

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20191017005

控轧控冷型 Q550 高强钢高温后的力学性能 试验研究*

宋林昕¹, 李国强^{1,2}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 通过升温、降温及冷却后的常温静力拉伸试验, 对控轧控冷型(TMCP)Q550 高强钢高温后的力学性能展开试验研究, 得到了经历 200~900 °C 之间 9 个不同的过火温度及自然冷却与浸水冷却两种冷却方式后, 钢材的表观特征、应力—应变关系与基本力学性能参数, 包括弹性模量、屈服强度、抗拉强度及断后伸长率。结果表明, 过火温度及冷却方式对 TMCP 型 Q550 钢材弹性模量的影响较小; 过火温度超过 600 °C 时, 钢材高温后的屈服强度和抗拉强度开始折减; 过火温度达到 700 °C 后, 钢材的应力—应变曲线皆无屈服平台, 不同冷却方式的结果开始呈现差异: 随过火温度升高, 自然冷却后钢材的强度减小而断后伸长率增大, 浸水冷却则相反, 且二者差异愈加明显。将试验结果与文献结果对比, 发现当过火温度超过 700 °C 时, TMCP 型 Q550 高强钢高温后的力学性能与调质型(QT)Q550 高强钢存在差异, 在经历较高的过火温度后, TMCP 钢在自然冷却下的强度折减比 QT 钢严重, 浸水冷却下的强度增长程度低于 QT 钢。

关键词: TMCP 型 Q550 高强钢; 高温后; 冷却方式; 试验研究; 力学性能

中图分类号: TU511.3 TU502 **文献标识码:** **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0369-07

Experimental Study on Post-fire Mechanical Properties of TMCP Q550 Steel

SONG Linxin¹, LI Guoqiang^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Prevention in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: By procedures of heating, cooling and static tensile test at ambient temperature, an experimental study was carried out to investigate the post-fire mechanical properties of TMCP (Thermo-Mechanical Controlled Process) Q550 steel. Nine experienced temperatures from 200°C to 900°C and two cooling methods, that is, cooling in air and cooling in water, were considered in the experiment. The apparent characteristics, stress-strain relationship and basic mechanical parameters including elastic modulus, yield strength, ultimate strength and ultimate elongation were obtained. The results show that: high-temperature treatment and cooling method have little influence on the elastic modulus

* 收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878506)资助

作者简介: 宋林昕(1996—), 女, 博士研究生。主要从事钢结构抗火研究。E-mail: linlinslx@126.com

通讯作者: 李国强(1963—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事多高层建筑钢结构分析与设计理论、钢结构抗火计算与设计理论、工程结构振动与检测理论、新型消能减震构件的研究。E-mail: gqli@tongji.edu.cn

of the steel; when the experienced temperature is higher than 600°C, the yield strength and ultimate strength begin to decrease; when the experienced temperature reaches 700°C or above, the stress-strain curves of the steel have no yielding platform, and the mechanical properties of different cooling methods begin to show differences; as the experienced temperature rises, the strength decreases and the elongation increases after cooling in air, while it shows inverse trend after cooling in water, and the difference of the results between the two cooling methods becomes more obvious. Comparing the test results with literature results, it is found that when the experienced temperature is higher than 700°C, the post-fire mechanical properties of TMCP Q550 steel are different from those of QT (Quenched and Tempered) Q550 steel. The reduction of the elastic modulus of TMCP steel is greater than that of QT steel, and the strength of TMCP steel is lower than that of QT steel when the experienced temperature is 900°C.

