

高温环境下建筑钢结构稳定性与变形控制

文 / 崔玉玲 起航(山东)投资建设集团有限公司

李道宾 山东盛桥实业集团有限公司

冯广冉 山东盛桥实业集团有限公司

摘要: 在建筑领域, 钢结构因其高强度、轻质等优势得到广泛应用。高温环境对建筑钢结构的稳定性与变形控制带来了严峻挑战。高温会使钢材的力学性能发生变化, 如屈服强度降低、弹性模量减小等。当建筑处于火灾等高温场景时, 钢结构可能因承载能力下降而发生变形甚至坍塌。深入研究高温环境下建筑钢结构的稳定性与变形控制, 对于保障建筑结构安全、减少灾害损失具有重要意义, 也是当前建筑工程领域亟待解决的关键问题之一。

关键词: 高温环境; 建筑钢结构稳定性; 变形控制

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.07.013

引言

随着现代建筑的不断发展, 建筑钢结构在各类建筑中扮演着愈发重要的角色。但高温环境的存在, 给钢结构的稳定性和变形控制提出了更高要求。在高温作用下, 钢结构内部应力分布会发生改变, 进而引发结构变形。这种变形若得不到有效控制, 将严重影响建筑的正常使用和安全性能。对高温环境下建筑钢结构稳定性与变形控制进行深入探究, 有助于完善钢结构设计和施工技术, 推动建筑行业的安全发展。

一、高温环境下建筑钢结构稳定性与变形控制的原则

(一) 遵循科学设计原则

在建筑钢结构的设计阶段, 需充分考虑高温环境的影响。要依据具体的高温工况, 如高温的持续时间、温度的变化范围等, 进行精确的力学分析和结构计算。合理确定结构的形式、构件的尺寸和连接方式, 确保结构在高温下具有足够的承载能力和稳定性。例如, 对于承受较大高温荷载的部位, 应适当增加构件的截面尺寸或采用高强度钢材。要遵循相关的设计规范和标准, 保证设计的科学性和合理性。在设计过程中, 还应进行多方案的比较和优化, 以选取最适合高温环境的设计方案, 从源头上保障钢结构的稳定性和变形控制。

(二) 重视材料特性原则

钢材在高温下的力学性能会发生显著变化, 因此在选择钢材时, 要充分重视其高温特性。应选用具有良好耐高温性能的钢材, 如耐热钢等, 这些钢材在高温下能保持较好的强度和韧性, 减少因高温导致的钢材性能劣化对结构稳定性的影响。还需考虑钢材的热膨胀系数, 尽量选择热膨胀系数较小的钢材, 以降低热膨胀引起的结构变形。在材料的采购和使用过程中, 要严格把控质量, 确保钢材的性能符合设计要求。要对钢材进行必要的检测和试验, 掌握其在高温下的实际性能, 为结构的稳定性和变形控制提供可靠的材料保障。

二、高温对建筑钢结构稳定性的影响

(一) 高温下钢材力学性能的变化

随着温度的升高, 钢材的屈服强度和弹性模量会逐渐降低。屈服强度的降低意味着钢材抵抗变形的能力减弱, 在相同荷载作用下, 钢材更容易发生塑性变形。弹性模量的减小则会使钢材的刚度下降, 结构的变形增大。当温度达到一定程度时, 钢材的强度和刚度会大幅降低, 甚至可能失去承载能力。例如, 在火灾等高温环境下, 钢材的屈服强度可能会降低到常温下的几分之一, 导致结构发生严重变形甚至倒塌。

(二) 温度场分布对结构稳定性的影响

在高温环境下, 结构内部的温度场分布往往是不均匀的。这种不均匀的温度场会导致结构各部分产生不同程度的热膨胀, 从而引起结构内部的应力分布不均匀。例如, 在阳光直射的一侧, 结构表面温度较高, 热膨胀较大; 而背阴一侧温度相对较低, 热膨胀较小。这种不均匀的热膨胀会使结构产生弯曲变形, 增加结构的附加内力。当附加内力超过结构的承载能力时, 就会影响结构的稳定性。不均匀的温度场还可能导致结构局部温度过高, 使局部钢材的力学性能劣化, 进一步降低结构的稳定性。

