

国家计量技术规范

编制说明

名 称： 航空热处理设备温度控制系统与记录系统测试规范

编制单位： 中航西安飞机工业集团股份有限公司

中国商用飞机有限责任公司

中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所

二〇二六年八月

一、任务来源及计划要求

1.1 任务来源

根据国家市场监督管理总局 2025 年国家计量技术规范制定、修订及宣贯计划（市监计量发〔2025〕45 号文件），全国航空专用计量测试技术委员会下达了“航空热处理设备控温系统测试方法”的编制任务，由中航西安飞机工业集团股份有限公司、中国商飞上海飞机制造有限公司、中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所等单位负责制订本国家计量技术规范《航空热处理设备控温系统测试方法》。

1.2 制订规范的目的和意义

热处理设备广泛应用于机械制造、航空航天、汽车、电子、能源等领域，主要是通过对工件加热、保温、冷却的工艺控制，改变材料内部显微组织，赋予工件所需的力学性能（如强度、韧性）、耐磨性或耐腐蚀性等，满足不同领域对工件性能的特定要求。

热处理设备通常由加热系统、炉体、温度控制系统、循环系统、冷却系统、电气控制系统和安全装置等组成，核心工作原理是“以温度为手段，以组织转变为桥梁，最终赋予工件目标性能”，即通过精准控温，实现对工件材料微观组织的调控，从而使工件达到所需的力学性能（如强度、韧性）、耐磨性或耐腐蚀性等。如热处理设备的技术状态不稳定或控温系统控制不准确，将会导致工件无法达到预期的性能，从而对热处理工艺的可控性和产品质量造成影响，因此必须对热处理设备的性能状态进行管控及评估，其性能状态的控制及评估主要由两项测试结果进行判定：有效加热区的测试和控温系统的测试。

热处理设备的控温系统能够直观反馈热处理设备温度控制系统的精准性和稳定性，温度控制系统由传感器、温度仪表组成，由于温度仪表需要处理电信号，因此会受到其他电磁信号扰动或内部元器件变化的影响，出现接收信号的准确度或运算准确度的下降，使温度控制系统精度衰减；而温度热电偶因长期在高温条件下工作，感温端材料成分发生变化，实际发出的物理电信号特征会发生变化（通常为电压或电阻信号），从而使仪表接收到的信号出现偏差，如果温度控制不准确，将会增加设备的温度偏差和波动度，影响设备温度控制的准确度，从而影响工件的性能。

国内目前关于热处理质量控制技术规范为 GJB509《热处理工艺质量控制》、HB5354《热处理工艺质量控制》、HB5425《航空热处理炉有效加热区测定方法》，国际关于热处理设备质量控制文件有 AMS2750《高温测量》、BAC5621《生产过程的温度控制》，

这些规范中主要对热处理设备有效加热区的测试作出明确要求，未对控制系统作出明确、详细的要求，具体见表 1。

表 1 国内外标准的要求

国内标准	HB5354《热处理工艺质量控制》	对温度仪表控温系统测试提出了定期测试的要求，未明确具体测试方法
	HB5425《航空热处理炉有效加热区测定方法》	热处理设备有效加热区的测定方法，关于设备控温精度作出规定，但未明确方法
国际标准	AMS2750《高温测量》	规定了控温系统的测试方法，但不够详细，可实施性不强，无法直接使用
	BAC5621《生产过程的温度控制》	规定了仪表系统的检查周期，未明确检查方法
国内文献	《热处理炉炉温均匀性和系统精度检测技术》	研究了控温系统对热处理设备的稳定性和可控性的影响，并对控温系统测试方法进行研究和论证
	《热处理炉高温测量解析》	分析热处理设备控温系统对加热炉温度场的影响及对热处理质量控制精细化发展的重要性
	《热处理设备系统精度提升研究与应用》	论证了关于热处理设备控温系统精度对保证产品的热处理质量的影响

在实际生产中，由于各企业采用的测试方法不同，即使同一台设备，不同企业测试得到的结果也可能存在显著差异，这不仅影响了设备性能评价的客观性，也给供应商审核和客户验收带来了困难，编制组在调研过程中收集了多个典型的测试差异案例。

案例一：测试传感器位置不正确导致的测试偏差。某航空零部件制造企业在进行控温系统测试时，将测试热电偶放置在距离控制传感器约 300mm 的位置，由于热处理设备内存在温度梯度，该位置的实际温度与控制传感器位置的温度相差约 2℃。测试结果显示控温系统偏差仅为 0.3℃，远小于实际偏差，设备继续投入使用后，生产的零件出现硬度不均匀问题，经追溯分析发现，实际控温偏差已达 2.5℃，已超出工艺允许范围。这一案例充分说明，测试传感器的放置位置对测试结果具有决定性影响，必须严格按照规定执行。

案例二：数据采集数量不足导致的数据缺乏代表性。西飞、商飞等航空主机厂在进行控温系统/记录系统测试时，通常采集 3 组及以上数据作为测试结果，以确保数据采集时处于热处理设备的稳定阶段，能够反映控温系统/记录系统真实的性能状态。如果仅采集 1 组数据，当该数据恰好处于温度波动的不利相位，测试结果不能代表系统的真实性能状态，经统计分析，采集 1 组数据的测试结果与采集 3 组数据的平均值相比，偏差可能达到 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以上，这在高精度热处理工艺中是不可接受的。

案例三：读数不同步导致的比对误差。由于现场工况限制，部分企业的控温仪表与测试标准仪表距离较远，测试人员需要分别读取两台仪表的示值。由于人的反应时间差异和温度波动的影响，两次读数之间存在时间差，导致无法进行同一时刻的数据比对。实验表明，当炉温波动度为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 时，读数时间差 10 秒就可能引入约 0.5°C 的比对误差。因此，采用同步数据采集技术是保证测试结果准确性的重要手段。

