

TA15 合金高温应力松弛和流变应力行为

申发兰 陈明和 冯建超

(南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

文 摘 对 TA15 合金进行 600 ~ 700℃ 下的应力松弛试验和 675 ~ 800℃ 下的单向拉伸试验,研究其应力松弛行为的特征及影响因素,得出 TA15 合金在高温下的流变应力行为规律。结果表明,在 600 ~ 700℃ 下 TA15 合金应力松弛行为可以分为两个阶段:第一阶段为应力松弛过程前 100 s,试样内的残余应力快速下降;第二阶段残余应力下降缓慢,经过 1 500 s 后剩余应力基本不变,趋向于某一个极限值;温度对应力松弛影响很大,温度越高,应力松弛越快;初应力、预应变、轧制方向对应力松弛影响不大,且随温度的升高影响变小。在 675 ~ 800℃ 下 TA15 合金流变应力随温度的升高而降低,通过对单拉试验数据进行拟合,得出 TA15 合金流动应力符合第一类本构方程。

关键词 TA15 合金,应力松弛,流变应力

Stress Relaxation and Flow Stress of TA15 Alloy at Elevated Temperature

Shen Falan Chen Minghe Feng Jianchao

(College of Mechanical and Electrical Engineering Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract Stress relaxation tests and tensile strength tests for TA15 titanium alloy sheet were carried at elevated temperatures. The stress relaxation behavior and influence of different factors were discussed. Flow stress rules for hot deformation of TA15 alloy were obtained. It was concluded that the residual stress falls fast at the first stage, while slowly at the second stage at 600 to 700℃, and the residual stress approaches a limit after 1 500 seconds. The influence of temperature on the stress relaxation is obvious, the higher the temperature is, the faster the stress relaxes. Initial stress, pre-strain, rolling direction have small effect on stress relaxation, and the influence is less with the rise of temperature. With the temperature increasing the flow stress of TA15 alloy is decreases at 675℃ to 800℃. The flow stress follow the first class of constitutive equation.

Key words TA15 titanium alloy, Stress relaxation, Flow stress

0 引言

TA15 合金具有中等的室温和高温强度,其名义成分为 Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V,属于高 Al 当量的近 α 型钛合金。TA15 合金的钣金件在航空、航天等领域应用广泛,但由于该合金的屈强比高在成形时回弹较严重,成形稳定性较差,使其在常温下成形困难。因此其成形通常采用热成形方法;并且在一些精密成形中,对热成形件要进行热校形以提高成形精度。应力松弛是热校形的理论基础,高温流变应力则对热成形工艺的制定有着重要的影响,因此需要对 TA15 合金高温下的应力松弛行为和流变应力行为进行深入

研究^[1-6]。

目前,国内外对 TA2、TC1、TC4 和 BT20 钛合金的高温应力松弛性能的研究比较多,林兆荣等人研究了 TA2、TC1、TC4 钛板在高温时的短时应力松弛行为,王明伟等人研究了 BT20 合金棒材的高温应力松弛行为^[7-11]。而对 TA15 合金板材的高温应力松弛性能行为的研究则很少。对 TA15 合金流变应力行为的研究虽然较多^[12-13],但大多是针对棒材的压缩实验,主要应用于锻造工艺,而对应用于板料成形工艺的研究则较少。本文以 TA15 合金板材为研究对象,研究其应力松弛行为的特点及温度、初应力、预应

收稿日期: 2012-08-28

作者简介:申发兰,1986 年出生,硕士,主要从事钛合金高温变形规律的研究

变、轧制方向等工艺因素对其应力松弛的影响,并对不同条件下得到应力松弛曲线进行拟合,得到其在相应条件下的应力松弛方程,为 TA15 合金的热校形工艺提供理论参考。通过单向拉伸试验得出 TA15 合金板材在高温下的真实应力—应变曲线,拟合出高温下的本构方程,为 TA15 合金板料的热成形有限元模拟及其工艺的合理制定提供了重要依据。

1 试验材料与方法

试验材料为 TA15 钛合金板料,板料厚度为 2 mm,应力松弛试验和单向拉伸试验的试件尺寸如图 1 所示。选择 600、650 和 700℃ 对 TA15 钛板进行应力松弛试验,选用 675、725、750、775 和 800℃ 对其进行单向拉伸试验。应力松弛试验时通电加热到预定温度后保温 5 min,然后开始加载,拉伸速率为 1 mm/min。单向拉伸试验时以 15 mm/min 的速度拉伸试样直至断裂。

