



基于速率温度参数计算 7075 铝合金 蠕变本构方程

李 昂

(核工业理化工程研究院 四所, 天津 300180)

摘 要: 针对高强铝合金蠕变数据存在幂律失效而难于拟合的问题, 采用 Monkman-Grant 关系式, 在经典时间温度参数模型的基础上, 推导 4 种不同形式的速率温度参数模型。根据高强铝合金 7075 在 34.4~148.9 °C 下的蠕变数据, 利用多元线性回归方法, 计算得出基于不同形式速率温度参数的材料稳态蠕变方程。结合统计检验方法, 评价不同模型下蠕变方程的拟合效果。结果表明: 在显著性水平 5% 的条件下, OSD' 模型下稳态蠕变速率实测数据与拟合结果的对数差值不满足正态分布。OSD'、LM' 模型下拟合数据对数值无法完全落入理想拟合线双侧 96.5% 的置信区间内。RMB'、MH' 模型下实测与拟合对数值之间的线性相关系数均大于 0.994, 对应的残差平方和分别为 0.2797、0.2800。基于 RMB'、MH' 模型的蠕变本构方程可以较好地描述 7075 铝合金在实验条件范围内的稳态蠕变行为。

关键词: 速率温度参数; 高强铝合金; 幂律失效; 蠕变本构方程; 统计检验

文章编号: 1004-0609(2020)-02-0308-08

中图分类号: TB31

文献标志码: A

Al-Zn-Mg-Cu 系(7 系)铝合金具有较高的比强度和硬度以及较好的耐腐蚀性能等诸多优点, 因而被广泛应用于航空航天、武器装备、核工业等领域^[1-3]。在高应力条件下长期服役的高温部件蠕变变形逐渐累积进而导致部件失效的概率增加, 因此, 准确预测铝合金部件蠕变变形和寿命对评估相关设备的可靠性和耐温年限具有极其重要的意义。稳态蠕变性能是评价 7 系铝合金耐温性能的重要考核指标。而蠕变本构方程更是部件蠕变计算的性能基础。关于 7 系铝合金的蠕变性能, 国内外的学者已做出大量研究^[4-8]。JAHROMI 等^[4]研究了喷射沉积 SS70 高强铝合金在 120 °C 下的蠕变行为, 结果表明当试验应力不小于 280 MPa 时, 该合金的抗蠕变性能优于传统 7075 合金。WILSHIRE 等^[5]发现当实验温度从 100 °C 上升至 190 °C 时, 7010 铝合金会发生明显的幂律失效现象, 蠕变应力指数从 23 下降至 5。材料发生幂律失效不仅会使蠕变方程的适用范围变窄, 同时也会增加蠕变方程的求解难度。SCRIVASTAVA 等^[6]采用分段拟合的方法研究了应力水平对 7075 铝合金蠕变性能的影响程度。LIN 等^[8]结合 Norton 律和 θ 函数法, 建立了 7075 铝合金蠕变本构模型。由于所用数据的实验条件有限, 以上研究

方法的适用性及拟合效果有待进一步验证。

时间温度参数法^[9-12]是国际上用于预测材料在较宽实验条件范围内持久寿命的计算方法, 遗憾的是该方法无法评估材料的蠕变性能。HEIMERL^[13]在其论文中提出了速率温度参数的概念, 但是并未分析速率温度参数的拟合适用性, 也没有将其应用于材料稳态蠕变本构方程的求解过程。

本文依据 Monkman-Grant 关系式^[14], 将经典的 RMB、MH、OSD、LM 时间温度参数修正为对应形式的速率温度参数。考虑到高强铝合金 7075 蠕变数据的分散性, 利用多元线性回归方法, 求解基于不同速率温度参数模型的材料蠕变方程。采用统计检验方法, 分析不同形式蠕变方程的拟合适用性, 确定铝合金 7075 的蠕变本构方程。

1 速率温度参数模型的建立

根据空穴富集理论, MACHLIN 等^[15]推导出蠕变稳态速率与持久断裂时间呈简单的反比例关系。MONKMAN 等^[14]通过数据拟合得出持久时间 t_r 与稳

态蠕变速率 $\dot{\epsilon}_s$ 之间的经典公式, 即:

$$\lg t_r = m \cdot \lg \dot{\epsilon}_s + b \quad (1)$$

MONKMAN 的计算结果显示对于大部分合金, 斜率 m 的取值范围大约在 $-0.7 \sim -1$ 之间。

针对传统时间温度参数无法计算稳态蠕变速率的问题, 依据 Monkman-Grant 公式(1), 在时间温度参数的表达式中引入稳态蠕变速率 $\dot{\epsilon}_s$, 替代参数中原有的持久时间 t_r , 将经典时间温度参数中的 Restrained-Manson-Brown(RMB)参数^[16]、Manson-Haford(MH)参数、Orr-Sherby-Dorn(OSD)参数、Larson-Miller(LM)参数修改为速率温度参数形式, 修正后的 RMB'、MH'、OSD'、LM'速率温度参数表达式如下:

$$X_{\text{RMB}'} = \frac{-\lg \dot{\epsilon}_s - \lg t_a \cdot T^{|q|-1}}{(T - T_a \cdot \langle q \rangle)^q} \quad (2)$$