综上所述，对于热处理设备控温系统/记录系统的测试，能够为设备温度的控制提供直观准确的参数，使温度控制参数更加接近设定值、温度记录数据更能准确的反映生产状态，从而保证零件的热处理质量，因此，必须对控温系统的测试方法和要求作出明确规定和统一标准，提高航空的热处理质量。

二、编制过程

2.1 编制原则

JJF1071-2010 是国家计量技术规范编写的基础性文件，规定了计量技术规范的结构、内容、表述方法等技术要求。本规范严格遵循该规则，确保规范的规范性、科学性和可操作性，本规范的编制遵循以下三项原则：

原则一：依据国内外标准和热处理工艺质量控制文件，编制组系统收集了国内外与热处理设备温度控制相关的标准和技术文件，包括国家标准（GB/T）、国家军用标准（GJB）、航空行业标准（HB）、美国汽车工程师协会标准（SAE AMS）、波音公司工艺规范（BAC）以及企业技术文件等。通过对这些标准的对比分析，识别出适用于航空热处理设备控温系统测试的技术要求和方法要素，确保规范的技术内容与国际先进水平接轨，同时符合我国航空工业的实际情况。

原则二：根据热处理设备的关键技术指标归纳技术要求，编制组调研了国内外主流热处理设备生产厂商的技术资料，包括美国应达集团（Inductotherm）、爱协林（Aichelin）、易普森（Ipsen）、成都大威等企业的产品技术规格，通过分析这些设备的关键技术指标，

归纳出控温系统/记录系统测试需要关注的核心参数，确保规范的技术要求既不遗漏关键指标也不过度计量，体现合理性和适用性。

原则三：兼容专业常用计量标准仪器和通用仪器设备制定测试方法，在测试方法的设计上，编制组充分考虑了我国计量技术机构的设备配置现状和发展趋势。测试用标准既包括便携式温度测试仪、数字温度采集仪等专业计量设备，也包括满足精度要求的通用仪器设备。这种设计既满足了计量溯源的严格要求，又考虑了企业的经济承受能力，有利于规范的实施和推广。

2.2 各阶段工作

《航空热处理设备控温系统测试方法》编制过程的各阶段工作安排如下：

2025 年 5 月至 7 月：组建《航空热处理设备控温系统测试方法》编制组，面向航空制造领域各单位在用的热处理设备控温系统开展特性调研，同步开展控温系统关键计量参数的预研分析，据此明确计量技术规范的编制内容与方向。

2025 年 8 月至 10 月：围绕热处理设备控温系统测试需求，开展其关键计量参数的分析研究，完成计量方法及规范编制方案的整体规划，并开展控温系统计量技术方法的专项研究。

2025 年 11 月至 2026 年 2 月：开展热处理设备控温系统现场计量技术规范的试验验证工作，完成其技术指标的分析，并依据所建模型完成测量点、测量间隔等关键参数的确定。基于关键参数及计量特性分析结果，建立热处理设备控温系统的量值溯源体系，据此形成规范初稿。编制组随后对初稿进行内部讨论，形成规范讨论稿。

2025 年 3 月至 9 月，编制组进一步完成了热处理设备控温系统计量技术规范的系统试验验证完善工作，依据试验验证结果形成测试报告，并在企业内部组织评审。

2025 年 9 月至 2026 年 6 月，针对讨论稿，走访涉及航空的企业及研究所，调研航空产业中热处理设备控温系统的测试需求与现状，并在部分相关单位完成测试方法的现场验证，同时开展不确定度评定方法的专题讨论，开展小范围测试，收集测试案例，据此对测试方法进行修订，形成征求意见稿。

2026 年 7 月至 9 月，正式提交征求意见稿，并面向航空行业广泛征求意见。收集专家意见，根据专家意见对规范内容进行修改完善，完善征求意见稿。

2026 年 10 月至 2027 年 1 月，修订编制说明、不确定度评定等文件，形成送审稿，向主管部门提交《航空热处理设备控温系统测试技术规范（送审稿）》审查。

2027 年 1 月至 2027 年 3 月，根据审查意见再次进行修改，形成报批稿。

2027 年 4 月：《航空热处理设备控温系统测试技术规范（报批稿）》测试规范申请报批。

2.3 征求意见情况

本规程意见征求分成两个阶段：

第一阶段为征求意见稿编制完成后，计划于 2026 年 08 月至 2026 年 10 月，通过评审会等形式向多家单位发送“征求意见稿”。

第一阶段征求意见的单位包括：航空工业 304 所（北京长城计量测试技术研究所）、中国商飞上飞公司、成飞公司、沈飞公司等。这些单位涵盖了航空制造产业链的主要环节，包括飞机整机制造、航空发动机制造、机载设备制造以及计量技术支撑等，具有广泛的代表性。

征求意见的内容包括：规范的适用范围是否恰当、术语和定义是否准确、技术要求是否合理、测试方法是否可行、结果判定准则是否明确、与现有标准的协调性等方面。征求意见表设计了详细的问题清单，便于反馈单位有针对性地提出意见。

表 2 第一阶段征求意见情况汇总表

序号	国家计量技术规范章条编号	意见内容	提出单位	处理意见	备注
1	题目	规范名称修改为《航空制件热处理设备温度控制与记录系统测试规范》。	审查委员	采纳	
2	1 范围	1. 删除“也适用于温度传感器和温度仪表无法拆卸时的替代测试”； 2. 增加本规范适用范围描述，改为“本规范适用于金属材料的热处理”。	审查委员	采纳	
3	2 引用文件	删除国际文件 AMS 2750《高温测量》。	审查委员	采纳	
4	3 术语和计量单位	1. 将“航空制件热处理设备”的术语名称修改为“热处理设备”，并采用国家标准中的术语定义内容； 2. 将“温度仪表控制系统”和“温度仪表记	审查委员	采纳	