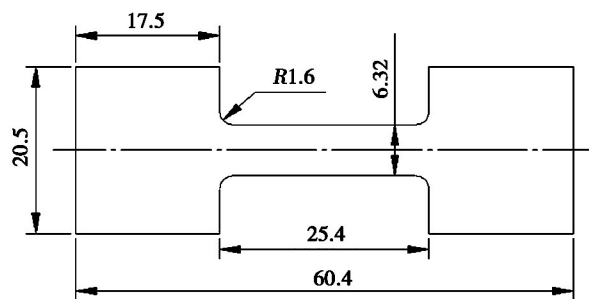


图 1 试样尺寸图

Fig. 1 Dimension figure of sample

2 结果与讨论

2.1 应力松弛特点

图 2 为初应力相同时,不同温度下材料的应力松弛 $\sigma-t$ 曲线。

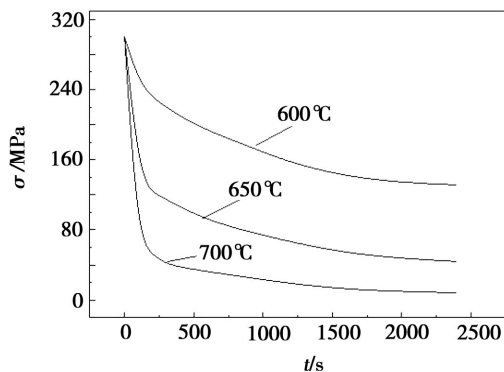


图 2 不同温度下 TA15 钛合金的应力松弛曲线

Fig. 2 Stress relaxation curves of TA15 alloy at various temperatures

由图 2 可以看出,TA15 合金的应力松弛分为两个阶段:第一阶段,应力松弛过程的前 100 s,试样承受的应力快速下降,之后随着时间的增加,应力松弛速度会逐渐减慢;第二阶段,剩余应力下降的非常慢,

并且经过 1 500 s 后剩余应力会接近于某一个值,这个值就是应力松弛极限。应力松弛过程进行的条件可以用下列的方程表示^[7]:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \text{常数} \quad (1)$$

式中, ε_0 是初始应变且恒定不变,弹性应变 ε_e 和塑性应变 ε_p 均不为常数,在应力松弛过程中,随着时间的增长,弹性应变逐渐变小,所以塑性应变逐渐增大。

2.2 工艺因素对 TA15 合金应力松弛的影响

从图 2 看出,温度是影响应力松弛的一个重要的因素。温度越高,第一阶段应力松弛越快,最终达到的应力松弛极限越小。将三个温度下的松弛极限绘制于图 3 中,并对其进行拟合,可得到应力松弛极限和温度的经验关系式:

$$\sigma_\infty = 0.0104T^2 - 14.696T + 5219.2 \quad (2)$$

式中, T 为温度, σ_∞ 为应力松弛极限。

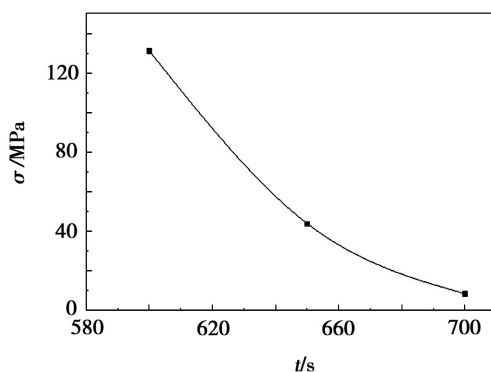
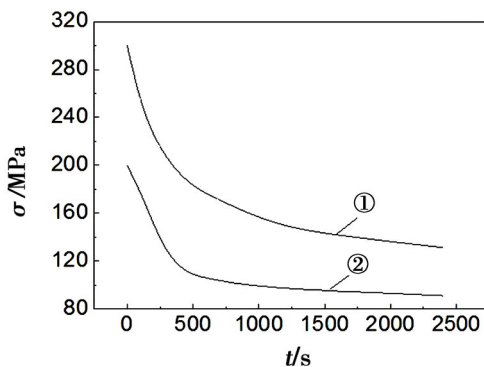


