

# 不锈钢材料的高温性能与本构关系

杨成博, 胡鹰, 杨波, 戴国欣

(重庆大学土木工程学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:** 不锈钢材料具有耐腐蚀、耐高温等特点, 是一种良好的环保耐久建筑材料。现有研究成果表明, 不锈钢高温性能优于低碳钢。通过比较规范以及国内外学者所得到的不锈钢高温力学性能参数, 指出了现有规范的不足。回顾了国内外关于不锈钢应力-应变本构模型的研究成果, 并通过比较分析, 归纳总结出各个模型的优缺点。Quach 三段式应力-应变模型适用于受拉和受压情况, 可直接应用于现行规范进行常温下结构设计, Gardner 提出的高温下应力-应变模型适用性较强, 但模型不够完整, 还需要进一步拓展。

**关键词:** 不锈钢; 高温; 力学性能; 本构关系

**中图分类号:** TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)S1-0103-07

## Material properties and stress-strain model for stainless steel at elevated temperatures

Yang Chengbo, Hu Ying, Yang Bo, Dai Guoxin

(School of Civil Engineering, Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** Stainless steel is a material with corrosion resistance and high temperature resistance, it is a kind of good environmental protection building material. Existing researches show that stainless steel has a better performance than low carbon steel in high temperature resistance. Through studying mechanics property for stainless steel at elevated temperatures obtained by scholars, to evaluate the deficiencies of the existing specifications. Reviewing the researches in strain-stress curves and constitutive relations models home and abroad, after introducing, analyzing, summing up the advantages and disadvantages of each model. Three-step stress-strain model proposed by Quach is applicable for the tensile and compressive conditions, can be directly used in current structural design specification in room temperature. The stress-strain model at elevated temperatures proposed by Gardner has a strong applicability, but it is not complete and still need to further expand.

**Key words:** stainless steel; high temperature; mechanics property; stress-strain model

不锈钢是一种镍含量高于 10.5% 的合金钢, 其中镍含量的范围为 10.5%~30%<sup>[1]</sup>。由于不锈钢作为建筑材料具有外观优美、抗腐蚀性强、生命周期成本低等一系列优点, 使不锈钢在建筑结构使用中

具有巨大的潜力。不锈钢最早开始在建筑中采用要追溯到 20 世纪初, 初期主要应用在装饰工程中, 并开始应用于建筑物的围护结构和屋盖结构<sup>[2]</sup>。国外很多学者也开始对不锈钢构件的性能和设计开展

收稿日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(51578092); 重庆大学百人计划启动基金(0218001104410)

作者简介: 杨成博(1991-), 男, 主要从事钢结构抗火研究, (E-mail) 943629956@qq.com。

胡鹰(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) y. hu@cqu.edu.cn。

开研究。

不锈钢作为一种特殊的钢材,除了上述提到的一些优点以外,其在高温条件下的残余强度和刚度均高于普通碳素钢,抗火性能良好<sup>[3]</sup>。20 世纪 90 年代以来,欧洲、澳大利亚和新西兰以及美国分别颁布了不锈钢设计规范<sup>[4-6]</sup>,但对于不锈钢抗火设计只有欧洲单独颁布了规范<sup>[7]</sup>。美国“9·11”事件之后,结构抗火研究一直是国内外研究的重点方向之一,近些年不锈钢结构的抗火性能研究逐步积累了一定的成果。

国内对不锈钢力学性能以及不锈钢结构的研究相对较少,也没有针对不锈钢结构的设计规范或行业标准,因此加强对建筑不锈钢的力学性能的研究很有必要。笔者主要对不锈钢高温条件下力学性能和本构关系做了较为详细的分析,比较了国外学者提出的各不锈钢本构模型的优缺点,可为不锈钢结构抗火设计和数值模拟提供参考。

## 1 试验研究

不锈钢材料高温力学性能研究始于 20 世纪 70 年代,Peckner 等<sup>[8]</sup>通过实验得到了不同牌号的奥氏体和铁素体不锈钢在高温条件下弹性模量和强度折减系数。中间较长一段时间不锈钢高温性能研究处于停滞不前的状态。

