

文章编号:1673-2049(2013)02-0109-05

高温后结构钢热变色试验

陈建锋,周天华

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:为了研究火灾后结构钢热变色的变化规律,对 Q235 结构钢加热至不同高温,再分别经历自然冷却、喷水冷却后采用 Lab 色差仪观测其热变色,由此提出了高温后钢材热变色 Lab 色度值的变化范围。结果表明:结构钢经不同高温冷却后,有显著热变色反应;冷却方式对结构钢热变色影响不显著,火灾温度是影响结构钢热变色的主要因素;高温后时效对热变色影响早期明显,3 d 后趋于稳定。本文研究成果可供火灾后钢结构损伤评估和加固分析时参考。

关键词:结构钢;高温;火灾后;热变色;Lab 色度

中图分类号:TU511.3 **文献标志码:**A

Experiment on Thermochromism of Structural Steel After High Temperatures

CHEN Jian-feng, ZHOU Tian-hua

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the thermochromism properties of structural steel after fire, structural steel Q235 was heated to different high temperatures, and cooled in different ways, then the thermochromism of structural steel surface by Lab-type measuring color apparatus was observed. The variation range of Lab color values of steel thermochromism after high temperatures was put forward. Results show that the structural steel presents thermochromism after cooling down from different high temperatures. Cooling method is not significant to thermochromism of structural steel, and the fire temperature is the main factor influencing the thermochromism of structural steel. After high temperatures, aging effect on thermochromism obviously at the early stage, and three days later, it tends to be stable. The study results in the paper can provide reference for fire damage assessment and reinforcement analysis of steel structures after fire.

Key words: structural steel; high temperature; after fire; thermochromism; Lab color

0 引言

火灾是一种多发灾害,对建筑物的损伤大小受诸多因素影响,其中大火的最高温度及其持续时间,是影响建筑结构破坏程度的主要因素,也是评估鉴定结构受火灾影响程度的重要指标之一^[1]。火灾所达最高温度的不同往往会对建筑物产生不同程度的

损伤,因此,火灾后温度场的推定成为火灾后建筑物评估及鉴定的首要工作内容,采用简单、易行的方法准确推定火灾温度,对火灾后结构受损鉴定有着重要的意义。

目前,针对钢筋混凝土结构火灾后温度场的推定方法研究较多^[2-4],但对钢结构火灾后的性能研究较少。结构钢经历了火灾升温 and 冷却过程后,往往

收稿日期:2013-01-23

基金项目:中国博士后科学基金项目(2011M501428)

作者简介:陈建锋(1975-),男,陕西商洛人,讲师,工学博士,博士后,E-mail:llrhym@yahoo.com.cn。

在金属表面会生成一层因过火温度不同而呈现不同颜色的氧化膜,俗称钢材的热变色。曹文銓^[5]对此做了一定研究,给出结构钢热变色随受火温度的升高依次由蓝色变成浅蓝色,再到灰色的定性描述,将其用于钢结构火灾后温度场的推定,由于使用者对颜色的语言描述理解不同会有较大偏差,且不利于使用。笔者对此也做了初步研究,并根据高温后结构钢热变色图片提炼编制了热变色图谱^[6-7]。该图谱直观地反映了结构钢热变色随温度变化的规律,使用方便,但是在实际应用中由于受环境光线及使用者对色彩的视觉误判,依据热变色图谱推定火灾温度会产生一定偏差。

Lab 色度分析系统是 1976 年由国际照明委员会(CIE)推荐的均匀色空间^[8],该空间是三维直角坐标系,其以颜色的亮度 L 、色度坐标 a (正值表示红色,负值表示绿色)和 b (正值表示黄色,负值表示蓝色)来表示颜色在色空间中的位置。该系统可以实现对被测试对象色彩的定量描述,是目前受到广泛应用的测色系统。笔者通过模拟结构钢受火试验,使结构钢经历不同高温,再采用不同降温方式进行冷却后,将 Lab 色度分析系统用于结构钢火灾后热变色的分析观测,探讨结构钢高温冷却后热变色变化,以期量化描述结构钢热变色随火灾温度的变化规律。