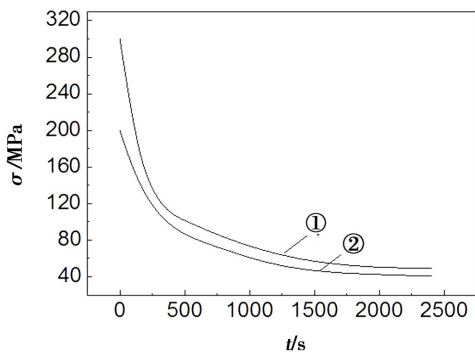
图 3 应力松弛极限与温度的关系

Fig. 3 Relationship between stress relaxation limit and temperature

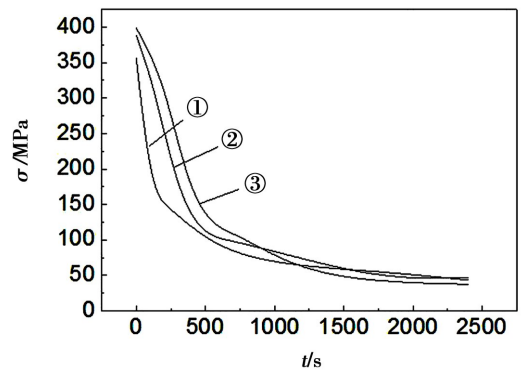
图 4 为不同温度下不同初应力作用下的应力松弛曲线。可以看出,在不同温度下初应力分别为 200 和 300 MPa 时经长时间应力松弛后,残余应力都将逐趋于某一个值即应力松弛极限。当温度为 600℃ 时两种初应力下的应力松弛极限相差 40 MPa,温度为 650℃ 时相差 10 MPa,而温度为 700℃ 时只相差 2 MPa,由此可见,初应力对应力松弛有一定的影响,初应力越大应力松弛极限越小,但是随着温度的升高,其影响越来越不明显。



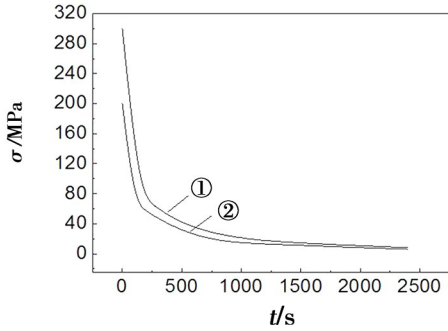
(a) 600℃



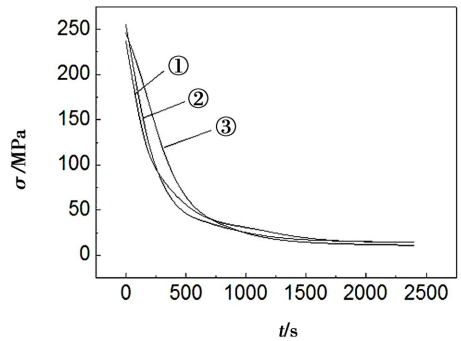
(b) 650°C



(b) 650°C



(c) 700°C



(c) 700°C

图4 各温度不同初应力下 TA15 合金的应力松弛曲线

Fig. 4 Stress relaxation curves of TA15 alloy in different initial stress at various temperatures

①—300 MPa;②—200 MPa。

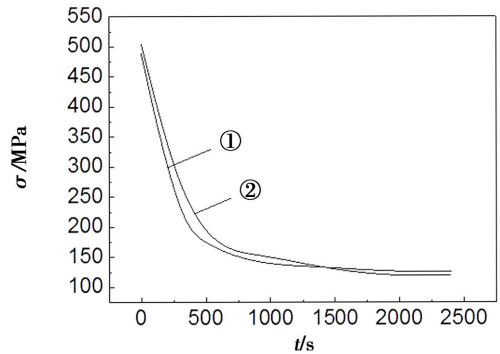
图5 各温度不同预应变下 TA15 合金的应力松弛曲线

Fig. 5 Stress relaxation curves of TA15 alloy in different pre-strain at various temperatures