20 世纪 90 年代,Sakumoto 等<sup>[9]</sup>对不锈钢 SUS 304、SUS 316 和 SUS314N2 进行了研究,SUS 是日本的不锈钢材料标准,类似于美国的 ASTM304、316 和 314N2。Fujita 等<sup>[10]</sup>曾对铁素体不锈钢高温性能进行了研究。Brinkman 等<sup>[11]</sup>对 316 系列(316FR 和 316L)不锈钢高温性能展开了研究。陈驹等<sup>[12]</sup>曾比较了不锈钢、碳素钢和合金钢高温下的力学性能,当温度高于 550 °C 时,不锈钢的弹性模量和屈服强度折减系数都明显高于低碳钢和合金钢。

近些年 Wang 等<sup>[13]</sup>研究了 EN1.4307 奥氏体不锈钢的高温材料性能,他们分别进行了 3 种形状试件的研究,分别为板状试件、角状试件和棒状试件,如图 1 所示。

试验结果表明试件周围温度稳定后,受火时间对试件高温性能的影响比较小。对于板状和棒状试件在温度达到 500 °C 时试件屈服强度下降很明显,而角状试件强度随温度的下降不太明显,并且高温下延展性也更好。

国内王元清等<sup>[14-15]</sup>研究了国产奥氏体不锈钢

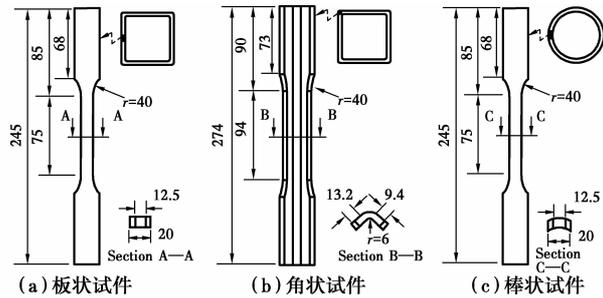


图 1 试件尺寸图

S31608(相当于 AISI 316 以及 EN 1.4401)单向拉伸以及循环加载的试验,发现在单调拉伸和循环荷载条件下国产不锈钢的应力应变曲线差别较大,循环荷载下不锈钢材料滞回性能良好。

## 2 不锈钢高温力学性能

不锈钢作为一种特殊的合金钢,不同于一般的碳素钢,没有明显的屈服阶段,所以一般采用对应 0.2% 塑性应变的应力作为不锈钢的屈服强度。和大多数建筑钢材一样,笔者所关心的不锈钢高温力学性能主要包括弹性模量,屈服强度,极限强度,延伸率等,下文所给出高温材性内容均为牌号为 EN 1.4301 不锈钢有关实验结果和规范相关内容。

### 2.1 弹性模量

材料的刚度特性一般用弹性模量来度量,EN 1993-1-4(2005)<sup>[4]</sup>给出了不同牌号的不锈钢初始弹性模量折减系数,用于不锈钢结构抗火设计。图 2 比较了弹性模量折减系数的试验结果和相关规范推荐值。

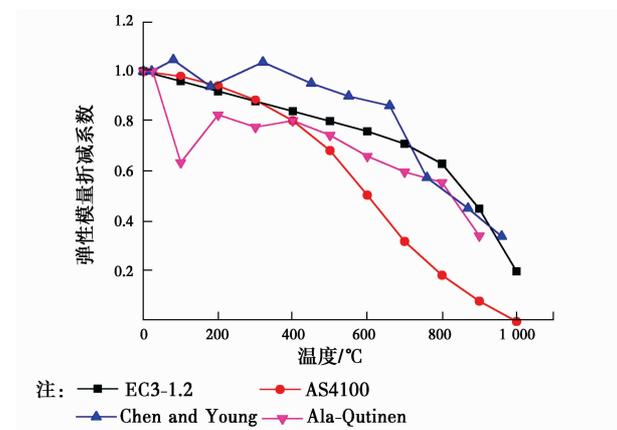


图 2 刚度折减系数

从图 2 中可以看出弹性模量的试验测量结果很不稳定,这是因为上述试验都是采用引伸计来跟踪弹性段,再取直线段斜率得出弹性模量。这种方法

所测出弹性模量一般仅供参考,精确测定弹性模量需要用到振动法、电测法等方法。从试验结果与规范推荐值都可以看出弹性模量在温度达到 500 °C 后下降很明显,澳大利亚规范 AS4100<sup>[16]</sup> 则显得过于保守。Chen 等<sup>[17]</sup> 和 Ala-Outinen<sup>[18]</sup> 还给出了高温下弹性模量连续性模型。

