

钢结构抗火设计研究与防护进展

王 明

中国二十二冶集团有限公司, 河北 唐山 064000

[摘要]文中综述了钢结构抗火设计与防护技术的研究进展。重点介绍钢材在高温下的力学性能退化机理和试验表征方法,评述了钢结构火灾响应的影响因素和数值模拟技术,展望了新型钢结构防火保护材料的研究方向。钢结构建筑的火灾安全设计需要从材料、构件、结构、防护等多角度综合考虑,协同运用试验研究、理论分析和数值模拟等手段,优化钢结构的耐火设计方法。

[关键词]钢结构; 建筑防火; 抗火设计

DOI: 10.33142/ec.v7i8.12964

中图分类号: TU391

文献标识码: A

Research and Protection Progress on Fire Resistance Design of Steel Structures

WANG Ming

China MCC22 Group Corporation Ltd., Tangshan, Hebei, 064000, China

Abstract: This article reviews the research progress of fire resistance design and protection technology for steel structures. It focuses on the mechanical performance degradation mechanism and experimental characterization methods of steel at high temperatures, evaluates the influencing factors and numerical simulation techniques of steel structure fire response, and looks forward to the research direction of new steel structure fire protection materials. The fire safety design of steel structures requires comprehensive consideration from multiple perspectives such as materials, components, structures, and protection, and the collaborative use of experimental research, theoretical analysis, and numerical simulation methods to optimize the fire resistance design method of steel structures.

Keywords: steel structures; building fire prevention; fire resistant design

引言

钢材在高温下容易发生强度退化、刚度退化和稳定性丧失,导致钢结构在火灾中提前破坏,引发严重的生命财产损失。因此,深入认识钢结构的火灾响应机理,发展有效的抗火设计方法和防护技术,可以提高钢结构建筑的火灾安全性能。本文将全面回顾钢结构抗火领域的研究现状,剖析存在的不足,展望未来的重点研究方向。

1 钢材在高温下的力学性能退化

1.1 常温下钢材的力学性能

钢材的强度一般用屈服强度、抗拉强度来衡量。结构用钢的屈服强度通常在 235~460MPa 之间,而抗拉强度可达 370~720MPa。具有良好承载能力的钢材的屈服、抗拉强度比一般在 1.4~1.7 之间。钢材的塑性主要取决于其延展率,优质结构钢的延伸率一般在 20%以上^[1]。钢材的塑性使其能够通过显著的变形来释放应力集中,提高结构的变形能力和倒塌阻力。钢材在交变载荷作用下会发生疲劳损伤,其疲劳性能决定了构件在动力荷载下的安全性。影响钢材疲劳性能的因素包括应力水平、加载频率、应力集中以及环境介质。

1.2 高温对钢材力学性能的影响机理

钢结构在火灾高温作用下其力学性能会发生显著退化,主要表现为强度降低、刚度下降及塑性降低。高温对

钢材力学性能的影响主要归因于微观组织结构的变化。当钢材温度升高时,原子的热运动加剧,晶格发生膨胀导致钢材的密度下降。高温激活了位错的运动,位错密度急剧增加,成大量的亚晶界与位错缠结,钢材的位错强化作用减弱。此外高温下会发生晶粒长大,大角晶界减少,细晶强化效应降低。钢材的弹性模量反映了其抵抗弹性变形的能力。随着温度的升高,钢材中原子间的平均距离增大,键合力减弱,导致弹性模量下降^[2]。当温度超过一定值时,弹性模量的降低变得更加显著。刚度的降低使得钢结构在火灾高温下更容易发生变形。

除了常见的奥氏体钢,许多新型钢材如马氏体钢、双相钢等在高温下表现出不同的力学性能退化机理。例如,马氏体钢在高温下会发生回火,碳化物析出长大,亚结构发生转变导致其强度下降更加显著。而双相钢中软硬相含量的变化以及残余奥氏体的分解等因素也会影响其高温力学性能。