1 试验研究

1.1 试验方案

调查研究表明,通常火灾初期升温较快,有时几分钟火灾温度就可达到 300 ℃,一般火灾温度均超过 300 ℃。火灾发展后期升温较慢,升温至 900 ℃通常需要 45 min 以上^[9]。试验及火灾案例表明,对钢结构而言,当温度 $T \leq 900$ ℃时,由于结构内部构件相互约束作用,结构仍具有一定承载能力,如果继续升温,钢结构会出现垮塌现象^[10]。为对经历火灾后未倒塌的钢结构进行安全评估与加固提供依据,笔者研究高温后采用不同冷却方式下,结构钢热变色的变化规律。考虑钢结构发生火灾后,有消防喷水灭火和燃烧材料燃尽自然灭火 2 种方式,试验分别设定试件升温至不同高温(300 ℃,400 ℃,500 ℃,600 ℃,700 ℃,800 ℃,900 ℃),然后采取自然冷却和喷水冷却这 2 种方式使试件降至室温,并考虑时效影响,在高温冷却后不同时间段观测记录结构钢表面热变色。通过试验研究结构钢热变色随所经历的最高温度、冷却方式以及高温后静置时间

不同而呈现的变化规律。

1.2 试件制作

试件选用钢结构工程常用材料 Q235B 热轧钢板制作,试件尺寸为 60 mm×60 mm×10 mm 方板。试验重点研究裸钢受热后热变色变化规律,为减小结构钢已有锈斑对热变色的影响,试件一面经铣床加工,呈现结构钢本色,另一面未加工,带有赤黄色锈迹。根据试验的温度设定和冷却方式要求,设计了 16 组试件(其中包括 2 组用于对比分析的室温试件),每组 3 个,总计 48 个。

1.3 试验设备与方法

鉴于受火时间对钢材性能影响不大,温度是影响钢材性能的关键因素^[11],为便于准确控制试件的最高温度,且能在相同升温环境下进行不同温度后的性能对比分析,试验加热设备采用箱型自动控温电阻炉,如图 1 所示。喷水冷却采用自制压力喷水嘴,按计算流量控制出水。热变色的记录采用 AC-DI 系列全自动测色色差仪,如图 2 所示,热变色采集结果以 Lab 色度值量化表示。

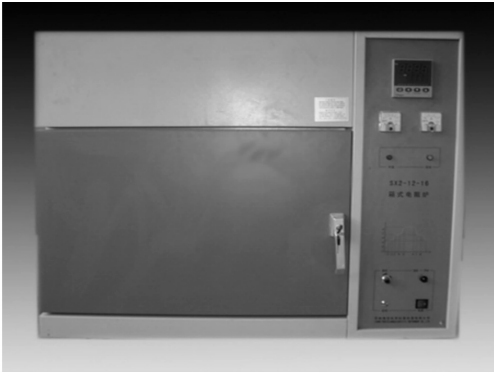


图 1 箱型自动控温电阻炉

Fig. 1 Automatically Controlled Temperature Box Type Resistance Furnace



图 2 全自动测色色差仪

Fig. 2 Full-automatic Measuring Color Apparatus

整个试验分为升温、冷却 2 个阶段。加热至设

定温度,恒温 12 min 后实施冷却。对于自然冷却试件,直接置于空气中自然冷却至室温。对于喷水冷却试件,取出炉膛后,在试件表面喷水降温。试验根据单位面积用水量相等原则模拟消防喷水降温,喷水时间 T_2 按下式计算

$$T_2=\frac{3.6Q_1T_1A}{Q_2\pi R^2}\tag{1}$$

式中: T_1 为消防灭火时间; Q_1 为消防灭火用水量; R 为水龙带灭火覆盖半径; Q_2 为压力喷嘴出水量; A 为试件单侧面积。

式(1)中的消防指标按照《高层民用建筑设计防火规范》(GB 50045—2005)选取, $T_1=2\text{ h}$, $Q_1=15\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, $R=15\text{ m}$, Q_2 稳定在 $35\text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$,由式(1)可以估算出试验模拟喷水时间。