Keywords: TMCP Q550 steel; post-fire; cooling methods; experimental study; mechanical properties

引言

相比于普通钢材,在建筑结构中使用高强度钢材从安全性、可靠性、社会经济效益以及环保效益等方面都有显著优势,但其与普通钢材类似,耐火性能差。因此,研究高强钢高温后的力学性能有助于对火灾后高强钢结构构件进行评估鉴定,也有利于进一步推广高强钢的使用^[1-2]。目前,对于国产高强钢,已有学者对 Q460^[3]、Q550^[4-5]、Q690^[6]、Q890^[7] 高强钢高温后的力学性能进行了研究。结果表明,高温冷却过程对高强钢弹性模量的影响不大;超过一定的过火温度时,高强钢的屈服强度、抗拉强度以及断后伸长率与常温相比有明显不同,且与冷却方式及钢材强度等级紧密相关。

高强钢根据交货状态可分为调质型高强钢(QT, Quenched and Tempered)与控轧控冷型高强钢(TMCP, Thermo-Mechanical Controlled Process)两类,前者采用传统的淬火与回火技术,后者则通过轧制与温度控制,从而控制钢材的组织结构,提高其力学性能^[8]。已有研究表明,这两类高强钢在焊接后存在较大的力学性能差异^[9],但还缺乏对其高温后力学性能方面的对比研究。作者的课题组已对 QT 型 Q550 高强钢^[4,7] 高温后的力学性能进行了研究,在此基础上,本文开展对照试验,研究 TMCP 型 Q550 高强钢高温后的力学性能,并对比分析交货状态对 Q550 钢材高温后力学性能的影响。

1 试验概况

由于进行对照试验,试验方案及试件参考文献[4,7]设计,试验设计及操作均符合规范《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)^[10]及《金属材料拉伸试验第2部分:高温试验方法》(GB/T 228.2—2015)^[11]的要求。

1.1 试验方案

试验分为升温、冷却及常温静力拉伸三个阶段。在同济大学结构抗火实验室进行升温及冷却试验:采用 MTS 653 Furnace 高温炉将试件升至指定温度后,保温 15 min 使试件温度均匀,再按方案将试件自然冷却或浸水冷却(后文图表中分别用“N”、“W”表示)。冷却后的试件在自然条件下放置 2 周,并观察其外观特征。随后,在同济大学耐久性实验室进行常温静力拉伸试验:采用万能试验机以 2 mm/min 的位移控制进行加载,试验装置如图 1 所

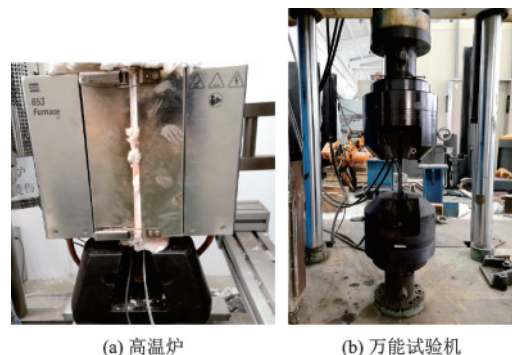


图1 试验装置

Fig.1 Test equipment

示。通过试验,可得到各工况下钢材的力—位移关系,从而得到应力—应变关系、弹性模量 E_T 、屈服强度 $f_{y,T}$ 、抗拉强度 $f_{u,T}$,并测量断后伸长率 A_T 。

1.2 试件设计

采用 20 mm 厚的 TMCP 型 Q550 钢板,将其加工成如图 2 所示的试件。其中,距试件一端 15 mm 处直径为 5 mm 的孔用以穿过钢丝,便于进行试件保温结束冷却前的操作。钢板的化学成分见表 1。

试验时室温为 30 °C,故以 30 °C 代表常温情况。除 30 °C 外,试件经历的最高过火温度包括 200、300、400、500、600、700、750、800 和 900 °C 这 9 个温度点,

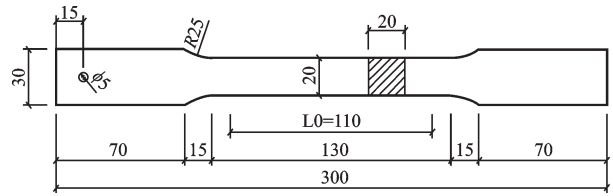


图 2 试件几何尺寸

Fig.2 Geometry of specimens

每个温度点对应自然冷却和浸水冷却两种冷却方式,则包括常温组共有 19 组试验;常温组 3 个试件,过火温度低于 600 °C 时每组 2 个试件,过火温度为 600 °C 及以上时每组 3 个试件,共计 49 个试件。试件情况见表 2。

