《辐射测温用-15℃~500℃面辐射源校准规范》验证报告

《辐射测温用-15℃~500℃面辐射源校准规范》编写组

2026 年 10 月

1.验证目的

选取典型的面辐射源作为样品，按照《辐射测温用-15℃~500℃面辐射源校准规范》（征求意见稿）中的校准方法进行测量，通过对测量结果的数据分析，验证校准方法的合理性和可行性。

2.验证项目和方法

本规范采用了两种亮度温度校准方法：采用标准面辐射源作为标准器、传递辐射温度计作为比较器的比较法；采用标准辐射温度计作为标准器的直接测量法。其中比较法的量值为标准面辐射源的亮度温度，是本规范推荐的校准方法。本报告以试验数据为输入，按明确的验证判据对规范各校准方法和技术要求逐项验证并给出通过与否的结论；试验过程与完整原始数据见《试验报告》。

本次验证项目、判据与数据来源如下：

a）比较法校准亮度温度——判据：与直接测量法结果之差满足传递比较判据式（2）；数据：试验报告表 3、表 4、表 5。

b）直接测量法校准亮度温度——判据：与比较法互证一致、50℃及以上差值不超过量值传递要求；数据：试验报告表 4。

c）温度均匀性指标——判据：不大于（0.2℃与 0.2%|t|的大者）（参考指标）；数据：试验报告表 7。

d）恒温光阑比较条件——判据：加光阑与直测的最大差值不超过 0.2℃；数据：试验报告表 6。

e）低温防结霜结露措施——判据：低于 5℃校准点面板无结霜结露、示值稳定；数据：试验报告图 10、图 11。

f）常温法向发射率核查方法——判据：操作可行、重复性好，核查结果不小于 0.95；数据：发射率核查原始记录。

3 采用比较法（标准面辐射源+传递辐射温度计）校准亮度温度的验证

3.1 验证方法

以标准面辐射源（低温段 4180、高温段 H500-D150）为标准，传递辐射温度计为比较器，按式（1）计算被校面辐射源亮度温度。为验证比较法结果的正确性，以经溯源的标准辐射温度计直接测量法结果作为对照，利用传递比较法判据（式（2））进行验证：

$$T_{\mathrm{c}} = T_{\mathrm{s}} + T_{\mathrm{cr}} - T_{\mathrm{sr}} \quad (1)$$

$$|t_{comp} - t_{direct}| \le \sqrt{U_{comp}^2 + U_{direct}^2}/2 \quad (2)$$

式中，t_{comp}——比较法校准结果，℃；t_{direct}——直接测量法校准结果，℃；U_{comp}——比较法扩展不确定度，℃；U_{direct}——直接测量法扩展不确定度，℃。

比较法扩展不确定度 U_{comp} 主要由标准面辐射源亮度温度溯源不确定度（U=0.4℃，k=2）和比较测量重复性、分辨力、光阑及环境辐射等分量合成，按规范附录 D 评定，U_{comp}≈0.5℃（k=2）；直接测量法扩展不确定度 U_{direct} 按标准辐射温度计最大允许误差±（1%×读数）℃或±1.4℃估计，100℃以下 U_{direct}≈1.6℃（k=2），200℃及以上 U_{direct}≈2.3℃（k=2）。判据限值取$\sqrt{U_{comp}^2 + U_{direct}^2}/2$：中低温段约 0.84℃，高温段约 1.18℃。

3.2 验证数据

13 台面辐射源在（-15~500）℃各校准点的比较法与直接测量法差值汇总见表 1 及图 1（数据取自《试验报告》表 5）。

表 1 比较法与直接测量法亮度温度差值（$t_{comp} - t_{direct}$）℃

温度点/℃	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号	8 号	9 号	10 号	11 号	12 号	13 号
0	1.6	1.6	1.6	1.6	/	/	/	/	/	/	/	/	/
20	0.6	0.6	0.6	0.6	/	/	/	/	/	/	/	/	/
50	0.4	0.4	0.4	0.4	/	0.4	0.3	0.3	/	0.3	0.3	0.3	0.3
100	0.3	0.3	0.3	0.3	/	0.3	0.2	0.2	/	0.2	0.2	0.2	0.2
200	/	/	/	/	/	/	0.7	0.7	/	0.7	0.7	0.7	0.7
300	/	/	/	/	/	/	0.4	0.4	/	0.4	0.4	0.4	0.4

