

我国建筑耐火钢的开发与应用

徐伟良, 张洪亮

(浙江工业大学职业技术学院, 杭州 310014)

摘要 耐火钢是一种功能性的新型建筑用特殊钢材, 钢材的耐火性能是指钢材耐高温的强度。介绍近年来耐火钢在我国建筑业的开发现状和工程应用, 并对这类钢材的耐火性能和生产机理进行分析。试验研究表明: 与普通钢相比, 耐火钢在高温下的强度和弹性模量均显著提高, 具有良好的高温性能。

关键词 耐火钢 高温性能 钢结构 开发与应用

Development and Application of Fire-Resistant Steel for Building in China

Xu Weiliang, Zhang Hongliang

(College of Vocational Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

Abstract Fire-resistant (FR) steel is a new type of building steel material with special function and FR properties of steel material are thought to be high-temperature-resistant strength. The paper introduces the recent development and engineering application of FR steels in building industry in china, and analyzes its FR properties and production mechanism. The results of the test study shows, compared with normal steels, that the high-temperature strength and elastic modulus of FR steels obviously increase and FR steels have good high-temperature performance.

Key words fire-resistant steel, high-temperature properties, steel structure, development and application

随着我国钢结构建筑的发展与应用, 使钢结构的防火问题愈显突出。在火灾的高温作用下, 钢材的强度和刚度会明显降低, 并可能发生钢结构建筑物倒塌而酿成巨灾。2001年“9.11”事件中, 美国纽约的世贸中心受恐怖分子驾机撞击使大量航空燃油爆炸燃烧后引起倒塌便是一例。为了避免灾难的发生, 我国规范规定, 当各类建筑钢结构梁、柱表面的温度超过 150°C 时, 必须覆盖适当厚度的隔热保护层。但此措施不仅污染环境, 增加建筑成本和延长工期, 而且减少建筑物的有效空间。因此, 开发耐火钢材是非常迫切的。

高性能耐火钢是发达国家竞相开发的一种用途广泛的特殊钢材, 已在国外高层和超高层、大跨度、轻钢轻板钢结构建筑中大量应用, 并在防火、抗震等方面表现出良好的性能。例如采用钢结构的日本新日铁第二办公大楼, 若按传统设计, 梁、柱构件的防火层厚度达 50mm, 使用耐火耐候钢后, 梁、柱的防火层厚度只需 15mm, 减薄了 2/3 以上, 部分露出室外的梁、柱则可取消保护层^[1]。本文介绍了近年来耐火钢在我国开发现状和工程应用, 并对这类钢材的耐火性能和生产机理进行了分析, 以供建筑钢结构行业的设计、制造和施工人员在选材时参考。

1 耐火钢的耐火性能和生产机理

钢材的强度和刚度是温度的函数。随着温度的升高, 钢材的强度、刚度和弹性模量等力学性能指标会明显降低。当钢结构的温度分别达到 350、500、600 时, 钢材的强度将分别下降 1/3、1/2、2/3。当温度达到 600 以上时, 钢材将完全丧失其承载能力^[1]。为了提高钢结构自身的抗火能力, 减薄或取消耐火涂层, 新一代建筑用功能性材料——耐火钢应运而生。

钢材的耐火性能是指钢材耐高温的强度。耐火钢是指除其常温力学和焊接性能与普通钢一致外, 还要求在 600 左右高温下保持 1~3h 后, 其屈服强度值不低于常温规格值的 2/3, 即将原采用普通钢耐 350 的抗火设计提高到耐 600 的抗火设计, 从而提高钢结构抗火灾能力, 增强建筑物的安全性。由文献[2]的耐火极限试验结果可知, 耐火钢按照其定义的耐 600 抗火设计, 达到国标 1 级梁的耐火极限时所需涂层厚度为 23mm; 普通钢按照其定义的耐 350 抗火设计为 50mm, 此状态下使用耐火钢仍可比普通钢节省 1/2 以上的涂层材料。此外, 在不重要的场合或通过合理的设计, 使用耐火钢可以不涂覆耐火材料, 从而降低工程总造价。因此, 耐火钢比普通钢具有优越的高温强度和抗火性, 是具有防火设计要求的钢结构建筑的首选材料, 是名副其实的“绿色钢材”。普通钢结构和耐火钢结构的防护成本对照可参见文献[1]中表 1。

