



了解火焰加热器中耐火材料的失效

SK 能源与摩根先进材料联合指南

目录

概要.....	3
指定适当的耐火材料.....	4
七种常见的耐火材料失效概述.....	5
1.纤维模块从顶部脱落或出现缝隙.....	5
2.砖壁出现故障——变形或倒塌.....	6
3.桥壁/洞壁倾斜或变形.....	7
4.浇注料开裂.....	7
5.地面开裂/隆起.....	8
6.对流段的对流浇注料/托臂损坏.....	8
7.配套不同材料.....	8
如何应对耐火材料失效.....	9
结论.....	10

概要

耐火材料和内衬可靠性是提高各行业的火焰加热器、焚化炉、窑炉和反应器性能的关键。

适当的耐火内衬不仅可以提高产量并最大限度降低能源成本，而且可以在耐火内衬 20 余年的整个生命周期内确保熔炉具有稳定的高性能。

耐火材料最终失效并不罕见，这可能导致能源浪费、性能下降，在某些极端情况下还会造成火焰加热器完全停机。停机，特别是计划外的停机，可能导致最终用户每天有超过 100 万美元的生产损失。耐火内衬可能只占整个火焰加热器的

5%左右，因此，要密切注意材料、设计、安装等整体耐火内衬质量，这是非常有意义的。

全球最大的私营炼油公司之一——SK 能源，以及先进材料技术开发和应用领域的世界领

先企业——摩根先进材料（摩根先进材料的热陶瓷部门），已经确定火焰加热器的许多耐火材料失效都是可以避免的。对于最终用户来说，火焰加热器耐火材料的大多数问题通常都可以归因于材料、设计或安装中的细小问题。

尽管 API 和 ASTM 都制定了耐火材料和耐火材料测试程序的明确标准，但是这些规范无法涵盖确保耐火材料最佳可靠性和最长使用寿命所需的所有细节。最终用户和耐火材料供应商进行深思熟虑和相互协作将有助于所有相关方更好地了解显著降低耐火材料失效可能性所需的细节。在本文中，SK 能源和摩根检测了一些最常见的耐火材料失效原因，以及工程师可以采取哪些措施来解决问题，并在将来避免这一问题。

指定适当的耐火材料

有一个常见的误解是：简单地指定最适当的耐火材料足以完全避免失效。虽然这个过程对于在火焰加热器耐火内衬的生命周期内确保其最佳性能和可靠性至关重要，但这一点不足以确保不会发生失效。工程师在监测耐火材料的性能时需要时刻留意，并在发现异常情况时迅速采取行动。然而，充分了解最终用户的操作条件，进而选择适当的耐火材料和内衬设计，应该是降低耐火材料失效风险的第一个也是最合乎逻辑的步骤。

最终用户与耐火材料供应商之间的合作是非常关键。对于耐火材料来说，每种应用的操作条件都会是独一无二的。适当的耐火材料应该具有抗温度应力和其他由操作参数引起的物理现象。必须对温度、启动/关闭、烟道气或工艺气体化学成分、所需的热损失等进行评估。耐火材料供应商通常能够提供自己的建议，但是买家根据自己的独特需求和经验进行详细说明也十分重要。

例如，运行中的熔炉会有各种不同的参数，耐火材料需要能够耐受这些参数。因此，非常重要的一点是为耐火材料设计师提供关于特定应用的操作条件的最完整准确的信息，以便做出最佳选择。选择适当的耐火材料时，更多的是将最佳材料和系统与特定应用的操作条件相匹配，但是时间和成本当然也要考虑在内。

与提供必要的材料和项目支持服务的耐火材料设计师合作也很重要。尽管大多数使用火焰加热器的最终用户将会在现场拥有一名具备丰富材料知识的人员，但是潜在的耐火材料失效和失效机制可能会超出其专业领域。在这种情况下，来自耐火材料供应商/设计师的响应支持有助于避免计划外的火焰加热器停机。

七种常见的耐火材料失效概述

人们往往会将耐火材料失效归因于材料质量问题。要想知道耐火材料为何失效，有时可能需要对许多相互关联的因素进行复杂的根本原因分析：材料与操作环境不匹配，选择的材料质量较差，耐火材料设计不当，安装技术不当。最终用户不会热衷于关停系统并进行这种分析，因此工程师和操作员获取关于耐火材料疲劳和失效的早期迹象方面的知识至关重要。一些最常见的耐火材料失效及其原因如下：

1. 纤维模块从顶部脱落或出现缝隙

这种情况可能是由许多原因造成的，并且通常涉及材料、设计或安装。首先，查看相关问题区域，并注意内衬的状况。受影响的是单个模块还是较大的区域？模块或锚固系统的任何部分是否仍然附着在顶部？周围的模块是否完好，几乎没有明显的缝隙？脱落到下面的碎片是什么样的？记住，事出皆有因。