### 2.2 屈服强度和极限强度

在高温条件下材料变形较大,屈服强度对应应变一般可以取 0.2%、1.0% 和 2.0%, 此处取  $\sigma_{0.2}$  作为屈服强度。图 3 和图 4 分别给出了不锈钢屈服强度和极限强度折减系数的试验结果与相关规范推荐值的对比。

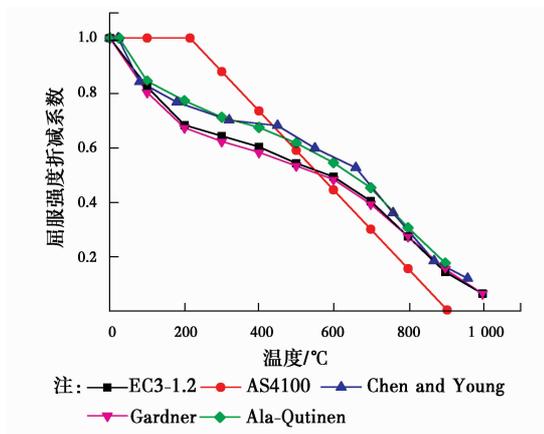


图 3 屈服强度折减系数

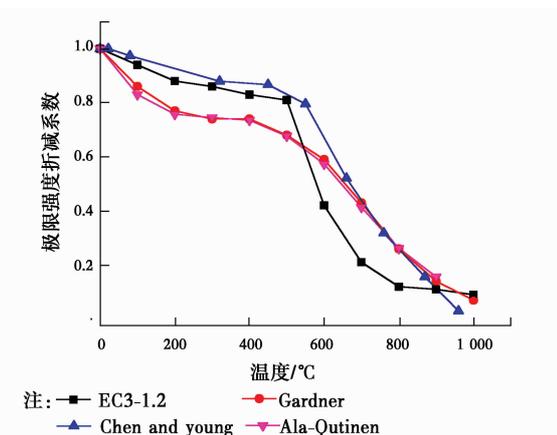


图 4 极限强度折减系数

AS4100 没有给出高温条件下极限强度折减系数,并且其屈服强度折减系数两段式模型过于简单,有很大局限性。

从图中可以看出实验结果与 EC3-1.2 给出值变化趋势比较一致,Ala-Outinen 试验结果表现出整体偏低的情况,可能该批钢材质量整体较差。EC3-1.2 与试验结果吻合较好,只是在温度达到 500 °C

时极限强度折减系数有一个较明显的突变,而实验结果并没有出现这种情况,整体上看 EC3-1.2 给出值偏于保守。

从以上分析结果可以看出不锈钢 EN 1.4301 在温度低于 500 °C 时表现出刚度和强度折减都不是很明显,在温度超过 500 °C 后刚度和强度下降明显,对于不锈钢结构抗火设计要引起足够重视。

## 3 不锈钢材料高温本构关系

实验测得的不锈钢应力应变曲线没有明显的屈服点,表现出明显的非线性特征。20 世纪 40 年代, Ramberg 和 Osgood<sup>[19]</sup> 提出了非线性材料的本构关系模型,此模型的提出本来用于铝合金,但是已经证明 Ramberg-Osgood 模型适用于许多非线性金属材料,其中也包括不锈钢材料。Rasmussen、Ben Young、L. Gardner 等<sup>[20,17,21]</sup> 都通过实验证明 Ramberg-Osgood 模型在  $\sigma_{0.2}$  以下曲线段对试验测得不锈钢应力应变曲线吻合度良好,在应力超过  $\sigma_{0.2}$  之后, Ramberg-Osgood 模型表现出应力偏大的缺陷,这样对不锈钢结构设计肯定是极为不利的,因此国外学者提出了一些基于 Ramberg-Osgood 模型改进后的不锈钢应力应变模型,与试验曲线吻合度更好。

