

# Statistical Properties of Compressive Strength of Thick Fireproof Coating for Steel Structure

Maiwulan Alimujiang<sup>1</sup>, Suwen Chen<sup>1,2</sup>, Linsen Wu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

<sup>2</sup>State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering (SLDRCET), Tongji University, Shanghai

Email: 1987mevlan@tongji.edu.cn

Received: Sep. 1<sup>st</sup>, 2016; accepted: Sep. 17<sup>th</sup>, 2016; published: Sep. 20<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

In this paper, batch tests have been conducted to obtain compressive strength of fireproof coating. The damage characteristic of the coating is analyzed, and the strength value, modulus of elasticity and ultimate strain under compressive loading are obtained through the statistical analysis. The finding from this paper helps to understand the mechanics properties of cementitious fireproof coating, and provides the coating material property data for the analysis of the residual fire resistance of a steel frame.

## Keywords

Basic Mechanical Properties, Thick Fireproof Coatings, Batch Tests, Statistical Analysis

---

# 厚型钢结构防火涂层抗压强度的统计特性研究

麦吾兰·阿力木江<sup>1</sup>, 陈素文<sup>1,2</sup>, 吴林森<sup>1</sup>

<sup>1</sup>同济大学土木工程学院, 上海

<sup>2</sup>同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海

Email: 1987mevlan@tongji.edu.cn

收稿日期: 2016年9月1日; 录用日期: 2016年9月17日; 发布日期: 2016年9月20日

## 摘 要

本文针对厚型钢结构防火涂层的抗压强度展开了批量试验研究,分析了厚型防火涂层的受压破坏特征,并通过对所得试验结果的数理统计分析,获得了防火涂层抗压强度、弹性模量和极限应变的统计特性和取值。本文研究有助于进一步认识厚型钢结构防火涂层的力学性能,并为准确评价钢结构的震后抗火性能提供材性分析数据。

## 关键词

抗压强度, 厚型钢结构防火涂层, 批量试验, 统计分析

## 1. 引言

地震次生火灾是地震最主要的次生灾害之一,有时比地震直接灾害造成的危害和损失还要大的多[1]-[4]。钢材以其强度高、重量轻、抗震性能佳和可靠性高等众多突出的优点被众多工程师所青睐。但是钢材的耐火性能较差,一般无防火保护的钢结构耐火时间很短,仅为 10 min~20 min [5],当采用适当的防火措施时,可以有效地提高钢结构的耐火极限。厚型防火涂料因其耐火时间长,耐久性好,具有良好的经济性和实用性而被我国大规模使用。但厚型防火涂料与构件的粘结性能较差,在地震、碰撞或恐怖爆炸等灾害中,涂料因受到冲击或碰撞都会遭受不同程度的破损,甚至脱落。

国内外对钢结构厚型防火涂料的研究比较少,同济大学王野华、张志凌、董兆海和赵升等[6]-[9]对钢结构防火涂料的材性做出了初步试验研究;金楚[10]对不同养护条件下的厚型涂料的基本力学性能进行了初步研究。王卫永、李国强和李大华等[11]使用层间应力理论对拉伸和弯曲作用下防火涂料和钢板件之间的层间正应力进行了分析;江黎明和廖志娟等[12] [13]引入 CZM 模型分析了涂层界面与涂层内部的应力分布及裂缝发展模式。Braxtan 和 Pessiki [14]对钢板件在受拉屈曲时,板件上喷涂型防火涂层的粘结性能进行了研究。

已有的试验及理论分析所用到的防火涂层力学性能参数未考虑到涂料力学性能的变异性。而根据本课题组的前期研究[15] [16],防火涂层的力学性能,包括强度和模量,具有较大的离散性,而力学性能变异性对涂层破损有较大的影响。本文通过批量试验得到足够的试验数据,并进一步进行数据统计分析得出防火涂层力学性能的统计数据,完善对厚涂型钢结构防火涂料的材料力学性能的认识。

## 2. 试验方案设计

### 2.1. 试验所用设备和涂料

试验采用易川防火涂料有限公司生产的涂料(YC-1 型)。涂料的主要成分有蛭石、珍珠岩、高岭土、轻钙、云母、水泥以及添加剂。该材料无毒不燃,不含有石棉成分,具有重量轻、干燥快、耐潮湿、耐冻融、耐腐蚀性、耐酸性、隔热性和抗老化等优良的理化性能。根据使用说明书进行涂料施工,试件先在养护室(温度为 15°~18°,湿度为 90%)养护 28 天,之后放在自然条件(温度 10°~20°,湿度 40%~80%)养护一周,如图 1 所示。