序号	国家计量技术规范章条编号	意见内容	提出单位	处理意见	备注
		录系统”的术语名称修改为“温度控制系统”和“温度记录系统”； 3. 将“温度仪表控制系统/温度仪表记录系统温度偏差”的术语名称修改为“温度偏差”。			
5	4 概述	将“测试标准器”修改为“测试设备”，全文其他地方也进行更改。	审查委员	采纳	
6	5 计量特性 表 1	将表 1 控温系统/记录系统允许的温度偏差中的“热处理设备类别”列删除，删除表备注“注：温度均匀性为 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 视为 2 级设备，温度均匀性为 $\pm 7^{\circ}\text{C}$ 视为 3 级设备”。	审查委员	采纳	
7	6.2	将 6.2 条款的标题修改为“测试设备”。	审查委员	采纳	
8	表 2	按 JJF1637、JJG141、JJG229 等要求修改测试设备的测试范围和最大允许误差。	审查委员	采纳	
9	7.2.1.1	将测量温度间隔修改为 300°C 。	审查委员	采纳	
10	7.2.2 测试方法	1. 方法要求中增加：K、E 型测试热电偶时，插入深度要求； 2. 数据选取方式描述不准确，修改为“同一组读 3 组数据，选取偏差最大的值作为温度偏差”；规定数据采集时间间隔要求。	审查委员	采纳	
11	7.2.3 数据处理	1. 规定数据修正采用的方法：内插法或就近修正法，明确后续数据修正要求； 2. 计算温度偏差时，分别说明手动补偿和电子补偿时的误差计算方法。	审查委员	采纳	
12	8 测试结果表达	明确当被测温度记录系统为多通道记录仪时，在报告中标注所测量的温度记录系统的	审查委员	采纳	

序号	国家计量技术规范章条编号	意见内容	提出单位	处理意见	备注
		通道号。			
13	9 测试时间间隔	删除建议时间间隔。	审查委员	采纳	
14	附录 B	1. 表 B1 测试值及计算结果中增加温度偏差值； 2. 计算标准不确定度分量时，增加详细计算过程。	审查委员	采纳	
15			航空工业 304 所		
16			中国商飞 上飞		
17			成飞公司		
18			沈飞公司		
19			航空工业 623 所		
20			中国航发 606 所		
21			航空工业 618 所		
.....					

第二阶段为标准规范实验报告、不确定度评定报告和规范文本编制后，计划于 2026 年 12 月至 2027 年 02 月，通过全国航空专用计量测试技术委员会向委员会内外相关机构进行意见征求。

表 3 第二阶段征求意见情况汇总表

序号	国家计量技术规范 章条编号	意见内容	提出单位	处理意见	备 注
1.			航空工业 304 所		
2.			上飞公司		
3.			成飞公司		
4.			沈飞公司		
5.			航空工业 623 所		
6.			中国航发 606 所		
7.			航空工业 618 所		
8.					

第二阶段征求意见的重点是：规范的技术内容是否满足行业需求、与相关国家标准的协调性、测试方法的可操作性和经济性、技术指标的先进性和合理性等方面。同时，还将征求对规范实施可能带来的影响和应对措施的意见建议。

三、主要技术内容的说明

3.1 规范的适用范围

3.1.1 本标准规范文献参考情况

本规范按照 JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》编制，表 4 列出了本规范参考的主要标准/文件。从表中可以看出，参考标准涵盖了国际标准（SAE AMS 2750H）、国家标准（GB/T 系列）、行业标准（HB 系列）和企业文件（CPS8100J 等）四个层级，体现了本规范在制定过程中对技术文件的系统梳理和综合借鉴。

AMS 2750H《Pyrometry》（高温测量）是美国汽车工程师协会发布的航空材料规范，最新版本为 H 版，是全球航空制造业高温测量领域的重要参考文件。该标准规定了热处理设备温度测量系统的技术要求、测试方法和合格判定准则，被波音、空客等航空制造商及其供应链企业广泛采用。本规范在术语定义、测试原理、技术要求等方面参考了 AMS 2750H 的相关内容，同时结合我国航空工业的实际情况进行了适当调整。

GB/T 13324-2006《热处理设备术语》规定了热处理设备领域的常用术语和定义，本规范中“航空热处理设备”等术语的定义参考了该标准。GB/T 9452-2023《热处理炉有效加热区测定方法》是我国热处理设备有效加热区测试的国家标准，本规范在适用范

围和技术要求方面与该标准保持协调。

HB 5425-2012《航空热处理炉有效加热区测定方法》是航空行业关于有效加热区测试的标准，本规范作为其配套标准，共同构成航空热处理设备性能测试的完整体系。

表 4 参考标准/文件汇总表

序号	发布机构	标准层级	标准编号	标准/文件名称	是否有相关性
1	SAE	国际	AMS 2750H	Pyrometry	有
2	国家市场监督管理总局	国家	GB/T 13324-2006	热处理设备术语	有
3	国家市场监督管理总局	国家	GB/T 9452-2023	热处理炉有效加热区测定方法	有
4	国家国防科技工业局	行业	HB 5425-2012	航空热处理炉有效加热区测定方法	有
5	中国商飞集团上飞公司	企业文件	CPS8100J	高温测量	有
6	中航西飞	企业文件	/	温度仪表系统精度校验方法	有

3.1.2 标准适用范围

根据上述文献以及设备不同结构配置的具体要求，本测试方法适用范围分析如下：

- （1）适用于航空热处理设备温度控制系统或温度记录系统温度偏差的测试。
- （2）本规范适用于温度传感器和温度仪表无法拆卸时的替代测试。
- （3）本规范规定了航空热处理设备温度控制系统或温度记录系统温度偏差的测试方法。