表 1 高温后 2 种冷却方式结构钢热变色的 Lab 色度值

Tab. 1 Thermochromism Lab Color Values for Structural Steel After High Temperatures in Two Cooling Ways

$T/\text{℃}$	L 值			a 值			b 值		
	自然冷却	喷水冷却	偏差/ %	自然冷却	喷水冷却	偏差/ %	自然冷却	喷水冷却	偏差/ %
20	49	48	2.0	2	2	*	3	3	*
300	47	45	4.3	−3	−3	*	0	0	*
400	42	41	2.4	−16	−15	6.3	−24	−22	8.3
500	39	39	*	−12	−12	*	18	−17	5.6
600	36	38	−5.6	−7	−7	*	−13	−13	*
700	36	37	−2.8	−5	−5	*	−8	−8	*
800	35	36	−2.9	−3	−3	*	−5	−5	*
900	35	36	−2.9	1	1	*	−2	−2	*

注:表中“*”表示无明显偏差;偏差为自然冷却色度值与喷水冷却色度值的差除以自然冷却色度值。

的热变色反应,采用喷水冷却和自然冷却这 2 种冷却方式,试件表面除锈斑差别之外热变色差异不大,冷却方式对结构钢热变色影响不显著。

2.2 温度对热变色的影响

图 3~5 为结构钢高温冷却后,利用 ACDI 系列全自动测色色差仪测试热变色所得结果。

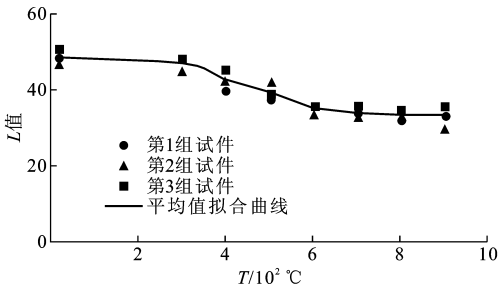


图 3 高温后结构钢热变色 L 值随温度变化曲线

Fig. 3 Variation Curves of Thermochromism Values L with Temperatures for Structural Steel After High Temperatures

由图 3 可以看出:随着温度的升高,热变色 L 值逐渐减小,试件亮度减小;温度为 $20\text{ ℃}\sim 300\text{ ℃}$

冷却后的试件考虑时效影响,在自然条件下静置 1,3,6,10,15,20 d,并依此观测记录不同时间段结构钢表面的热变色。

2 试验结果与分析

2.1 冷却方式对热变色的影响

为研究高温后不同冷却方式对结构钢热变色的影响,试验中分别采用喷水冷却和自然冷却这 2 种冷却方式。试验结果表明,采用 2 种不同冷却方式冷却后结构钢试件表面的锈斑有一定差别,喷水冷却试件较自然冷却试件锈斑更为明显。避开锈斑,分别测得高温后 2 种冷却方式结构钢热变色的 Lab 色度值,如表 1 所示。

由表 1 可见,结构钢经不同高温冷却后,有显著

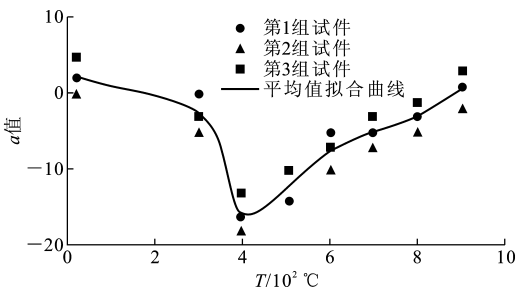


图 4 高温后结构钢热变色 a 值随温度变化曲线

Fig. 4 Variation Curves of Thermochromism Values a with Temperatures for Structural Steel After High Temperatures

