

# 高温工件搬运夹具隔热结构与气路防护设计研究

单位：江苏安睿克智能科技有限公司，江苏 连云港

## 摘要

针对锻造、热处理、压铸、烧结及炉前自动化生产场景中高温工件搬运夹具易出现热量沿夹爪向执行端传递、气动系统温升过高、气管老化失效、传感器误动作及夹持可靠性下降等问题，提出一种面向高温工件短节拍搬运的复合隔热夹具结构与气路防护设计方法。首先，基于高温工件搬运工况特征，建立夹具系统热传递路径模型，明确高温承载区、隔热阻断区和低温执行区的功能分区原则；其次，从材料匹配、结构布局、隔热路径控制和气路防护策略四个层面开展设计，构建由耐热夹爪、陶瓷耐磨接触层、玻璃陶瓷隔热断桥、陶瓷纤维隔热层、空气断热槽及辐射反射罩组成的复合隔热结构；进一步，结合等效热传导系数计算与热-结构耦合有限元分析，对不同结构方案的温度场、热应力及热变形进行对比研究；最后，对气源接口、近热源气管、气动执行元件及检测元件提出系统化防护设计方案，并从安全性、可维护性和工程应用可行性角度进行评估。结果表明：所提出的复合隔热结构可将主传热路径等效热传导系数降至约  $0.25 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；在工件表面温度  $650 \text{ }^\circ\text{C}$ 、单次夹持时间  $20 \text{ s}$ 、环境温度  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  的典型工况下，夹爪根部最高温度可控制在  $83 \text{ }^\circ\text{C}$  以内，气缸安装面温度可控制在  $55 \text{ }^\circ\text{C}$  以内，气管外壁温度可控制在  $68 \text{ }^\circ\text{C}$  以内；与金属整体直连方案相比，主传热热流密度降低约  $98.7\%$ ，气路热防护效率达到  $76.9\%$ ，夹具末端热变形控制在  $0.20 \text{ mm}$  以内。研究结果表明，该设计方法能够显著提高高温工件搬运夹具的安全性、稳定性与工业适用性，可为高温自动化搬运装备和非标末端执行器设计提供参考。

关键词：高温工件；搬运夹具；隔热结构；气路防护；热流分析；有限元分析；气动安全

## Abstract

A composite thermal-insulation structure and pneumatic circuit protection method are proposed for high-temperature workpiece handling grippers used in forging, heat treatment, die casting and furnace-front automation. The method addresses excessive heat transfer from gripper jaws to actuators, pneumatic component overheating, hose aging, sensor malfunction and reduced gripping reliability. A functional zoning principle is established, including the high-temperature load-bearing zone, thermal isolation zone and low-temperature actuation zone. A composite insulation path consisting of heat-resistant jaws, alumina ceramic wear pads, machinable glass-ceramic thermal bridges, ceramic fiber layers, air gaps and reflective shields is designed. Equivalent thermal conductivity calculation and thermo-structural finite element analysis are conducted to compare temperature distribution, thermal stress and deformation among different structural schemes. The results show that the equivalent thermal conductivity of the proposed heat-transfer path can be reduced to approximately  $0.25 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . Under a representative condition of  $650 \text{ }^\circ\text{C}$  workpiece temperature,  $20 \text{ s}$  gripping duration and  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  ambient

temperature, the maximum temperature at the gripper root, cylinder mounting surface and hose outer surface can be controlled within 83 °C, 55 °C and 68 °C, respectively. Compared with an integral metallic connection scheme, the main heat flux is reduced by about 98.7%, the pneumatic thermal protection efficiency reaches 76.9%, and the end deformation is limited to less than 0.20 mm. The proposed method provides an engineering reference for the design of high-temperature automatic handling grippers and customized end effectors.

Keywords: high-temperature workpiece; handling gripper; thermal insulation structure; pneumatic circuit protection; heat flux analysis; finite element analysis; pneumatic safety

## 0 引言

在锻造、热处理、铸造、压铸、烧结及钢铁深加工等工业生产过程中，高温工件在加热、出炉、转运、装卸及工序衔接阶段需要借助机械手、工业机器人、桁架或专用夹具完成自动化搬运。相较常温搬运，高温工件搬运不仅具有较高的热载荷，而且伴随热辐射增强、接触传热显著、热应力集中、工件表面氧化皮脱落和热冲击等复杂工况。这使得夹具系统在满足夹持力、结构刚度和定位精度要求的同时，还必须具备良好的隔热性能、稳定的气路防护能力以及完善的安全控制措施。