3.2 术语和定义

热处理设备的定义参考了 GB/T 13324-2006《热处理设备术语》中 3.1 条中关于“热处理设备术语”的定义：用于实现炉料各项热处理工艺的加热、冷却或各种辅助作业的设备。热处理设备是指用于航空零部件热处理加工的各类加热设备，其特点是：工作温度范围宽，通常从低温回火（约 150℃）到高温固溶处理（约 1100℃）；温度控制精度要求高，通常要求温度均匀性在±3℃至±28℃范围内，对应不同的设备等级；设备结构形式多样，包括周期性作业炉（箱式炉、井式炉、台车炉等）和连续性作业炉（辊底炉、网带炉、推杆炉等）；气氛控制要求严格，部分工艺需要在真空、保护气氛或可控气氛下进行，这些特点决定了控温系统测试需要针对不同的设备类型和工艺要求进行差异化处理。

温度控制系统的定义参考了 AMS2750《Pyrometry》（高温测量）中 2.4.11 控制仪表、2.4.12 控制传感器、2.4.72 系统精度测试（SAT）的定义，同时参考 CPS8100《高温测量》3.9.1 控制传感器、3.16 工艺设备的仪表系统、3.17.1 控制仪表的定义。温度控制系统通常由控温仪表、控制传感器等四部分组成。控制传感器：用于测量热处理设备温度并将温度信号转换为电信号，通常采用热电偶或热电阻；补偿导线：用于将传感器信号传输至控制仪表，其热电特性应与传感器匹配；控温仪表：接收传感器信号，与设定温度比较，通过控制算法（如 PID 算法）计算控制输出；执行机构，根据控制仪表的输出信号调节加热功率，如固态继电器、可控硅调功器、交流接触器等。控温系统的精度取决于上述各组成部分的精度和匹配程度，任何一个环节的误差都会影响最终的控制效果。

温度记录系统的定义参考了 AMS2750《Pyrometry》（高温测量）中 2.4.55 记录仪表、2.4.56 记录传感器、2.4.72 系统精度测试（SAT）的定义，同时参考 CPS8100《高温测量》3.9.2 记录传感器、3.16 工艺设备的仪表系统、3.17.2 记录仪表的定义。温度记录系统与控制系统的区别在于：记录系统的主要功能是温度数据的记录和存储，不参与温度控制；而控制系统的主要功能是根据温度偏差进行控制调节。在实际配置中，记录系统和控温系统可能共用传感器（即控制传感器同时作为记录传感器），也可能独立配置各自的传感器。当两者独立配置时，需要分别进行测试，记录系统的温度偏差要求通常与控温系统的温度偏差要求相同或相近，因为记录数据同样用于工艺评价和质量判定。

温度偏差的定义参考了 AMS2750《Pyrometry》（高温测量）中 3.4.4 条中关于“SAT 差值”的定义，同时参考 CPS8100《高温测量》6.2.6.3 条中关于“系统偏差的计算”条款。温度偏差指的是：在相同的温度条件下，被测控温系统（或记录系统）的示值与经过校准的标准测试系统示值之间的差值。温度偏差是一个带符号的量，正值表示被测系统示值高于标准值（正偏差），负值表示被测系统示值低于标准值（负偏差）。温度偏差的绝对值反映了控温系统的精度水平，绝对值越小，精度越高。温度偏差的测量基于比较法原理，即将被测系统与标准系统置于同一热环境中，在稳定状态下同时读取两者的示值，计算偏差。为了保证比较的有效性，两个系统的传感器测量端应尽可能靠近（距离不超过 76mm），以消除空间温度梯度的影响，同时，读数应在系统达到热稳定后进行，以消除瞬态过程的影响。

补偿值的定义参考了 AMS2750《Pyrometry》（高温测量）中 2.4.38 条中关于“补

偿：对仪表进行的任何手动或电子调整，用来更改设定值或仪表计算温度的显示值。制造商专用术语还可能包括偏置、输入改变等。”的定义，同时参考 CPS8100《高温测量》3.31 条中关于“补偿：对仪表进行的任何手动或电子调整，以改变所需的设定点或仪表计算温度的显示值。”的定义，结合补偿在热处理设备温度控制系统与温度记录系统测试中的实际应用，定义“补偿值”为：在温度控制仪表或温度记录仪表上，为更改其设定值或示值，通过手动或电子方式所引入的调整量。

3.3 测量条件

3.3.1 环境条件

热处理设备控温系统/记录系统测试为现场计量，测试仪器工作的环境温度、相对湿度等应符合正常工作的要求即可。

现场计量的环境条件通常不如实验室条件严格，但应满足以下基本要求：

- （1）环境温度应在测试仪器和被测设备正常工作温度范围内，通常为 $5^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ；
- （2）环境相对湿度应不超过85%，避免在高湿环境下进行测试，防止电气设备受潮和热电偶接点氧化；
- （3）测试现场应无强烈振动、强电磁干扰和腐蚀性气体，避免对测试仪器和被测设备造成干扰。

测试仪器在现场使用前应进行预热和检查，确认仪器工作正常、电池电量充足（如为便携式仪器）、传感器连接可靠。测试过程中应注意保护仪器，避免碰撞、跌落和高温烘烤。

综上所述，本规范对现场的温湿度不做具体要求，只要满足测试仪器工作的环境温度、相对湿度等条件能符合正常工作的要求即可。

3.3.2 测试用标准设备

3.3.2.1 测试仪器

测试仪器可以是便携式温度测试仪、数字显示仪表、数字温度记录仪表、数字温度采集仪器或满足精度要求的其他仪表。测试仪器分辨力：至少 0.1°C ，测量范围为 $(-80\sim 600)^{\circ}\text{C}$ 时，最大允许误差为： $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ ；测量范围为 $(600\sim 1300)^{\circ}\text{C}$ 时，最大允许误差为：读数的 $\pm 0.1\%$ ，以上指标参考AMS2750。