(三) 高温引发的结构内力重分布

在常温下, 结构的内力分布是按照设计荷载和结构形式进行分配的。当结构处于高温环境时, 由于钢材力学性能的变化和温度场分布的不均匀, 结构的内力会重新分布。例如, 高温区域的钢材强度降低, 会使该区域承担的内力减小, 而相邻低温区域的钢材则会承担更多的内力。这种内力重分布可能会导致某些构件的内力超过其设计承载能力, 从而引发结构的局部破坏。

(四) 不同构件在高温下的稳定性表现

建筑钢结构中的不同构件在高温下的稳定性表现存在差异。例如, 柱构件在高温下主要承受轴向压力和因热膨胀产生的附加内力。随着温度的升高, 柱构件的强度和刚度降低, 可能会发生失稳现象。梁构件在高温下除了承受自身的荷载外, 还会受到不均匀温度场引起的

弯曲变形和内力重分布的影响。当梁构件的变形过大时，会影响其正常的受力性能，甚至导致结构的破坏。

（五）高温时长对结构整体稳定性的影响

在短时间的高温作用下，钢材的力学性能虽然会有所降低，但结构可能还能够承受一定的荷载，保持相对稳定。然而，随着高温作用时间的延长，钢材的性能会持续劣化，结构的变形和内力重分布会不断加剧。例如，在长时间的火灾高温作用下，钢材的强度和刚度会逐渐丧失，结构的变形会不断增大，最终可能导致结构的整体倒塌。高温时长还会影响结构的耐火极限，当高温作用时间超过结构的耐火极限时，结构的稳定性将无法保证。

三、建筑钢结构在高温环境下的变形特征

（一）热膨胀导致的结构变形规律

当钢材受热时，其原子间的距离会增大，从而导致钢材体积膨胀。在结构中，这种热膨胀会引起构件的伸长和结构整体的变形。热膨胀引起的结构变形规律与温度的变化、钢材的热膨胀系数以及结构的约束条件等因素密切相关。一般来说，温度升高幅度越大，结构的变形也就越大。钢材的热膨胀系数越大，相同温度变化下的变形也会越大。而结构的约束条件则会限制结构的自由膨胀，从而在结构内部产生附加应力。例如，在固定端约束的情况下，构件的热膨胀会受到限制，产生较大的附加应力，可能导致构件的局部变形或破坏。在设计和分析建筑钢结构时，需要充分考虑热膨胀引起的变形规律，合理设置结构的约束条件，以减少附加应力的产生。

（二）不均匀温度场下的变形特点

在实际的高温环境中，建筑钢结构往往处于不均匀的温度场中。这种不均匀的温度场会导致结构各部分的热膨胀程度不同，从而产生不均匀的变形。不均匀温度场下的变形特点主要表现为结构的弯曲变形和扭曲变形。例如，在阳光直射的一侧，结构表面温度较高，热膨胀较大；而背阴一侧温度相对较低，热膨胀较小。这种不均匀的热膨胀会使结构产生弯曲变形，导致结构的轴线发生偏移。当结构不同部位的温度变化不一致时，还可能引起结构的扭曲变形，使结构的平面形状发生改变。不均匀温度场下的变形会增加结构的附加内力，影响结构的稳定性和正常使用。在设计和分析建筑钢结构时，需要考虑不均匀温度场下的变形特点，采取相应的措施来减少变形的影响。