400	/	/	/	/	/	/	0.8	0.8	/	0.8	0.8	0.8	0.8
480	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-0.2	-0.2	-0.2
500	/	/	/	/	/	/	0.1	0.1	/	0.1	/	/	/

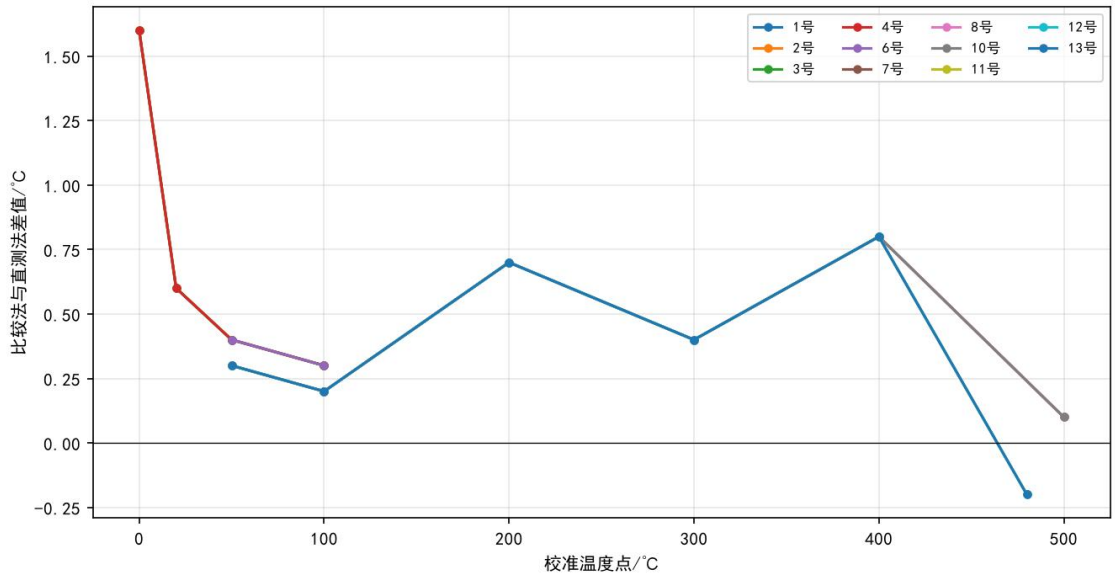


图 1 各面辐射源比较法与直接测量法差值图 ℃

按式（2）对各校准点逐点验证，代表性验证结果见表 2。

表 2 传递比较法验证结果（代表性校准点） ℃

面辐射源	温度点/℃	差值	U_{comp}	U_{direct}	判据限值	结果
1 号	50	0.4	0.5	1.6	0.84	合格
1 号	100	0.3	0.5	1.6	0.84	合格
4 号	0	1.6	0.5	1.6	0.84	不合格
4 号	20	0.6	0.5	1.6	0.84	合格
7 号	200	0.7	0.5	2.3	1.18	合格
11 号	400	0.8	0.5	2.3	1.18	合格
12 号	480	-0.2	0.5	2.3	1.18	合格
13 号	100	0.2	0.5	1.6	0.84	合格

3.3 验证结果分析

由表 1、图 1 及表 2 可见，50℃及以上温度点两种方法差值大部分在 0.9℃以内，全部通过传递比较法验证；低温段（-15~0）℃差值相对较大，最大 1.6℃（4 号 0℃点），超出判据限值 0.84℃。分析认为低温段标准辐射温度计受环境背景辐射影响及自身漂移影响示值偏大，与省规范任务书中“辐射温度计长期稳定性存在不确定性，易产生温度漂移”的分析一致，而非比较法本身的问题；比较法以标准面辐射源亮度温度为量值，可避免该影响。

3.4 验证结论

比较法校准面辐射源亮度温度的方法合理、可行，适用于所有辐射测温用（-15℃~500℃）面辐射源；中高温段与直接测量法一致性良好，低温段量值以标准面辐射源亮度温度为准，可避免传递辐射温度计漂移引入的系统误差。