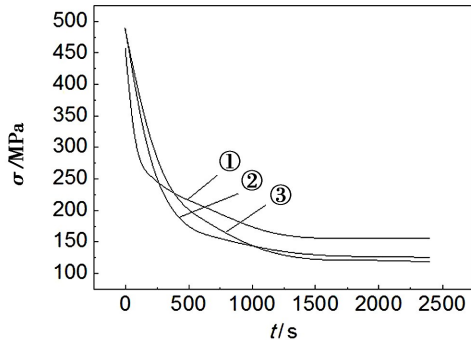
①—2 mm;②—4 mm;③—6 mm。

图5为不同温度下不同预应变下的应力松弛曲线。可见,在温度不同时预应变分别为2、4和6 mm时经一段时间的应力松弛后,应力松弛极限相差不大。这说明预应变的大小对应力松弛极限影响不大,而且随着温度的升高,不同预应变的应力松弛曲线重合性越好,应力松弛极限相差越小。

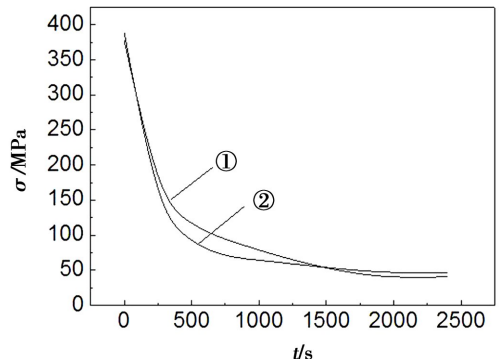
图6为为不同温度下相同预应变下不同轧制方向的应力松弛曲线。可见,沿轧制方向和垂直轧制方向的试样经过一定时间的松弛后,剩余应力会趋于相同,且温度越高应力松弛曲线越相近。这说明轧制方向对应力松弛极限影响不大。但是在应力松弛第一阶段垂直轧制方向试样承受的应力下降的较快。



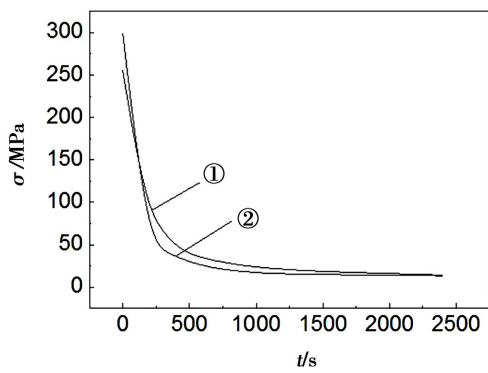
(a) 600°C



(a) 600°C



(b) 650°C



(c) 700°C

图6 各温度不同轧制方向 TA15 钛合金的应力松弛曲线

Fig. 6 Stress relaxation curves of TA15 alloy in different rolling directions at various temperatures

①—沿轧制方向;②—垂直轧制方向。

2.3 应力松弛方程

采用二次延迟函数来描述金属的应力松弛行为,某一温度下金属材料的应力松弛方程为:

$$\sigma = \sigma_{\infty} + b e^{-t/\tau_1} + c e^{-t/\tau_2} \quad (3)$$

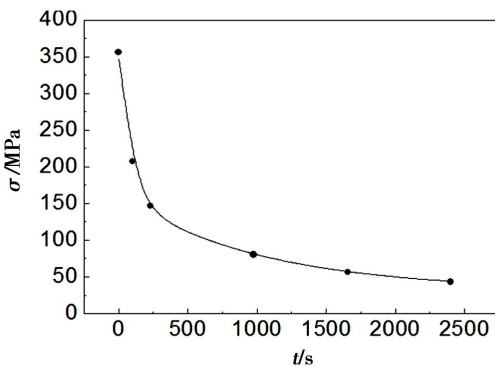
式中, σ 为瞬时松弛应力; σ_{∞} 为应力松弛极限; b 、 c 、 τ_1 、 τ_2 为应力松弛系数; t 为时间。由应力松弛实验曲线上获得的数据,经拟合后可得到应力松弛方程系数,不同状态的 TA15 合金应力松弛方程系数列于表 1。

图 7、图 8 分别为 650 和 700°C 时,不同预应变下,试验数据与拟合曲线的对比,圆点代表试验数据,曲线为根据(3)式拟合的曲线。可以看出,该应力松弛方程能够较好的反应 TA15 合金高温下的应力松弛曲线,最大拟合误差在 10% 以内。