### 3.1 Ramberg-Osgood 模型简介

Ramberg-Osgood 模型是固体力学中描述弹塑性材料应力-应变关系(应力-应变曲线)的一个经典理论模型,该理论视总应变为弹性应变  $\epsilon_e$  和塑性应变  $\epsilon_p$  之和。

Ramberg-Osgood 模型方程为:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \epsilon_{yp} \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^n \quad (1)$$

式中:  $E_0$  为材料初始弹性模量;  $\sigma_y$  为材料条件屈服极限;  $\epsilon_{yp}$  为该应力下的塑性应变(残余应变);  $n$  为材料的应变硬化指数。通过实验测得这 3 个量之后, 带入模型就能得到试验材料的应力应变曲线。

材料的弹性形变等于比例极限除以初始弹性模量,则可知比例极限  $\epsilon_p$  下对应的塑性应变为:

$$\epsilon_{pp} = \epsilon - \frac{\sigma_p}{E_0} = \epsilon_{yp} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_y} \right)^n \quad (2)$$

由式(2)可得硬化指数  $n$  的表达式为:

$$n = \frac{\ln(\epsilon_{yp}/\epsilon_{pp})}{\ln(\sigma_y/\sigma_p)} \quad (2)$$

对于不锈钢来说,当应力超过  $\sigma_{0.2}$  之后, Ramberg-Osgood 模型存在模型应力相对于试验数

据偏高的缺陷,如图 5 所示。

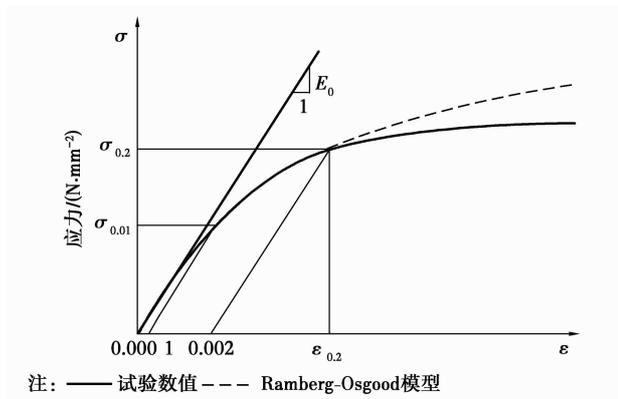


图 5 试验结果与 Ramberg-Osgood 模型曲线对比

由于 Ramberg-Osgood 模型在应力超过  $\sigma_{0.2}$  之后,预测值偏于不安全,所以国外很多学者开始提出新的不锈钢应力应变模型,其中 Rasmussen<sup>[20]</sup> 基于 Ramberg-Osgood 模型以  $\sigma_{0.2}$  为分界点将应力应变函数化为一个分段函数,很好地解决了 Ramberg-Osgood 模型的不足。

### 3.2 常温部分

MacDonald 等<sup>[22]</sup> 通过研究 UNS30400 (AISI304) 不锈钢槽钢柱材料力学性能发现, Ramberg-Osgood 模型中的硬化指数  $n$  取决于  $\sigma_{0.2}$  和  $\sigma_{0.01}$ , 不适用于大应变情况。在此基础上, Rasmussen 重新定义了  $\sigma_{0.2}$  之后的 Ramberg-Osgood 模型的应力应变函数, Rasmussen 应力应变函数如下:

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n & \text{for } \sigma \leq \sigma_{0.2} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \epsilon_u \left( \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^m + \epsilon_{0.2} & \text{for } \sigma > \sigma_{0.2} \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln(\sigma_{0.2}/\sigma_{0.01})} \quad m = 1 + 3.5 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u}$$

参数  $n$  是为了考虑不锈钢材料的应变硬化保证应力应变曲线在  $\sigma > \sigma_{0.2}$  段与试验数据相吻合,而参数  $m$  则是为了改善 Ramberg-Osgood 模型后半段应力偏高的情况。

$$E_{0.2} = \frac{E_0}{1 + 0.002n/e} \quad e = \frac{\sigma_{0.2}}{E_0}$$

$E_{0.2}$  为应力应变曲线在  $\sigma_{0.2}$  处的切线模量,而参数  $e$  可以看出是一个修饰条件屈服极限大小的量纲为一的量,以保证应力应变曲线在  $\sigma_{0.2}$  处平滑过渡。