目前，企业现场高温工件搬运夹具常见问题主要体现在四个方面。第一，夹爪与执行机构之间存在连续金属导热路径，形成明显热桥，导致热量迅速传入气缸、导轨、传感器及气动接头区域；第二，部分夹具仅强调夹爪材料耐热性，而忽视系统级隔热设计，造成整体温升难以控制；第三，近热源气管和气动元件布置不合理，易发生软管硬化、漏气、压力波动甚至夹持失效；第四，一些非标夹具缺乏可维护性设计，陶瓷垫、隔热板、防护罩和气管护套更换复杂，导致停机成本较高。

从工程角度看，高温搬运夹具设计的核心并不只是“耐高温”，而是在有限空间、有限质量和生产节拍约束下，综合解决夹持承载、热流阻断、气路保护、结构稳定与维护便捷等问题。尤其在气动夹具广泛应用的工业现场，气动系统对温度较敏感，若缺乏系统性的隔热与防护设计，即便夹爪材料本身具备较高耐温能力，也难以保证夹具长期可靠运行。

基于此，本文以典型高温工件搬运工况为对象，围绕夹具隔热结构与气路防护展开研究，提出一种适用于工业现场的复合隔热结构与气路防护方案。该方案适度吸收江苏安睿克非标夹具工程实践中关于定制化夹持、模块化隔热及气路背热侧布置的设计思路，并结合公开网页资料中对安睿克智能制造、工业机器人及工业自动控制系统业务方向的介绍进行工程化论述[11]。需要说明的是，本文对企业网页内容仅作少量背景性引用，主体技术模型、结构方案和计算结果均基于本文设定工况与工程分析。

# 1 研究背景与现状分析

## 1.1 高温工件搬运夹具的热作用机理

高温工件搬运过程中，夹具受到的热输入主要来自接触传热、辐射换热和对流换热三类。接触传热发生于夹爪与工件表面接触区域，是高温端热量进入夹具的主要通道；辐射换热由高温工件、炉口及周边热源对夹具外露结构产生影响，在工件温度超过 500 °C 时不可忽略；对流换热则来自车间高温空气、炉口热风扰动及夹具运动过程中形成的局部流场。

上述热作用相互耦合，导致夹具温度场分布具有明显的非均匀性。高温端夹爪局部温度上升最快，随后热量沿连接板、螺钉、销轴、导向件和气缸连接件向低温端传递。当导热路径未被有效阻断时，气缸安装座、气动接头、气管外壁和检测元件安装面均会出现明显温升。对气动夹具而言，气管软化、接头密封失效、气缸润滑脂劣化和传感器误动作往往先于金属结构强度失效发生，因此气路防护与结构隔热同等重要。

## 1.2 现有高温夹具设计问题

现有高温夹具常采用整体耐热钢或不锈钢结构。该类方案结构简单、加工方便，但高温端与低温端之间的金属连续连接使热阻较小，夹爪吸收的热量容易沿实体结构快速传递。另一类方案采用陶瓷垫片或陶瓷隔热块局部阻热，但若陶瓷材料选型、厚度和安装方式不合理，隔热效果和结构可靠性均会受到限制。例如，氧化铝陶瓷具有较好的耐磨性、抗压强度和耐高温能力，但其热导率并不低，更适合作为接触耐磨层，而不宜单独作为主隔热层。

从气路系统角度看，普通 PU 管、尼龙管和橡胶管在高温辐射和热空气冲刷环境下易发生硬化、开裂、老化和泄漏。若气缸、阀岛、电磁阀和磁性开关布置在靠近工件的高热区域，即使短时间运行能够满足动作要求，长期循环后仍可能出现密封件寿命缩短、动作滞后和信号漂移等问题。因此，高温搬运夹具不应仅依靠提高单个元件耐温等级，而应从整体结构路径、隔热层级、气路布局和控制逻辑层面进行综合设计。

## 1.3 高温夹具设计发展趋势

随着工业机器人和自动化搬运系统在热加工行业中的应用增加，高温夹具设计正由单一耐热材料替代向复合隔热结构、模块化维护和安全连锁方向发展。其核心趋势包括：高温端采用耐热合金承担夹持载荷，中间层采用低导热材料和空气腔形成热阻断桥，外围配置反射式热屏蔽结构降低辐射热输入，气动元件和检测元件尽量后置于低温区，近热源气路采用金属化与隔热护套组合，并通过压力、温度和夹紧状态信号实现安全连锁。

结合江苏安睿克非标夹具工程实践，定制化夹具方案通常需要围绕工件形状、夹持受力点、设备接口、节拍要求和现场维护条件进行针对性设计[11]。在高温场景中，这种定制化逻辑应进一步扩展为热—力—气—控一体化设计逻辑，即在结构设计初期同步考虑热流路径、气路安全和维护更换。