本规范规定测试仪器测量范围为 $(-80\sim 600)^{\circ}\text{C}$ 时，最大允许误差为： $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ ；测量范围为 $(600\sim 1300)^{\circ}\text{C}$ 时，最大允许误差为：读数的 $\pm 0.1\%$ ，这一要求主要是基

于以下考虑：控温系统的允许偏差通常为 $\pm 1.1^{\circ}\text{C}$ 至 $\pm 5.6^{\circ}\text{C}$ ，测试仪器的误差应远小于被测系统的允许偏差， 0.1°C 的分辨力要求是为了保证读数的精细度，便于识别小的温度偏差；数字式仪表具有读数客观、便于自动采集等优势，因此规范推荐使用数字式仪表。

3.3.2.2 测试传感器

(1) 热电偶

测试用热电偶可以使用易耗型热电偶或非易耗型热电偶。对于盐浴炉和其他具有腐蚀性液体或气体的热处理设备，应采用带有防腐蚀性保护管保护的热电偶。对于空气循环炉，建议优先使用非易耗型热电偶，如果使用易耗型热电偶时，应使用不得对炉子产生污染的外层保护材料制作而成的热电偶。热电偶在使用前应检定合格，并具备带有修正值的检定证书和合格证书，检定证书检定的温度范围要覆盖所使用的温度范围。

K型和N型热电偶的使用温度范围为 $(-40\sim 1000)^{\circ}\text{C}$ ，最大允许误差为： $(-40\sim 375)^{\circ}\text{C}$ ： $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ， $(375\sim 1000)^{\circ}\text{C}$ ： $\pm 0.004 \cdot t$ ；E型热电偶的使用温度范围为 $(-40\sim 800)^{\circ}\text{C}$ ，最大允许误差为 $(-40\sim 375)^{\circ}\text{C}$ ： $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ， $(375\sim 800)^{\circ}\text{C}$ ： $\pm 0.004 \cdot t$ ；J型热电偶的使用温度范围为 $(-40\sim 750)^{\circ}\text{C}$ ，最大允许误差为 $(-40\sim 375)^{\circ}\text{C}$ ： $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ， $(375\sim 750)^{\circ}\text{C}$ ： $\pm 0.004 \cdot t$ ；以上数据来源于JJF1637-2017《廉金属热电偶校准规范》中对1级热电偶的技术要求。

T型热电偶使用温度范围为 $(-40\sim 350)^{\circ}\text{C}$ ，最大允许误差为 $(-40\sim 125)^{\circ}\text{C}$ ： $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ， $(125\sim 350)^{\circ}\text{C}$ ： $\pm 0.004 \cdot t$ ；以上数据来源于GB/T 16839.1-2018《热电偶 第1部分：电动势规范和允差》中对1级T型热电偶的技术要求。

R和S型热电偶使用温度范围为 $(0\sim 1600)^{\circ}\text{C}$ ，最大允许误差为 $(0\sim 1100)^{\circ}\text{C}$ ： $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ ， $(1100\sim 1600)^{\circ}\text{C}$ ： $\pm [1+0.003(t-1100)]$ ，B型热电偶使用温度范围 $(600\sim 1700)^{\circ}\text{C}$ ，最大允许误差为 $\pm 0.25\% t$ ；以上数据来源于JJG141-2013《工作用贵金属热电偶》中对I级R和S型热电偶、II级B型热电偶的技术要求。

热电偶是温度测量中最常用的传感器，其类型选择应考虑以下因素：不同分度号热电偶的适用温度范围不同，K型热电偶适用于 -200°C 至 1260°C ，N型热电偶适用于 -270°C 至 1300°C ，S型热电偶适用于 -50°C 至 1768°C ，B型热电偶适用于 0°C 至 1820°C ；精度要求，贵金属热电偶（S型、B型、R型）的精度通常高于廉金属热电偶（K型、N型、E型、J型、T型）；化学稳定性，在氧化性气氛中，K型、N型热电偶具有较好的稳定性；在还原性

气氛或真空环境中，应选用贵金属热电偶或特殊保护管保护的热电偶；机械强度，非易耗型热电偶（如铠装热电偶）具有较好的机械强度和抗振动性能，适用于恶劣环境。对于盐浴炉等腐蚀性环境，保护管的材质选择至关重要。常用的保护管材质包括：不锈钢（适用于一般氧化性气氛）、耐热钢（适用于高温氧化性气氛）、陶瓷（适用于高温和腐蚀性气氛）、石英（适用于高温和需要快速响应的场合）等。保护管的使用会对热电偶的响应速度和测量精度产生一定影响。

（2）铂电阻

测试用铂电阻在使用前应检定合格，并具备带有修正值的检定证书，检定证书检定的温度范围要覆盖所使用的温度范围，应在合格有效期内使用。测试铂电阻的使用温度范围为（-80~850）℃，误差应符合JJG229-2010《工业铂、铜热电阻》A级公差要求。

铂电阻的工作原理是基于铂金属电阻随温度变化的特性。与热电偶相比，铂电阻具有以下优点：精度高，A级铂电阻在0℃时的允许误差为±0.15℃，在100℃时为±0.35℃，精度优于大多数热电偶；稳定性好，铂电阻的漂移通常小于热电偶，适合长期监测；无需参考端补偿，使用简便。但铂电阻的温度范围较窄，高温下铂丝会挥发、晶粒长大，导致性能劣化，因此一般仅用于300℃以下的温度测量。JJG 229-2010规定了工业铂热电阻的公差要求，本规范要求使用A级铂电阻，以确保测量精度。A级铂电阻的检定应在覆盖使用温度范围的多个温度点进行，通常包括0℃、100℃和实际使用温度点附近。

