

ICS 83.080.20

CCS G 32



# 团 标 准

T/CEATEC XXX—2025

## 人形机器人用 TPU 仿肤材料 性能评价

Performance evaluation of TPU skin-like material for humanoid robots

2025-X-XX 发布

2025-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发布

# 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	2
4 评价原则与要求 .....	2
4.1 评价原则 .....	3
4.2 评价要求 .....	3
5 评价指标 .....	3
5.1 物理性能指标 .....	3
5.2 化学性能指标 .....	4
5.3 机械性能指标 .....	4
5.4 表面性能指标 .....	4
5.5 生物相容性指标 .....	5
5.6 耐老化性能指标 .....	5
5.7 外观质量指标 .....	5
5.8 环境适应性指标 .....	5
6 试验方法 .....	6
6.1 物理性能试验 .....	6
6.2 化学性能试验 .....	6
6.3 机械性能试验 .....	7
6.4 表面性能试验 .....	7
6.5 生物相容性试验 .....	7
6.6 耐老化性试验 .....	7
6.7 外观质量试验 .....	8
6.8 环境适应性试验 .....	8
7 取值规则 .....	8
7.1 数据收集 .....	8
7.2 数据分析 .....	8
7.3 单指标分值计算 .....	9
7.4 总指标分值计算 .....	10
8 评价结果 .....	10
8.1 评价等级划分 .....	10
8.2 评价结果的适用 .....	10
9 评价报告 .....	11
9.1 报告内容 .....	11
9.2 报告有效期 .....	11

## 前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件主要起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

# 人形机器人用 TPU 仿肤材料 性能评价

## 1 范围

本文件规定了人形机器人用热塑性聚氨酯弹性体（TPU）仿肤材料性能评价的评价原则与要求、评价指标、试验方法、取值规则、评价结果、评价报告。

本文件适用于以TPU为基材，经改性、成型等工艺制备，用于人形机器人外观覆盖、肢体接触等部位的仿肤材料性能评价。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 1033.1 塑料 非泡沫塑料密度的测定 第1部分：浸渍法、液体比重瓶法和滴定法
- GB/T 1037 塑料薄膜与薄片水蒸气透过性能测定 杯式增重与减重法
- GB/T 1040.3 塑料 拉伸性能的测定 第3部分：薄膜和薄片的试验条件
- GB/T 1681 硫化橡胶回弹性的测定
- GB/T 1687.4 硫化橡胶 在屈挠试验中温升和耐疲劳性能的测定 第4部分：恒应力屈挠试验
- GB/T 2411 塑料和硬橡胶 使用硬度计测定压痕硬度（邵氏硬度）
- GB/T 2918 塑料 试样状态调节和试验的标准环境
- GB/T 3681 塑料 自然日光气候老化、玻璃过滤后日光气候老化和菲涅耳镜加速日光气候老化的暴露试验方法
- GB/T 4883 数据的统计处理和解释 正态样本离群值的判断和处理
- GB/T 5470 塑料 冲击法脆化温度的测定
- GB/T 7759.1 硫化橡胶或热塑性橡胶 压缩永久变形的测定 第1部分：在常温及高温条件下
- GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定
- GB/T 8802 热塑性塑料管材、管件 维卡软化温度的测定
- GB/T 9341 塑料 弯曲性能的测定
- GB/T 9979 纤维增强塑料高低温力学性能 试验准则
- GB/T 10006 塑料 薄膜和薄片 摩擦系数的测定
- GB/T 10655 高聚物多孔弹性材料 空气透气率的测定
- GB/T 12721 橡胶软管 外覆层耐磨耗性能的测定
- GB/T 12833 橡胶和塑料 撕裂强度和粘合强度测定中的多峰曲线分析
- GB/T 14234 塑料件表面粗糙度
- GB/T 15905 硫化橡胶湿热老化试验方法
- GB/T 16886.5 医疗器械生物学评价 第5部分：体外细胞毒性试验