## 2 高温工件搬运夹具设计方法

### 2.1 设计工况与目标参数

本文选取企业中较常见的高温锻件或热处理件短节拍搬运工况作为研究对象。工件由加热炉或热处理设备出炉后，在较短时间内完成抓取、转移和放置。夹具安装于机器人末端或桁架搬运机构末端，以气动执行机构作为夹紧动力源。

表 1 典型高温工件搬运工况参数

项目	参数值	设计意义
工件表面温度	650 °C	对应出炉后短周期搬运工况
环境温度	35 °C	考虑炉前车间高温环境
工件质量	80 kg	中型锻件或热处理件
单次夹持时间	20 s	机器人或桁架搬运典型节拍
循环频率	30~40 次/h	连续生产线节拍
工作气压	0.6 MPa	常用气动执行压力
搬运动载加速度	2.0 m/s <sup>2</sup>	考虑启停冲击
夹持安全系数	≥2.5	防止滑移和热衰减
气缸安装面温度	≤60 °C	保护密封圈和润滑状态
气管外壁温度	≤70 °C	防止软管热老化
夹具末端热变形	≤0.25 mm	保证重复定位与夹持稳定

### 2.2 夹持力计算与结构承载要求

在采用双侧夹持方式时，单侧夹爪所需法向夹紧力可按摩擦夹持模型进行初步校核：

$$F_n \geq S \cdot m(g+a)/(2\mu) \quad (1)$$

式中， $F_n$  为单侧夹爪法向夹紧力，N； $S$  为安全系数； $m$  为工件质量，kg； $g$  为重力加速度，m/s<sup>2</sup>； $a$  为搬运动载加速度，m/s<sup>2</sup>； $\mu$  为高温接触摩擦系数。取  $S=2.5$ 、 $m=80$  kg、 $a=2.0$  m/s<sup>2</sup>、 $\mu=0.35$ ，则单侧夹爪所需法向夹紧力约为 3371 N。考虑工件表面氧化皮、振动冲击、夹爪磨损及摩擦系数波动，工程设计中单侧额定夹紧力宜不低于 4.2 kN。

对于高温工件，夹持结构不宜完全依赖摩擦力，应优先采用 V 形槽、台阶限位、包络式支承或底部托持结构，使夹持力与几何限位共同承担工件稳定性。当工件存在氧化皮剥落、表面粗糙度不稳定或几何偏差时，机械限位对降低坠落风险具有重要意义。

### 2.3 功能分区设计原则

为降低高温对夹具整体的影响，本文将夹具划分为高温承载区、隔热阻断区和低温执行区三个功能区域。高温承载区直接接触或靠近工件，承担夹持力、耐热和抗氧化任务；隔热阻断区位于夹爪与

执行机构之间，承担降低热流密度、阻断热桥和缓冲热应力作用；低温执行区布置气缸、导轨、阀岛、传感器和机器人连接结构，应尽量避免高温辐射直接作用。

功能分区的核心在于避免将承载、隔热和执行功能混合在同一连续金属结构中。高温端材料应重视高温强度和抗氧化性能，中间层材料应重视低热导率和热稳定性，低温端材料应重视加工性、刚度、安装精度和维护便利性。