表 1 TMCP 型 Q550 钢材化学成分

Table 1 Chemical constitution of TMCP Q550 steel

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Cr	Ni	Mo	B	CEV	Alt	Pcm
质量分数/wt%	0.06	0.24	1.56	0.01	0.001	0.032	0.015	0.19	0.02	0.005	0.0016	0.36	0.036	0.17

表 2 试件情况

Table 2 Situations of specimens

温度/°C	30(常温)	200	300	400	500	600	700	750	800	900
个数	3	4	4	4	4	6	6	6	6	6

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

经历不同的过火温度以及不同的冷却方式后, TMCP 型 Q550 钢材的表观特征也有所不同,如图 3 所示。过火温度为 200~600 °C 的 TMCP 型 Q550 钢材自然冷却后的表观特征基本一致,在保持金属本色的同时,表面略带红褐色;过火温度为 700~900 °C 时,表面仍带有红褐色,且随过火温度的升高,自然冷却后的颜色逐渐变深,由金属本色向深蓝色过渡。过火温度为 200~400 °C 时,浸水冷却后的表观特征基本一致,在保持金属本色的同时,表面略带红褐色和黄色;过火温度为 500~900 °C 时,表面仍带有红褐色和黄色,且随过火温度的升高,浸水冷却后的颜色逐渐变深,由金属本色向炭黑色过渡。浸水冷却的试件比自然冷却的锈蚀度高,过火温度达到 600 °C 时,浸水冷却的试件表层就因锈蚀而脱落;而自然冷却的试件在过火温度达到 900 °C 时表层才略有脱落,但在经历静力拉伸的试验过程中其表层会完全脱落。

各个试件均出现颈缩现象。过火温度在 700 °C 及以下时,试件即将断裂时有明显响声,断裂时发出更大的响声,即经历两声断裂;过火温度在 750 °C 及以上时,试件仅在断裂时发出响声。



图 3 试验后试件的表观特征及拉伸破坏形态

Fig. 3 Surface characteristics of the specimens after the test

2.2 应力—应变关系曲线

TMCP 型 Q550 高强钢高温后的应力—应变关系曲线如图 4 所示。由图可得, TMCP 型 Q550 钢材在常温时有明显的屈服平台;当过火温度不超过 600 °C 时,自然冷却及浸水冷却后都有明显的屈服平台;当过火温度达到 700 °C 后,自然冷却及浸水冷却后都无屈服平台。