3.3.2.3补偿导线

使用易耗型廉金属热电偶进行测试时，不允许使用补偿导线，只有使用非易耗型热电偶或贵金属热电偶测试时，才可使用补偿导线，补偿导线在使用前应检定合格，并带有20℃的修正值；K型、N型、E型、J型补偿导线测量范围为（室温~70）℃，最大允许误差为±1.1℃；T型补偿导线测量范围为（室温~70）℃，最大允许误差为±0.5℃；S型、R型补偿导线测量范围为（室温~70）℃，±2.5℃；以上数据来源于GB/T 4989-2013《热电偶用补偿导线》中5.1条热电特性及允差的技术要求。

热电偶测量的是测量端（热端）与参考端（冷端）之间的热电势，如果补偿导线材质与热电偶材质不同，会引入附加热电势，产生测量误差。易耗型廉金属热电偶价格低廉，通常一次性使用，无需补偿导线；而非易耗型热电偶和贵金属热电偶价格较高，需要配合补偿导线使用以延长其使用寿命。

补偿导线分为补偿型和延长型两种：补偿型补偿导线采用与热电偶热电特性相近的合金材料制成，价格较低，但引入的误差相对较大；延长型补偿导线采用与热电偶相同的材料制成，热电特性一致，误差较小，但价格较高。补偿导线在使用前应检定合格，并带有20℃的修正值。20℃是补偿导线通常所处的环境温度，在该温度下的修正值可以有效补偿补偿导线引入的误差。

3.3 技术要求及测试方法分析

3.3.1 技术要求说明

本规范仅规定了温度偏差一个测试项目，但该项目涵盖了控温系统/记录系统的整体性能。温度偏差测试实际上是对控温系统各组成部分（传感器、补偿导线、连接器、仪表）综合误差的整体评价。这种方法的优点是：测试简便，无需拆卸系统各部件分别检测；结果直观，直接反映系统在实际工作状态下的性能；与实际使用情况一致，测试结果具有工程应用价值。

表 5 列出了测试项目及其被测对象。温度控制系统或温度记录系统温度偏差的测试对象是航空热处理设备，具体包括设备的每个控温区。对于多区控温的设备，应分别对每个控温区进行测试，因为不同控温区的传感器、仪表可能存在差异，其精度也可能不同。

表 5 测试项目

序号	测试项目	被测对象
1	温度控制系统或温度记录系统 温度偏差	航空热处理设备

3.3.2 测试项目分析

（1）温度偏差

温度控制系统或温度记录系统温度偏差为航空热处理设备使用的工艺仪表（控温仪表、记录仪表）和温度传感器、补偿导线（和连接器）的组合误差，即航空热处理设备工艺仪表系统（温度控制、记录系统）的温度示值偏离设备实际温度的程度。该特性引用了 AMS 2750H《Pyrometry》（高温测量）中“2.4.72 系统精度”的术语。

温度偏差的误差来源包括：传感器误差，包括热电偶的塞贝克系数偏差、不均匀性、老化漂移等；补偿导线误差，包括热电特性偏差、温度梯度影响等；连接器误差，包括接触热电势、接触电阻等；仪表误差，包括参考端补偿误差、线性化误差、A/D 转换误

差、显示分辨力等。这些误差分量有些是系统性的（如固定偏差），有些是随机性的（如波动），温度偏差测试得到的是这些误差分量的综合效果。温度偏差对航空质量的影响主要体现在：温度偏高可能导致过烧、晶粒粗化、氧化烧损等问题；温度偏低可能导致加热不足、组织转变不完全、性能不达标等问题；温度波动可能导致组织不均匀、残余应力增大、变形开裂等问题，因此，控制温度偏差在允许范围内是保证热处理质量的关键。

航空热处理设备度仪表控制系统/温度记录系统温度偏差是确保设备内部温度准确控制以及设备安全性能及产品质量的重要参数，温度控制准确度对航空加工及处理至关重要，零件实际温度偏离工艺温度较大，将会在零件内部产生残余应力，可能导致制件开裂和强度下降，影响航空的质量。因此，必须对航空热处理设备温度控制系统或温度记录系统温度偏差进行周期测试。航空热处理设备的温度控制系统或温度记录系统就是将热处理设备每个控温系统/记录系统读数，与经过修正后的标准测试系统的读数进行比较，以确定热处理设备每个温度控制系统或温度记录系统的满足技术指标的要求。图 1 展示了航空热处理设备的温度控制系统或温度记录系统主要组成部分及测试原理。从图中可以看出，标准测试系统由测试热电偶、补偿导线和测试仪器组成，与被测工艺系统并置于同一热环境中，通过比较两者的示值来评估被测系统的精度。