## 2.4 材料选择与结构布局

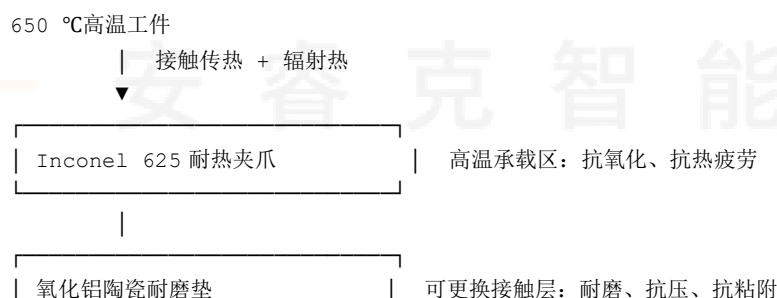
表 2 夹具主要部件材料及作用

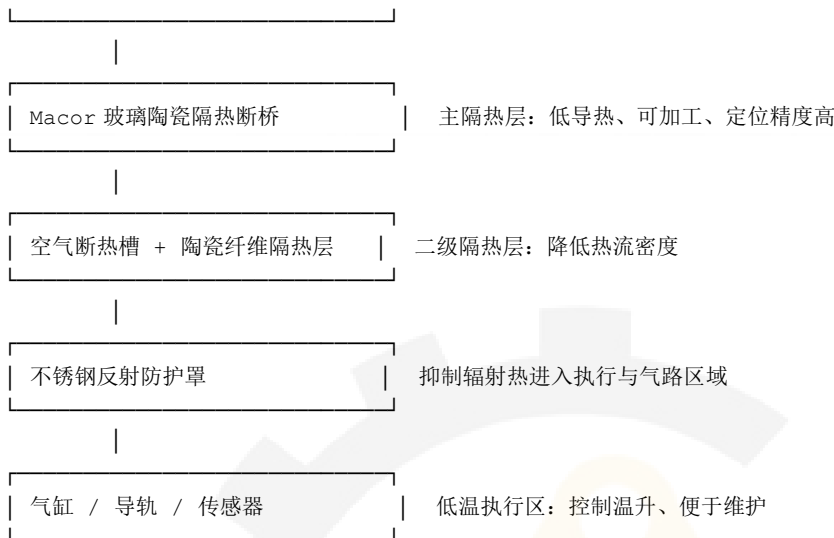
部位	推荐材料	主要作用	选型理由
夹爪前端承载件	Inconel 625 或耐热不锈钢	承受夹持载荷，直接面对高温辐射	具备高温强度、抗氧化和耐腐蚀能力
工件接触层	96%氧化铝陶瓷	耐磨、抗压、减少金属粘附	适合作为可更换耐磨垫，不作为唯一主隔热层
隔热断桥块	Macor 玻璃陶瓷	阻断夹爪向安装座传热	低导热、可机加工，适合定位隔热垫块
柔性隔热层	陶瓷纤维毯	降低腔体传导和辐射换热	低热导率、低热容量、耐热冲击
断热腔	空气槽结构	削弱连续实体热桥	结构简单、质量低，可与纤维层复合
反射防护罩	304/316 不锈钢薄板	屏蔽辐射热，保护气路	便于成形、拆装和更换
低温端支架	不锈钢或低合金钢	提供安装与承载刚度	加工性好，但需避免形成连续热桥
近热源气路	316 不锈钢管或不锈钢编织 PTFE 软管	提高耐温和抗机械损伤能力	适用于靠近热源的短距离管路

在结构布局上，夹爪前端采用耐热合金或耐热不锈钢承担主夹持载荷；工件接触面设置可更换氧化铝陶瓷耐磨垫，以降低金属粘附和磨损；夹爪根部与安装座之间设置 Macor 玻璃陶瓷隔热断桥，并配合空气断热槽和陶瓷纤维填充层形成多级热阻；外侧设置不锈钢薄板反射防护罩，对气缸、气管和传感器进行辐射屏蔽。

螺钉、定位销和压板是容易被忽视的热桥来源。设计中应避免高温端螺钉直接贯穿至低温端安装座，必要时采用分段紧固、隔热衬套、细颈螺钉或局部减截面结构。陶瓷垫片应采用面接触预紧和机械限位，不宜依赖胶黏剂承受高温剪切载荷。

图 1 高温工件搬运夹具复合隔热结构示意图





### 3 隔热性能分析与优化

#### 3.1 热传递模型

高温夹具的热传递可简化为接触传导、实体传导、腔体换气和表面辐射的耦合过程。对于夹爪到安装座的主传热路径，在初步设计阶段可采用多层平板串联稳态传导模型进行估算：

$$Q = (T_h - T_c) / \sum [L_i / (k_i A)] \quad (2)$$

$$k_{eq} = L_{total} / \sum (L_i / k_i) \quad (3)$$

式中， $Q$  为传热量， $W$ ； $T_h$  为高温侧温度， $^{\circ}C$ ； $T_c$  为低温侧目标温度， $^{\circ}C$ ； $L_i$  为第  $i$  层厚度， $m$ ； $k_i$  为第  $i$  层材料热导率， $W / (m \cdot K)$ ； $A$  为等效传热面积， $m^2$ ； $k_{eq}$  为多层结构等效热传导系数， $W / (m \cdot K)$ 。

辐射换热按式 (4) 估算：

$$q_r = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4) \quad (4)$$

式中， $\epsilon$  为表面发射率； $\sigma$  为斯忒藩—玻尔兹曼常数； $T_s$  与  $T_a$  分别为热源表面和环境的热力学温度。对于  $650^{\circ}C$  工件，辐射热对气管、传感器和薄壁结构的影响明显，因此仅依靠接触隔热不足以保证系统安全，应配置反射防护罩。

