于多个领域。其比强度是优质钢材的15倍，碳纤维的2.6倍，芳纶纤维的1.7倍，且断裂伸长率高于碳纤维和芳纶，柔韧性良好，在高应变率和低温环境下仍能保持稳定力学性能。UHMW-PE还具备耐强酸强碱腐蚀、抗紫外线、低摩擦系数、卫生无毒等特性，使用温度可低至 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，甚至适用于液氮环境。UHMW-PE因分子量极高，传统加工难度大。通过专用注塑机及工艺优化，可实现高效成型，生产效率达10~40模/h，较传统压制烧结法显著提升。

UHMW-PE凭借其高强轻质、耐磨耐腐蚀等特性，已成为人形机器人轻量化、提升运动性能关键材料，其独特性能在机器人领域是不可替代，比强度是优质钢丝的15倍、碳纤维的1.8倍，密度仅为水的0.97倍，显著降低机器人自重。特斯拉Optimus Gen2采用UHMW-PE轻量化材料实现减重10 kg，步行速度提升

30%。摩擦系数低且具备自润滑特性，适合高频率运动传动部件（如腱绳、关节），可承受长期高负荷运作而不易磨损。其抗化学腐蚀和弯曲性能适用于防护外壳和柔性传动结构。即使在 $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮环境下仍保持韧性，避免普通塑料低温脆化问题。

腱绳传动系统在人形机器人中起到模拟人体肌腱的作用，通过拉动或放松绳索来驱动关节运动。腱绳材料是灵巧手肌腱，牵引手指活动，完成各种动作，是提升灵巧手的精细控制能力和轻量化重要材料。腱绳材料主要分为高分子纤维类和金属类。UHMW-PE替代钢丝成了腱绳核心材料，其重量仅为钢丝的 $1/7\sim 1/8$ ，无需防锈，单台机器人腱绳价值量约3 520元，若全球出货量达1 000万台，市场规模将突破350亿元。UHMW-PE用于关节部件，集成于灵巧手的传动和支撑结构，模拟人体肌腱实现高灵活度与低惯量，提升运动精度。UHMW-PE用于轴承、衬套等滑动部件时无需润滑油，物理性能优于金属材料。用于传感器与机身覆盖层：兼具防护性能与轻量化需求，优化人机交互体验。

2.8 TPU

热塑性聚氨酯弹性体橡胶（Thermoplastic Polyurethanes，简称TPU），是由软链段（长链低聚物二醇）和硬链段（二异氰酸酯和扩链剂）组成的线性嵌段聚合物，介于橡胶和塑料之间的高分子材料。其分子结构以线性为主，硬链段强极性，硬链段微相区通过氢键形成物理交联，分布在软链段基体中形成一种物理交联点，从而使弹性体具有硫化橡胶的弹性回复性能。TPU通过氢键形成物理交联，可加热塑化并溶解于特定溶剂。按成分可分为聚酯型和聚醚型，具有硬度范围宽（60 HA~85 HD）^[27]、耐磨、耐油、透明、弹性好等特点^[28]，在 $-40\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内保持柔性，无需增塑剂。

TPU复合材料的独特性能在人形机器人中展现应用潜力，尤其在柔性部件、结构材料和电子皮肤等方向备受关注。TPU复合材料通过融入玻璃纤维、炭黑、二氧化硅等成分，在提升强度和耐热性的同时保持轻量化特性，可降低机器人能耗并提升运动灵活性。TPU材料兼具橡胶的弹性和塑料的加工性^[29]，耐磨、耐候性优良，适合制作需要反复形变的部件关节

缓冲层、线缆保护套。支持3D打印和复杂结构成型，可通过配方调整实现硬度、弹性等性能定制，满足机器人不同部位的功能需求。TPU柔韧性接近人类皮肤，用于电子皮肤基底集成柔性传感器，实现压力、温度等信号检测。3D打印TPU已被用于研发软质仿生皮肤。TPU用于机器人骨架、外壳等部件，通过蜂窝状或多孔结构设计，提供可靠支撑减轻整体重量。利用其弹性特性制作膝关节、肘关节等部位缓冲层，降低运动冲击并提升耐久性。耐磨损、抗老化的TPU涂层可延长机器人内部线缆和外露部件使用寿命。

3 结束语

人形机器人规模生产离不开新材料技术的突破，工程塑料凭借轻量化、高性能及设计灵活性等优势，已成为人形机器人骨骼、外壳、核心部件的关键材料。工程塑料推动人形机器人性能突破关键路径，使人形机器人在续航能力、运动效率、精密制造、成本优化等取得成效，其技术进步与应用拓展将直接决定机器人产业的发展速度。随着材料性能持续突破和制造成本下降，工程塑料有望在人形机器人骨骼、关节、外壳等部位实现全面替代金属。