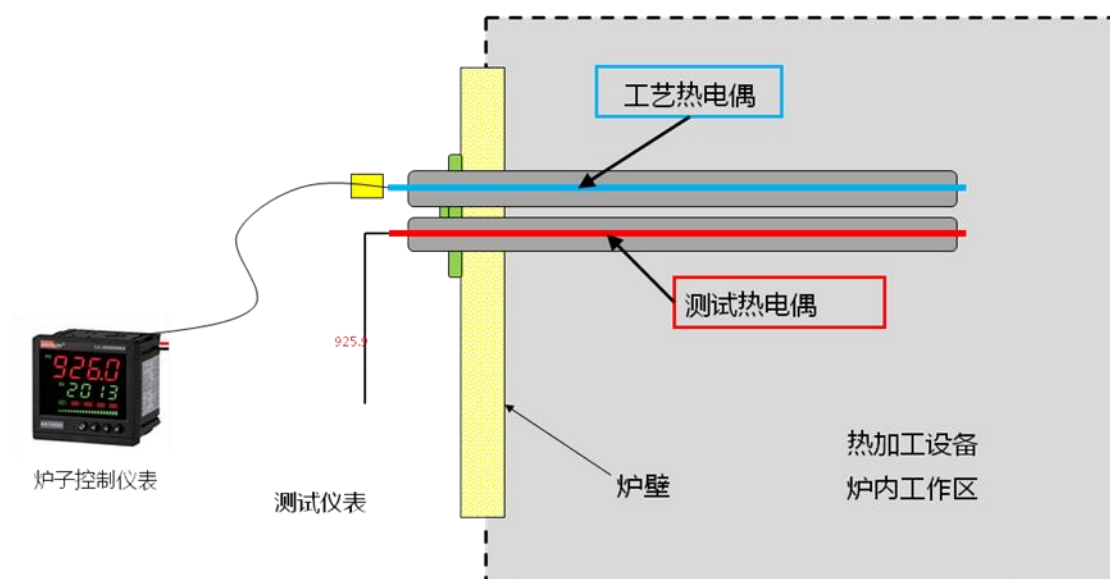


图 1 温度控制系统或温度记录系统主要组成部分及测试原理

温度控制系统或温度记录系统温度偏差的测试方法基于比较法，测试方法与 AMS 2750H 《Pyrometry》（高温测量）基本一致，将测试热电偶、补偿导线与测温仪器组成

的标准设备，与航空热处理设备使用的工艺仪表（控温仪表、记录仪表）分别在使用温度范围的上限、下限进行比对，从而得到温度偏差。测试时，测试热电偶测量端应在设备每个控温区控制、记录传感器测量端附近，二者距离应小于 76 mm，当使用 E 型或 K 型测试传感器且测试温度超过 260.0 ℃时，E 型或 K 型每一次的插入深度应不小于上一次使用时的深度。（来源：AMS 2750H《高温测量》）。

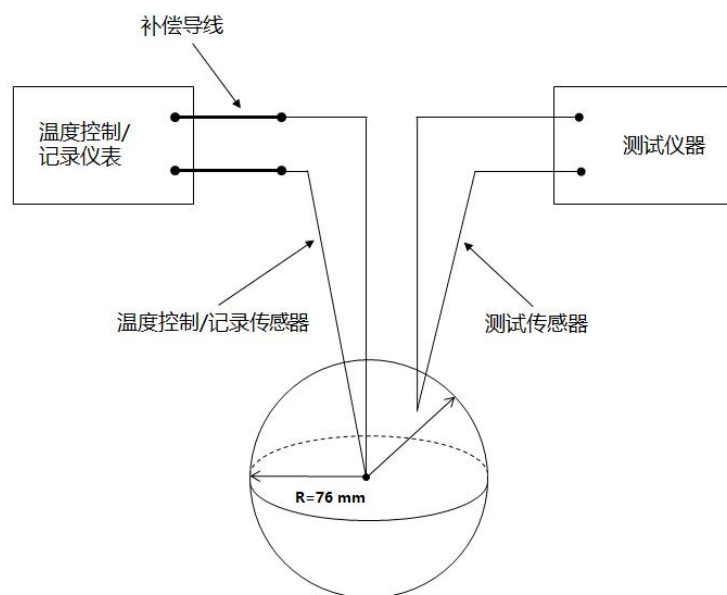


图 2 温度控制系统或温度记录测试接线图

在热处理高温测量中，温度控制系统或温度记录系统温度偏差测试的核心目的是验证整套温度测量系统（传感器+补偿导线+仪表）的误差，所以标准（如 AMS 2750、CPS8100）会严格规定：测试传感器与被测传感器的距离不得超过 76 mm（该距离不是被测控温系统或记录系统传感器与测试传感器尖端之间的距离，而是以被测控温系统或记录系统传感器尖端为球心，半径为 76 mm 的球体空间范围，测试传感器的尖端应置于该球体内部），原因主要有三点：

①热处理设备内即使处于稳定状态，不同位置之间也存在温度差异，这种差异称为空间温度梯度，为了最大限度消除空间温度梯度的影响：热处理设备内部必然存在温差，即便是均温区，不同位置的温度也不完全一致。如果两个传感器距离较远，测出的温差里就混入了“位置不同导致的实际炉温差异”，这会直接影响测试结果，把炉温不均匀误判为测量系统不准，导致测试失效。

②确保“同一位置”比较的有效性：温度控制系统或温度记录系统温度偏差测试是比较两个传感器在同一点的读数。只有尖端距离相近，才能认为它们处于同一热环境中，此时两者的读数差才能真正代表传感器、补偿导线和仪表的综合偏差。温度偏差测试的目的是比较两个测量系统在同一温度点的示值，如果两个传感器距离过远，测得的温差就包含了空间温度梯度的影响，导致测试结果不能真实反映测量系统的误差。

③兼顾传热影响与操作安全：两传感器并非越近越好，距离过近可能因接触而导热，影响各自真实温度；而距离过远则失去比较意义，而 76 mm 是标准在大量实践中，平衡了精度、传热干扰和可操作性后，确定的合理最大容差，简而言之，传感器分布距离较大时，测的是热处理设备炉温均匀性；而传感器距离缩至 76 mm 内，测的才是温度控制系统或温度记录系统温度偏差，在该距离范围内，空间温度梯度的影响可以控制在可接受的范围内。距离过近（如小于 10 mm）可能导致两个传感器之间的热传导和辐射换热相互影响，改变各自的温度场，同样会影响测试结果的准确性。

（2）测试温度点的选择

测试温度点的选取参考了实际使用的温度点的工艺要求，测量标准器的实际温度值应为测试热电偶、补偿导线（补偿型）、测温仪在对应温度点的修正值与测温仪示值共同计算的结果，当测试时使用了延长型/补偿型补偿导线，均应在计算温度偏差时，将补偿型/延长型补偿导线所引入的误差进行修正。