Rasmussen 模型前半段与 Ramberg-Osgood 模

型完全相同,超过  $\sigma_{0.2}$  后半段应力应变曲线由  $\sigma_u$  和  $\epsilon_u$  控制, Rasmussen 为了证明该模型的稳定性,还对  $\sigma_u$  和  $\epsilon_u$  两个变量进行了参数化分析,当  $\sigma_u$  的变化范围为  $\pm 20\%$  时,引起的 ( $\epsilon = 2\%$ ) 误差最大为  $7.1\%$ ; 当  $\epsilon_u$  的变化范围为  $\pm 20\%$  时,引起的  $\sigma_{0.2}$  ( $\epsilon = 2\%$ ) 误差最大为  $2.7\%$ 。可以看出 Rasmussen 模型具有较好的稳定性。

Rasmussen 模型对于不锈钢常温本构关系已有了较好的吻合性,因此 Rasmussen 模型于 2005 年被 EN 1993-1-4 所采用,在此之后很多学者又在 Rasmussen 模型基础上提出了很多改进模型。

Gardner 和 Nethercot<sup>[21]</sup> 针对大应变情况,在 Ramberg-Osgood 模型基础上又提出了新的改进,建议用条件屈服极限  $\sigma_{1.0}$  代替极限应力  $\sigma_u$ , 公式如下:

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n & \text{for } \sigma \leq \sigma_{0.2} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \left( 0.008 - \frac{\sigma_{1.0} - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \right) \cdot \left( \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_{1.0} - \sigma_{0.2}} \right)^{n'_{0.2,1.0}} + \epsilon_{0.2} & \text{for } \sigma > \sigma_{0.2} \end{cases} \quad (5)$$

Gardner 和 Nethercot 对 EN1.4301 进行了受拉和受压材性试验,用条件屈服极限  $\sigma_{1.0}$  代替极限应力  $\sigma_u$ , 所以此模型既适用于受拉也适用于受压情况, Rasmussen 模型参数  $\sigma_u$  来源于受拉试验,受压试验无法获得。

Quach 等<sup>[23]</sup> 证明 Rasmussen 模型在材料受拉试验中与试验数据吻合良好,而在受压试验应变大于  $\epsilon_{0.2}$  时,模型与试验数据表现出很大差别。Quach 等在 Gardner 和 Nethercot 的研究成果基础上,提出了不锈钢的三段式本构关系模型。

Olsson<sup>[24]</sup> 研究不锈钢应力应变曲线发现,曲线在应变大于  $\epsilon_{2.0}$  时,材料真实应力与名义应变曲线非常接近一条直线。Quach 三段式本构关系模型,前两段保留了 Gardner 和 Nethercot 模型,第三段根据 Olsson 研究成果提出。

当  $\epsilon > \epsilon_{2.0}$  时真实应力和名义应变关系如下:

$$\sigma_t = a + b\epsilon$$

式中:  $\sigma_t$  为真实应力;  $\epsilon$  为名义应变,常数  $a, b$  由曲线边界点  $(\sigma_{t2.0}, \epsilon_{2.0})$  和  $(\sigma_u, \epsilon_{2.0})$  来确定, Quach 三段式模型具体公式见文献<sup>[23]</sup>。

Quach 三段式模型基于大量实验数据提出,同时适用于受压和受拉情况,相对于 Gardner 和

Nethercot 模型补充了  $\epsilon > \epsilon_{2.0}$  段,使模型得以完整。该模型具有较好的适用性,已被用于冷弯不锈钢残余应力<sup>[25-26]</sup>研究中。

### 3.3 高温部分

EN 1993-1-4 对于不锈钢高温下本构关系直接采用低碳钢模型,只是将相关低碳钢强度和刚度参数用不锈钢力学参数替换,用于不锈钢结构抗火设计。但不锈钢与低碳钢在高温条件下性能差异较大,这样就使不锈钢高温条件下本构关系研究显得

$$\epsilon_T = \begin{cases} \frac{f_T}{E_T} + 0.002 \left( \frac{f_T}{f_{y,T}} \right)^{n_T} & \text{for } f_T \leq f_{y,T} \\ \frac{f_T - f_{y,T}}{E_{y,T}} + \epsilon_{u,T} \left( \frac{f_T - f_{y,T}}{f_{u,T} - f_{y,T}} \right)^{m_T} + \epsilon_{y,T} & \text{for } f_T > f_{y,T} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $E_T$  为相应温度原点弹性模量;  $f_{y,T}$  为相应温度塑性应变为 0.2% 所对应材料强度;  $n_T$  为材料的高温应变硬化指数,模型以  $f_{y,T}$  为分界点分为两段。第二段控制点为  $(f_{u,T}, \epsilon_{u,T})$ , 分别对应相应温度下极限强度和对应应变。