如果一切都不见了（包括纤维和所有金属部件），那么可能是出现了安装问题，螺柱焊接不充分。也可能是由于潜在的杂质（例如硫或锈）腐蚀了外壳。在安装前不对外壳进行防腐蚀保护，使这两个问题变得越来越普遍。如果螺柱仍然存在，但是没有螺母，那么可能是因为没有拧紧。

如果大部分或所有纤维都不见了，但是支架锚固件仍然是完整的，那么其原因可能是机械损伤。两种可能性分别是在安装过程中发生损坏或者由于水的原因导致纤维承受过多重量。水不会影响纤维，但水的重量会影响纤维。如果设备正在架设或停机维护，且密封不良，那么周围环境里的水可能会泄漏到设备中。由于纤维的孔隙率为90%以上，因此纤维可以吸收比自身重量大得多的水。检查下面的纤维，观察是否被锚固件扯掉，或者出现水渍迹象。在某些情况下，即使是最仔细的检查也可能漏掉由水造成的损坏。

确定纤维中是否存在过大的缝隙。如果是的话，这些缝隙是什么样子的？有些是直线，有些分布在模块周围，有些位于一定的区域内。热点是否与这些缝隙有关？对于任何明显的缝隙，最好首先检查纤维的化学状况和设计。如果其中任何一项都没有得到充分的确定，那么随着时间的推移，将会出现多米诺骨牌效应，使更多模块受到影响。如果化学状况和设计符合要求，那么就要查看安装、操作问题等其他情况。在所有失效情况下，重要的是快速行动，确定根本原因，使最终用户恢复可靠的操作和生产

2. 砖壁出现故障——变形或倒塌

隔热耐火砖 (IFB) 在许多火焰加热器中都很常见，特别是在较低的火焰冲击墙体中。IFB 内衬自 20 世纪 30 年代以来一直存在。然而，由于它们导热性低、低蓄热性、和抗机械损伤的能力，它们可能仍然是最佳内衬选择。火焰加热器的砖壁区域通常是最高温度区域，需要高质量的材料和设计。

遇到 IFB 墙体问题时，需要注意几个关键点。和任何其他耐火内衬一样，该系统需要良好的材料、设计和安装。良好的设计指的是锚固件选择（冶金性能和尺寸），并考虑到 IFB 的可逆热膨胀。对于任何与耐火材料有关的问题，首先要收集事实，并对内衬状况和事实进行分析。

从设备外部观察是否存在热点。从内部观察时，墙体是否完好？如果是的话，可能备用内衬有问题。许多老旧内衬产品例如使用有机粘合剂粘合在一起的矿棉块作为后备内衬。经过多年的使用，粘合剂会烧尽，使板材变薄。操作过程产生的正常振动可能导致这些纤维塌陷，并形成空隙或热点。可以使用热点修复材料来修复这些空隙。热点修复材料可以从操作设备外部泵送，或者根据需要，通过泵送和/或喷射，在设备内部使用。

看设备内部时，要观察砖的正面。是开裂还是熔化？这可能表明熔炉运行温度较高，或者正在使用错误等级的砖。燃料燃烧时可能含有较高百分比的氢气，从而提高了火焰温度。此外，并非所有 IFB 都是相同的。相同温度等级的产品会有显著不同的配方和燃烧进度。这会使高温砖的性能产生很大的差异。理解这一点很重要，这有助于对比 IFB，并选择成本最低的产品。

是否热面砖完好但墙体出现弯曲？其原因可能涉及设计、安装和变化的操作条件等。通常这表现在膨胀缝和回接锚固系统中。所有 IFB 内衬都需要针对可逆热膨胀进行设计。如果没有足够的伸缩留量，砖体将向某个方向移动，这样就会看到弯曲。

砖内衬的寿命可以达到 30 年。如果熔炉操作在这段时间内发生变化，原有的耐火材料设计可能会变得不充足。生产率的增加也可能产生更高温度和更长火焰的附加效果。随着温度的升高，IFB 也会进一步膨胀。如果伸缩留量不再充足，墙体会膨胀并突出，从而出现弯曲。

通过这种额外的膨胀，墙体也将进一步垂直增长。回接支柱如果不够长，就会由此从回接座中脱离。记住，当炉温升高时，IFB 锚固件的温度将会增加。由于大多数金属锚固件在高温下非常脆弱，因此温度的升高可能会使锚固件不再具备使墙体保持原位或使自身长期保持正常状态的能力。

IFB 内衬也可能受到不良安装工艺的影响。有时一个隐秘的常见问题是膨胀缝用砂浆砌合，因此不能自由滑动。这种情况甚至可能根本看不到，因为邻近砖块的过剩砂浆会进入膨胀缝区域，造成同样的效果。