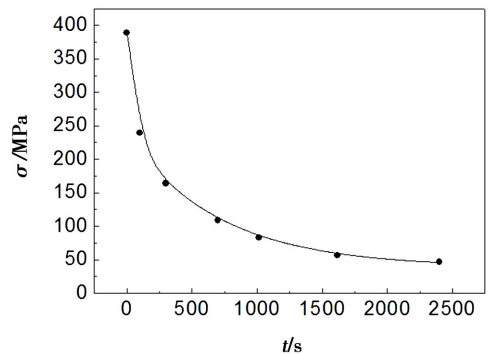
表 1 TA15 合金薄板在不同状态下的应力松弛方程系数

Tab. 1 Stress relaxation equation coefficients of TA15 alloy sheet in different state

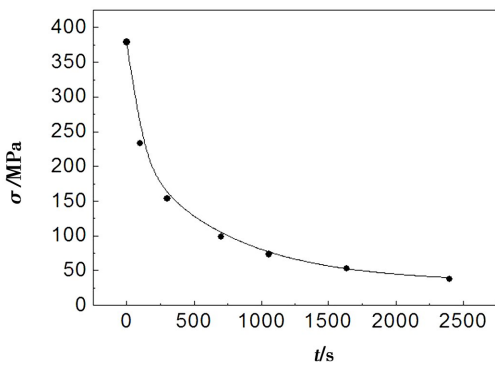
$t / ^\circ\text{C}$	initialstate	$\sigma_{\infty} / \text{MPa}$	b / MPa	c / MPa	τ_1 / s	τ_2 / s
600	$\varepsilon_0 = 7.8\%$	151.0	108.1	190.5	35.1	560.6
	$\varepsilon_0 = 15.7\%$	113.8	226.4	156.3	98.7	788.8
	$\varepsilon_0 = 23.6\%$	92.7	233.3	170.6	99.8	1270.3
	$\sigma_0 = 200 \text{ MPa}$	86.9	46.8	66.3	126.7	853.1
	$\sigma_0 = 300 \text{ MPa}$	122.2	45.3	132.5	92.0	896.7
650	$\varepsilon_0 = 7.8\%$	31.4	188.9	128.7	78.6	1024.8
	$\varepsilon_0 = 15.7\%$	38.7	156.4	194.7	62.5	721.0
	$\varepsilon_0 = 23.6\%$	33.3	153.8	189.7	75.5	718.3
	$\sigma_0 = 200 \text{ MPa}$	36.6	58.3	104.2	64.8	764.2
	$\sigma_0 = 300 \text{ MPa}$	33.2	154.2	117.6	88.6	976.6
700	$\varepsilon_0 = 7.8\%$	11.3	87.8	142.9	692.2	73.2
	$\varepsilon_0 = 15.7\%$	10.4	140.0	102.8	176.5	590.8
	$\varepsilon_0 = 23.6\%$	8.9	91.4	146.9	64.4	524.2
	$\sigma_0 = 200 \text{ MPa}$	6.2	108.4	84.9	64.6	604.2
	$\sigma_0 = 300 \text{ MPa}$	6.4	202.0	98.7	54.4	654.6