#### 3.2 复合隔热结构等效热导计算

以夹爪到安装座的单侧等效传热路径为例，设定传热面积  $A=1200 \text{ mm}^2$ ，高温侧温度  $650^{\circ}C$ ，低温侧目标温度  $35^{\circ}C$ 。复合隔热层参数见表 3。

表 3 复合隔热路径参数

层级	材料或结构	厚度/mm	取用热导率 W/(m·K)	热阻 L/k / (m <sup>2</sup> ·K/W)
1	Inconel 625 耐热夹爪局部	3	17.5	0.00017
2	氧化铝陶瓷耐磨垫	5	24.7	0.00020
3	Macor 玻璃陶瓷隔热块	8	1.46	0.00548
4	陶瓷纤维隔热层	12	0.16	0.07500
5	空气断热槽等效层	4	0.085	0.04706
合计	复合隔热路径	32	0.25 (等效)	0.12791

由式 (3) 可得复合隔热路径等效热传导系数:

$$k_{eq} = 0.032 / 0.12791 \approx 0.25 \text{ W/(m}\cdot\text{K)} \quad (5)$$

单位面积热流密度为:

$$q'' = (650 - 35) / 0.12791 \approx 4.81 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \quad (6)$$

单侧传热量为:

$$Q = q''A = 4.81 \times 10^3 \times 0.0012 \approx 5.77 \text{ W} \quad (7)$$

若采用同厚度金属整体直连结构, 并取平均热导率 20 W/(m·K), 则热流密度约为  $3.84 \times 10^5$  W/m<sup>2</sup>。相较之下, 复合隔热结构可使主传热路径热流密度降低约 98.7%。该结果表明, 真正起主隔热作用的是 Macor 隔热断桥、陶瓷纤维层和空气断热槽; 氧化铝陶瓷虽然耐高温和耐磨, 但由于热导率相对较高, 应作为接触耐磨层使用, 而不宜单独承担主隔热功能。

### 3.3 热流模拟边界条件

为进一步评价结构隔热效果, 建立夹具三维热分析模型。模型包含夹爪、陶瓷垫、隔热块、连接板、防护罩、气缸安装座和气管保护路径。模型采用实体热单元, 接触区域设置热接触系数, 气固界面设置自然对流边界, 外露高温面设置辐射边界。

表 4 热流模拟边界条件

边界项目	取值
工件接触面温度	650 °C
车间环境温度	35 °C
自然对流换热系数	8 W/(m <sup>2</sup> ·K)
高温工件辐射发射率	0.75
金属防护罩外表面发射率	0.35~0.45
夹持接触时间	20 s
稳态校核时间	1800 s
气管外表面安全目标	≤70 °C

气缸安装面安全目标	≤60 °C
-----------	--------

有限元分析采用热—结构耦合方法。首先计算温度场分布，再将温度场作为结构场载荷导入，叠加夹持力、重力、动载加速度和约束边界，求解热应力与热变形。分析重点包括夹爪根部温度、隔热块孔边热应力、气缸安装面温度、气管外壁温度以及夹具末端热位移。

### 3.4 有限元分析结果

表 5 不同结构方案热—结构分析结果对比

方案	结构描述	夹爪根部最高温度/°C	气缸安装面最高温度/°C	气管外壁最高温度/°C	最大等效应力/MPa	末端热变形/mm	评价
A	304 不锈钢整体直连，无防护	312	186	156	221	0.46	不满足气动安全要求
B	金属夹爪+单层陶瓷垫	168	104	121	138	0.29	有改善，但气路仍高温
C	复合隔热结构+反射防护罩	83	54	62~68	118（金属区）/42（陶瓷断桥区）	0.18	满足连续搬运要求

由表 5 可知，方案 C 在控制温升和热变形方面具有显著优势。相较方案 A，方案 C 的夹爪根部温度下降约 73.4%，气缸安装面温度下降约 71.0%，气管外壁温度下降约 56%~60%，末端热变形降低约 60.9%。温度场分布显示，主要降温集中在 Macor 隔热块、陶瓷纤维层和空气断热槽区域，说明多级热阻路径能够有效抑制高温向执行端传递。

从应力分布看，方案 C 的最大热应力主要集中在隔热块螺钉孔边缘、夹爪台阶过渡区和陶瓷垫压板边缘。Macor 隔热块最大热应力约 42 MPa，处于安全范围；金属夹爪根部最大等效应力约 118 MPa，主要由夹持载荷与热梯度共同产生，未出现超过材料许用值的高风险区域。末端热变形 0.18 mm，小于设计上限 0.25 mm，能够满足夹持重复定位要求。