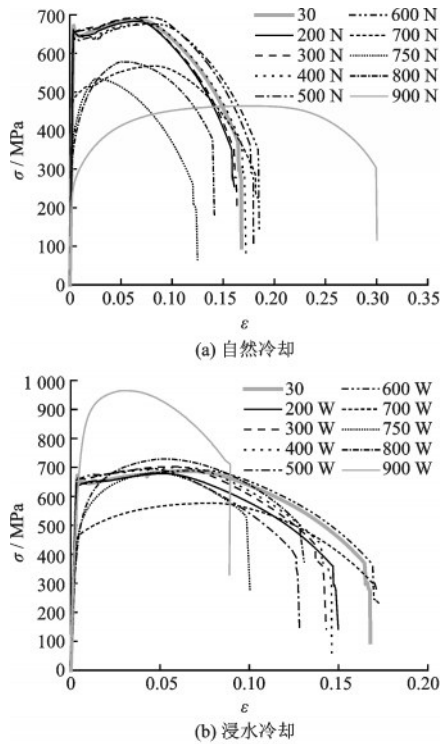


图4 应力—应变关系曲线
Fig.4 Stress-strain curves

2.3 力学性能参数

TMCP型Q550高强钢高温后的力学性能参数值见表3,相应的折减系数值见表4,折减系数随温度变化的情况如图5所示。其中,折减系数为高温后的力学性能参数值与常温时的相应值之比; E_T 、 $f_{y,T}$ 、 $f_{u,T}$ 、 A_T 分别表示弹性模量、屈服强度、抗拉强度、断后伸长率; T 表示过火温度,下标不带“ T ”的表示常温时相应的参数。若应力—应变关系曲线有明显的屈服平台,则取下屈服点作为屈服强度;若无明显的屈服平台,则取0.2%的残余应变所对应的应力值作为名义屈服强度。

TMCP型Q550高强钢弹性模量的折减在过火温度为700~800 °C时较明显,折减系数在750 °C(自然冷却)、700 °C(浸水冷却)时达到极小值,但仍在12%之内;若忽略该温度区间,则弹性模量的折减均在3%以内。因此,过火温度及冷却方式对弹性模量的影响较小。

当过火温度不超过600 °C时,高温冷却对TM-CP型Q550钢材的屈服强度无明显影响;当过火温度为600~800 °C时,随着过火温度的升高,屈服强度逐渐减小。当过火温度不超过700 °C时,不同冷却方式的结果基本一致;当过火温度为700~800 °C时,随温度升高不同冷却方式的变化规律相似,屈

表3 高温后TMCP型Q550钢材的力学参数值

Table 3 Values of post-fire mechanical properties of TM-CP Q550 steel

$T/^\circ\text{C}$	E_T/MPa		$f_{y,T}/\text{MPa}$		$f_{u,T}/\text{MPa}$		$A_T/\%$	
	N	W	N	W	N	W	N	W
30	198 868	198 868	643	643	682	682	19.77	19.77
200	197 336	197 412	649	636	687	674	19.98	19.13
300	193 432	198 641	652	642	690	686	20.00	19.18
400	197 888	195 109	620	661	667	701	20.58	18.95
500	198 585	196 746	669	647	704	682	19.19	18.92
600	196 032	197 532	624	644	662	683	20.07	19.61
700	190 338	175 933	510	507	568	577	20.93	17.62
750	175 486	181 945	402	479	534	682	17.07	13.75
800	179 278	195 851	365	445	587	718	20.51	9.70
900	192 702	193 578	251	766	466	957	31.53	12.86

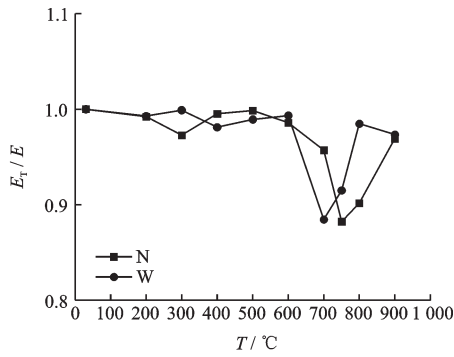
表4 高温后TMCP型Q550钢材的力学参数折减系数

Table 4 Reduction factors of post-fire mechanical properties of TMCP Q550 steel

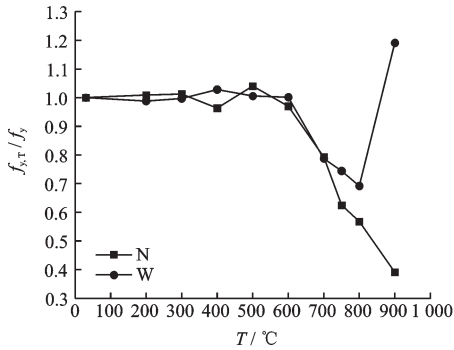
$T/^\circ\text{C}$	E_T/E		$f_{y,T}/f_y$		$f_{u,T}/f_u$		A_T/A	
	N	W	N	W	N	W	N	W
30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
200	0.99	0.99	1.01	0.99	1.01	0.99	1.01	0.97
300	0.97	1.00	1.01	1.00	1.01	1.01	1.01	0.97
400	1.00	0.98	0.96	1.03	0.98	1.03	1.04	0.96
500	1.00	0.99	1.04	1.01	1.03	1.00	0.97	0.96
600	0.99	0.99	0.97	1.00	0.97	1.00	1.02	0.99
700	0.96	0.88	0.79	0.79	0.83	0.85	1.06	0.89
750	0.88	0.91	0.62	0.74	0.78	1.00	0.86	0.70
800	0.90	0.98	0.57	0.69	0.86	1.05	1.04	0.49
900	0.97	0.97	0.39	1.19	0.68	1.40	1.59	0.65