4 采用直接测量法（标准辐射温度计）校准亮度温度的验证

4.1 验证方法

以经溯源的标准辐射温度计为标准器，直接测量被校面辐射源亮度温度并引入示值修正值，与比较法结果互为对照，验证直接测量法的可行性及适用范围。

4.2 验证数据

表 3 直接测量法亮度温度校准结果 ℃

温度点/℃	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号	8 号	9 号	10 号	11 号	12 号	13 号
0	-0.2	-0.3	-0.1	-0.6	/	/	/	/	/	/	/	/	/
20	19.5	19.3	20.5	20.3	/	/	/	/	/	/	/	/	/
50	49.2	49.1	49.7	50.4	/	49.1	49.2	49.4	/	49.8	50.2	50.5	50.3
100	97.7	97.7	98.8	97.7	/	97.9	97.9	97.9	/	98.9	100.2	100.5	100.4

200	/	/	/	/	/	/	194.8	194.0	/	196.7	200.5	200.6	200.4
300	/	/	/	/	/	/	291.3	291.2	/	295.3	300.1	300.1	300.4
400	/	/	/	/	/	/	387.9	388.4	/	393.7	400.6	400.3	400.1
480	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	480.8	480.2	479.7
500	/	/	/	/	/	/	483.8	483.7	/	490.3	/	/	/

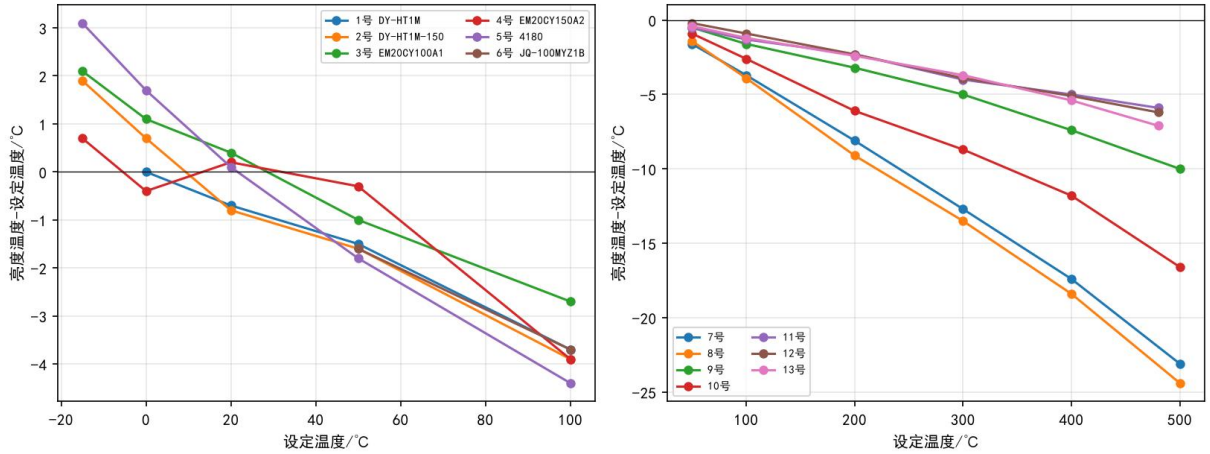


图 2 面辐射源亮度温度与设定温度的偏差

4.3 验证结果分析

直接测量法在 50℃及以上温度点结果稳定，与比较法差值不超过 0.9℃，满足量值传递要求；由图 2 可见亮度温度与设定温度的偏差随温度升高而增大（500℃最大约 23℃），表明面辐射源必须经校准获得亮度温度量值而不能以设定温度代替；低温段受环境辐射、反射辐射及温度计漂移影响，差值最大达 1.6℃，测量重复性明显变差。