$$X_{\text{MH}'} = \frac{-\lg \dot{\epsilon}_s - \lg t_a}{T - T_a} \quad (3)$$

$$X_{\text{OSD}'} = \lg \dot{\epsilon}_s + \frac{Q}{R \cdot T} \quad (4)$$

$$X_{\text{LM}'} = T \cdot (C - \lg \dot{\epsilon}_s) \quad (5)$$

式中: T 为温度, K; Q 为过程活化能, kJ/mol; R 为摩尔气体常数, 取值为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; $\dot{\epsilon}_s$ 代表稳态蠕变速率, $1/\text{h}$; $\lg t_a$ 、 T_a 、 q 、 C 均为常数项。当 $q > 0$ 时, $\langle q \rangle = q$, 当 $q \leq 0$ 时, $\langle q \rangle = 0$ 。当 q 分别等于 -1 、 0 、 1 时, RMB' 参数分别退化为 LM' 参数、OSD' 参数及 MH' 参数。

在确定速率温度参数的系数项之前, 还需要确定主曲线 $P(\sigma)$ 的形式。研究中采用 “GJB/Z 18A-2005K”^[17] 中推荐的四阶 $\lg \sigma$ 的多项式对 $P(\sigma)$ 进行拟合。速率温度参数模型的具体表达式仅以 RMB' 速率温度参数为例, 其他 LM'、OSD' 及 MH' 参数模型的对应表达式可以通过表达式中 q 取相应数值后简化得出。在 RMB' 速率温度参数模型中, 蠕变稳态速率 $\dot{\epsilon}_s$ 、温度水平 T 、应力水平 σ 应满足如下关系:

$$\lg \dot{\epsilon}_s = -\lg t_a \cdot T^{|q|-1} - (T - T_a \cdot \langle q \rangle)^q \cdot (a_0 + a_1 \cdot \lg \sigma + a_2 \cdot \lg^2 \sigma + a_3 \cdot \lg^3 \sigma + a_4 \cdot \lg^4 \sigma) \quad (6)$$

2 蠕变方程的求解

2.1 材料状态及蠕变数据

以高强铝合金 7075 作为算例, 利用本研究提出的

速率温度参数模型, 求解基于不同模型下的稳态蠕变拟合方程。7075 铝合金的蠕变数据来自文献[18], 该铝合金的成分如表 1 所列, 挤压板的热处理状态为 T6 态, 蠕变试样的取样方向为板内短横向(垂直于挤压板的挤压方向)。计算中使用的有效蠕变数据共 28 个, 分别取自 34.4°C 、 99.4°C 、 148.9°C 的蠕变实验, 应力水平处于 $138 \sim 523 \text{ MPa}$ 的范围内, 数据分布见图 1。从图 1 中可以清楚地看出, 相同温度下实验应力与 7075 铝合金稳态蠕变速率的对数值呈非线性关系, 即在实验条件范围内, 高强铝合金 7075 存在明显的幂律失效现象。

表 1 7075 铝合金的成分含量

Table 1 Chemical composition of 7075 aluminum alloy (mass fraction, %)

Zn	Mg	Cu	Si	Fe	Cr	Ti	Al
5.51	2.44	1.60	0.12	0.23	0.22	0.05	Bal.

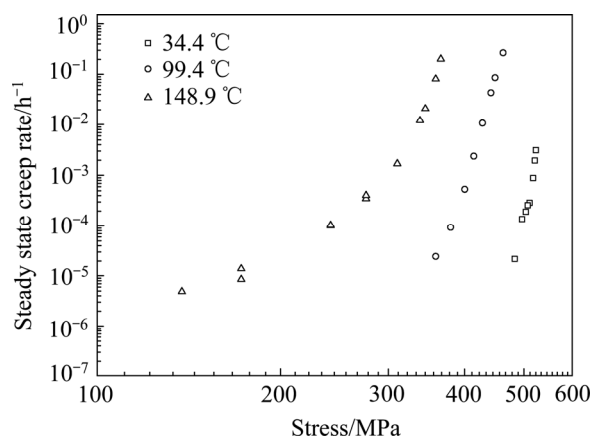


图 1 高强铝合金 7075 蠕变数据的分布情况

Fig. 1 Distribution of steady state creep rate data of aluminum alloy 7075

将 7075 铝合金的蠕变数据标示在蠕变速率-持久时间的关系图 2 中, 线性拟合已断裂数据的稳态蠕变速率 $\dot{\epsilon}_s$ 、持久时间 t_r 之间的数值关系, 拟合线表达式为 $\lg t_r = -0.7806 \lg \dot{\epsilon}_s - 0.8728$, 线性相关系数 $R_r^2 = 0.9410$, 说明高强铝合金 7075 的稳态蠕变速率与持久时间之间基本满足 Monkman-Grant 公式。

2.2 蠕变方程的拟合过程

为了保证蠕变拟合方程的准确性, 建立 $\lg(\dot{\epsilon}_{\text{fitted}})$ 与 $\lg(\dot{\epsilon}_{\text{test}})$ 之间残差平方和的优化函数, 拟合确定的系数应使残差平方和 R_1^2 最小。残差平方和 R_1^2 的函数表达式如下:

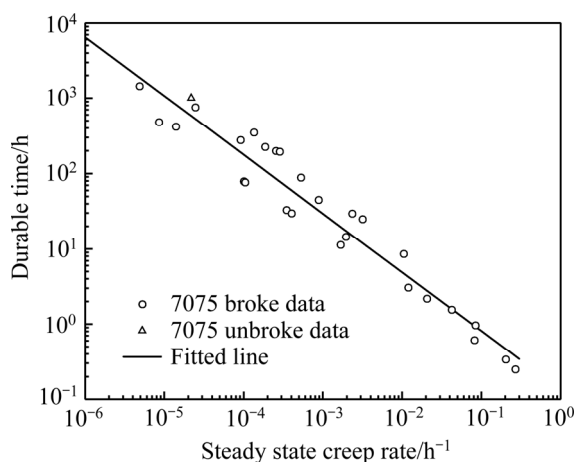


图2 高强铝合金 7075 稳态蠕变速率与持久时间的关系

Fig. 2 Variation of enduring time with steady creep rate of 7075 alloy

$$R_{r1}^2 = \sum_{i=1}^{n_{\sigma}} \sum_{j=1}^{m_T} [\lg \dot{\epsilon}_{ij} + \lg t_a \cdot T^{[q]-1} + (T_j - T_a \cdot \langle q \rangle)^q \cdot (a_0 + a_1 \cdot \lg \sigma_{ij} + a_2 \cdot \lg^2 \sigma_{ij} + a_3 \cdot \lg^3 \sigma_{ij} + a_4 \cdot \lg^4 \sigma_{ij})]^2 \quad (7)$$

式中： i 代表应力水平编号； j 代表温度水平编号； n_{σ} 代表在温度为 T_j 的条件下应力水平的数量； m_T 代表在应力为 σ_i 的条件下温度水平的数量。

在具体的求解过程中，由于 T_a 仅在 MH'、RMB' 模型的参数中出现，不妨先将 q 设定为 1，降低 T_a 对函数表达式(7)求解过程的非线性干扰。如果残差平方和存在最小值，残差平方和对 $\lg t_a$ 、 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 等 6 个待定系数在对应系数处的偏导数均应等于 0。分别推导 $\lg t_a$ 、 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 等系数在对应系数处的偏导数计算式并整理为 6 阶的矩阵形式。结合 7075 铝合金的蠕变数据，利用多元线性回归的方法，确定在 $q=1$ 的条件下残差平方和 R_{r1}^2 最小值为 0.2800，对应 T_a 的最优解为 -147.38，如图 3 所示。然后在 $[-1, 1.5]$ 的范围内搜索 q 的最优解，使残差平方和 R_{r1}^2 最小，具体计算结果见图 4。从图 4 中可以确定残差平方和 R_{r1}^2

的最小值 0.2797，对应的 q 值等于 1.02，优化后不同形式温度参数模型的其他待定系数项及残差平方和如表 2 所示。从表 2 的数据可知，RMB' 模型的残差平方和 R_{r1}^2 最小，MH' 模型的 R_{r1}^2 与 RMB' 模型的计算值相当，OSD' 模型的 R_{r1}^2 明显大于其他模型的计算值。