时,随着温度升高, L 值降幅不大,试件亮度的变化不明显; $300\text{ ℃}\sim 600\text{ ℃}$ 时,曲线下降明显; $600\text{ ℃}\sim 900\text{ ℃}$ 时,曲线趋于平缓。可见,随着温度的升高,结构钢表面氧化膜的生成使得其光泽渐失。

由图 4 可以看出,随着温度的不同,热变色 a 值变化显著。图 4 中 a 值正向越大,表示颜色越偏于红色,负向越大,表示颜色越偏于绿色;温度为 $20\text{ ℃}\sim 300\text{ ℃}$ 时,随着温度的升高, a 值下降, 200 ℃

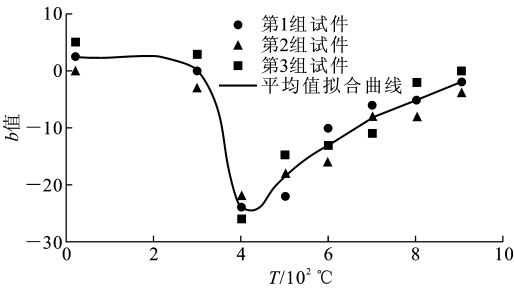


图 5 高温后结构钢热变色 b 值随温度变化曲线

Fig. 5 Variation Curves of Thermochromism Values b with Temperatures for Structural Steel After High Temperatures

时 a 值接近于 0, 之后 a 值为负; 300 °C ~ 400 °C 时, 曲线下降趋势较大, 400 °C 为转折点, a 值最小降至 -17; 400 °C ~ 900 °C 时, 随着温度的升高, a 值增大, 温度至 900 °C 时, a 值增至正值, 接近室温。

由图 5 可以看出, 随着温度的不同, 热变色 b 值变化显著。图 5 中 b 值正向越大, 表示颜色越偏于黄色, 负向越大, 表示颜色越偏于蓝色; 当温度为 20 °C ~ 300 °C 时, 随着温度的升高, b 值缓慢下降, 300 °C 时接近于 0, 之后 b 值为负; 300 °C ~ 400 °C 时, 曲线下降趋势较大, 400 °C 为转折点, b 值最小降至 -24; 400 °C ~ 900 °C 时, 随着温度的升高, b 值增大, 900 °C 时, b 值增至 -2。

由 a, b 值的变化规律可知, 当温度为 20 °C ~ 400 °C 时, 随温度的升高, 结构钢冷却后热变色向蓝绿色加深, 400 °C 为转折点, 过了 400 °C, 蓝绿色逐渐变浅, 由蓝绿色变为灰蓝色继而向灰色发展, 随温度的继续升高, 灰色变为浅灰色。可见, 火灾温度对热变色影响较为显著。

2.3 时效对热变色的影响

为进一步研究结构钢冷却后静置时效对热变色的影响, 对 300 °C, 600 °C, 900 °C 试件进行了跟踪观测, 测得其自然条件下静置 1, 2, 3, 7, 10, 15, 19 d 的热变色 Lab 色度值, 如图 6~8 所示。

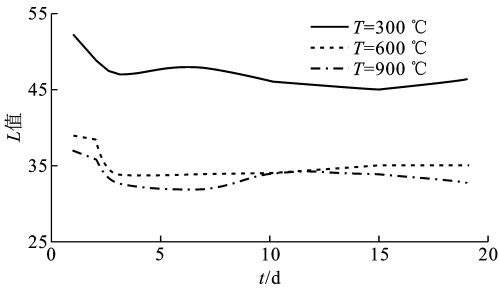


图 6 高温后结构钢热变色 L 值随时间变化曲线

Fig. 6 Variation Curves of Thermochromism Values L with Time for Structural Steel After High Temperatures