高温强度是建筑用耐火钢的关键性能要求。耐火钢中的混合组织尤其是细小、弥散分布的 M-A 组织的结构变化、合金元素 Mo 等的固溶强化作用和高温下 MC、Mo₂C 的析出强化作用是耐火钢获得良好高温性能的主要原因。由文献[3], 采用马钢生产的屈服强度为 45MPa 级耐火 H 型钢进行的综合性能试验可知:

(1) 耐火钢的室温显微组织为多边形铁素体 + M-A(Martensite-Austenite)组织 + 少量珠光体的混合组织。由于相对于晶界而言, 混合组织之间的相界可以更有效地阻碍位错运动, 因此, 这种混合组织一方面大幅度降低了耐火钢的屈强比, 另一方面, 非常有益于提高钢的高温强度。透射电镜分析表明, 耐火钢的 M-A 组织亚结构为板条状。

M-A 组织与耐火钢中的合金元素及轧后空冷工艺密切相关。由于耐火钢中的合金元素 Mo 推迟了相变,增加了过冷奥氏体的稳定性。在轧后的连续冷却过程中,首先在钢中形成先共析铁素体,并必然在铁素体相界前沿向四周排碳,一部分碳与合金元素将逐渐扩散到奥氏体内部,促使奥氏体稳定化并形成富碳奥氏体。在随后的冷却过程中达到一定条件,富碳奥氏体部分形成马氏体,或部分保留至室温,形成亚结构为板条状的 M-A 组织。试验与计算结果均表明^[4], M-A 组织在高温下会逐渐分解,形成合金渗碳体。溶于 M-A 组织中的 Mo、Mn、Cr、V 等合金元素转移到渗碳体中,增加了渗碳体的稳定性,阻碍了渗碳体的粗化,从而使其成细小、均匀分布,提高了 M-A 组织的抗回火软化能力,同时也阻碍了回火组织的粗化,使耐火钢保持良好的高温性能。弥散分布在晶界处的 M-A 组织,对晶界活动起拖曳作用,抑制了晶粒的滑移和粗化,对耐火钢获得良好的高温性能作出了贡献。因此,在耐火钢的基本组织中,保持一定数量、细小弥散分布在晶界处的 M-A 组织是耐火钢获得良好高温性能的一个主要原因。

(2) Mo 是提高钢热强性的主要合金元素, Nb、V、Ti 是主要的微合金化元素。耐火结构用钢的冶金原理和生产技术是相当简单的,即只要添加 0.15%~0.60% 的 Mo 就能提高钢的高温强度。中国钢铁公司(台湾地区)已在实验室及现场进行耐火钢的开发研究。实验证明^[5],添加合金元素 Mo 能缓和钢材高温强度的降幅,使钢材在 600°C 高温时,其强度指标显著地优于传统钢材,屈服强度能够维持在室温规格值的 2/3 以上。研究工作表明^[4],通过复合添加合金元素 Mo 和 Nb,可以提高晶粒边界的强度,抑制沉淀在晶界上发生,改善钢的高温力学性能。

合金元素 Mo 主要起固溶强化的作用: Mo 固溶于钢中,强化了铁素体基体,提高了钢的高温强度和蠕变强度。同时 Mo 易于在晶界处偏聚,形成 Mo 族,强化晶界。相分析的结果证实^[3],以固溶形式存在的 Mo 在钢中约占 90%,并且随着温度的升高没有显著变化。可以说,合金元素 Mo 等的固溶强化作用是耐火钢获得良好高温性能的另一主要原因。