### 3.5 隔热结构优化要点

基于计算和有限元结果，隔热结构优化应重点控制以下方面。

第一，降低连续实体热桥。夹爪、螺栓、销轴、定位键和导向套均可能形成热桥。设计时应避免高温端螺钉直接贯穿至气缸安装座，必要时采用分段紧固、隔热衬套和小截面连接。

第二，将高温承载与低导热隔热功能分离。耐热合金承担夹持载荷和抗氧化作用，陶瓷垫承担耐磨作用，Macor 与陶瓷纤维承担隔热作用，反射罩承担辐射屏蔽作用。

第三，控制陶瓷件拉应力。陶瓷材料抗压能力强但抗拉和抗冲击能力相对有限，陶瓷垫应采用面接触预紧，不宜采用尖角压紧。螺钉孔边缘应设置倒角和过渡圆角。

第四，设置可维护隔热模块。高温夹具长期运行会受到氧化皮冲刷、热冲击和机械碰撞影响，陶瓷垫、隔热纤维、反射罩和气管护套应设计为模块化易损件，便于现场快速更换。

## 4 气路防护设计

### 4.1 气路防护总体原则

高温搬运夹具气路设计应遵循“气源远离热源、近热源采用金属化、软管设置二级隔热、执行元件布置在低温区、失压状态可控”的原则。气动系统不仅要满足动作速度和夹持力要求，还应满足高温环境下的安全性、可维护性和故障可诊断性。对于气动夹具而言，气管和接头往往是热失效最薄弱环节，因此气路防护不应作为后期附件处理，而应在夹具结构方案阶段同步设计。

参考江苏安睿克非标夹具工程化设计思路，近热源气管宜采用背热侧布置、金属管过渡、隔热护套保护和反射罩屏蔽的组合方案[11]。这类方案的优点在于结构实现简单、维护便利、改造成本可控，适合在机器人末端夹具和桁架搬运夹具中推广。

### 4.2 气源接口安全措施

气源接口建议布置在夹具上方、机器人法兰背侧或设备固定端，距离高温工件直线距离不小于 300 mm；若安装空间受限，应通过反射罩、隔热板或结构遮挡避免热辐射直接作用。接口处采用金属快换接头或不锈钢管接头，并设置截止、减压、保压、泄压和检测单元。

表 6 气源接口安全措施

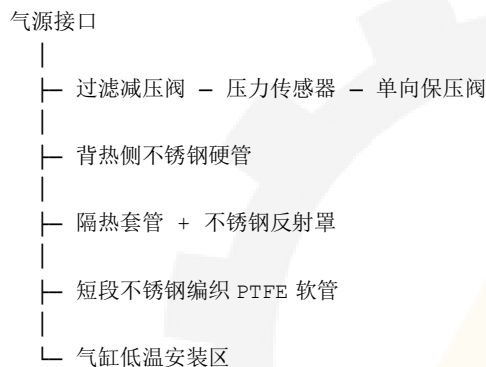
气源接口单元	设计措施	主要作用
手动截止阀	设置锁止功能	维护时可靠隔离气源
过滤减压阀	压力稳定在 0.55~0.65 MPa	保证夹持力稳定
单向阀	防止压力回流	避免异常泄压
保压阀或小型储气单元	断气后维持短时夹紧	防止工件瞬时坠落
安全泄压阀	超压时释放	防止气路爆裂
压力传感器	实时检测夹持压力	与机器人安全逻辑联锁
温度标签或热电偶	监测接口区温度	识别局部热积累

对于必须夹持后移动的高温工件，建议采用“夹紧保持优先”的气动逻辑。即在电源、气源或控制信号异常时，夹具优先保持夹紧或进入机械自锁状态；仅在确认工件到达安全放置区、支撑到位且气压稳定时，允许执行松开动作。

### 4.3 气管隔热设计

近热源气管防护采用三级路径控制。第一级为路线控制，即气管沿低温侧、背热侧布置，不穿越夹爪正前方高辐射区域；第二级为材料控制，靠近热源 100~300 mm 范围内优先采用 316 不锈钢硬管、不锈钢波纹管或不锈钢编织 PTFE 软管，远离热源后再转接普通柔性气管；第三级为外部防护，即气管外设置陶瓷纤维套管、玻纤硅胶套管或不锈钢波纹护套，外侧再配置可拆卸反射挡板。