由图 6 可以看出, 结构钢冷却后静置时间对热

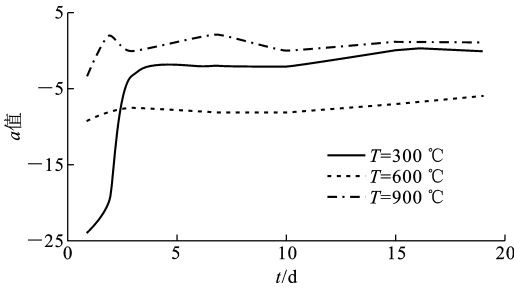


图 7 高温后结构钢热变色 a 值随时间变化曲线

Fig. 7 Variation Curves of Thermochromism Values a with Time for Structural Steel After High Temperature

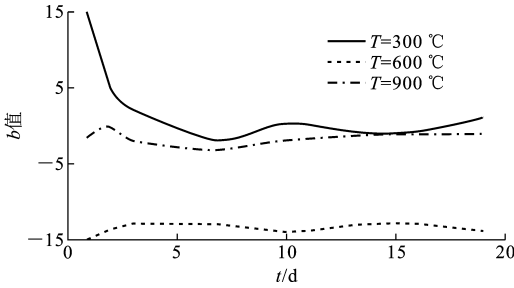


图 8 高温后结构钢热变色 b 值随时间变化曲线

Fig. 8 Variation Curves of Thermochromism Values b with Time for Structural Steel After High Temperatures

变色 L 值有一定影响。高温冷却后前 3 d 曲线下降明显, 300 °C 试件 L 值下降幅度为 5, 600 °C 试件 L 值下降幅度为 5, 900 °C 试件 L 值下降幅度为 4; 3 d 后曲线趋于平缓, 3 组试件 L 值均趋于稳定。

由图 7 可以看出: 高温冷却后前 3 d, 300 °C 试件冷却后, 随静置时间的增加, 热变色 a 值增幅较大, 增长幅度为 21; 600 °C, 900 °C 试件 a 值随静置时间增加的幅度不显著; 3 d 后曲线趋于平缓, 3 组试件 a 值均趋于稳定。

由图 8 可以看出: 高温冷却后前 3 d, 300 °C 试件冷却后, 随静置时间的增加, 热变色 b 值降幅较大, 降低幅度为 13; 600 °C, 900 °C 试件 b 值随静置时间延长变化不显著; 3 d 后曲线趋于平缓, 3 组试件 b 值均趋于稳定。

由图 6~8 还可以看出, 高温后时效对结构钢热变色影响早期明显, 3 d 后趋于稳定。考虑到结构钢高温后热变色 3 d 后趋于稳定, 且火灾修复加固工作往往在该时间段之后, 因此, 依据试验数据统计分析, 给出了 3 d 后结构钢热变色 Lab 色度值随温度的变化范围, 如表 2 所示。

由表 2 可见, 随温度的不同, 结构钢热变色 Lab 色度值有明显变化。单就 L, a, b 某一参数在不同温度下对应值的变化范围有微小重叠, 但是综合对

表 2 结构钢热变色 Lab 色度值变化范围

Tab. 2 Variation Ranges of Thermochromism Lab Color Values for Structural Steel

$T/^{\circ}\text{C}$	20	300	400	500	600	700	800	900
L 值	47~51	44~48	40~45	37~42	32~38	32~37	31~36	30~36
a 值	0~5	-5~0	-18~-13	-14~-10	-10~-5	-7~-3	-5~-1	-2~3
b 值	0~5	-3~3	-26~-22	-22~-15	-16~-10	-11~-6	-8~-2	-4~0