（三）节点部位在高温下的变形情况

节点部位是建筑钢结构中连接构件的关键部位，在高温下容易出现变形问题。节点部位的变形主要是由于钢材在高温下的力学性能变化、温度场分布不均匀以及节点连接的松动等原因引起的。在高温下，钢材的屈服强度和弹性模量降低，节点部位的承载能力也会相应下降。不均匀的温度场会使节点各部分产生不同程度的热膨胀，导致节点的变形。节点连接在高温下可能会出现松动，进一步加剧节点的变形。节点部位的变形会影响结构的整体性和稳定性，导致结构的传力路径发生改变，

增加结构的附加内力。例如，在焊接节点中，高温可能会使焊缝处的钢材性能劣化，出现裂缝和变形；在螺栓连接节点中，高温可能会使螺栓松动，降低节点的连接强度。在设计和施工中，需要重视节点部位在高温下的变形情况，采取有效的加固和防护措施。

（四）结构体系在高温下的整体变形模式

建筑钢结构的结构体系在高温下会呈现出特定的整体变形模式。在高温作用下，结构体系的各个构件会发生不同程度的变形，这些变形相互耦合，形成结构体系的整体变形。常见的整体变形模式包括弯曲变形、剪切变形和扭转变形等。例如，在框架结构体系中，高温可能会使柱构件发生轴向伸长和弯曲变形，梁构件发生弯曲和扭转变形，从而导致整个框架结构发生侧向位移和扭曲。在网架结构体系中，高温可能会使杆件发生伸长和弯曲变形，导致网架结构的形状发生改变。结构体系的整体变形模式与结构的形式、构件的布置以及温度场的分布等因素密切相关。了解结构体系在高温下的整体变形模式，对于评估结构的稳定性和采取相应的变形控制措施具有重要意义。

（五）反复高温作用下的累积变形分析

在一些特殊的高温环境中，建筑钢结构可能会受到反复高温作用。例如，在工业厂房中，由于生产工艺的需要，可能会频繁地出现高温工况。在反复高温作用下，结构的变形会逐渐累积，导致结构的变形不断增大。这种累积变形是由于钢材在每次高温作用下都会发生一定程度的塑性变形，而在降温过程中，塑性变形无法完全恢复，从而使变形逐渐累积。累积变形会使结构的应力状态发生改变，增加结构的附加内力，降低结构的稳定性和承载能力。例如，在反复高温作用下，结构的某些部位可能会出现疲劳裂缝，进一步削弱结构的性能。在设计和评估建筑钢结构时，需要考虑反复高温作用下的累积变形问题，采取有效的措施来控制累积变形的发展，保证结构的长期稳定性。

四、高温环境下建筑钢结构变形控制措施

（一）结构设计阶段的变形控制策略

在建筑钢结构的设计阶段，应采取有效的变形控制策略。要合理选择结构形式，根据建筑的功能要求和高温环境特点，选择具有良好稳定性和抗变形能力的结构形式。例如，对于高温环境较为严重的建筑，可以采用空间结构形式，如网架结构、壳结构等，这些结构形式具有较高的刚度和稳定性，能够有效地抵抗高温引起的变形。要进行精确的结构计算和分析，考虑高温环境下钢材的力学性能变化、温度场分布以及结构的内力重分布等因素，准确计算结构在高温下的变形情况。根据计算结果，合理调整结构的构件尺寸和布置，确保结构在高温下的变形满足设计要求。在设计中还应设置适当的变形缝和伸缩缝，以释放结构在高温下的变形，避免因变形受阻而产生过大的内力。

（二）选用合适钢材及防护材料控制变形

在钢材的选择方面，应优先选用具有良好耐高温性能的钢材，如耐热钢、不锈钢等。这些钢材在高温下能

够保持较好的强度和韧性，减少因高温导致的钢材性能劣化对结构变形的影响。还可以根据具体的高温环境要求，选择合适的热膨胀系数的钢材，以降低热膨胀引起的结构变形。在防护材料的选用方面，可以采用防火涂料、隔热材料等对钢结构进行防护。防火涂料能够在高温下形成隔热保护层，延缓钢材温度的升高，减少钢材的性能劣化；隔热材料则可以有效地阻隔热量的传递，降低结构内部的温度，从而控制结构的变形。