GB/T 16886.10 医疗器械生物学评价 第10部分：皮肤致敏试验  
GB/T 19466.2 塑料 差示扫描量热法（DSC） 第2部分：玻璃化转变温度的测定  
GB/T 27025 检测和校准实验室能力的通用要求  
QB/T 5354 人造革合成革试验方法 挥发性有机化合物的测定

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

**人形机器人用TPU仿肤材料 TPU skin-like material for humanoid robots**

以热塑性聚氨酯弹性体为主要基材，通过添加增塑剂、相容剂、着色剂、抗老化剂等助剂，经混合、挤出、压延或注塑等工艺制成，具有接近人体皮肤的触感、外观及力学特性，用于人形机器人表面覆盖的柔性材料。

#### 3.2

**透湿率 water vapor transmission rate**

单位时间内通过单位面积仿肤材料的水蒸气量，表征材料的透气透湿性能，单位为克每平方米每 24 小时 ( $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h})$ )。

#### 3.3

**拉伸断裂伸长率 tensile breaking elongation**

仿肤材料在拉伸试验中，断裂时的伸长量与原始标距长度的百分比，反映材料的柔韧性和变形能力，以 % 表示。

#### 3.4

**摩擦系数 coefficient of friction**

仿肤材料表面与其他物体表面发生相对滑动时，摩擦力与正压力的比值，分为静摩擦系数和动摩擦系数，本文件特指动摩擦系数。

#### 3.5

**生物相容性 biocompatibility**

仿肤材料与人体皮肤长期或短期接触时，不引起皮肤刺激、致敏等不良反应的能力。

#### 3.6

**耐老化性 aging resistance**

仿肤材料在光照、温度、湿度等环境因素作用下，保持其原有物理、化学、机械性能及外观质量的能力。

#### 3.7

**环境适应性 environmental adaptability**

仿肤材料在不同温度、湿度等环境条件下，维持其核心性能稳定的能力。

### 4 评价原则与要求

## 4.1 评价原则

### 4.1.1 科学性

评价指标基于材料科学理论及人形机器人实际应用场景设定，试验方法符合国家标准或国际通用标准，数据处理采用统计学原理，确保评价结果客观可靠。

### 4.1.2 公正性

评价活动由独立于生产方和使用方的第三方机构实施，评价人员无利益冲突，评价流程、数据及判定标准公开透明。

### 4.1.3 一致性

同一批次样品在不同时间、不同实验室的评价方法和判定标准保持统一，确保结果可重复、可对比。

### 4.1.4 全面性

评价指标覆盖物理性能、化学性能、机械性能、表面性能、生物相容性、耐老化性、外观质量、环境适应性八大维度，无关键性能遗漏。

### 4.1.5 可操作性

试验设备易于获取且经计量检定合格，试验步骤清晰可重复，指标限值量化明确，便于实际执行。

## 4.2 评价要求

### 4.2.1 人员要求

评价人员应满足以下要求：

- a) 应具备高分子材料、检测技术、生物医学等相关专业本科及以上学历，或5年以上相关领域工作经验；
- b) 经仿肤材料性能评价专业培训，熟悉本文件及引用标准，取得CMA检测人员资质证书；
- c) 遵守职业道德，对评价数据严格保密，主动回避利益相关项目。

### 4.2.2 机构要求

评价机构应满足以下要求：

- a) 具备独立法人资格，取得CMA资质认定，认证范围涵盖本文件全部试验项目；
- b) 配备符合第6章要求的试验设备，设备经计量检定合格且在有效期内；
- c) 建立符合GB/T 27025的质量管理体系，试验场所满足环境要求。

### 4.2.3 样品要求

评价样品应满足以下要求：

- a) 从同一批次、同一规格产品中随机抽样，抽样数量不少于3个，单个样品尺寸满足对应试验要求；
- b) 样品表面无划痕、气泡、杂质、色差等缺陷，边缘平整，按GB/T 2918的规定进行状态调节。

## 5 评价指标

### 5.1 物理性能指标

仿肤材料物理性能评价指标及等级划分见表1。

表1 人形机器人用TPU仿肤材料物理性能评价指标

评价指标	I 级（优秀）	II 级（良好）	III 级（合格）
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.15±0.05	1.15±0.05	1.15±0.15