其中

$$E_{y,T} = \frac{E_T}{1 + 0.002n_T E_T / f_{y,T}}$$

$$n_T = 6 + 0.2 \sqrt{T}$$

$$m_T = \begin{cases} 5.6 - \frac{T}{200} & \text{for EN1.446.2} \\ 2.3 - \frac{T}{1000} & \text{for EN1.446.2} \end{cases}$$

式中:  $E_{y,T}$  为相应温度下塑性应变为 0.2% 点的切线模量,  $m_T$  参数的存在,可以对模型后半段应力值有一定的折减,这样与实验数据能够吻合得更好。

Chen 和 Young 通过实验得到了不锈钢材料高温的一系列力学参数,这样就使其不锈钢高温应力

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_\theta} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0.2,\theta}} \right)^{n_\theta} & \text{for } \sigma \leq \sigma_{0.2} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2,\theta}}{E_{0.2,\theta}} + \left( 0.02 - \epsilon_{t0.2,\theta} - \frac{\sigma_{t2.0,\theta} - \sigma_{0.2,\theta}}{E_{0.2,\theta}} \right) \left( \frac{\sigma - \sigma_{0.2,\theta}}{\sigma_{t2.0,\theta} - \sigma_{0.2,\theta}} \right)^{n'_{\theta}} + \epsilon_{t0.2,\theta} & \text{for } \sigma_{u,\theta} > \sigma > \sigma_{0.2} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\sigma_{2.0,\theta}$  为  $\theta$  温度下材料塑性应变为 0.2% 时对应应力;  $\sigma_{u,\theta}$  为  $\theta$  温度下材料极限应力;  $\sigma_{t2.0,\theta}$  为  $\theta$  温度下全应变 2% 时对应应力;  $E_\theta$  和  $E_{0.2,\theta}$  为  $\theta$  温度下材料弹性模量和材料塑性应变为 0.2% 时切线模量;  $n_\theta$  和  $n'_\theta$  分别为  $\theta$  温度下模型第一段和第二段应变硬化指数。

Gardner 等研究了 EN 1.4301 和 EN 1.4301/4 在高温下的材料性能,并给出了式(7)所需参数在不同温度下的取值,该模型同时适用于受拉和受压情况,但是此模型非完整应力应变关系,有一定局

愈加重要。

Chen 和 Young<sup>[17]</sup> 曾对 EN1.4662 (Duplex) 和 EN1.4301 (AISI304) 不锈钢的高温材料性能进行了研究,并以 Rasmussen 模型为基础,提出了不锈钢在不同温度下应力应变模型。由于不同温度下,应力、应变参量数值都不一样,所以 Chen 和 Young 不仅提出了适于不锈钢的高温本构模型,还给出了弹性模量,极限应力、应变随温度变化的拟合公式。

Chen 和 Young 高温应力应变模型如下

应变模型得以参数化。

其高温与常温数据转化公式如下:

$$\frac{A_T}{A_{\text{normal}}} = a - \frac{(T-b)^n}{c}$$

其中  $A$  可以为  $E, f_{y,T}, f_{u,T}, \epsilon_{u,T}$  等一系列力学参数,角标 normal 为常温下数据,  $a, b, c$  为转化公式的相关参数,Chen 和 Young 也给出了它们在各温度下的取值。此模型与试验数据吻合度良好,但此模型需要用到极限强度,高温下极限强度比较小,强度值不够稳定,模型精确性不容易控制。该模型与 Rasmussen 模型思路基本一致,在受压条件下准确性还有待进一步验证。