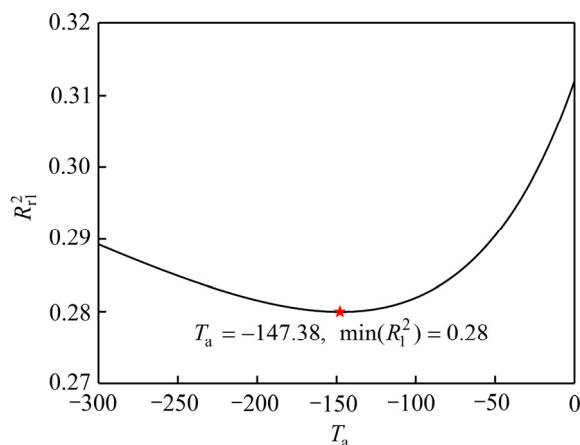


图3 不同 T_a 取值对应蠕变数据残差平方和 R_{r1}^2 的变化趋势

Fig. 3 Variation of sum of squared residuals R_{r1}^2 with T_a values

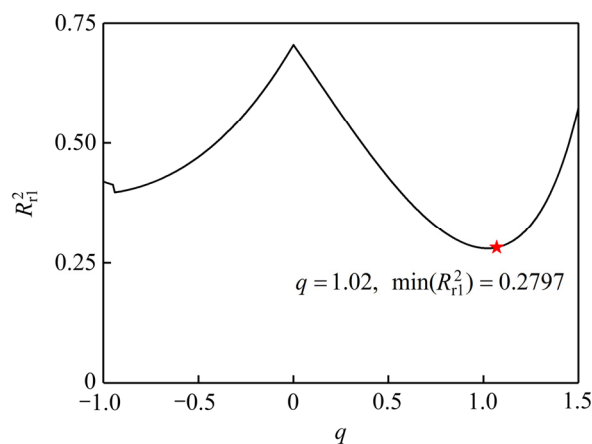


图4 不同 q 值条件下蠕变数据残差平方和 R_{r1}^2 的变化趋势

Fig. 4 Variation of sum of squared residuals R_{r1}^2 with q values

表2 不同速率温度参数模型中其他系数优化值及对应的残差平方和

Table 2 Optimized parameters and related SSE R_{r1}^2 in different models

Model	Optimized parameters							SSE R_{r1}^2
	q	$\lg t_a$	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	
RMB'	1.02	37.8424	-5.0865	9.0607	-6.1221	1.8397	-0.2076	0.2797
MH'	1	41.9540	-6.0021	10.6719	-7.1937	2.1568	-0.2429	0.2800
OSD'	0	1.0038×10^4	-5.6857×10^3	9.8308×10^3	-6.3975×10^3	1.8521×10^3	-2.0140×10^2	0.7049
LM'	-1	-25.1469	5.7388×10^4	-2.8434×10^3	-5.2273×10^4	3.2785×10^4	5.7399×10^3	0.4194

3 蠕变本构方程的评价

3.1 拟合数据的分散性

在确定蠕变方程的系数项后, 采用统计检验的方法分析不同模型下蠕变方程对实测数据的拟合效果。对不同速率温度参数模型下拟合值 $\lg(\dot{\epsilon}_{\text{fitted}})$ 与实测值 $\lg(\dot{\epsilon}_{\text{test}})$ 之间偏差量的分布进行正态检验。图 5 所示的理论累积概率函数在正态坐标图上呈直线。RMB'、MH'、LM'模型下的偏差量数据基本分布在理论累积

概率函数两侧, 近似地服从线性关系, 而 OSD'模型下部分预测值与实测值之间偏差量较大。

采用 Shapiro-Wilk 检验法对偏差量的分布进行非参数检验, 进一步确认其分布类型。在确认偏差量满足正态分布的前提下, 对偏差量数据进行 Dixon 双侧离群值检验。选择显著性水平 α 为 0.05, 不同模型对应的统计及判定值如下表 3 所示。从表中的数据可知, OSD'模型下的拟合值与实测值的对数偏差量数据不服从正态分布, 而基于其他模型蠕变方程的偏差量数据服从正态分布且不存在异常值, 这说明拟合数据与实测数据之间不会出现明显的偏差。