参考文献：

- [1] 公募开年最高收益接近40% 选对赛道成关键因素 [N]. 证券时报, 2025-01-27 (A005版).
- [2] 充分发挥矿物填料在工程塑料材料中重要作用 [N]. 中国建材报, 2016-09-01 (06版).
- [3] 机器人发展简史 [N]. 浙江日报, 2023-03-31 (08版).
- [4] 江苏普理新材料有限公司. 一种聚醚醚酮溶解稳定装置:CN2020473066.3[P].2020-04-03.
- [5] 陶永亮, 李彬杰, 杨建京. 医用塑料应用与介绍 [J]. 橡塑技术与装备, 2022,48(12):1-7.
- [6] 北京服装学院. 一种过滤器具用电纺丝基复合纳米纤维材料的制备方法:CN200910079812.9[P].2009-03-12.
- [7] 周力, 董自军. 提高甲铵泵的运行周期 [C]// 第23届全国尿素厂技术交流会论文集. 杭州: 中国化工学会全国化肥工业信息总站, 2014:52-58.
- [8] 学术网文. peek的介电常数 peek材料. [EB/OL]. [2022-01-01]. <https://www.bmlink.com/zt/583438/zq3403864.html>.
- [9] 许勤坤. 碳系纳米填料/聚合物基 PTC 导电复合材料的研究 [D]. 西安理工大学, 2015.
- [10] 天津利安隆新材料股份有限公司业绩公告 [N]. 中国证券报, 2025-04-22 (B059版).
- [11] 2021年中国聚酰亚胺 (PI) 行业市场现状及发展前景预测分析 [EB/OL]. [2021-12-31]. <https://new.qq.com/omn/20210208/20210208A073B500.html>.
- [12] 北京派创石油技术服务有限公司. 地热闭环工质循环开采方法:CN202111677999.X[P].2021-12-31.
- [13] 武海涛, 刘甜甜, 潘丽, 等. 聚酰亚胺泡沫的研究及应用 [J]. 化工新型材料, 2023,51(10):231-234+238.
- [14] 张迎增. 抗菌尼龙的发展趋势 [EB/OL]. [2013-02-27]. <http://blog.sciencenet.cn/blog-43469-665484.html>.
- [15] 上海凯赛生物技术股份有限公司, CIBT 美国公司, 凯赛(上海)生物科技有限公司. 一种聚酰胺树脂的连续化生产装置:CN202321814326.9[P].2023-07-11.
- [16] 广东顺德顺炎新材料股份有限公司. 耐候玻纤增强 PA66 高铁轨道套筒材料及其制备方法:CN201810798388.2[P].2018-07-19.
- [17] 宋吉亮. 纳米钨催化 CO₂ 和 CO 合成酯及炔酮的研究 [D]. 大连理工大学, 2017.
- [18] 牛津大学(苏州)科技有限公司. 一种透明导电聚合物膜的制备方法及其制备的导电聚合物膜:CN202210010405.8[P].2022-01-06.
- [19] 绵阳市金华洋电器制造有限公司. 一种两芯圆形电连接器:CN201911101445.8[P].2019-11-12.
- [20] 深圳市冠旭电子股份有限公司. 耳挂式耳机:CN202211121390.9[P].2022-09-15.
- [21] 茂泰(福建)鞋材有限公司. 一种含聚碳酸酯的苯乙烯型热塑性弹性体复合材料及其成型制备方法:CN201410326853.4[P].2014-07-10.
- [22] 艾鑫, 董浩彬, 曾志军. 热致液晶聚合物加工研究 [C]//2013 中日电子电路秋季大会暨秋季国际 PCB 技术 / 信息论坛论文集. 广东东莞: 2013-11-20:87-94.
- [23] 余巧玲, 王万卷, 潘永红, 等. 液晶聚合物在工程塑料领域的研究进展 [J]. 现代化工, 2016,36(11):19-23.
- [24] 上海维凯光电新材料有限公司, 上海乘鹰新材料有限公司, 江苏乘鹰新材料股份有限公司. 一种用于太阳能电池组件用透明背板的高耐候粘结涂料:CN202010470496.4[P].2020-05-28.
- [25] 郭英鹏. PPA+60% 玻纤材料零件的注塑工艺及模具设计 [D]. 山东大学, 2013.
- [26] 苏州威瑞成新材料有限公司. 一种耐热高结晶增强 PTT/LCP 合金材料的制备方法:CN201910248196.9[P].2019-03-29.
- [27] 旭荣电子(深圳)有限公司. 一种保护套:CN201420578998.9[P].2014-09-30.
- [28] 广东百卓鞋业有限公司. 一种具有按摩作用的鞋子:CN201821900275.0[P].2018-11-16.
- [29] 朱笑初, 徐新民, 钱志国, 等. 热塑性弹性体在汽车安全气囊系统中的应用及性能特征 [C]//2007 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集. 昆明: 中国工程塑料工业协会, 工程塑料应用杂志社, 2007-07-01:7-9.