Gardner 等<sup>[27]</sup> 基于 Gardner 和 Nethercot 提出的不锈钢常温本构关系提出了不锈钢高温下的本构关系。不同于常温条件下,其高温本构关系第二段采用全应变 2% 对应应力 ( $\sigma_{2.0}$ ) 为控制参数 (常温下采用  $\sigma_{1.0}$ ), 其具体公式如下:

限性。

随着不锈钢在建筑结构中使用得越来越多,有关不锈钢结构或者构件的设计也逐渐增多,应力应变函数作为隐函数用于有限元分析以及结构设计始终不够直观,Abdella<sup>[28]</sup> 在 Chen 和 Young 模型的基础上提出了不锈钢高温下应力应变关系的显函数形式。

Abdella 的基本思路是利用 Chen 和 Young 的试验数据,以  $\sigma_{0.2}$  为分界点反解 Chen 和 Young 模型用总应变表示应力。在已知材料应变时,利用该模

型可以直接求得应力,较为直观。相较于前文所述模型更有利不锈钢结构抗火设计,模型详见文献[28]。

此后 Abdella 在自己所提出不锈钢高温两段式本构关系基础上,结合 Quach 模型提出了不锈钢高温三段式应力应变关系的显函数形式,模型详见文献[29],Abdella 所做改进对于不锈钢抗火设计具有

积极意义,其准确性还有待进一步验证。

### 3.4 模型所需参数总结

关于上述不锈钢本构关系除了其准确性,还有一个很重要的方面就是其实用性,如果模型过于复杂使用起来则较为不便,表 1 总结了各个模型所需要的力学参数。

表 1 模型参数统计表

模型种类	$E_0$	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_{1.0}$	$\sigma_{2.0}$	$\sigma_u$	$\epsilon_u$	$n'_{0.2,1.0}$	$n'_\theta$	$n$	$T$
Rasmussen	✓	✓							✓	
Gardner	✓	✓	✓				✓		✓	
Quach	✓	✓							✓	
Chen and Young	✓	✓			✓	✓				✓
Gardner(高温)	✓	✓		✓				✓	✓	✓
Abdella	✓	✓			✓	✓			✓	✓

注: $n'_{0.2,1.0}$ 为描述 $\sigma_{0.2}$ 和 $\sigma_{1.0}$ 间曲线段的应变硬化指数。

从表 1 可以看出,各模型所需参数不尽相同,高温模型所需参数多于常温模型,这也与实际情况相符。Gardner 常温模型所需参数较多,Quach 模型所需参数符合经典 Ramberg-Osgood 三参数模型,其精确性和适用性较其他模型更高。高温模型还不够成熟,Chen and Young 所提出模型虽然与试验数据符合较好,但高温下其大应变适用性和应力稳定性还有待证明。而 Abdella 根据 Chen 和 Young 的试验结果所提出来的不锈钢高温下的显式模型,应用于有限元分析以及不锈钢高温结构设计虽更为直观,但其准确性有待证明。

## 4 结 论

不锈钢力学性能与低碳钢有很大区别,其耐腐蚀和耐高温性能都优于低碳钢。由于国内有关建筑用不锈钢常温和高温下性能研究较少,所以笔者主要总结了国外学者对不锈钢高温力学性能的研究成果,得出了以下结论:

1) 温度高于 500 °C 时,不锈钢高温弹模模量、屈服强度以及极限强度下降明显,对于不锈钢结构抗火设计应引起足够重视。

2) 不锈钢高温下材料性能研究已有一定成果,但是无论是 EC3-1.2 还是 AS4100 有关不锈钢高温下材料性能都不够详尽,AS4100 更是欠缺高温下必要力学参数极限强度折减系数,屈服强度折减模型则过于简单。

3) 不锈钢常温下本构关系研究已趋于成熟,尤其是 Quach 三段式模型,其准确性和适用性较强,可为不锈钢结构设计以及数值模拟提供参考。

4) 不锈钢高温下本构关系研究已取得一定进展,Gardner 所提出高温下模型适用性较强,但不适用于大应变情况,需要进一步试验研究加以完善。

### 参考文献:

- [1] EN 10088-2. Stainless steels. Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes [S]. Brussels: European Committee for Standardization (CEN); 2005.
- [2] Baddoo N R. stainless steel in construction; A review of research, application, challenges and opportunities [J]. Journal of Construct-ional Steel Research, 2008, 64(11): 1199-1206.
- [3] Young B. Experimental and numerical investigation of high strength stainless steel structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64 ( 11 ): 1225-1230.
- [4] EN 1993-1-4, Eurocode 3; Design of steel structures-part 1. 4; General rules - supplementary rules for stainless steels [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 1996.
- [5] AS/ NZS 4673; 2001, Cold-formed stainless steel structures [S]. Sydney: Australian/ New Zealand Standard, 2001.
- [6] SEI/ASCE-8-02, ASCE specification for the design of