2 火灾工况下钢结构的性能分析方法

2.1 钢结构火灾响应的影响因素

火灾参数如火灾温度、持续时间、升温速率直接决定了钢结构构件所承受的温度荷载。火灾温度越高、持续时间越长,钢材的力学性能退化越严重,钢结构的承载能力下降也就越明显。不同的火灾工况会导致截然不同的钢结

构火灾响应后果。再就是钢结构自身的因素,包括钢材的材料性能、构件的几何参数以及结构体系的特点等。高强钢材虽然在常温下具有更高的承载效率,但其高温强度下降更为显著。构件的截面形状、尺寸、细长比等几何参数影响了其在高温下的稳定性和变形能力。结构体系的超静定度、连续性等因素也会影响钢结构在火灾下的力学重分布特性。

火灾蔓延过程中,钢结构的边界约束状态可能发生改变,导致结构的静力不确定性。例如,梁端的半刚性性质在高温下会发生改变,柱脚固定端在基础破坏后会丧失约束。边界条件的变化会引起钢结构内力重分布,导致局部构件承载能力的下降从而引发结构破坏。钢结构的初始缺陷如构件的初始弯曲度、残余应力等会降低构件的屈曲承载力,在高温荷载下更容易引起稳定性问题。残余应力的存在会导致构件在受热过程中产生附加的变形和应力。

2.2 钢结构在火灾工况下的力学分析模型

目前,已经发展出的钢结构火灾响应分析模型可大致分为三类,分别是简化计算方法、先进分析方法和数值模拟方法^[3]。简化计算方法通常基于经验公式,虽然计算效率高但适用条件有限。例如,标准火灾曲线虽被广泛采用但与真实火灾参数差异较大。另一方面,基于跨中位移和承载力的快速评估公式能较好地预测钢梁在火灾中的极限状态,但对于复杂结构难以适用。

先进分析方法考虑了材料和几何非线性,能够描述钢结构在高温下的大变形行为。其中矩阵位移法可用于钢架结构的火灾响应分析只需对刚度矩阵进行修正即可考虑温度效应。有限条带法通过将板壳结构离散为条带单元,在节省计算成本的同时能考虑温度沿高度方向的梯度分布。

数值模拟方法中,有限元法以其通用性及高精度受到青睐。通过耦合热分析与力学分析,有限元方法能够准确预测钢结构构件乃至整体在火灾中的温度场。采用多尺度建模策略可在合理计算成本下实现精细化的火灾响应分析。然而钢结构在高温下会发生复杂的非线性大变形,对单元类型、材料模型和求解算法提出了较高要求。

2.3 基于有限元的钢结构火灾响应数值模拟技术

有限元法是目前钢结构火灾响应数值模拟的主要方法。通过有限元分析,可以在计算机上实现钢结构从材料到构件再到整体结构在火灾下的精细化三维建模,预测结构的温度场演化和热-力耦合作用下的变形、应力状态,为钢结构耐火设计提供重要依据。

钢结构的火灾有限元分析一般分为两个步骤——热分析和热-力耦合分析。热分析考虑钢构件与火环境的热交换,计算钢结构内部的瞬态温度场分布。在此基础上热-力耦合分析以热分析的温度场作为荷载,计算钢结构在温度作用下的应力应变响应。两个分析步骤可采用不同的有限元模型和单元类型。

在热分析中,需要对钢构件、防火涂层以及周围介质

进行空间离散并合理选择热单元类型。考虑到温度在构件厚度方向的梯度变化一般采用体单元对钢构件进行建模。对于防火涂层,可采用壳单元或实体单元模拟。热分析需要准确给定钢材和防火涂层的热物性参数,以及火灾环境与结构之间的热边界条件。辐射和对流换热系数的选取对于热分析结果有重要影响。