服强度逐渐折减,但结果呈现出差异,自然冷却后的折减程度更严重;当过火温度超过800 °C时,不同冷却方式对屈服强度的影响显著:自然冷却后的屈服强度逐渐减小,而浸水冷却后的屈服强度却大幅增加;当过火温度为900 °C时,自然冷却后的屈服强度仅为常温时的39%,而浸水冷却后的屈服强度却超出常温的19%,其值约为自然冷却的3倍。

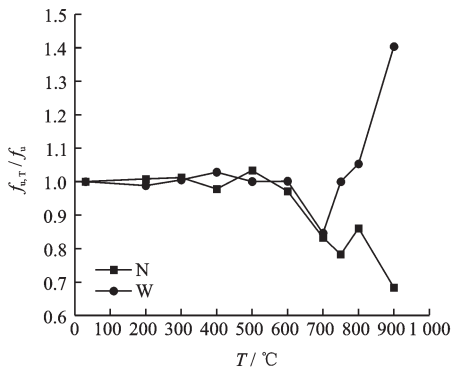
当过火温度不超过600 °C时,高温冷却对TM-CP型Q550钢材的抗拉强度无明显影响;当过火温度不超过700 °C时,不同冷却方式的结果基本一致。过火温度为600~700 °C时,抗拉强度明显减小,幅度接近20%。当过火温度达到700 °C后,不同冷却方式的结果开始呈现差异:随过火温度的升高,自然冷却后的抗拉强度波动减小;而浸水冷却后的抗



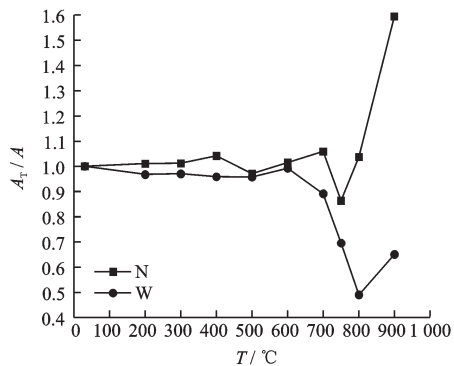
(a) 弹性模量折减系数



(b) 屈服强度折减系数



(c) 抗拉强度折减系数



(d) 断后伸长率折减系数

图5 TMCP型Q550钢材力学参数折减系数随温度变化图
Fig. 5 Reduction factors of post-fire mechanical properties of TMCP Q550 steel

拉强度增大,至900℃时超过常温的40%,其值约为自然冷却的2倍。

TMCP型Q550钢材在经历高温后,浸水冷却后的断后伸长率均小于自然冷却,但过火温度不超过600℃时,断后伸长率与常温基本一致。当过火温度达到700℃后,不同冷却方式的结果开始呈现差异。虽然断后伸长率的总体变化趋势皆随着过火温度的升高先减小再增大,但最小值对应的过火温度不同;过火温度为900℃时自然冷却后的结果超过常温的59%,而浸水冷却的仅为常温的65%,不及自然冷却结果的一半。

3 TMCP钢与QT钢高温后力学性能的对比如分析

3.1 对比分析

本试验为文献[4,7]试验的对照组,对比分析文献[4,7](QT型Q550钢材,以下简称QT钢)和本试验(TMCP型Q550钢材,以下简称TMCP钢)的结果,以研究交货状态对国产Q550高强钢高温后力学性能的影响。