- cold-formed stainless steel structural members [S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2002.
- [7] EN 1993-1-2, Eurocode 3: Design of steel structures—part 1. 2: General rules—structural fire design [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [8] Peckner D, Bernstein IM. Handbook of stainless steels [M]. New York, NY: McGraw-Hill, 1977.
- [9] Sakumoto Y, Nakazato T, Matsuzaki A. High-temperature properties of stainless steel for building structures [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(4):399-406.
- [10] Fujita N, Ohmura K, Kikuchi M, et al. Effect of Nb on high-temperature properties for ferritic stainless steel[J]. Scripta Materialia, 1996, 35(6): 705-710.
- [11] Brinkman C R. Elevated-temperature mechanical properties of an advanced type 316 stainless steel [C]// ASME Pressure and Piping Conference, Boston, MA (US), 08/01/1999--08/05/1999;75-80.
- [12] 陈驹, 金伟良, 杨立伟. 建筑用不锈钢的抗火性能[J]. 浙江大学学报:工学版, 2008, 42(11):1983-1989.
- [13] Wang X Q, Tao Z, Song T Y, et al. Stress-strain model of austenitic stainless steel after exposure to elevated temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 99: 129-139.
- [14] 王元清, 常婷, 石永久, 等. 奥氏体不锈钢 S31608 的本构关系试验[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2013 (9): 1231-1234.
- [15] 王元清, 常婷, 石永久. 循环荷载下奥氏体不锈钢的本构关系试验研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2013, 42(6): 1175-1179.
- [16] AS4100; 1998. Steel structures [S]. Sydney (Australia): Standards Australia; 1998.
- [17] Chen J, Young B. Stress-strain curves for stainless steel at elevated temperatures [J]. Engineering Structures, 2006, 28(2): 229-239.
- [18] Ala-Outinen T. Fire resistance of austenitic stainless steels Polarit 725 (EN 1.4301) and Polarit 761 (EN 1.4571) [M]. Technical Research Centre of Finland, 1996.
- [19] Ramberg W, Osgood W R. Description of stress-strain curves by three parameters [R]. National Advisory Committee for Aeronautics, Washington (DC) Technical note No. 902, 1943.
- [20] Rasmussen K J R. Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(1):47-61.
- [21] Gardner L, Insausti A, Ng K T, et al. Elevated temperature material properties of stainless steel alloys [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(5): 634-647.
- [22] Macdonald M, Rhodes J, Taylor G T. Mechanical properties of stainless steel lipped channels [C]// Fifteenth international specialty conference on cold-formed steel structures. Missouri S&T (formerly the University of Missouri-Rolla), 2000.
- [23] Quach W M, Teng J G, Chung K F. Three-stage full-range stress-strain model for stainless steels [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134 (9): 1518-1527.
- [24] Olsson A. Stainless steel plasticity material modelling and structural applications [D]. Sweden: Luleå University of Technology, 2001.
- [25] Quach W M, Teng J G, Chung K F. Residual stresses in press-braked stainless steel sections, I: Coiling and uncoiling of sheets[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(8): 1803-1815.
- [26] Quach W M, Teng J G, Chung K F. Residual stresses in press-braked stainless steel sections, II: Press-braking operations[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(8): 1816-1826.
- [27] Gardner L, Nethercot D A. Experiments on stainless steel hollow sections—Part 1: Material and cross-sectional behavior [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(9): 1291-1318.
- [28] Abdella K. Explicit full-range stress-strain relations for stainless steel at high temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(4): 794-800.
- [29] Abdella K. A three-stage full-range stress-strain inversion for stainless steel alloys as an explicit function of temperature [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 53: 9-14.

(编辑 张 苹)