4.4 验证结论

直接测量法操作简便、量值传递环节少，适用于不具备标准面辐射源时面辐射源的校准；用于低温段时应充分评估标准辐射温度计漂移及环境辐射引入的不确定度。

5 温度均匀性及恒温光阑比较条件的验证

按规范方法对 13 台面辐射源开展均匀性测量（数据取自《试验报告》表 7），各温度点均匀性最大差值见表 4 及图 3，分半径统计见图 4。

表 4 面辐射源温度均匀性最大差值 ℃

温度点/℃	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号	8 号	9 号	10 号	11 号	12 号	13 号
0	0.2	0.1	0.0	0.2	0.0	/	/	/	/	/	/	/	/
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	/	/	/	/	/	/	/	/
50	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.4
100	0.1	0.4	0.5	0.3	0.4	0.4	0.1	0.3	0.2	0.2	0.3	0.1	0.7
200	/	/	/	/	/	/	0.1	0.4	0.5	0.3	0.5	0.4	1.2
300	/	/	/	/	/	/	0.3	0.6	1.0	0.3	0.6	0.4	1.8
400	/	/	/	/	/	/	0.5	0.5	1.4	0.4	0.9	1.1	1.1
480	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	1.5	1.4	1.7
500	/	/	/	/	/	/	1.0	0.7	1.6	1.1	/	/	/