从应力—应变曲线形态上看,二者有较大区别。TMCP钢无论自然冷却亦或是浸水冷却,当过火温度达到700℃后就无屈服平台。而QT钢在自然冷却后,除过火温度为750℃外皆有屈服平台;浸水冷却后当过火温度达到750℃后无屈服平台。

对于力学性能参数, TMCP钢与QT钢高温后力学性能参数折减系数的对比如图6所示。当过火温度达到700℃后,两种钢材力学性能的折减程度存在差异。TMCP钢弹性模量的折减程度比QT钢严重,但与其他力学性能参数的变化幅度相比仍较小(12%以内),可认为两种钢材高温后的弹性模量基本不受高温冷却过程的影响。当过火温度不超过700℃时,两种钢材的屈服强度和抗拉强度变化程度基本一致;超过700℃时两种钢材的力学性能变化呈现出不同程度的差异:随温度的变化趋势一致,但若存在极值点则极值点对应的温度略有不同。当过火温度不超过600℃时,两种钢材的断后伸长率变化程度基本一致;超过600℃时,两种钢材自然冷却后的断后伸长率随温度的变化趋势类似,但TMCP钢的折减系数小于QT钢,且在750℃时有极小值,而浸水冷却后二者趋势不同, TMCP钢存在极小值而QT钢存在极大值。