在热-力耦合分析中,钢构件采用梁单元、壳单元或实体单元建模。梁单元计算效率高但难以考虑局部屈曲效应,壳单元能够描述钢构件的面外变形但在处理材料非线性时有局限,实体单元可准确模拟钢材的三维应力状态但计算成本较高。热-力耦合分析的关键在于高温材料本构模型,需准确描述钢材随温度变化的应力-应变关系,并考虑蠕变和相变等效应。同时在几何模型中引入初始缺陷和残余应力对于模拟构件的极限承载能力影响较大。

钢结构火灾响应涉及较多尺度效应。宏观结构响应与材料的细观组织演化和缺陷的微观力学行为密切相关。多尺度建模是火灾响应模拟的新趋势,通过将不同空间尺度的力学行为桥接,可实现力学机理与工程应用的紧密结合。但如何平衡计算精度和效率,发展合理的多尺度耦合计算方法仍需深入研究。

3 钢结构的防火保护技术

3.1 被动防火保护方法及其特点

防火涂料通常由基料、助剂和颜料组成,施工时采用喷涂或刷涂的方式涂覆在钢构件表面。遇火时防火涂料直接膨胀形成致密的泡沫炭化层,该炭化层导热系数低能有效阻隔钢构件与火环境的热交换。防火涂料的优点是施工方便、涂层厚度易于控制、对钢构件外观影响小但其抗冲击性能较差,在结构变形时容易发生脱落。

板材包覆法是将耐火板材固定在钢构件外侧,利用板材良好的隔热性能降低钢构件的温升速率。常用的包覆材料有石膏板、矿棉板、陶瓷纤维毡等。与防火涂料相比,防火板材的机械强度和耐久性更好,不易损坏。但板材包覆施工繁琐,操作不当时容易在板材接缝处产生热桥,而且包覆后会显著增大钢构件的截面尺寸。

浇注法则是先在钢构件表面设置模板,然后在钢构件与模板之间浇注隔热材料,待材料凝固后拆除模板。浇注法常用的防火材料有膨胀珍珠岩、发泡水泥等,这些材料导热系数低且比热容大,对钢构件的保护效果好。但浇注法工序多,施工繁琐且浇注后钢构件截面大幅增加会影响钢结构的受力特性。浇注法多用于建筑设备管线等隐蔽工程的防火。

钢管混凝土构件将钢材置于混凝土保护层内,既可充分发挥钢-混凝土两种材料的受力性能,又能提高构件的耐火极限。与裸露钢结构相比,在相同火灾条件下,钢管混凝土构件内部钢材的温升速度显著降低,高温屈服和蠕变等失效模式得到有效缓解。因此钢管混凝土构件可作为

钢结构的耐火构造措施,在高层建筑和大跨度钢结构中得到应用较多。

3.2 主动防火保护系统的工作原理与应用

主动防火保护系统通过自动探测和自动抑制控制火灾蔓延、降低钢结构的火灾荷载,从而提高其耐火性能。与被动防火保护相比,主动防火保护不改变钢结构构件本身而是通过对火灾环境的有利干预实现防火。火灾自动报警系统、自动喷水灭火系统、防排烟系统是钢结构建筑中常用的主动防火保护系统。

火灾自动报警系统由探测器、控制器和报警装置组成,其工作原理是利用探测器对火灾环境的特征参数进行实时监测,当探测到火灾信号时,控制器发出报警指令,启动警报装置进行声光报警,同时将火情信息传递给消防控制中心,为火灾扑救和人员疏散争取宝贵时间。常用的火灾探测器有感烟探测器、感温探测器、复合式探测器等。

自动喷水灭火系统是钢结构建筑中应用最广泛的主动灭火设施。当域内发生火灾时,高温烟气引起喷头的热敏元件熔断,喷头被激活而开启喷出水雾覆盖初期火源,抑制火势蔓延。同时大量喷水汽化吸热可降低火区温度控制钢构件的温升速率。湿式系统、干式系统和预作用系统是常见的自动喷水灭火系统形式,可根据建筑物的用途、环境条件等因素进行选用。大量研究表明,配置自动喷水灭火系统能够显著降低钢结构在火灾中的坍塌风险^[4]。