(a) $\varepsilon_0 = 7.8\%$



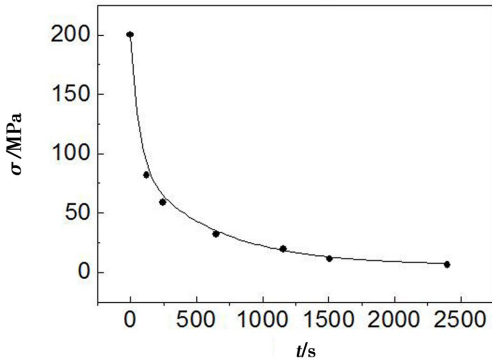
(b) $\varepsilon_0 = 15.7\%$



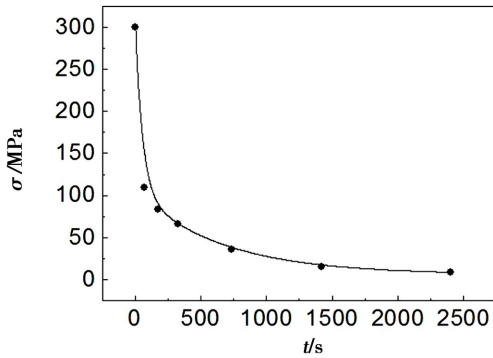
(c) $\varepsilon_0 = 23.6\%$

图7 650°C不同预应变下试验数据与拟合曲线的对比

Fig.7 Comparison between test curve and fitting curve in various pre-strain



(a) 200 MPa



(b) 300 MPa

图8 700°C不同初应力下试验数据与拟合曲线的对比

Fig.8 The comparison between test curve and fitting curve in various initial stress at 700°C

2.4 流变应力行为

根据单向拉伸试验数据得出不同温度下TA15合金的真实应力-应变曲线,如图9所示。

TA15合金在675~800°C流动应力随着温度的升高而逐渐降低。这是因为随变形温度的升高,材料的高温软化作用增强,材料内部原子动能增加,原子活动更剧烈,材料的变形抗拉抗力降低。在同一温度下,随着变形程度的增加流动应力快速达到峰值之后降低。

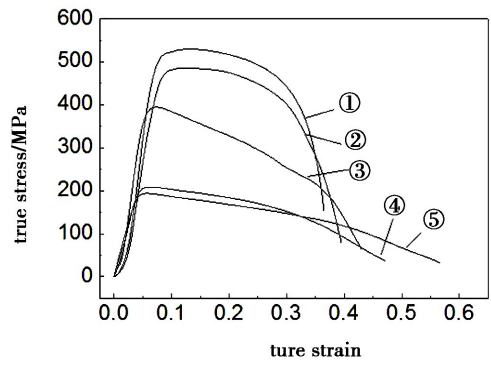


图9 不同温度下TA15合金的真实应力-应变曲线

Fig.9 True stress-strain curves of TA15 alloy at various temperatures

①-675°C;②-725°C;③-750°C;④-775°C;⑤-800°C。

材料的本构模型主要有两类^[14]:第一类是直接描述变形条件,如温度、应变速率等对流变应力的影响;第二类模型则考虑了材料变形中对其在结构状态影响的因素,变形条件主要取决于材料结构。为了更好的研究TA15合金高温时成形性能,利用广义胡克定律及第一类模型方程构建其在高温下的本构方程。其表达式形式如下:

$$\sigma_e = E\varepsilon \quad (4)$$

$$\sigma_p = C\varepsilon^n \exp(n_1\varepsilon) \quad (5)$$

式(4)和(5)分别为材料在弹性和塑性阶段的真实应力-应变方程。其中, E 为弹性模量, C 、 n 、 n_1 为材料参数。根据单向拉伸试验得到的试验数据经过计算拟合得出TA15合金在高温下的本构方程,不同温度下TA15合金本构方程系数列于表2。

表2 TA15合金在不同温度下的本构方程系数

Tab.2 Constitutive equation coefficients of TA15 alloy sheet in different temperatures

$t/^\circ\text{C}$	E	C	n	n_1
675	10200	2768	0.19	-2.6
725	8890	3040	0.12	-2.4
750	7205	3290	0.10	-2.6
775	5467	1870	0.16	-2.5
800	4527	2040	0.08	-2.2

3 结论

(1)在600~700°C,TA15合金应力松弛过程的前100s内应力下降迅速,之后随时间的增加,松弛速率逐渐减慢,经过1500s后剩余应力变化很小,基本达到应力松弛极限。

(2)温度升高,TA15合金应力松弛极限降低,应

力松弛速率加快;初应力越高,应力松弛速率越快,随着温度的升高,初应力对应力松弛的影响越来越不明显;预应变的大小对应力松弛极限影响不大,且随着温度的升高,不同预应变的应力松弛极限相差变小。

(3)TA15 合金在试验温度范围内的高温短时应力松弛规律符合 $\sigma = \sigma_{\infty} + be^{-t/\tau_1} + ce^{-t/\tau_2}$ 松弛方程。

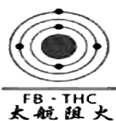
(4)TA15 合金热拉伸变形的流变应力随温度的升高显著降低,流变应力规律符合 $\sigma_p = C\varepsilon^n \exp(n_1\varepsilon)$ 本构方程。