在经历较高的过火温度(对应本试验的900℃)后, TMCP钢自然冷却下的强度折减比QT钢严重,浸水冷却下的强度增长不如QT钢;自然冷却下的

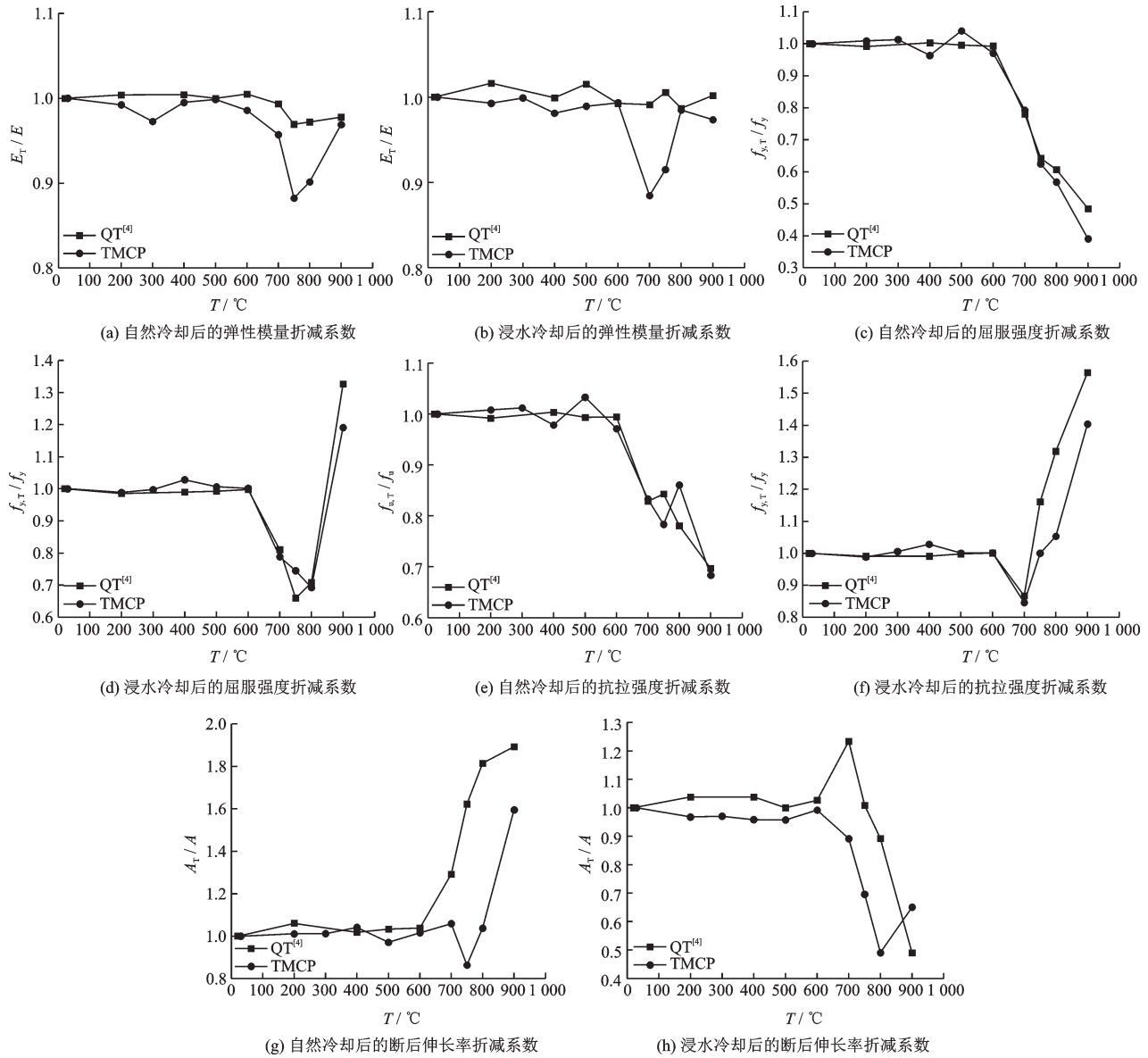


图6 TMCP钢与QT钢高温后力学性能折减系数的对比

Fig.6 Comparison of reduction factors of post-fire mechanical properties of TMCP steel and QT steel

延性增长不如QT钢,而浸水冷却下的延性折减程度低于QT钢。

3.2 机理分析

钢材力学性能的变化主要取决于微观组织的演变,受火冷却相当于对钢材再次进行热处理。

钢材热处理的临界温度一般在700~850℃之间,当过火温度超过700℃后,钢材将发生复杂的相变^[12],相应地TMCP钢与QT钢的力学性能变化出现不同程度的差异。当过火温度为900℃时,TMCP钢的强度折减系数低于QT钢,即自然冷却下TMCP钢的强度折减比QT钢严重,浸水冷却下的强度增长程度低于QT钢。这主要有两个方面的原因:从

组织结构而言,QT钢以回火马氏体为主,TMCP钢以回火贝氏体为主,其相比于回火马氏体是较软的相;从合金成分而言,TMCP钢的合金元素总体上少于QT钢,而合金元素又是提高钢材强度的重要因素之一,尤其当高温使重结晶发生从而减弱位错等强化作用后,合金元素对强度的贡献程度增大。因此,在经历较高的过火温度(对应本试验的900℃)后,TMCP钢由于具有较软的相回火贝氏体以及合金元素较少,从强度方面而言QT钢更具优势。

4 结论

(1)当过火温度不超过600℃(自然冷却)或

400℃(浸水冷却)时,冷却后TMCP型Q550钢材的表观特征基本一致;超过此温度后,不同的过火温度及冷却方式会影响其表观特征。

(2)经历高温后,无论自然冷却或浸水冷却,当过火温度不超过600℃时,TMCP型Q550钢材的应力应变曲线皆有屈服平台;当过火温度达到700℃后则无屈服平台。

(3)过火温度及冷却方式对TMCP型Q550钢材弹性模量的影响较小。

(4)当过火温度不超过600℃时,TMCP型Q550钢材的屈服强度、抗拉强度及断后伸长率与常温基本一致。当过火温度超过600℃时,屈服强度和抗拉强度开始折减。当过火温度达到700℃后,不同冷却方式的结果开始呈现差异,总体而言,随过火温度的升高,自然冷却后的强度减小而断后伸长率增大,浸水冷却则相反;且随过火温度的升高,不同冷却方式下结果的差异愈加明显。