比 L,a,b 对应值的差异,可以区分出不同的温度段。

3 结 语

- (1) 钢结构经历了火灾升温 and 降温冷却过程后, 结构钢表面呈现明显的热变色反应。
- (2) 冷却方式对结构钢热变色影响不显著, 火灾温度是影响结构钢热变色的主要因素。
- (3) 结构钢高温冷却后静置时效对热变色影响幅度较小, 3 d 内, 随着时间的推移, 试件亮度减小, 3 d 后热变色 Lab 色度值趋于稳定。
- (4) 编制了火灾后结构钢热变色 Lab 色度值变化表, 该表结合 ACDI 系列全自动测色色差仪, 可用于火灾后结构钢的无损检测及温度场推定。
- (5) 试验证明, 采用 Lab 色度分析系统研究结构钢高温后热变色变化规律, 方法简单可行。利用该方法可进一步研究有涂装附着层钢结构遭受火灾后表面颜色的变化规律。

参考文献:

References:

[1] 闵明保,李延和,高本立,等. 建筑物火灾后诊断与处理[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1994.

MIN Ming-bao,LI Yan-he,GAO Ben-li,et al. Diagnosis and Treatment of Existing Building After Fire [M]. Nanjing:Jiangsu Science and Technology Press, 1994.

[2] 李保霞. 混凝土“火灾温度”鉴定方法研究[J]. 混凝土,2008(5):10-12.

LI Bao-xia. Method for Identifying “Conflagration Temperature” of Concrete[J]. Concrete,2008(5):10-12.

[3] 侯世恩,王建刚. 火灾温度的判定方法[J]. 消防科技, 1997(4):5-9.

HOU Shi-en, WANG Jian-gang. Judgment Methods of Fire Temperature[J]. Fire Science and Technology,1997(4):5-9.

[4] 王安坤,陶 里,周 燕. 混凝土建筑物火灾温度判定方法概述[J]. 工程质量,2005(3):37-39.

WANG An-kun,TAO Li,ZHOU Yan. Brief Description of Concrete Building Fire Temperature Judging

Methods[J]. Engineering Quality,2005(3):37-39.

[5] 曹文衔. 损伤累积条件下钢框架结构火灾反应的分析研究[D]. 上海:同济大学,1998.

CAO Wen-xian. Study on Structure Response of Steel Frames Subjected to Fire with Damage Accumulation Effects[D]. Shanghai:Tongji University,1998.

[6] 陈建锋. 钢结构火灾后安全评估及加固研究[D]. 南京:河海大学,2009.

CHEN Jian-feng. Investigation on Safety Assessment and Strengthening Technique of Steel Structure Post-fire[D]. Nanjing:Hohai University,2009.

[7] 陈建锋,曹平周,周天华,等. 钢结构火灾温度推定方法研究[J]. 建筑科学,2010,26(9):67-70,53.

CHEN Jian-feng, CAO Ping-zhou, ZHOU Tian-hua, et al. Estimate Methods of Fire Temperature for Steel Structure[J]. Building Science, 2010, 26(9): 67-70, 53.

[8] MARGULIS D. Photoshop Lab 修色圣典[M]. 袁鹏飞,译. 北京:人民邮电出版社,2007.

MARGULIS D. Photoshop Lab Color the Canyon Conundrum[M]. Translated by YUAN Peng-fei. Beijing:Posts & Telecom Press,2007.

[9] 李国强,蒋首超,林桂祥. 钢结构抗火计算与设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.

LI Guo-qiang,JIANG Shou-chao,LIN Gui-xiang. Fire Resistance Calculation and Design of Steel Structure [M]. Beijing:China Architecture & Building Press, 1999.

[10] 李国强,韩林海,楼国彪,等. 钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006.

LI Guo-qiang, HAN Lin-hai, LOU Guo-biao, et al. Fire Resistance Design of Steel Structure and Steel-concrete Composite Structure[M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2006.

[11] 余志武,王中强,史召锋. 高温后新Ⅲ级钢筋力学性能的试验研究[J]. 建筑结构学报,2005,26(2):112-116.

YU Zhi-wu, WANG Zhong-qiang, SHI Zhao-feng. Experimental Research on Material Properties of New Ⅲ Grade Steel Bars After Fire[J]. Journal of Building Structures,2005,26(2):112-116.