图1 防火涂料施工

(三) 基于温度监测的实时变形调控方法

基于温度监测的实时变形调控方法是一种有效的变形控制手段。在建筑钢结构中安装温度传感器和变形监测设备，实时监测结构的温度变化和变形情况。当监测到结构的温度或变形超过设定的阈值时，及时采取相应的调控措施。例如，可以通过调整空调系统、通风系统等方式来控制结构的温度，降低结构的变形。也可以采用预应力技术，根据结构的变形情况，适时调整预应力的的大小，以抵消高温引起的变形。还可以利用智能材料，如形状记忆合金等，在温度变化时自动产生变形，对结构的变形进行补偿和调控。通过实时监测和调控，能够及时发现和处理结构的变形问题，保证结构在高温环境下的稳定性和安全性。



图2 温度监测

(四) 构造措施对变形的抑制作用

合理的构造措施能够有效地抑制建筑钢结构在高温环境下的变形。在结构构造方面，可以设置加强肋、加劲板等构件，提高结构的刚度和稳定性。加强肋和加劲板能够增加构件的截面惯性矩，抵抗高温引起的弯曲变形。还可以在结构中设置支撑体系，如柱间支撑、水平支撑等，增强结构的整体稳定性，防止结构在高温下发生侧向位移和扭曲变形。在节点构造方面，应采用合理的连接方式和构造形式，确保节点在高温下的可靠性。例如，采用焊接和螺栓混合连接的方式，既能保证节点的连接强度，又能在一定程度上适应高温下的变形。还可以在节点部位设置柔性连接装置，释放节点的变形，减少附加应力的产生。

(五) 后期维护及修复对变形的控制手段

后期维护及修复工作对于控制建筑钢结构在高温环境下的变形具有重要意义。在日常维护中，要定期对钢结构进行检查和维护，及时发现和处理结构的损伤和变形问题。例如，检查钢结构的表面涂层是否完好，如有脱落或损坏，应及时进行修补；检查节点连接是否松动，如有松动，应及时进行紧固。对于已经发生变形的结构，应根据变形的程度和原因，采取相应的修复措施。如果变形较小，可以通过调整结构的内力分布、加固构件等方式进行修复；如果变形较大，影响到结构的安全使用，则需要对结构进行整体修复或改造。通过后期的维护和修复工作，能够及时消除结构的安全隐患，保证结构在高温环境下的长期稳定性。

结语

高温环境下建筑钢结构的稳定性与变形控制是个复杂且关键的研究课题，通过深入研究钢材在高温下的性能变化规律，以及采取有效的防护和控制措施，能够显著提高钢结构在高温环境中的稳定性，减少变形的发生，为建筑钢结构在高温环境下的安全应用提供更坚实的保障，确保建筑的可靠性和耐久性。

参考文献

- [1] 尤洋. 螺纹锚固单边螺栓节点高温下及高温后受拉性能研究 [D]. 山东大学, 2022.
- [2] 刘海定. 新型镍基合金 945A 强化技术及高温形变组织结构稳定性研究 [D]. 湖南大学, 2022.
- [3] 陈柳萍. Co-V 基高温合金中 γ' 相结构稳定性和热力学性质的理论研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2020.
- [4] 冯阳. 460MPa 级建筑结构用钢设计及组织性能研究 [D]. 东北大学, 2020.
- [5] 张超华. 基于有限元法的建筑钢结构焊接应力与变形预测及控制研究 [D]. 重庆大学, 2020.
- [6] 郭华泾. 既有工业建筑钢结构疲劳性能预后分析及完整性评估 [D]. 东南大学, 2020.
- [7] 崔丹丹. 高温下钢结构压杆的弹塑性稳定分析 [D]. 哈尔滨工程大学, 2019.