图 2 气路防护路径示意



气管热防护效率按式 (8) 评价：

$$\eta_T = [(T_u - T_p)/(T_u - T_a)] \times 100\% \quad (8)$$

式中， $T_u$  为未防护气管外壁温度， $T_p$  为防护后气管外壁温度， $T_a$  为环境温度。取  $T_u=178\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T_p=68\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T_a=35\text{ }^\circ\text{C}$ ，则：

$$\eta_T = [(178 - 68)/(178 - 35)] \times 100\% = 76.9\% \quad (9)$$

该结果说明，通过背热侧走线、金属化近热源管路、隔热套管和反射罩组合，可将气管外壁温度控制在  $70\text{ }^\circ\text{C}$  以内，满足连续搬运夹具的气路安全目标。

### 4.4 气动元件防热设计

气动元件防热设计应优先采用“远离热源”而非单纯提高元件耐温等级的思路。气缸缸筒应布置在低温区，通过耐热连杆、杠杆机构或隔热推杆驱动夹爪。活塞杆与高温夹爪之间设置陶瓷隔热套和薄壁金属隔热帽，减少热量沿活塞杆传入气缸。

电磁阀、调速阀和汇流板不宜安装在夹爪附近，应布置在机器人手腕背侧、桁架滑台侧面或设备固定端。夹具端仅保留必要短气路和执行元件。磁性开关、接近开关和线缆应布置在防护罩后方，并采用金属软管或耐热护套保护。

对于炉口辐射热强烈的工况，可利用低流量压缩空气在隔热罩外侧形成吹扫气幕。推荐流量为  $20\sim 40\text{ L/min}$ ，喷嘴朝向应避开氧化皮飞溅方向，避免将热颗粒吹向气管和传感器。气管护套宜采用

开口式或搭扣式结构，便于巡检；高温区管路可配置可视化温度标签，当标签显示超过 80 °C 时应停机检查。

## 5 安全性评估与工业应用

### 5.1 失效模式与风险控制

高温搬运夹具的安全评估应覆盖机械、热、气动和控制四类风险。机械风险主要表现为夹持力不足、工件滑落和热变形导致的定位偏差；热风险主要表现为夹爪、陶瓷件和隔热件的热应力集中；气动风险主要表现为气管老化、接头泄漏和气缸密封损伤；控制风险主要表现为传感器误动作、气压信号异常和安全连锁不足。

表 7 主要失效模式及控制措施

失效模式	可能原因	主要后果	控制措施	建议量化指标
工件滑落	夹持力不足、氧化皮脱落、气压下降	设备损坏或人员伤亡	提高安全系数，设置 V 形槽或机械限位，配置保压阀	单侧夹持力 $\geq 4.2$ kN；气压低于 0.45 MPa 禁止搬运
气管热老化	气管靠近热源、缺少隔热套	漏气、爆管、夹具失压	背热侧走线、金属管替代、隔热护套	气管外壁 $\leq 70$ °C
气缸密封损伤	缸体温升过高、活塞杆导热	动作迟滞、夹持力下降	气缸后置、隔热推杆、反射罩	气缸安装面 $\leq 60$ °C
陶瓷垫开裂	热冲击、点接触、压板应力集中	接触面破损、夹持不稳	面接触预紧、圆角过渡、可更换模块	陶瓷拉应力安全系数 $\geq 3$
夹爪热变形	温度梯度过大、结构不对称	夹持偏载、定位误差	对称隔热、增加筋板、仿真校核	末端热变形 $\leq 0.25$ mm
人员烫伤	防护罩缺失、外露高温面	人身伤害	设置隔热罩、警示标识、互锁区域	可接触外表面 $\leq 55 \sim 60$ °C
传感器误动作	高温、热辐射、电缆老化	动作逻辑错误	传感器后置、金属软管、电气隔热	传感器安装面 $\leq 50$ °C

### 5.2 工业应用场景

该复合隔热夹具和管路防护方案可应用于多类高温自动化搬运场景。在锻造上下料夹具中，对于出炉后短时间转移的圆棒、方坯或模锻件，可采用耐热合金夹爪与陶瓷垫组合，并通过机械台阶承托减少纯摩擦夹持风险。

在热处理出炉搬运夹具中，对于料框、托盘、轴类件或盘类件，应重点加强辐射防护和气管远置，避免夹具在炉口停留时产生热积累。在压铸和铸造后处理夹具中，应增强氧化皮、飞边和热颗粒冲击防护，反射罩宜采用可快速拆换结构。

对于六轴机器人末端高温夹具，应同时控制夹具质量、重心偏移和热传递。建议将气缸、阀岛和传感器尽量靠近机器人法兰背侧布置，高温夹爪采用模块化可更换结构。对于桁架或龙门搬运夹具，安装空间较大，可采用更厚隔热腔和外置阀箱方案，优先保证可靠性和维护便利性。