(3) 钢中存在大量细小弥散的 MC 析出相。合金元素 Mo 不但在钢中形成 MC 碳化物,还容易形成 Mo₂C,并且保持细小尺寸。Nb 通过析出细小弥散分布的 M(C、N)型析出物,具有较高的组织稳定性,能起到析出强化的作用,并能显著提高钢的高温强度。与 Nb 的作用相同, V-Ti 微合金元素的析出物具有良好的高温稳定性,也可提高钢的高温强度。通过复合使用少量耐热性高的 Cr、Mo 合金元素与 Nb-V-Ti 微合金化元素,可达到最佳的高温强化效果。因此,若采用 Cr-Mo-Nb 成分,可以保证钢材在 700°C 高温时,其屈强比(钢材的屈服强度与极限抗拉强度之比)不小于 0.75。

此外, Rikio Chijiwa 等^[6]认为, Mo 容易在 NbC 第二相质点周围形成偏析层,使 NbC 第二相难以在高温下聚集长大,提高了高温屈服强度。因此,高温下 MC、Mo₂C 等的析出强化作用有效地提高了钢的高温性能。

2 耐火钢的国内开发现状和工程应用

(1) 宝钢: 由宝钢集团公司开发的耐火钢,采用适宜的技

术,使钢含有特定的成分、表面结构和微观组织,从而使钢本身生成所需要的耐火性。其耐火性与日本的 FR 钢相当,即保证在 600 的高温时其屈服强度值不低于室温规格值的 2/3, 1080 条件下可保持 2.5h 不屈服。2001 年宝钢的 5000 余吨耐火钢已成功用于上海市第一个全钢结构高层住宅楼——中福楼工程,这也是国内首次大批量生产和在高层建筑中使用耐火钢^[1]。

(2) 武钢: 武钢于 2001 年 10 月研制成功并通过鉴定的 WJG510C2 钢种,集高耐火性、高耐候性、高 Z 向拉伸性能(其 Ψ_Z 指标全部高于 Z 向钢最高级别 Z35 的要求,即 $\Psi_Z \geq 35\%$)和能承受大线能量焊接(在大线能量条件下焊接时,其焊接接头具有良好的抗拉、抗弯和抗冲击性能,焊接热影响区仍具有优良的强韧性)于一体,其技术性能指标达到国际领先水平,填补了国内空白,属技术首创。这种钢的耐火性能与日本的 FR 钢相当。在交货使用状态下具有足够的强度和较低的屈强比,即保证了该材料具有高的塑性变形功和良好的冷变形能力,从而降低了材料发生脆性断裂的可能性。此外, WJG510C2 钢 HAZ 的淬硬性倾向低,具备低的冷裂纹敏感性^[1,7]。

典型应用^[7]: 中国的重点文化工程和具有世界一流水平的国家标志性工程——中国国家大剧院,总建筑面积为 18 万 m²。考虑到国家大剧院的用途及意义,该工程对钢材的要求十分严格。2002 年 2 月,在国家大剧院钢管混凝土柱工程项目招标中,武钢的耐火钢成功中标。同年 8 月中旬,工程需用的 $\phi 406\text{mm}$ 和 $\phi 508\text{mm}$ 耐火钢管,共计 254 根近 300t 全部运到北京。经工程设计、采购、施工、监理等部门组成的验收小组验收,钢管的质量全部检验合格,并已成功应用到工程中,实用效果良好,受到了有关方面的高度赞扬。

(3) 攀钢: 攀钢钢研院试验生产出了具有自主知识产权的建筑用高强度热轧耐火钢新钢种。高强度热轧耐火钢既具有低屈强比、抗层状撕裂和良好的焊接性等性能特点,又具有耐火性等性能特点,在 600 高温时的屈服强度不低于室温值的 2/3,可以少用或不用防火涂层^[1]。