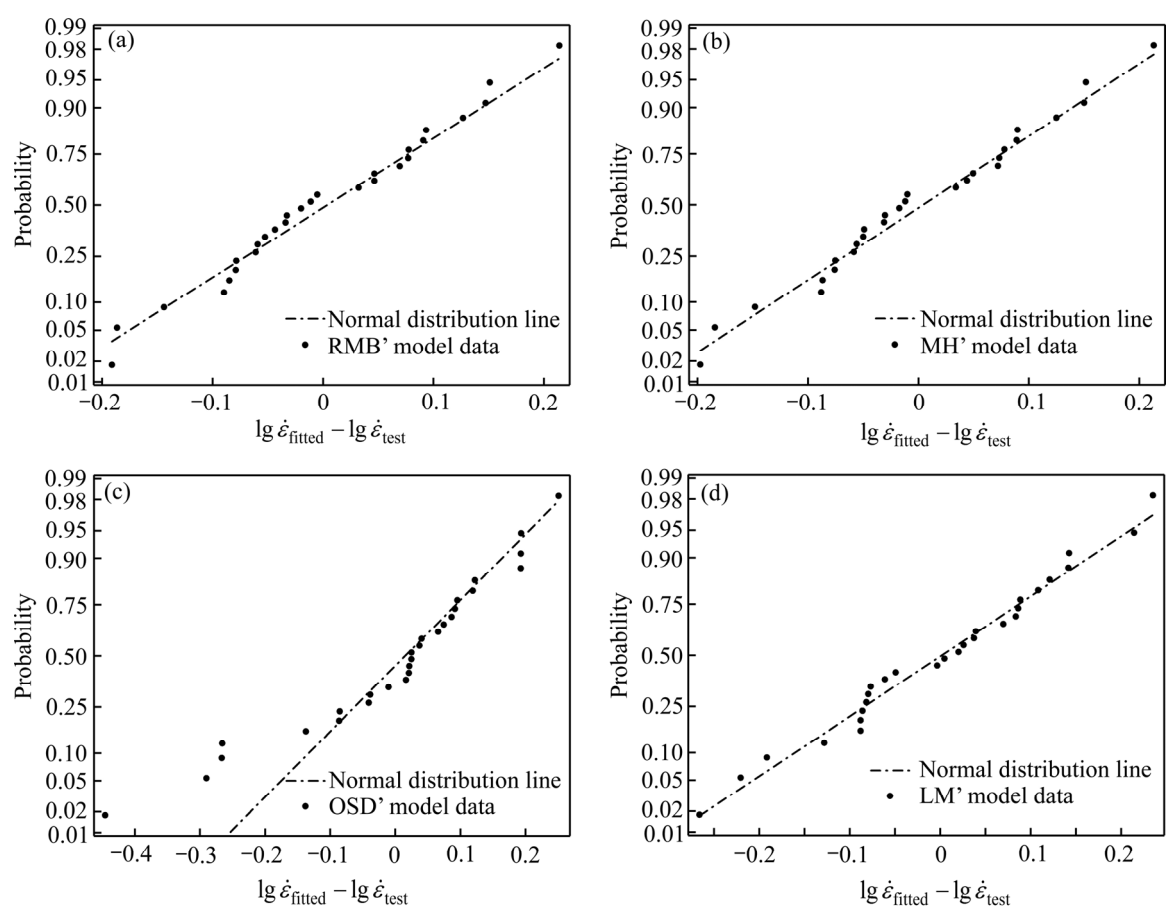


图 5 不同模型下蠕变速率拟合值与实测值的对数偏差量在正态概率图上的分布
Fig. 5 Logarithmic difference distribution of actual measurements and fitted creep data by different models: (a) RMB' model; (b) MH' model; (c) OSD' model; (d) LM' model

表 3 不同模型下偏差量数据的检验结果

Table 3 Test results of logarithmic difference data by different models

Model	Normality test			Outlier test		
	Statistic	$W_{0.05}$	Decision at level (5%)	Max (r_{22}, r'_{22})	$D_{0.95}$	Decision at level (5%)
RMB'	0.979	0.924	Obey	0.19	0.420	No outlier
MH'	0.979		Obey	0.17		No outlier
OSD'	0.917		Reject	—		—
LM'	0.979		Obey	0.22		No outlier

3.2 拟合数据的有效性

为了考察蠕变方程的有效性,建立不同模型下拟合数据与实测数据的回归直线,计算不同速率温度参数模型下拟合与实测数据的对数残差标准差 S_{A-RLT} ,确定理想拟合线($\lg \dot{\epsilon}_{\text{fitted}} = \lg \dot{\epsilon}_{\text{test}}$)双侧 96.5%置信区间的边界线,检验不同模型下的预测数据是否完全落入该置信区间内,其中对数残差标准差 S_{A-RLT} 的计算式如式(8)所示,双侧 96.5%置信区间边界线的表达式如式(9)所示。

$$S_{A-RLT} = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^{n_A} (\lg \dot{\epsilon}_{\text{fitted},i} - \lg \dot{\epsilon}_{\text{test},i})^2 \right] / (n_A - 1)} \quad (8)$$

$$\lg \dot{\epsilon}_{\text{fitted}} = \lg \dot{\epsilon}_{\text{test}} \pm 2.11 S_{A-RLT} \quad (9)$$

式中: $\dot{\epsilon}_{\text{fitted}}$ 、 $\dot{\epsilon}_{\text{test}}$ 的单位为 h^{-1} ; n_A 代表全部数据点的数量。

图6所示分别是RMB'、MH'、OSD'、LM'模型下拟合数据与实测数据的回归直线。从图6中可以看出,RMB'、MH'、LM'模型下拟合数据与实测数据对数值的线性相关系数均大于0.99,OSD'模型的相关系

数略小但也在0.98以上。而以上模型拟合直线的斜率均接近于1,与理想拟合线基本重合。

图7所示为不同速率温度参数模型下蠕变方程拟合数据的有效性检验图。从图7中可以看出,与OSD'、LM'模型相比,基于RMB'、MH'模型的拟合值与实测值的吻合程度显然更好,数据点密集地分布在理想拟合线周围且均落入96.5%的置信区间内。而利用OSD'、LM'模型计算的蠕变数据中,(-0.693, -1.198)落于理想拟合线96.5%置信区间之外,该数据对应的实验条件分别为(148.9 °C, 365.4 MPa)。这说明OSD'、LM'模型无法保证实验条件范围内的拟合结果均达到设定的置信度。

综合预测数据分散性及有效性的检验结果,RMB'、MH'模型的蠕变方程可以更好地描述高强铝合金7075在实验条件范围内的稳态蠕变行为。在温度水平34.4~148.9 °C、应力水平138~523 MPa的范围内,基于RMB'、MH'模型的7075铝合金蠕变本构方程分别如下:

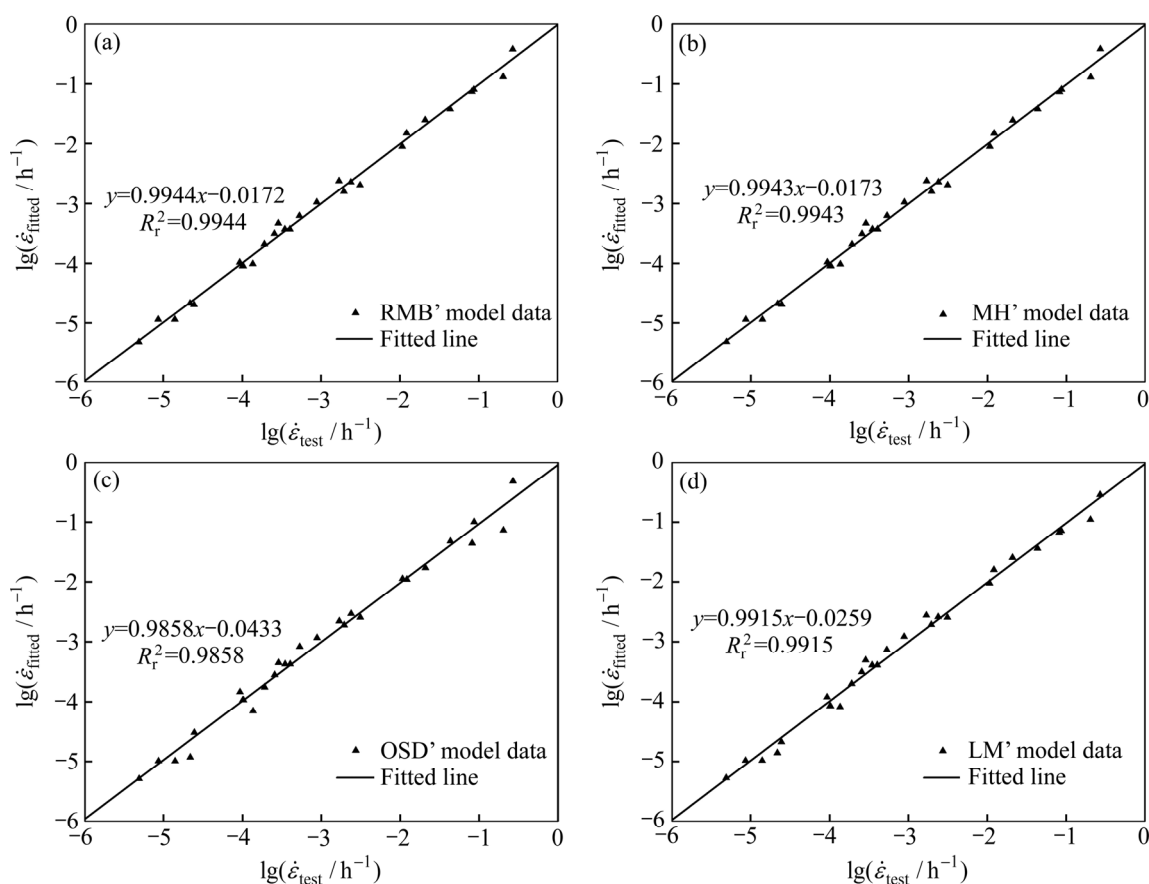


图6 不同模型下蠕变方程拟合数据与实测数据的对比

Fig. 6 Comparison of actual measurements and fitted creep data by different models: (a) RMB' model; (b) MH' model; (c) OSD' model; (d) LM' model