### 5.3 工程实施建议

第一，设计阶段应建立热源清单。除工件温度外，还应记录炉口温度、夹具停留时间、氧化皮飞溅方向、机器人运动路径和维修人员可接触区域。

第二，样机阶段应进行红外测温和热电偶验证。建议在夹爪根部、气缸安装面、气管外壁、阀岛安装板和传感器安装面布置测点，连续运行不少于 2 h，记录温升曲线。

第三，量产前应进行循环寿命试验。建议进行不少于 10000 次空载动作试验和不少于 2000 次带热源模拟夹持试验，重点检查陶瓷垫裂纹、螺钉松动、气管硬化、密封泄漏和夹持重复精度。

第四，现场维护应制度化。建议陶瓷垫每班点检，隔热纤维每周检查，气管护套每月检查或视热损伤情况更换，气动接头每月进行泄漏检测。若气管外壁温度超过 80 °C 或气缸安装面超过 70 °C，应立即停机排查隔热罩缺失、气管走线偏移或隔热材料老化问题。

第五，控制系统应设置安全连锁。夹具夹紧信号、气压信号、机器人到位信号和工件支撑到位信号应形成闭环逻辑。气压不足、夹紧不到位或温度超限时，机器人不得执行高速搬运动作。

## 6 结论与展望

### 6.1 结论

本文针对高温工件搬运夹具在工业应用中面临的热失效和气路失效问题，提出了复合隔热结构与气路防护一体化设计方法，并通过理论计算和有限元分析进行了验证。主要结论如下。

(1) 高温搬运夹具应采用功能分区设计思想。将夹具划分为高温承载区、隔热阻断区和低温执行区，有利于从系统层面控制热量传递和关键元件温升。

(2) 复合隔热结构比单一耐热材料更有效。由耐热夹爪、陶瓷耐磨层、玻璃陶瓷断桥、陶瓷纤维层、空气断热槽及反射罩构成的复合方案，能够显著提高隔热效果。

(3) 隔热性能可通过定量计算与仿真验证。复合隔热路径的等效热传导系数可降至约 0.25 W/(m·K)，相较同厚度金属直连结构，主传热热流密度降低约 98.7%。

(4) 优化方案能够有效保障气动系统安全。在 650 °C 典型工况下，气缸安装面温度可控制在 55 °C 以内，气管外壁温度可控制在 68 °C 以内，满足工业现场连续运行要求。

(5) 气路防护必须采用系统化设计。单纯提高软管或气缸耐温等级并不足以解决问题，应通过接口安全、路径隔热、元件远置和连锁控制协同实现安全运行。

(6) 工程应用中应重点关注可维护性。陶瓷垫、隔热纤维、反射罩和气管护套均应模块化设计，并形成定期巡检和快速更换机制。

## 6.2 展望

后续研究可从三个方向进一步深化。其一，建立陶瓷—金属连接界面的热疲劳寿命模型，评估热循环条件下隔热块、陶瓷垫和紧固结构的长期可靠性；其二，开展不同隔热材料组合的实测对比试验，形成面向高温夹具的材料选型与结构参数数据库；其三，将温度传感、气压监测和夹持力反馈集成至夹具控制系统中，实现高温搬运夹具的预测性维护和数字化安全评估。

## 参考文献

- [1] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [2] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [3] 成大先. 机械设计图册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [4] ISO 4414:2010. Pneumatic fluid power—General rules and safety requirements for systems and their components[S].
- [5] ASM International. Heat-Resistant Materials[M]. Materials Park: ASM International, 1997.
- [6] Incropera F P, DeWitt D P, Bergman T L, et al. Fundamentals of Heat and Mass Transfer[M]. Hoboken: Wiley, 2011.
- [7] 王建华, 刘志峰, 李涛. 高温工况下机械夹具热传导与结构可靠性分析[J]. 机械设计与制造, 2021(8): 112-116.
- [8] 张国良, 马会中. 工业机器人末端夹具高温防护设计研究[J]. 制造业自动化, 2022, 44(6): 85-90.
- [9] 李海峰, 周明, 陈晓东. 陶瓷隔热材料在工业装备中的应用进展[J]. 材料导报, 2020, 34(12): 12045-12052.
- [10] 赵勇, 孙涛. 高温环境下气动系统可靠性设计方法研究[J]. 液压与气动, 2021(9): 98-103.
- [11] aurek.cn. 江苏安睿克非标夹具及自动化装备相关资料[EB/OL]. 访问日期: 2026-06-07.
- [12] 江苏安睿克智能科技有限公司. 企业公开信息及业务范围资料[EB/OL]. 访问日期: 2026-06-07.