评价指标	I 级(优秀)	II 级(良好)	III 级(合格)
邵氏 A 硬度 (HA)	60±5	60±10	60±15
压缩永久变形 (70°C × 24h, %)	≤20	≤25	≤30
透湿率 (g/(m² · 24h))	400±50	400±100	400±200
透气率 (cm³/m² · 24h · 0.1MPa)	≥600	≥400	≥200
玻璃化转变温度 (°C)	-35°C±5°C	-35°C±10°C	-35°C±15°C
维卡软化温度 (°C)	≥85	≥75	≥65

## 5.2 化学性能指标

仿肤材料化学性能评价指标及等级划分见表2。

表2 人形机器人用TPU仿肤材料化学性能评价指标

评价指标	I 级(优秀)	II 级(良好)	III 级(合格)
VOC 含量 (g/L)	≤10	≤20	≤30
可溶性重金属含量 (mg/kg)	≤1	≤3	≤5
耐汗液性 (拉伸强度保留率, %)	≥95	≥90	≥85
耐清洁剂性 (外观变化)	无变色、无溶胀	轻微变色、无溶胀	中度变色、轻微溶胀
耐化妆品性 (硬度变化, HA)	≤±2	≤±4	≤±6
pH稳定性	6.0~7.5		
耐腐蚀性	拉伸强度保持率 (%)	≥95	≥90
	断裂伸长率保持率 (%)	≥90	≥85
			≥80

## 5.3 机械性能指标

仿肤材料机械性能评价指标及等级划分见表3。

表3 人形机器人用TPU仿肤材料机械性能评价指标

评价指标	I 级(优秀)	II 级(良好)	III 级(合格)
拉伸强度 (MPa)	≥18	≥15	≥12
拉伸断裂伸长率 (%)	≥550	≥450	≥350
撕裂强度 (kN/m)	≥50	≥40	≥30
弯曲强度 (MPa)	≥12	≥10	≥8
回弹性 (%)	≥70	≥60	≥50
冲击强度 (kJ/m²)	≥25	≥20	≥15
耐疲劳性能 (10万次循环后性能保持率, %)	拉伸强度	≥90	≥85
	断裂伸长率	≥90	≥85
			≥80

## 5.4 表面性能指标

仿肤材料表面性能评价指标及等级划分见表4。

表4 人形机器人用TPU仿肤材料表面性能评价指标

评价指标	I 级(优秀)	II 级(良好)	III 级(合格)
表面粗糙度 Ra (μm)	≤0.5	≤1.0	≤2.0
静摩擦系数	≥1.0	≥0.8	≥0.6
耐磨耗性 (1000次循环, 失重, mg)	≤30	≤40	≤50
耐划伤性 (2N针划, 划痕深度, μm)	≤10	≤15	≤20

## 5.5 生物相容性指标

仿肤材料生物相容性评价指标及等级划分见表5。

表5 人形机器人用TPU仿肤材料生物相容性评价指标

评价指标	I 级（优秀）	II 级（良好）	III 级（合格）
细胞毒性（级）	≤1	≤2	≤3
皮肤刺激性（级）	0	1	2
皮肤致敏性	无致敏		
溶出物安全性	有害物质未检出		

注：皮肤致敏性判定标准按GB/T 16886.10试验，无致敏反应为合格，出现致敏反应为不合格。

## 5.6 耐老化性能指标

仿肤材料耐老化性能评价指标及等级划分见表6。

表6 人形机器人用TPU仿肤材料耐老化性能评价指标

评价指标	I 级（优秀）	II 级（良好）	III 级（合格）
耐热空气老化 (70℃×168h)	拉伸强度保持率 (%)	≥90	≥85
	断裂伸长率保持率 (%)	≥90	≥85
耐热空气老化 (100℃×72h)	拉伸强度保持率 (%)	≥85	≥80
	断裂伸长率保持率 (%)	≥85	≥75
耐光老化	拉伸强度保持率 (%)	≥90	≥85
	断裂伸长率保持率 (%)	≥90	≥85
	色差 (Δ E)	≤0.5	≤1.0
耐湿热老化	拉伸强度保持率 (%)	≥95	≥90
	断裂伸长率保持率 (%)	≥95	≥90