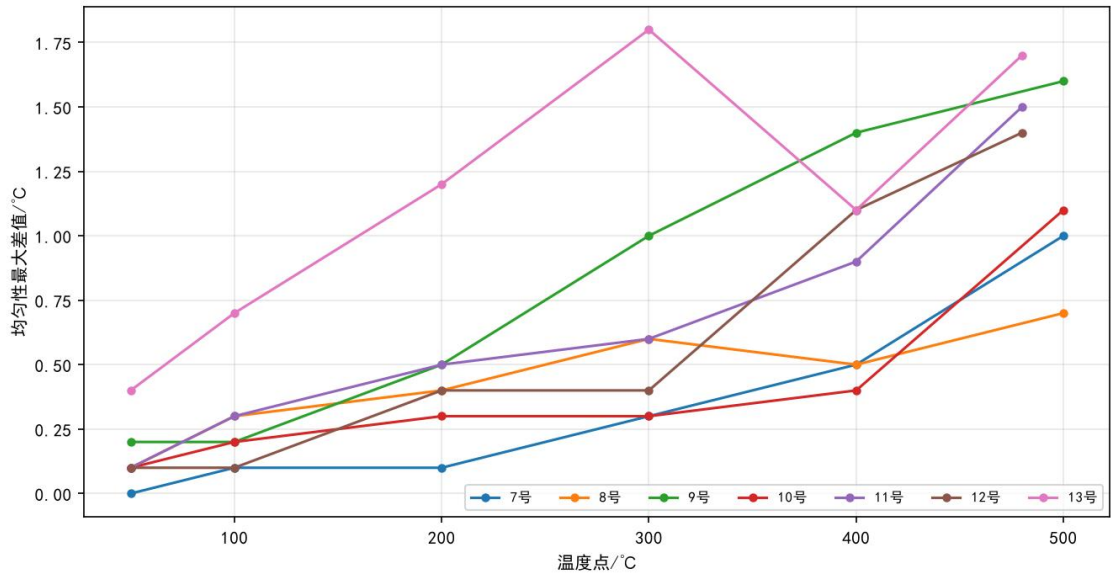


图 3 高温面辐射源温度均匀性最大差值随温度点变化

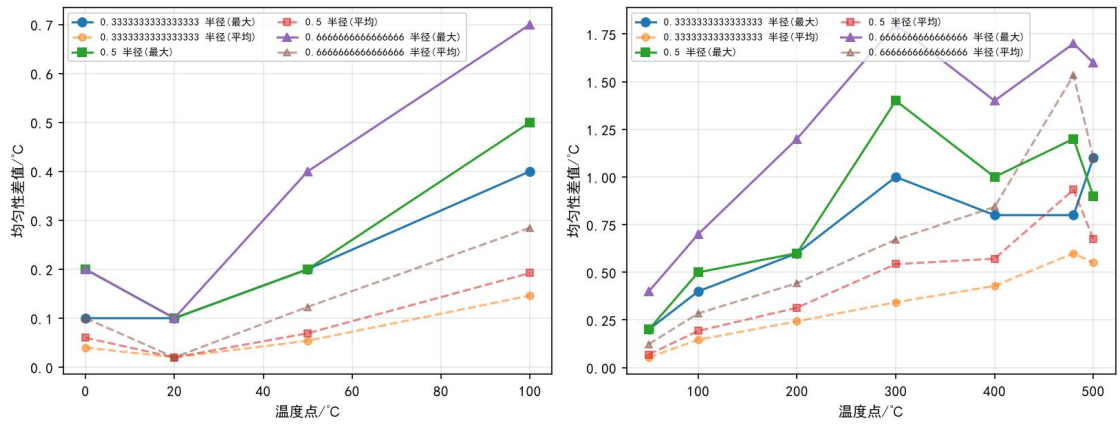


图 4 面辐射源分半径温度均匀性统计

对靶面直径不同的面辐射源，在标准源和被校源前方分别加装同直径恒温光阑后比较（数据取自《试验报告》表 6），加光阑与直测的最大差值不超过 0.2℃（见表 5 及图 5），各直径平均绝对差值在 0.025℃~0.048℃之间，验证了恒温光阑比较条件引入的附加误差可忽略，瞄准模型及光阑技术要求可行。

表 5 加装恒温光阑对测量结果的最大影响 ℃

面辐射源	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号	8 号	9 号	10 号	11 号	12 号	13 号
最大差值	0.1	0.1	0.1	0.0	0.2	0.0	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2