参考文献

[1] 李兴无,沙爱学,张旺峰,等. TA15 合金及其在飞机结构中的应用前景[J]. 钛工业进展,2003,20(4/5):90-94
[2] 刘勇,尹钟大,朱景川,等. 工艺因素对 TC4 合金应力松弛行为的影响[J]. 材料工程,2005(4):38-41
[3] 舒滢,曾卫东,周军,等. BT20 合金高温变形行为的研究[J]. 材料科学与工艺,2005,13(1):55-58
[4] Idem K, Peddieson J. Simulation of the age forming process [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005,27(2):165-172
[5] 陈先有,瞿晶. 航天钛合金零件热成形及应用分析[J]. 航空科学技术,2007(5):38-40

[6] 纪仁峰,闵新华,胡弘剑,等. TA15 钛合金高温塑性变形流变应力行为研究[J]. 稀有金属与硬质合金,2009,37(2):12-16
[7] 刘勇,尹钟大,朱景川. 温度、应力及晶粒度对 TC4 合金应力松弛性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2003,32(8):643-647
[8] 林兆荣,熊志卿. TA2、TC1、TC4 钛板高温短时应力松弛的研究[J]. 稀有金属材料与工程,1983(6):1-7
[9] 陈明和,高霖,翟建军,等. 钛板零件的无(半)模热校形研究[J]. 制造技术与机床,1999(12):34-36
[10] 王明伟,王春燕,杨继新,等. BT20 钛合金高温应力松弛行为研究[J]. 稀有金属材料与工程,2012,41(3):502-505
[11] 刘勇,朱景川,尹钟大. TC4 合金应力松弛行为及微观组织观察[J]. 稀有金属,2002,26(6):43-46
[12] 王洋,尤逢海,朱景川,等. TA15 合金热变形行为研究[J]. 机械工程材料,2006,30(11):63-65
[13] 梁业,郭鸿镇,刘鸣,等. TA15 合金高温本构方程的研究[J]. 塑性工程学报,2008,15(4):150-154
[14] 邓学峰,张辉,陈振华. 耐热铝合金(FVS0812)板材温拉伸本构方程[J]. 塑性工程学报,2006,13(3):83-87

(编辑 任涛)



陕西太航阻火聚合物有限公司

1 F 系列多功能环氧固化剂

(1)与环氧的比例可调:根据相应的性能要求选用不同的比例。总的规律是 F 固化剂的比例大时,耐热性、耐烧蚀性、阻燃性能高;反之,韧性相对提高。

(2)耐热性:F 固化剂固化 E-51 对 45# 钢的粘接剪切强度如下。

室温,15 MPa;300℃,6~8 MPa;400℃/1 h 老化,7~11 MPa;500℃/1 h 老化,2~3 MPa。对照组 2.4—咪唑固化的 E-51,400℃/1 h 老化后试片自行开裂且胶层灰化。

(3)烧蚀性能:F 固化剂与 E-51 环氧等质量比的烧蚀性能按 GJB323A—96 测试:线烧蚀率 0.3~0.4 mm/s;质量烧蚀率 0.07 g/s。

(4)洁净阻燃性能:F 固化剂固化的环氧一般不燃或难燃、无烟或少烟、无剧毒气体放出、属洁净阻燃。

(5)电性能:击穿电压可达 94 kV/mm, $\rho_v = 2 \times 10^{16} \Omega \cdot m$ 。

2 R 系列、RB 系列、RBB 系列多功能双向可调交互反应型环氧固化剂

(1)耐热性:固化 E-51 环氧 350℃ 可达 3~5 MPa。

(2)耐烧蚀性能:R 系列固化的环氧,线烧蚀大部分为负值,约 0.3 mm/s;质量烧蚀率 < 0.07 g/s。

(3)阻燃性:大部分不燃或难燃,离火数秒熄灭,烟少或无烟。

(4)韧性:R 系列固化的 E-51 环氧,粘接卫星点火元器件,可耐 $2 \times 10^5 g$ 的过载冲击(g 为重力加速度)。

地址:西安市电子二路中段国晟大厦 4010 号

邮箱:shanxth@126.com

电话/传真:029-88758316

网址:www.taihangchina.com