注：色差 Δ E 依据 CIE Lab 色空间计算。

## 5.7 外观质量指标

仿肤材料外观质量评价指标及等级划分见表7。

表7 人形机器人用TPU仿肤材料外观质量评价指标

评价指标	I 级（优秀）	II 级（良好）	III 级（合格）
颜色均匀度 (Δ E)	≤1.0	≤2.0	≤3.0
表面缺陷	无气泡、裂纹、杂质、污点及明显划痕		
透明度或遮盖性	符合设计要求，表面无可见透底或透光不均		
表面平整度	无明显凹陷、波纹或变形		
仿生肤感	触感柔软细腻，无粘腻感		
批次间一致性	≤0.5	≤0.8	≤1.0
光泽度 (60°, GU)	≥20	≥14	≥8

## 5.8 环境适应性指标

仿肤材料环境适应性评价指标及等级划分见表8。

表8 人形机器人用TPU仿肤材料环境适应性评价指标

评价指标	I 级（优秀）	II 级（良好）	III 级（合格）

评价指标		I 级（优秀）	II 级（良好）	III 级（合格）
高低温循环	拉伸强度变化率（%）	≥95	≥90	≥85
恒定高温暴露	拉伸强度保持率（%）	≥95	≥90	≥85
	断裂伸长率保持率（%）	≥95	≥90	≥85
恒定低温暴露	拉伸强度保持率（%）	≥90	≥85	≥80

## 6 试验方法

### 6.1 物理性能试验

#### 6.1.1 密度

应按照GB/T 1033.1的规定进行。

#### 6.1.2 邵尔A硬度

应按照GB/T 2411的规定进行。

#### 6.1.3 压缩永久变形

应按照GB/T 7759.1的规定进行。

#### 6.1.4 透湿率

应按照GB/T 1037的规定进行。

#### 6.1.5 透气率

应按照GB/T 10655的规定进行。

#### 6.1.6 玻璃化转变温度

应按照GB/T 19466.2的规定进行。

#### 6.1.7 维卡软化温度

应按照GB/T 8802的规定进行。

### 6.2 化学性能试验

#### 6.2.1 VOC 含量

按照QB/T 5354的规定进行。

#### 6.2.2 可溶性重金属含量

应按照GB/T 40493的规定进行。

#### 6.2.3 耐汗液性

配置人工汗液（氯化钠20g/L、乳酸10g/L、尿素5g/L，pH4.5~5.5），试样尺寸50mm×150mm×2mm，浸泡于37±2℃汗液中72h，取出擦干后状态调节24h，测试拉伸强度，计算保留率（保留率=浸泡后强度/浸泡前强度×100%），每个样品测试3个试样，取平均值，精确至1%。

#### 6.2.4 耐清洁剂性

选取中性清洁剂（pH 6~8），蘸取清洁剂的脱脂棉（5g）覆盖于50mm×50mm×2mm试样表面，23±2℃放置24h，去除脱脂棉后冲洗擦干，由3名专业人员目视评定外观，取多数结果。

#### 6.2.5 耐化妆品性

选取含甘油、硅油的润肤乳，均匀涂抹于50mm×50mm×2mm试样表面，37±2℃放置48h，无水乙醇擦拭后测试邵氏硬度，计算硬度变化值，每个样品测试3个点，取平均值，精确至1HA。

#### 6.2.6 pH稳定性

按水提取法或规定的萃取比例，用去离子水或缓冲溶液萃取24h，测定提取液pH。

### 6.2.7 耐腐蚀性

将试样分别置于三种溶液中（ $23\pm2^{\circ}\text{C}$ ），浸泡168h，取出后清洗、晾干并目测记录表面缺陷。随后进行拉伸/伸长等力学测试。