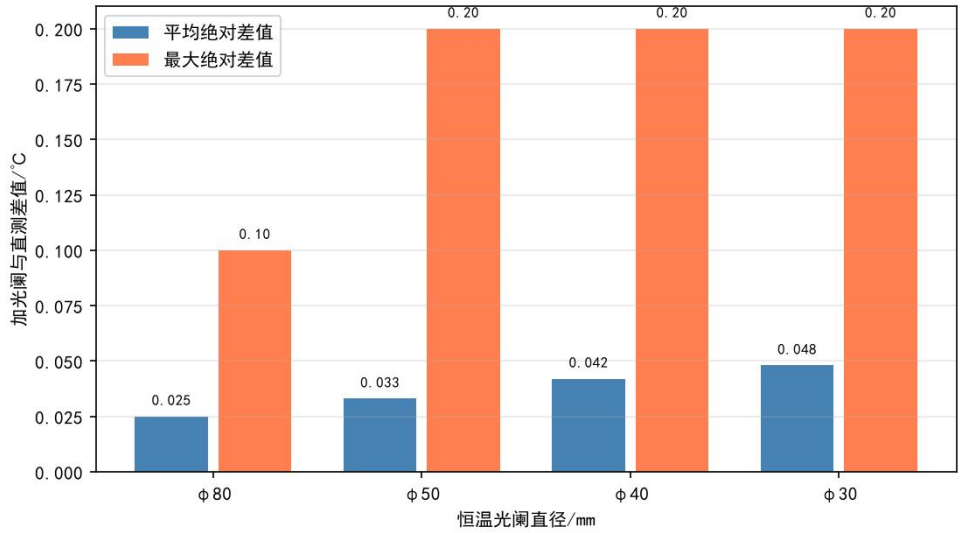


图 5 不同直径恒温光阑对测量结果影响的统计

6 低温防结霜结露措施的验证

面辐射源在低于露点（约 5℃以下）使用时面板结霜结露，1 号面辐射源 0℃点未加防护时面板出现结露、示值异常。采用磁吸有机玻璃罩罩住面源板面并通入氮气保

护后（见图 6、图 7），-15℃、0℃校准点面板无结霜结露，示值稳定，验证了该措施有效。

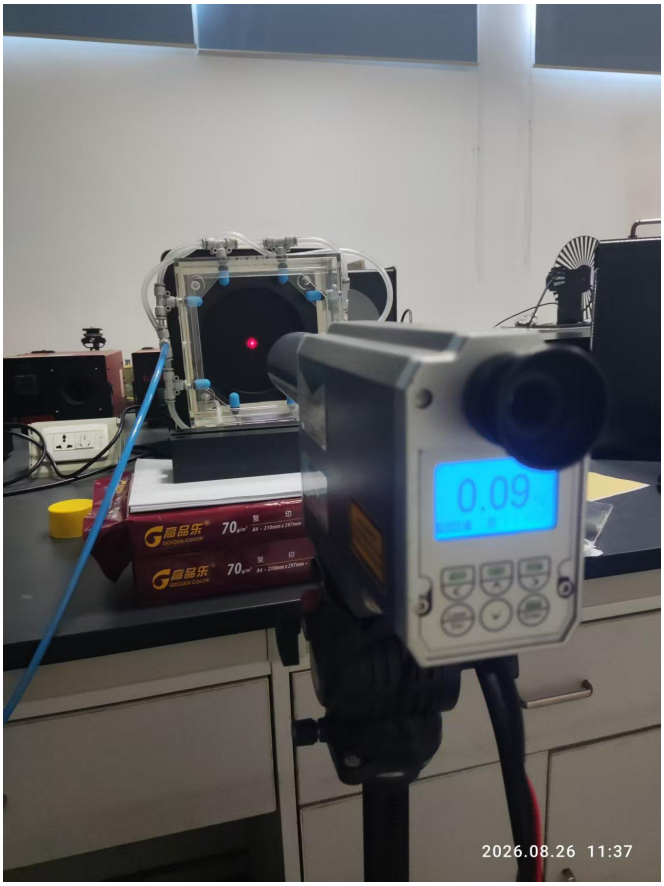


图 6 磁吸有机玻璃罩通氮气保护装置与激光瞄准现场

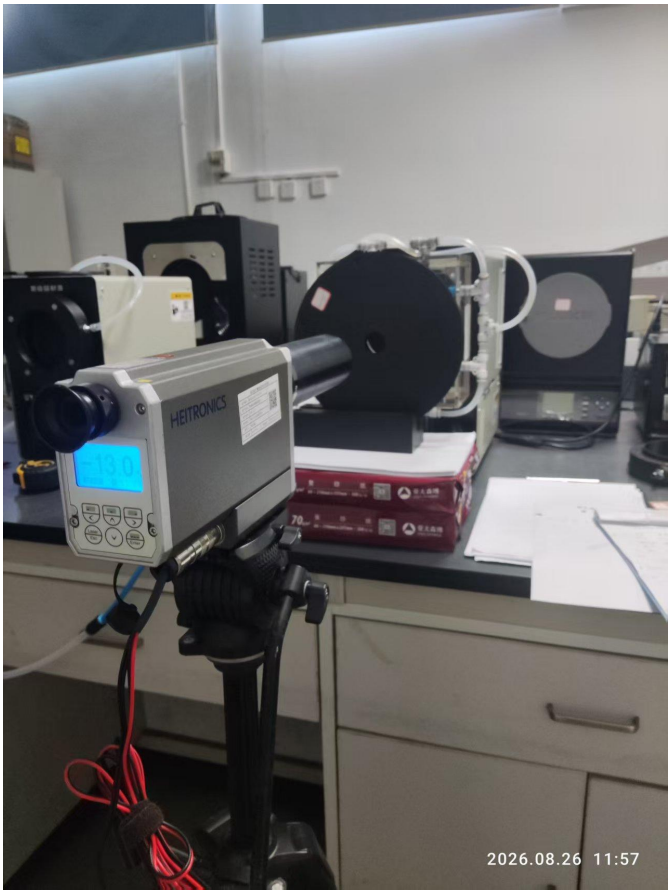


图 7 加罩通氮气后-15℃稳定工作（无结霜结露）

7 常温法向发射率核查方法的验证

结果表明该方法操作简便、重复性好，可作为面辐射源发射率的核查手段；核查结果可用于判断面辐射源发射率是否满足≥0.95 的参考指标，并为规范附录 H 发射率偏离修正提供输入参数。

8 总结

采用标准面辐射源+传递辐射温度计的比较法，适用于校准所有辐射测温用-15℃~500℃面辐射源，量值为标准面辐射源亮度温度，中低温段可有效降低辐射温度计漂移影响，推荐作为主要校准方法。

采用标准辐射温度计的直接测量法，适用于不具备标准面辐射源时面辐射源的校准，低温段应评估漂移及环境辐射影响。

恒温光阑比较条件可行，附加影响不超过 0.2℃；面辐射源温度均匀性、稳定性指标总体合理；低于 5℃校准应采用磁吸有机玻璃罩通氮气保护防止结霜结露；常温法向发射率核查方法简便可行。规范征求意见稿的校准方法合理、可行。