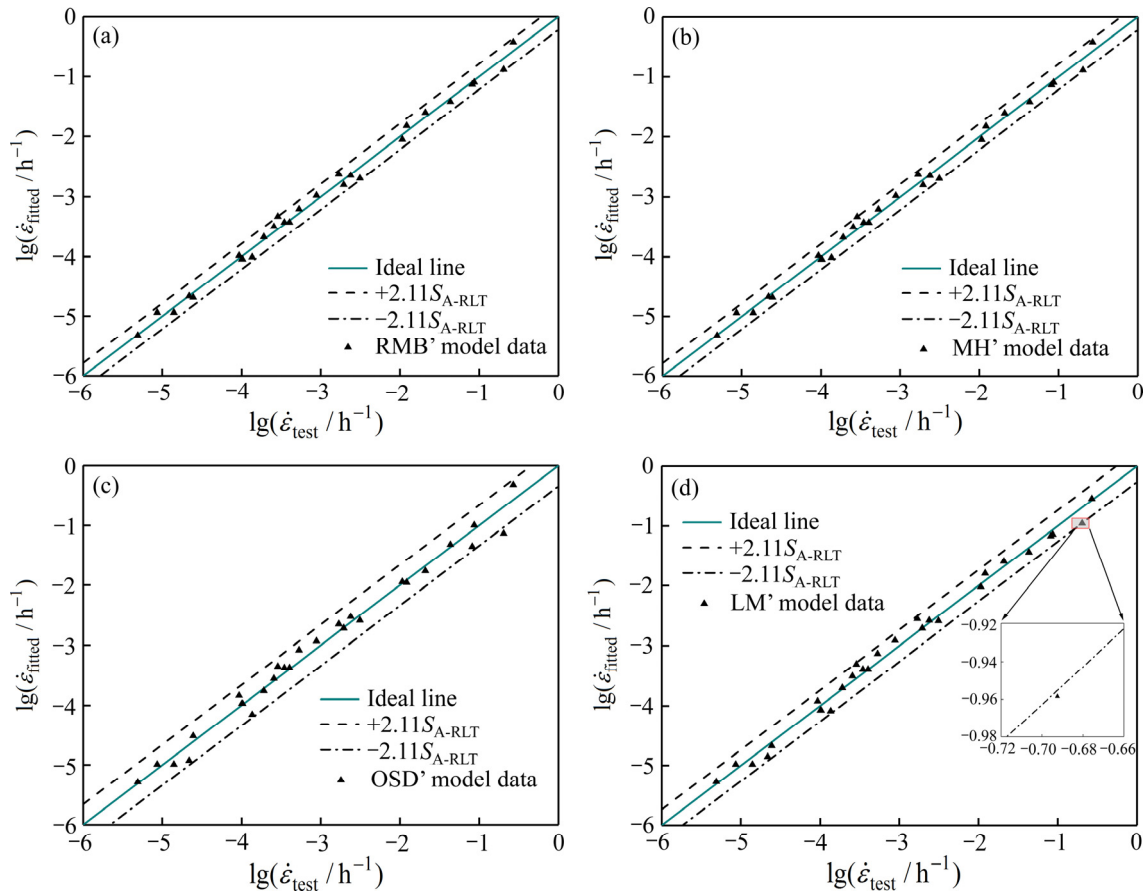


图7 不同模型下蠕变方程预测数据的有效性检验

Fig. 7 Effectiveness of fitted results by different rate temperature models: (a) RMB' model; (b) MH' model; (c) OSD' model; (d) LM' model

$$\lg \dot{\varepsilon}_s = -37.8424T^{0.11} + (T+150.3276)^{1.02} \cdot (5.0865 - 9.0607 \lg \sigma + 6.1221 \lg^2 \sigma - 1.8397 \lg^3 \sigma + 0.2076 \lg^4 \sigma) \quad (10)$$

$$\lg \dot{\varepsilon}_s = -37.8424 + (T+147.38) \cdot (6.0021 - 10.6719 \lg \sigma + 7.1937 \lg^2 \sigma - 2.1568 \lg^3 \sigma + 0.2429 \lg^4 \sigma) \quad (11)$$

3.3 蠕变本构方程的验证

为验证 7075 铝合金稳态蠕变本构方程的正确性, 在不同温度水平下开展低应力的蠕变性能实验。根据蠕变方程(10)、(11), 分别在对应温度下建立应力-稳态蠕变速率对数值的预测曲线, 并与验证实验数据进行比较, 结果如图 8 所示。图 8 中同时示出了依据蠕变数据分散性确定的置信度为 96.5% 的预测区间。从图中可以看出, RMB' 和 MH' 参数模型下的预测曲线基本重合, 低应力水平的验证数据均落入对应温度下预测曲线的置信区间内。经计算, RMB'、MH' 模型下稳态蠕变速率 $\dot{\varepsilon}_s$ 对数预测值的平均相对误差值分别

为 2.56%、2.48%, 这说明建立的蠕变本构方程可以较好地描述高强铝合金 7075 在试验温度及应力水平下的稳态蠕变行为, 完全满足工程应用的需求。

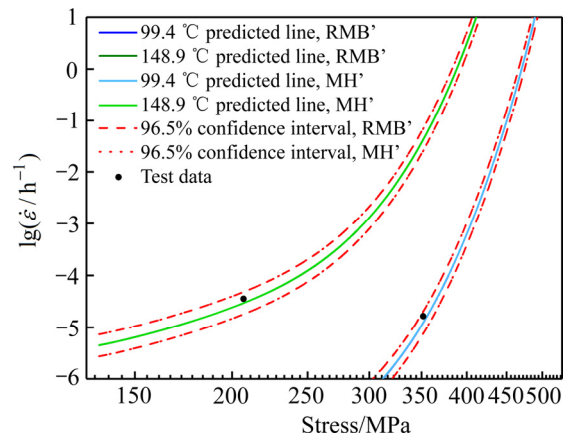


图8 基于速率温度参数的铝合金 7075 蠕变性能预测曲线与实验数据的比较

Fig. 8 Comparison of actual measurements and predicted creep data of 7075 by rate temperature parameter models

4 结论

1) 结合时间温度参数及 Monkman-Grant 关系式, 提出了 RMB'、MH'、OSD'、LM'等 4 种速率温度参数模型, 并将速率温度参数成功应用于高强铝合金稳态蠕变速率本构方程的求解过程。

2) 采用多元线性回归方法, 求解出基于不同速率温度参数模型(RMB'、MH'、OSD'、LM')的高强铝合金 7075 稳态蠕变速率拟合方程, 对应的残差平方和 R_{r}^2 分别为 0.2797、0.2800、0.7049、0.4194。检验结果显示, 在显著性水平 5%的条件下, OSD'模型下实验数据与拟合结果的对数差值不满足正态分布。OSD'、LM'模型下拟合数据对数值无法完全落入理想拟合线的 96.5%置信区间内, 而 RMB'、MH'参数模型下的拟合结果均满足以上分散性及有效性的检验要求。

3) 通过高温低应力下的验证实验, 实验结果均落入预测曲线 96.5%的置信区间内, 证明了基于 RMB'、MH'参数模型的蠕变本构方程可以较好地描述高强铝合金 7075 的稳态蠕变行为。