## 6.3 机械性能试验

### 6.3.1 拉伸强度与断裂伸长率

应按照GB/T 1040.3的规定进行。

### 6.3.2 撕裂强度

应按照GB/T 12833的规定进行。

### 6.3.3 弯曲强度

应按照GB/T 9341的规定进行。

### 6.3.4 回弹性

应按照GB/T 1681的规定进行。

### 6.3.5 冲击强度

应按照GB/T 5470的规定进行。

### 6.3.6 耐疲劳性能

应按照GB/T 1687.4的规定进行。

## 6.4 表面性能试验

### 6.4.1 表面粗糙度

应按照GB/T 14234的规定进行。

### 6.4.2 静摩擦系数

应按照GB/T 10006的规定进行。

### 6.4.3 耐磨耗性

应按照GB/T 12721的规定进行。

### 6.4.4 耐划伤性

用针划试验设备施加2N负荷沿试样表面划痕，采用显微测厚或轮廓仪测划痕深度。

## 6.5 生物相容性试验

### 6.5.1 细胞毒性

应按照GB/T 16886.5的规定进行。

### 6.5.2 皮肤刺激性

应按照GB/T 16886.10的规定进行。

### 6.5.3 皮肤致敏性

应按照GB/T 16886.10的规定进行。

### 6.5.4 溶出物安全性

按照规定的萃取条件（模拟汗液、人工唾液）制备提取液，分析有害有机物、重金属迁移及VOC残留。

## 6.6 耐老化性试验

### 6.6.1 热空气老化

将试样放入热空气老化箱，在规定温度下保持相应时间，在老化前后分别做拉伸试验与伸长率测定。

### 6.6.2 耐光老化

应按照GB/T 3681的规定进行。

#### 6.6.3 耐湿热老化

应按照GB/T 15905的规定进行。

### 6.7 外观质量试验

#### 6.7.1 颜色均匀性

颜色均匀度采用色差仪（精度 $\Delta E \leq 0.01$ ），在试样表面随机取5个点（中心及四角），以中心为基准测 $\Delta E$ ，取最大值，精确至0.1。

#### 6.7.2 表面缺陷与平整度

采用目视法检查材料表面缺陷与平整度。

#### 6.7.3 仿生肤感

由不少于10名受试者在标准条件下对触感进行评判（柔软度、滑爽度、温感），并测量表面粗糙度、硬度、恢复时间等指标综合判定。

### 6.8 环境适应性试验

#### 6.8.1 高低温循环

将试样置入温度循环箱，按 $-20^{\circ}\text{C} \rightarrow 23^{\circ}\text{C} \rightarrow 60^{\circ}\text{C}$ 的循环程序循环10次，每段保持1h，循环后目测并做拉伸测试。

#### 6.8.2 恒定高温/低温暴露

应按照GB/T 9979的规定进行。

## 7 取值规则

### 7.1 数据收集

评价数据通过实验室试验、第三方检测核验、现场抽样复核三维度采集，确保数据真实、完整且可追溯：

- a) 实验室试验数据：同步记录试验日期、环境参数、设备型号及计量证书编号、操作人员资质编号，并留存原始试验曲线；
- b) 第三方检测数据：应提供CMA 资质机构出具的检测报告原件，报告应明确对应本文件的试验方法、样品批次信息及关键指标原始数据，且检测日期距评价日期不超过6个月；
- c) 定性指标数据：外观质量、皮肤致敏反应等指标应附带分辨率 $\geq 2048 \times 1536$ 的高清影像资料，及3名持证评价人员的独立判定记录与签字确认文件。

### 7.2 数据分析

#### 7.2.1 数据预处理

- a) 异常值剔除：应按照GB/T 4883的规定判定异常值；
- b) 数值修约：应按照GB/T 8170的规定进行；
- c) 平行性校验：定量指标中，5个平行试样结果相对偏差 $>5\%$ 、3个平行试样结果相对偏差 $>8\%$ 时，应重新制备试样并补测，补测数据应单独标注。