加载采用同济大学土木学院的电子万能试验机,型号规格: CMT4204 20KN,试验力误差:示值的  $\pm 0.5\%$  以内。



Figure 1. The test block under maintenance  
图 1. 养护中的试验试块

## 2.2. 实验实施

进行了 56 个边长为 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 的防火涂层的抗压强度试验, 分别编号为 C01-C56 (Compression)。采用非金属压缩模式, 试件上下表面涂凡士林, 以 0.5 mm/min 的速度均匀加载至试块破坏。

抗压强度计算公式如式 1:

$$f_c = \frac{F_c}{A_c} \quad (1)$$

其中:  $f_c$  — 抗压强度(MPa);  
 $F_c$  — 抗压极限荷载(N);  
 $A_c$  — 受压面积(mm<sup>2</sup>)。

## 3. 试验现象

典型的涂层单轴受压应力 - 应变曲线如图 2 所示(以试件 C15 受压过程为代表), 其中应变采用的是试验加载的位移与试件高度的比值。

由图 2 可见, 在 OA 段和 AB 段, 试件应力随应变的增长近似直线; 过 B 点后呈现非线性状态, 达到峰值 C 时, 涂层上下段有横向裂缝出现。在 CD 段, 试件表面出现斜向裂缝, 如图 3 所示。达到 D 点时, 裂缝逐步贯通, 涂料表面局部开始脱落, 如图 4 所示。在 DE 段, 试件内部已经不再是单轴受力状态, 而是承受正应力和剪应力的综合作用, 随着荷载的增大, 斜裂缝逐渐形成破坏带, 残余应力缓慢下降。其余 55 个试块的破坏模式相同, 受压应力 - 应变曲线也类似。

## 4. 试验结果统计分析

采用 K-S 检验方法对弹性模量、抗压强度以及极限应变的分布进行检验, 在显著水平为  $\alpha = 0.05$  时, 均符合正态分布, 其统计结果如表 1 所示。其中, 弹性模量取值为弹性阶段应力比为 0.4 和 0.8 之间直线的斜率。极限应变是试件应力应变曲线中最大应力对应的应变。

### 1) 涂层抗压强度

涂层抗压强度均值为 = 1.24 MPa, 标准差 = 0.17 MPa。因此, 涂层抗压强度的概率密度函数为式 2:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.17} e^{-\frac{(x-1.24)^2}{2 \times 0.17^2}} \quad (2)$$

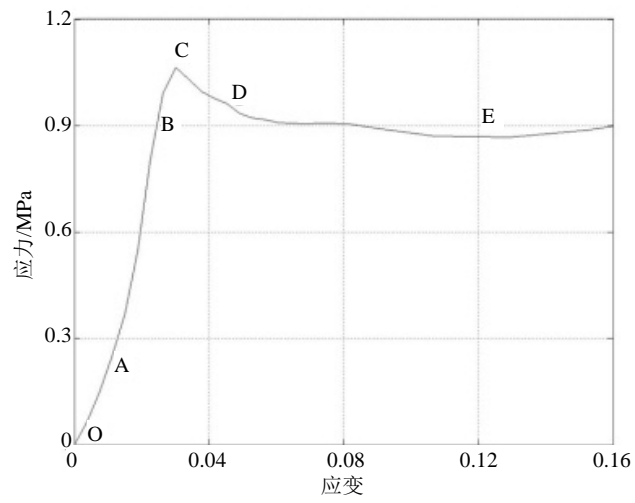


Figure 2. Stress strain curve of C15  
图 2. C15 应力 - 应变曲线

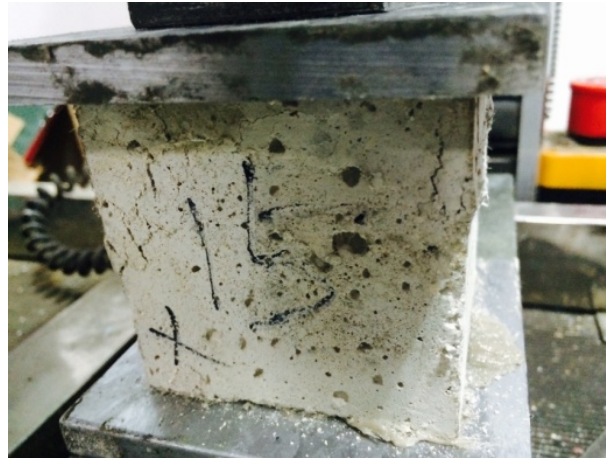


Figure 3. Inclined cracks on the test block  
图 3. 试块斜向裂缝



Figure 4. Well versed inclined cracks  
图 4. 贯通的斜裂缝

**Table 1.** System resulting data of standard experiment  
**表 1.** 标准试验系统结果数据

参数	均值	标准差	标准值	变异系数 VC
fc (MPa)	1.24	0.17	0.96	0.14
Ec (MPa)	61.16	22.29	24.49	0.36
$\varepsilon_c$	0.058	0.018	0.028	0.31