(4) 鞍钢: 鞍钢从 2000 年开始研制耐火钢,现已具备了 400 级、490 级系列耐火钢的生产技术。其中工业生产的 490 级高性能耐火钢,由鞍钢永宝型钢制品有限公司加工焊接成耐火 H 型钢并已应用于鞍山东方钢结构有限公司的厂房建设。按照我国现有标准、试验方法进行的鞍钢自产建筑用耐火钢的耐火极限试验结果表明^[2],鞍钢耐火钢在 600 高温下保温 30~150min 内屈服强度均不低于常温值的 2/3;在无涂覆状态下达到国家建筑 4 级梁的耐火极限;薄型涂覆达到 3 级梁的耐火极限;厚型涂覆达到 1 级梁的耐火极限,实现了耐火钢的厚型涂覆材料厚度比普通 Q345 钢节省 1/2,并且焊接性能良好,完全达到了国标要求,已于 2003 年 8 月通过国家鉴定。

(5) 马钢: 马钢根据钢的合金化原理,借鉴国外耐火钢的设计经验,采用了以低碳为原则的耐火钢成分设计。首先开展了 Mn-Mo-Nb 合金系钢、含 Mo 钢、低 Mo-Nb-Ti 合金系钢、Mo-Nb-Cr 合金系钢的研究,然后开展了 Mo-V-Ti 合金系钢、Mo-Cr-V-Ti 合金系钢以及 Nb-V-Ti-Re 微合金化钢的

探索性研究,并最终确定了耐火钢的成分,成功开发了耐火H型钢。它基本克服了普通建筑结构用钢(如我国的Q235、Q345级钢等)在高温时迅速软化的弱点,可以减薄或取消耐火涂层,是一种“环保型”耐火钢材。它不仅具有良好的常温、高温性能和焊接性能,还具有优良的抗高温蠕变性能,其产品已成功应用于上海中福花园民用钢结构住宅工程^[8]。

3 结语

(1)耐火钢是一种功能性的新型建筑用特殊钢材。与普通钢相比,耐火钢在高温下的强度和弹性模量均显著提高,具有良好的高温性能。

(2)耐火钢的室温显微组织为多边形铁素体 + M-A 组织 + 少量珠光体的混合组织。

(3)耐火钢中的混合组织尤其是细小、弥散分布的M-A组织的结构变化,合金元素Mo等的固溶强化作用和高温下MC、Mo₂C的析出强化作用是耐火钢获得良好高温性能的主要原因。

(4)在建筑钢结构中应用耐火钢可减少污染,降低建筑成本,缩短施工周期,减轻建筑物重量,增强建筑的安全性,增加建筑的有效空间,具有显著的经济和社会效益。

参考文献

- 1 张威振,徐志胜.耐火耐候钢的研究与应用.钢结构,2004,19(4):53
- 2 王泽林,王文仲,郝森,等.建筑结构用耐火钢的耐火极限试验.钢结构,2004,19(4):56
- 3 沈俊昶,杨才福,马鸣图,等.耐火钢综合性能及构件抗火试验分析.钢结构,2006,21(4):87
- 4 刘志勇,杨才福,沈俊昶,等.建筑用耐火钢组织与性能的研究.钢结构,2005,20(4):75
- 5 王锡钦.高功能结构用钢板的发展.建筑钢结构进展,2002,4(1):16
- 6 Chijiwa R. Development and practical application of fire-resistant steel for building. Nippon Steel Techn Rep, 1993, 58(1): 47
- 7 刘继雄,陈晓,李平和,等.高性能耐火耐候建筑用钢的力学性能和焊接性能及其典型应用研究.建筑钢结构进展,2004,6(3):9
- 8 蒲玉梅,奚铁.马钢建筑用高效结构钢材的开发应用.钢结构,2007,22(1):70