钢结构建筑火灾安全防护中也需要排烟系统参与。一方面,机械加压送风可有效阻止烟气在竖井中蔓延;另一方面,机械排烟系统通过引导火区热烟气,降低火区温度延缓钢构件温升,为火灾扑救赢得时机。性能化防排烟设计是防排烟领域的新趋势,根据烟气流动的数值模拟结果优化系统设计参数,在提高防排烟效果的同时节约工程造价。主动防火保护系统在钢结构建筑中的合理应用,可以有效控制火灾发展,延缓钢结构破坏,为人员安全疏散和火灾扑救创造有利条件。但主动系统的可靠性依赖于电力供应、给水条件以及系统本身的完好性,因此平时必须加强检测维护,确保其处于正常工作状态。

3.3 新型钢结构防火保护材料的研究进展

在防火涂料方面,目前的研究主要集中在提高涂层材料的隔热性能、黏结强度以及耐久性。通过在传统膨胀型涂料中掺入硼酸铝、氧化铝、二氧化硅等纳米陶瓷颗粒,可显著提高涂层的耐高温性能和机械强度。引入粉煤灰、

玻璃微珠等轻质填料可降低防火涂层的密度和导热系数提高隔热效果。表面改性技术的应用,如等离子体处理、溶胶-凝胶法等则可增强涂层与钢材基体的附着力,提高防火涂料的耐候性和抗冲击性。但纳米改性和表面处理工艺都会在一定程度上增加防火涂料的成本。

在防火板材方面,主要以新型无机防火板材的开发为主。硅酸钙板因其优异的耐火性能和环保性能而成为较好的选择,但硅酸钙板的抗水性和抗冲击性有待提高。通过在硅酸钙基体中掺入玻璃纤维、聚丙烯纤维等增强体可显著改善硅酸钙板的力学性能。泡沫混凝土和发泡陶瓷也是潜在的新型防火板材基体材料。它们兼具低密度和低导热系数的特点但力学性能相对较差,在实际运用中需要与增强材料复合以满足使用要求。

随着对钢结构耐火机理认识的深入,一些仿生防火材料也成为研究的新方向。例如,通过模拟鳞片、毛发等动物表面结构,研制出高比表面积和低密度的仿生隔热材料。受昆虫体腔结构的启发开发出内部具有定向微孔道的轻质隔热泡沫材料。仿生防火材料能在轻质高强的同时具备优异的隔热性能,代表了防火材料发展的未来趋势,但其制备工艺复杂,量产成本高,距实用化尚有较大差距。

4 结束语

钢结构抗火设计与防护技术经过几十年的发展,在基础理论、分析方法、防护措施等方面取得长足进步。展望未来,钢结构抗火领域仍存在机遇、挑战。深入揭示钢材高温退化机理、创新钢结构火灾响应分析方法、研发高效耐火防护材料、建立多维度火灾安全评估体系将是今后的重点研究方向。

[参考文献]

- [1] 欧阳辉,郑晓芬,程浩. 高强钢结构抗火性能研究现状[J]. 结构工程师,2022,38(6):202-213.
- [2] 张若筠. 钢结构抗火防火设计要点与防火涂料施工注意事项[J]. 建筑技术,2018,49(8):894-896.
- [3] 解佩瑶. 浅谈高层建筑钢结构的应用及其抗火问题[J]. 建材发展导向,2018,16(4):32-34.
- [4] 杨明,盘洪玉. 钢结构抗火设计研究与防护进展[J]. 四川建材,2023,49(12):211-212.

作者简介:王明(1989.2—),男,黑龙江省哈尔滨市人,汉族,本科学历,中级工程师,就职于中国二十二冶集团有限公司,从事建筑工程施工技术管理相关工作。