3. 桥壁/洞壁倾斜或变形

桥壁和洞壁基本上是无支撑的，因此材料选择和设计非常重要。墙体出现一定程度的倾斜虽然并不好，但却经常见到。但是，墙体如果倾斜过度，无疑会造成失效。在一个倾斜的墙体上，每块砖都不再具有均匀的柱状支撑。砖块中的压力点较高，这可能导致墙体失效。

如果墙体不直，那么可能就像地面不平一样简单。任何墙体都需要具备良好的垂直基础才能保持正常状态。

许多墙体问题的原因都是伸缩留量不充足。伸缩留量是根据操作条件设计的。如果设备超负荷运转，墙体设计可能无法完成任务。随着时间的推移，也可能出现塌陷问题。和 IFB 一样，并非所有耐火砖都是相同的，它们在配方、烧制和高温性能方面存在差异。

选择最佳产品的关键在于研究环境和热（工作温度）强度性能。一般来说，最佳产品通常不是成本最低的材料。成本在许多情况下是材料选择的驱动因素，但是不能牺牲可靠性。

4. 浇注料开裂

浇注料内衬是独一无二的。它们是唯一在离开耐火材料制造厂时未处于成品状态的产品，因此其总质量也高度依赖于安装人员。浇注料必须与适当温度范围的清水混合，由熟练的专业安装人员安装，能够最大限度发挥其性能（密度、强度等），并延长其使用寿命。在操作开始之前也必须将浇注料固化，并将水移除。如果这个过程没有以缓慢和受控的方式进行，浇注料就可能爆炸性碎裂。

浇注料会表现出来的另一种固有特性是一定程度的收缩裂缝，这是正常现象。正常的裂纹通常不会贯穿整个厚度。然而，如果裂纹确实渗透到深处，这可能意味着不可预见的机械应力。过度开裂可能表明安装不良。造成这种情况的原因通常是安装过程中用水量过多。

5. 地面开裂/隆起

如果温度自原始耐火材料设计以来显著增加，那么地面开裂/隆起可能是一个常见问题。和任何砖内衬一样，内衬必须设计伸缩留量。在正常运行过程中，膨胀缝的缝隙内容易填满碎屑，从而限制缝隙的热膨胀能力。在任何周转期间，如有可能，最好将这些膨胀缝抽真空，以免随着时间的推移产生碎屑堆积和可能的问题。

采用不同的材料尤其可能发生地面开裂。如果采用地面燃烧设备，就会使用一定材料等级的浇注料燃烧炉体。燃烧炉周围可能会采用不同的地面材料，因为它不需要承受火焰。如果没有设计和安装充足的膨胀缝，通常会在燃烧炉体的拐角处看到开裂。

6. 对流段的对流浇注料/托臂损坏

浇注料在施工过程中容易受到损坏。在许多情况下，对流段的浇注料在被转移到作业现场架设之前，在钢铁制造车间的半控制条件下进行安装。考虑到从制造厂到作业现场的距离可能跨越半个地球，不难想象设备在不平稳的运输状况下可能会出现损坏。

一些损坏往往表现为可见的裂纹，并且通常贯穿整个厚度。这不同于通常不会贯穿整个厚度的正常收缩裂缝。你还可能注意到表面出现碎裂，这表明钢的定向机械弯曲。托臂从基底内衬突出时可能特别容易受到损坏。

应制定和验证适当材料选择、内衬设计、安装和提升/移动程序，以最大限度降低损坏风险。API 560（火焰加热器）、API 936（整体材料 QA/QC）等文件涵盖了材料设计和材料质量的一些最低要求。最终用户、EPC 或制造商的规格说明书通常会涵盖安装实体的操作和运输。

如有明显损坏，应进行修复。损坏的严重程度将决定适当的修复程序。通常情况下，如果认为必须进行修复，则应谨慎拆下受影响的内衬部分，以免损坏周围未损坏的材料。修复面积至少为包含三个锚固件的区域。

7. 匹配不同材料

检修门（纤维和砖）、观察口（IFB/浇注料或真空成型/纤维模块）、烧嘴砖、泄压门等开口周围往往会采用不同的耐火材料。不同的材料也具有不同的耐火性能，这使均匀设计变得困难。