#### 7.2.2 等级匹配

将预处理后的数据与表1中等级限值比对，确定单指标等级，规则如下：

- a) 定量指标：实测值落入某等级区间则匹配对应等级；临界值按高等级匹配；
- b) 定性指标：按描述性标准匹配，如耐清洁剂性“无变色、无溶胀”对应I级，“严重变色或溶胀”直接判定为不合格；

c) 生物相容性特殊指标：皮肤致敏性仅分“合格（无致敏）”和“不合格（有致敏）”，分别对应有效和无效取值。

### 7.3 单指标分值计算

#### 7.3.1 基础得分设定

单指标基础得分根据匹配等级确定，对应关系为：

- a) I 级（优秀）：100 分；
- b) II 级（良好）：80 分；
- c) III 级（合格）：60 分；
- d) 不合格（低于 III 级）：0 分。

#### 7.3.2 指标权重确认

各评价指标权重应按照表2执行，且全部指标权重总和为100%。具体权重分配见表2。

表2 评价指标权重分配表

评价指标	指标权重
物理性能（21%）	密度
	邵尔A硬度
	压缩永久变形
	透湿率
	透气率
	玻璃化转变温度
	维卡软化温度
化学性能（21%）	VOC 含量
	可溶性重金属含量
	耐汗液性
	耐清洁剂性
	耐化妆品性
	pH稳定性
	耐腐蚀性
机械性能（21%）	拉伸强度
	断裂伸长率
	撕裂强度
	弯曲强度
	回弹性
	冲击强度
	耐疲劳性能
表面性能（8%）	表面粗糙度Ra
	静摩擦系数
	耐磨耗性
	耐划伤性
生物相容性（8%）	细胞毒性
	皮肤刺激性
	皮肤致敏性
	溶出物安全性

评价指标		指标权重
耐老化性 (8%)	耐热空气老化	2%
	耐热空气老化	2%
	耐光老化	2%
	耐湿热老化	2%
外观质量 (7%)	颜色均匀性	1%
	表面缺陷	1%
	透明度或遮盖性	1%
	表面平整度	1%
	仿生肤感	1%
	批次间一致性	1%
	光泽度	1%
环境适应性 (6%)	高低温循环	2%
	恒定高温暴露	2%
	恒定低温暴露	2%

#### 7.4 总指标分值计算

仿肤材料性能总指标得分通过各指标得分加权计算，具体步骤如下：

- 指标得分确定：根据表 1 中各指标的实测结果对应等级确定得分，I 级得 100 分，II 级得 80 分，III 级得 60 分，低于 III 级要求得 0 分；
- 加权得分计算：各指标加权得分=指标得分×该指标权重；
- 总得分计算：总得分=Σ（各指标加权得分），精确至 1 分。

### 8 评价结果

#### 8.1 评价等级划分

根据总得分将仿肤材料性能划分为以下4个等级：

- 优秀：总得分 $\geqslant 90$ 分；
- 良好：总得分 $80\sim 89$ 分；
- 合格：总得分 $60\sim 79$ 分；
- 不合格：总得分 $<60$ 分。

#### 8.2 评价结果的适用

不同等级仿肤材料的适用范围应满足以下要求：

- 优秀：性能全面优异，适用于高端人形机器人（如服务机器人、情感陪伴机器人）的头部、手部等核心接触部位，要求高仿真度、高耐久性及高安全性的场景；
- 良好：性能均衡可靠，适用于中端人形机器人（如工业辅助机器人、教育机器人）的躯干、四肢等常规接触部位，满足日常使用需求；
- 合格：性能基本达标，适用于低端人形机器人（如玩具机器人、展示机器人）的非核心覆盖部位，对性能要求较低的场景；
- 不合格：性能存在缺陷或安全隐患，禁止用于人形机器人生产，应返回生产企业优化改进。

## **9 评价报告**

### **9.1 报告内容**

实施评价的机构应根据现场检测及数据处理结果形成评价报告，内容包括但不限于：评价基本信息（目的、范围、准则、日期地点、委托方、样品信息）、实施信息（机构及人员资质、设备检定情况）、过程信息（样品状态、检测环境、步骤标准、数据处理）、结果信息（指标实测值、等级得分、总得分及等级）、支持材料（原始记录、检定证书等）。

### **9.2 报告有效期**

报告经技术负责人审核、质量负责人批准，盖公章及CMA标志，有效期应为1年，一式三份交委托方、生产企业及存档（ $\geq 3$ 年），委托方公开结果应经过机构确认。

---