测试温度点的选取原则包括：应覆盖设备使用温度范围的上限和下限，以验证整个温度范围内的精度；应包含工艺常用的关键温度点，如固溶温度、时效温度、回火温度等；对于使用温度范围较宽的设备，可在上限、下限和中点三个温度点进行测试；当设备仅用于单一工艺时，可在该工艺温度点进行测试，但应适当扩展测试温度范围以验证系统的线性度。

根据调研情况，温度控制系统或温度记录系统温度偏差的技术指标如表 6 所示，热处理设备温度均匀性要求不同，对应的温度控制系统或温度记录系统允许偏差要求不同。这种分类方法的依据是：温度均匀性要求反映了设备的热工性能水平，温度均匀性要求越高的设备，其控温系统的精度要求也应相应提高；允许偏差的数值与温度均匀性要求之间存在一定的比例关系，热处理设备等级由各单位按照客户规范或相关管理要求自行定义。

表 6 温度偏差技术要求

代表性企业	测试对象	技术要求	
波音、商飞、 沈飞	航空热处理设备 温度控制系统与 温度记录系统	温度均匀性要求/℃	允许偏差/℃
		±3	±1.1 或读数的±0.2%， 取大者
		±6	±1.7 或读数的±0.3%， 取大者
		±8	±2.2 或读数的±0.4%， 取大者
		±10	±2.2 或读数的±0.4%， 取大者
		±14	±2.8 或读数的±0.5%， 取大者
		±28	±5.6
		只有最高或最低或温度范围的热处理设备； 制冷和淬火设备	±2.8

(3) 测试时载荷状态

规范的测试对象为航空热处理设备温度控制系统或温度记录系统，建议热处理设备处于载荷状态或正常生产状态，只有在真实生产条件下，设备内部的热容量、气流组织、辐射传热路径及控制系统的动态响应特性才能与实际工艺过程保持一致。当炉膛内存在工件等载荷时，工件会吸收并储存热量、改变气流通道的并对热辐射形成遮蔽与二次辐射，这些因素共同导致炉膛内的温度场分布和温度变化速率与空载状态存在本质差异，若在空中条件下进行测试，所获得的数据仅能反映设备在无生产负荷时的理想化表现，无法反馈热处理设备在实际处理产品时可能存在的温度偏差、滞后或超调问题，因此，建议在载荷状态或正常生产状态下进行温度控制系统或温度记录系统温度偏差测试，其目的在于确保测试条件与生产工艺条件等效，使测试结论能够真实、准确地反映热处理设备在实际运行中的控制能力。

波音、商飞、沈飞等航空制造企业的工艺控制要求是本规范技术指标制定的重要参考。这些企业在长期的生产实践中，积累了丰富的热处理质量控制经验，其工艺要求经过了大量零件的验证，具有可靠性和先进性。本规范将这些企业的工艺控制要求统一为国家计量技术规范，有利于提高我国航空热处理行业的整体质量水平，促进供应链的质量一致性。

3.4 测试结果的表达

经测试的温度控制系统或温度记录系统温度偏差，出具测试报告。参照 JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》，测试报告至少应包含实验室名称和地址、测试地点、报告的唯一性标识(如编号)、测试日期、测试依据、测试环境的描述、测试结果及其测量不确定度的说明等信息。

3.5 复测时间间隔

考虑到不同客户的需求、实际使用的频次不一，复测时间间隔可根据设备的工艺要求、使用频繁程度、技术文件要求等实际使用情况，由使用单位自行确定。

四、验证实验的情况和结果

验证实验的设备选择遵循代表性原则，覆盖了航空热处理常用的设备类型：箱式电炉 3 台，工作温度范围 200℃至 1000℃，分别代表低、中、高温应用；井式炉 2 台，工作温度范围 500℃至 1200℃，主要用于长轴类零件的热处理；真空炉 2 台，工作温度范围 300℃至 1100℃，用于钛合金、高温合金等活性金属的热处理；空气循环炉 3 台，工作温度范围 100℃至 650℃，用于铝合金零件的固溶处理和时效处理。

验证实验的温度点设置：每台设备在其使用温度范围的上限、下限和中点进行测试。测试在每个温度点保温 30 分钟后开始数据采集，每隔 5 分钟读取一组数据，共采集 3 组数据；验证实验的统计分析表明：同一设备在同一温度点多次测试的结果偏差不超过 0.3℃；不同操作人员使用相同方法测试的结果一致性良好，最大差异不超过 0.4℃；测试方法适用于所有验证设备类型，未出现因设备类型不同而导致方法不适用的情况；5 分钟的数据采集间隔和 3 组数据的最少采集量能够满足测试要求，其偏差符合要求。

五、与现行法规、标准的关系

本规范系新制定的计量技术规范，与现行的法规、标准之间并无相应的对应关系。本测试规范为首次制订，本测试标准结合实际情况，综合考虑了 AMS 2750H《Pyrometry》（高温测量）、CPS8100J《高温测量》等国内外技术标准以及波音、商飞等民航制造商工艺控制的要求，参照国内外民航主流制造商的工艺要求控制。

六、参考资料

JJF 1001-2011 通用计量术语及定义

JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示

JJF 1071-2010 国家计量校准规范编写规则
JJF1637-2017 廉金属热电偶校准规范
JJG229-2010 工业铂、铜热电阻检定规程
JJG141-2013 工作用贵金属热电偶
GB/T 13324-2006 热处理设备术语
GB/T 9452-2023 热处理设备有效加热区测定方法
GB/T 4989-2013 热电偶用补偿导线
HB 5425-2012 航空热处理炉有效加热区测定方法
AMS 2750H Pyrometry
CPS8100J 高温测量