(5)当过火温度达到700℃后,TMCP型Q550钢材与QT型Q550钢材高温后的力学性能折减程度存在差异。总体而言,在经历较高的过火温度(对应本试验的900℃)后,TMCP钢在自然冷却下的强度折减比QT钢严重;浸水冷却下的强度增长、自然冷却下的延性增长、浸水冷却下的延性折减程度低于QT钢。

(6)火灾后,对TMCP型Q550钢结构构件进行评估鉴定时,可根据钢材表观特征对火场条件进行初步判断,力学性能的变化可参考表4取值。

参考文献:

- [1] 施刚,石永久,王元清. 超高强度钢材钢结构的工程应用[J]. 建筑钢结构进展, 2008, 10(4): 32-38.
Shi G, Shi Y J, Wang Y Q. Engineering application of ultra-high strength steel structures[J]. Progress in Steel Building Structures, 2008, 10(4): 32-38. (in Chinese)
- [2] 王卫永,李国强. 高强钢结构抗火设计理论研究进展[J]. 工业建筑, 2016, 46(7): 61-67.
Wang W Y, Li G Q. Research progress of fire resistance design theory of high strength steel structures[J]. Industrial Construction, 2016, 46(7): 61-67. (in Chinese)
- [3] Wang W Y, Liu T Z, Liu J P. Experimental study on post-fire mechanical properties of high strength Q460 steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 114: 100-109.
- [4] Li G Q, Lyu H B, Zhang Ch. Post-fire mechanical properties of high strength Q550 structural steel[C]// 11th Pacific Structural Steel Conference, Shanghai: [s.n.], 2016.
- [5] 范圣刚,刘平,石可,等. 高温下与高温后Q550D高强钢材力学性能试验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(7): 680-689.
Fan Sh G, Liu P, Shi K, et al. Experiment on mechanical properties of Q550D high-strength steel exposed to overall stage of fire exposure [J]. Journal of Tianjing University (Science and Technology), 2019, 52(7): 680-689. (in Chinese)
- [6] 李国强,吕慧宝,张超. Q690钢材高温后的力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(5): 109-116.
Li G Q, Lyu H B, Zhang Ch. Experimental research on post-fire mechanical properties of Q690 steel [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(5): 109-116. (in Chinese)
- [7] 吕慧宝. 国产超500MPa高强度结构钢高温后力学性能研究[D]. 上海:同济大学, 2017.
Lyu H B. Research on mechanical properties of domestic 500MPa up high strength structural steel after fire [D]. Shanghai: Tongji University, 2017. (in Chinese)
- [8] 李大赵,索志光,崔天燮,等. 采用TMCP技术的低碳低合金高强钢生产的研究现状及进展[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(1): 1-7.
Li D Zh, Suo Zh G, Cui T X, et al. Research status and progress on production of low carbon-alloying and high-strength steel with TMCP procrss [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(1): 1-7. (in Chinese)
- [9] Stroetmann R, Kästner Thoralf, Hälsig André, et al. Mechanical properties and a new design approach for welded joints at high strength steels[C]//International Conference on Engineering Research and Practice for Steel Construction 2018, Hong Kong: [s.n.], 2018.
- [10] 金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2010[s]. 北京:中国标准出版社, 2010.
Metallic materials: tensile testing: part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010[s]. Beijing: Standard Press of China, 2010. (in Chinese)
- [11] 金属材料拉伸试验第2部分:高温试验方法:GB/T 228.2—2015[s]. 北京:中国标准出版社, 2015.
Metallic materials: tensile testing: part 2: method of test at elevated temperature: GB/T 228.2—2015[s]. Beijing: Standard Press of China, 2015. (in Chinese)
- [12] 朱学仪. 钢材热处理手册[M]. 北京:中国标准出版社, 2013.
Zhu X Y. Handbook of steel heat treatment [M]. Beijing: Standard Press of China, 2013. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)