在许多情况下，我们在上文概述的问题最终将导致高温的火焰加热器气体通过受损的耐火内衬，使外壳上出现热点。如果在观察口和门口周围看到热点，这些接口可能设计不当。将动态区域密封是非常困难的，特别是使用不同的耐火材料时。对于观察口，你会希望使用相同的耐火材料，避免出现设计问题，并实现最佳密封。当管道从炉内穿到炉外时，管道密封件还可以提供人员保护，并阻止环境空气进入炉内。就观察口的情况为例。如果采用 IFB 墙体，那么最好把观察口开在 IFB 墙体上，尽管这确实需要一些技巧和良好的设计，但是可以轻松完成。为了避免出现匹配膨胀材料（IFB），而非匹配伸缩特性不同的材料（浇注料）的问题，需要采用良好的高温纤维膨胀缝。膨胀缝要在高温下保持弹性，以克服差异移动。

采用纤维墙体时，通常会设计真空成型的观察口。如果用模块将其围住，就需要能够收缩的刚性和弹性材料。同样在这两者之间要严谨的使用能够在运行中保持弹性的高温纤维接缝。这个潜在问题可以很容易的通过安装在现场进行切割的模块观察口事先解决。这些材料已经非常成功地使用了很多年。



如何应对耐火材料失效

耐火材料失效的原因很多。在耐火材料选择、内衬设计和安装过程中避免或预测所有这些原因都是非常困难的。许多潜在的问题可以通过明确说明操作条件、选择适当的材料和遵循最佳耐火材料设计和安装来预防。在大多数情况下，对耐火材料失效来说更多的是应对而非预防。了解在发生失效时应采取哪些步骤，将有助于工程师最大限度减少未来失效的风险，并避免系统完全停机的情况。

1. 首先隔离区域。一旦确定失效问题，应尽快完成这项工作。人员安全至关重要，修复速度始终是一个问题。然而，重要的是充分考虑潜在的解决方案，认识到仓促完成修复可能产生的后果。
2. 在受影响的区域使用蒸汽冷却表面。许多耐火材料失效问题可以在熔炉运行的同时得到解决，但是首先需要冷却表面，以免造成人身伤害和设备的附加损坏。
3. 咨询现场专家。大多数最终用户会雇用具备大量材料知识的人员，他们能够在熔炉运行的同时确定耐火材料的修复方法。
4. 与耐火材料设计师联系。如果问题无法在内部得到解决，请咨询耐火材料设计师的建议。如果这样做是安全的，那么应该在熔炉运行的同时这样做，通常他们能够帮助你远程解决问题。通过使用基于纤维的热点修复材料可以缓解许多问题，这种材料可以在设备保持运行时从外部泵送至热点区域。
5. 如果问题严重到必须关停设备，那么需要通过以下方式确定根本原因：
 - a) 检查热点区域。有很多线索可以让你得出怀疑的结论。
 - b) 拆下并测试耐火材料。是否正确制造？是要求这样做还是期望这样做？
 - c) 检查内衬设计。目前是否能够满足设备运行？设备运行是否有变化？
 - d) 检查不良安装的迹象。有一些线索也可以引导你进行这一步骤。
6. 进行根本原因分析。这提供了长期解决问题的最佳机会。根本原因只能是一定数量的可能性。原因是否在于材料？内衬设计？安装？操作——改变的操作条件或混乱的操作条件？



结论

由于耐火材料问题而关停熔炉应该是最后的手段，因为这会浪费运营商的能源、时间和金钱。重要的是要注意，大量失效的原因在于耐火材料的使用环境。操作过程中常见的一个突出问题是提高熔炉温度的同时不考虑对原始耐火材料设计的影响，而自最初的规格说明书以来，各种要求会发生变化。要经常重新检查你正在使用的耐火材料。在规格设计阶段进行高于产能的规划而非低于产能的规划是有益的，这样可以尽量减少耐火材料失效的风险。因此，运营商和耐火材料设计师之间的合作至关重要。摩根先进材料与 SK 能源有着长期的合作关系，两家企业携手合作，持续为每种应用寻找适当的耐火材料。理解和避免耐火材料失效既是材料制造商的责任，也是运营商的责任。有许多外部因素会造成耐火材料失效，因此，快速确定耐火材料失效并了解背后的原因可以确保熔炉运营商充分利用其耐火材料，最大限度提高熔炉整体性能，并可能减少数百万美元的损失。

联系摩根先进材料

欧洲

Morgan Advanced Materials
Tebay Road
Bromborough, Merseyside
United Kingdom
CH62 3PH

T +44 (0)151 334 4030
europesales@morganplc.com

北美

Morgan Advanced Materials
2102 Old Savannah Road
Augusta, Georgia
United States
30906

T +1 (706) 796 4200
nasales@morganplc.com

南美

Rua Darci Pereira 83
Distrito Industrial de Santa Cruz
Rio de Janeiro
Brazil
23565-190

T+55 (21) 3305 7400
sasales@morganplc.com

亚太

Morgan Advanced Materials
150 Kampong Ampat
05-06A
KA Centre
Singapore 368324

T +65 6595 0000
asiasales@morganplc.com