REFERENCES

- [1] 冯云祥, 刘静安. 超高强铝合金的发展与研制开发方向[J]. 材料导报, 2004, 18(8A): 196–202.
FENG Yun-xiang, LIU Jing-an. Development and study orientation for super aluminum alloy[J]. Materials Review, 2004, 18(8A): 196–202.
- [2] 曹春晓. 一代材料技术, 一代大型飞机[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 702–706.
CAO Chun-xiao. One generation of material technology, one generation of large aircraft[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 702–706.
- [3] 姬浩. 先进铝合金锻件在大型飞机上应用研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(11): 13–15.
JI Hao. Application research on advanced aluminum alloy forging for large airplane[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(11): 13–15.
- [4] JAHROMI S A. Creep behavior of spray-cast 7XXX aluminum alloy[J]. Materials and Design, 2002, 23: 169–172.
- [5] WILSHIRE B, SCHARNING P J. Creep and creep fracture of commercial aluminum alloy[J]. Journal of Material Science, 2008, 43: 3992–4000.
- [6] SRIVASTAVA V, WILLIAMS J P, MCNEE K R, GREENWOOD G W, JONES H. Low stress creep behaviour of 7075 high strength aluminum alloy[J]. Material Science and Engineering A, 2004: 50–56.
- [7] 吕凤工, 黄遐, 曾元松, 王永坤. 7050 铝合金蠕变时效成形本构模型研究[J]. 材料科学与工艺, 2014, 22(3): 28–33.
LÜ Feng-gong, HUANG Xia, ZENG Yuan-song, WANG Yong-kun. Research on constitutive model of 7050 aluminum alloy for creep age forming[J]. Materials Science and Technology, 2014, 22(3): 28–33.
- [8] LIN Y C, JIANG Y Q, ZHOU H M, LIU G. A new creep constitutive model for 7075 aluminum alloy under elevated temperatures[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(12): 4350–4357.
- [9] 张俊善. 材料的高温变形与断裂[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 378–379.
ZHANG Jun-shan. High temperature deformation and fracture of materials[M]. Beijing: Science Press, 2007: 378–379.
- [10] MARAHLEH G, KHEDER A R, HAMAD H F. Creep life prediction of service-exposed turbine blades[J]. Materials Science and Engineering A, 2006: 305–309.
- [11] 赵杰, 李东明, 方园园. Manson-Haferd 常数的选择及在蠕变持久寿命预测中的应用[J]. 材料工程, 2009(6): 30–34.
ZHAO Jie, LI Dong-ming, FANG Yuan-yuan. Selection of Manson-Haferd constants and its application on rupture life prediction[J]. Journal of Materials Engineering, 2009(6): 30–34.
- [12] WOO G K, SONG N Y, WOO S R. Application and standard error analysis of the parametric methods for predicting the creep life of type 316LN SS[J]. Key Engineering Materials, 2005, 297/300: 2272–2277.
- [13] HEIMERL G J. Time-temperature parameters and an application to rupture and creep of aluminum alloys[J]. NACA TN 3195, 1954.
- [14] MONKMAN E C, GRANT N J. An empirical relationship between rupture life and minimum creep rate in creep-rupture tests[J]. Proceedings of ASTM International, 1956, 56: 593–620.
- [15] MACHLIN E S. Creep-rupture by vacancy condensation[J]. Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 1956, 8(2): 106–110.

- [16] SERUGA D, NAGODE M. Unification of the most commonly used time-temperature creep parameters[J]. Materials Science and Engineering A, 2011(528): 2804–2811.
- [17] GJB/Z 18A—2005. 金属材料力学性能数据表达准则[S]. GJB/Z 18A—2005. Metallic materials-guidelines for the presentation of mechanical property data[S].
- [18] FLANEGAN A E, TEDSEN L F, DORN J E. Stress rupture and creep tests on aluminum-alloy sheet at elevated temperatures[J]. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1947(1): 213–244.

Derivation of steady creep constitutive equation of 7075 aluminum alloy by rate temperature parameter

LI Ang

(Institute of Physical and Chemical Engineering of Nuclear Industry, Tianjin 300180, China)

Abstract: Based on Monkman-Grant equation and time temperature parameter, four different rate temperature parameter models were proposed to resolve the difficulty of creep data fitting when power-law breakdown appears in high strength aluminum alloy. The 7075 creep data were fitted into different rate temperature parameter models to obtain the steady creep rate equations by multiple linear regression. The effectiveness of model prediction were discussed in comparison of different models by statistical test methods. The results demonstrate that when significance level is 5%, the logarithmic difference distribution of measured and fitted data by OSD' model do not satisfy normal distribution. The fitted logarithmic creep rate by OSD' and LM' models could not completely drop into 96.5% confidence intervals of ideal fitted line. The regression curves are calibrated by logarithmic values of measured and fitted data by RMB' and MH' models, which linear correlation coefficients are greater than 0.994. The sum of squared residuals of RMB' and MH' models are 0.2797 and 0.2800, respectively. The steady state creep behavior of 7075 aluminum alloy in experimental conditions can be well described by creep constitutive equations of RMB' and MH' models.

Key words: rate temperature parameter; high strength aluminum alloy; power-law breakdown; creep constitutive equation; statistical test

Foundation item: Project(CNNC2019YTEP-IPCE01) supported by the Elite Project for Young Talents of China National Nuclear Corporation, China

Received date: 2019-01-25; **Accepted date:** 2019-06-20

Corresponding author: LI Ang; Tel: +86-22-58231665; E-mail: kenshin0209@sina.com

(编辑 王 超)