由于涂层抗压强度试验结果服从正态分布模型，具有 95% 保证率的抗压强度正态分布模型为式 3：

$$f_{cu,k} = \mu_{f,cu} - 1.645\sigma_{f,cu} \quad (3)$$

其中均值方差，方差，变异系数由表 1 均为已知，由式 3 可求出相应的涂层抗压强度标准值，列入表 1。

### 2) 涂层抗压弹性模量取值

涂层抗压弹性模量均值为 = 61.16 MPa，标准差 = 22.29 MPa。因此，涂层抗压弹性模量的其概率密度函数为式 4：

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 22.29} e^{-\frac{(x-61.16)^2}{2 \times 22.29^2}} \quad (4)$$

由于涂层抗压弹性模量试验结果服从正态分布模型，具有 95% 保证率的抗压弹性模量正态分布模型为式 5：

$$E_{cu,k} = \mu_{E,cu} - 1.645\sigma_{E,cu} \quad (5)$$

其中均值方差，方差，变异系数由表 1 均为已知，由式 5 可求出相应的涂层抗压弹性模量标准值，列入表 1。

### 3) 涂层抗压极限应变取值

涂层抗压极限应变均值为 = 0.058，标准差 = 0.018。因此，涂层抗压极限应变的其概率密度函数为式 6：

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.018} e^{-\frac{(x-0.058)^2}{2 \times 0.018^2}} \quad (6)$$

由于涂层抗压极限应变试验结果服从正态分布模型，具有 95% 保证率的抗压极限应变正态分布模型为式 7：

$$\varepsilon_{cu,k} = \mu_{\varepsilon,cu} - 1.645\sigma_{\varepsilon,cu} \quad (7)$$

其中均值方差，方差，变异系数由表 1 均为已知，由式 7 可求出相应的涂层抗压极限应变标准值，列入表 1。

## 5. 结语

本文针对厚钢结构防火涂层的抗压性能，通过批量试验得到足够的试验数据，并进行数据统计分析，获得了防火涂层抗压强度、弹性模量和极限应变的统计特性和指标取值，进一步完善对厚涂型钢结构防火涂层的材料力学性能的认识。

## 参考文献 (References)

- [1] 赵思健, 任爱珠, 熊利亚. 城市地震次生火灾研究综述[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(2): 57-67.



- [2] 陈素文, 李国强. 地震次生火灾的研究进展[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(5): 120-126.
- [3] Takewaki, I. (2011) Preliminary Report of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. *Journal of Zhejiang University—Science A*, **12**, 327-334. <http://dx.doi.org/10.1631/jzus.A1100111>
- [4] NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention) (2011) 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. (In Japanese)
- [5] 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.
- [6] 王野华. 钢结构防火涂料力学性能研究[D]: [本科毕业论文]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2007.
- [7] 张志凌. 钢结构防火涂料与钢构件的粘结性能研究[D]: [本科毕业论文]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2007.
- [8] 董兆海. 静载下厚涂型钢结构防火涂层的破损研究[D]: [本科毕业论文]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2008.
- [9] 赵升. 厚涂型钢结构防火涂料的材料研究[D]: [本科毕业论文]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2008.
- [10] 金楚. 单调荷载下厚涂型钢结构防火涂层的破损机理研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2010.
- [11] 王卫永, 李国强, 李大华. 防火涂料和钢板间之间的层间应力[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2009, 34(4): 451-455.
- [12] 江黎明, 陈素文, 金楚. 单调荷载下厚涂型钢结构防火涂层破损机理研究[C]//中国建筑学会, 中国地震学会. 第八届全国地震工程会议论文集: 2010年卷. 重庆: 土木建筑与环境工程, 2010: 283-286.
- [13] 廖志娟, 陈素文, 江黎明, 吴林森. 纯弯荷载下厚型钢结构防火涂层破损的试验研究和数值分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(2): 197-204.
- [14] Braxtan, N.L. and Pessiki, S. (2011) Bond Performance of SFRM on Steel Plates Subjected to Tensile Yielding. *Journal of Fire Protection Engineering*, **21**, 37-55. <http://dx.doi.org/10.1177/1042391510394244>
- [15] Chen, S.W., Jiang, L.M., Usmani, A., Li, G.Q. and Jin, C. (2015) Damage Mechanisms in Cementitious Coatings on Steel Members under Axial Loading. *Construction and Building Materials*, **90**, 18-35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.025>
- [16] Chen, S.W., Jiang, L.M., Usmani, A. and Li, G.Q. (2015) Damage Mechanisms in Cementitious Coatings on Steel Members in Bending. *Structures and Buildings*, **168**, 351-369. <http://dx.doi.org/10.1680/stbu.13.00096>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网覆盖推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)