应变波形对 Inconel 625 合金低周疲劳性能的影响

刘雪莹[1]，陈立佳[1]，周 舸[1]，王宝森[2]

(1. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院，辽宁 沈阳 110870)

(2. 宝钢股份研究院 焊接与表面技术研究所，上海 201900)

摘 要：在 650 ℃以及拉压对称三角波（TR）、慢拉快压锯齿波（ST）和快拉慢压锯齿波（FT）3 种应变波形下对 Inconel 625 合金进行了低周疲劳实验，研究了合金在不同应变波形下的低周疲劳变形与断裂行为。结果表明：3 种应变波形加载条件下，合金在 0.3%~0.7%的外加总应变幅下均呈现循环硬化，其中在 ST 下的循环应力幅最高；采用锯齿波形时，由于拉伸蠕变分量和压缩蠕变分量的引入造成合金的疲劳寿命缩短；此外，合金的循环应力和应变之间呈现单斜率线性关系，且其塑性应变幅与弹性应变幅和疲劳寿命之间亦呈线性关系。利用扫描电子显微镜对 Inconel 625 合金在 3 种加载波形下的低周疲劳断口形貌进行观察，结果表明，Inconel 625 合金的疲劳裂纹萌生和扩展均是以穿晶方式进行的。

关键词：Inconel 625 合金；低周疲劳；应变波形；断口形貌；失效形式

中图法分类号：TG132.3^{+}3；TG146.1^{+}5；TG115.5^{+}7 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-185X(2021)04-1263-07

Inconel 625 合金是一种以 Cr 和 Mo 为主要强化元素的镍基合金，另外，还含有一定量的 Fe、Nb、Co 等元素。由于 Inconel 625 合金具有良好的抗氧化性能、耐腐蚀性能以及优异的力学性能，目前已经被普遍应用于航空航天、舰船、能源等领域[1-4]。为确保工程构件在实际服役中的安全运行，对该类合金组织与性能方面的研究已得到广泛重视。Liu 等人[5]研究了热挤压工艺对 Inconel 625 合金组织和性能的影响，发现热挤压可以改善 Inconel 625 合金的性能，降低腐蚀速率，其中在加热过程中产生的 $M_{23}C_6$ 碳化物在热挤压时得以保留并主要分布在晶界处，从而对伸长率和耐腐蚀性产生有益影响。Gao 等人[6]研究了冷变形量对 Inconel 625 合金管材组织及性能的影响，发现随着冷变形量的增加，合金的平均晶粒尺寸减小，晶粒变形均匀性逐渐改善，合金的硬度增加。Liu 等人[7]研究了富铬 $M_{23}C_6$ 相、富铌 *M*C 相和 δ 相对 Inconel 625 合金高温拉伸性能的影响，发现在高温拉伸加载条件下，富铬 $M_{23}C_6$ 碳化物和富铌 *M*C 碳化物在 700 ℃时发生分解，进而产生颗粒增强效应，使 Inconel 625 合金的抗拉强度在 600~750 ℃温度范围内呈现先升高后降低的趋势，而 δ 相的生长则导致断裂伸长率的降低。王媛媛等人[8]研究了 Inconel 625 合金的室温低周疲劳行为，其研究结果表明，Inconel 625 合金在室温下的疲劳变形前期由于位错之间、位错与孪晶界之间的交互作用而表现出循环硬化，而后期由于位错重构等则呈现循环软化。Nagesha 等人[9]研究了 Inconel 625 合金管材在 600~680 ℃、14 MPa 条件下使役 117 000 h 再经过 1160 ℃/2 h 固溶处理后的低周疲劳行为，并与原始态的进行了比较。结果发现，使役后经过固溶处理的 Inconel 625 合金与原始态合金相比表现出更好的低周疲劳抗力。王媛媛等人[10]通过对 Inconel 625 合金焊接接头在 25 和 760 ℃下进行低周疲劳实验发现，Inconel 625 合金焊接接头在 25 ℃时的疲劳裂纹以穿晶方式进行扩展，而在 760 ℃时疲劳裂纹则以穿晶和沿晶混合方式扩展。

对于 Inconel 625 合金而言，其使用温度范围主要集中于 650~750 ℃。另一方面，在高温下，蠕变损伤的作用不可忽视，而为了揭示蠕变损伤对材料低周疲劳性能的影响，通常采用在高温下进行不对称性应变波形的疲劳实验[11]。为此，本实验采用 3 种应变波形针对 Inconel 625 合金在 650 ℃下的低周疲劳行为进行了研究，并主要探讨了应变波形对合金疲劳变形及断裂行为的影响规律，以期为该类合金的抗疲劳设计提供必要的理论依据。

1 实 验

Inconel 625 合金的化学成分（质量分数，%）为 C 0.1，Cr 23.0，Co 1.0，Si 0.5，Mo 10.0，Mn 0.5，Ti 0.4，Al 0.4，Nb 4.2，Fe 5.0，余量为 Ni。所采用的疲劳试样

收稿日期：2020-04-15

基金项目：国家自然科学基金（51805335）

作者简介：刘雪莹，女，1994 年生，硕士生，沈阳工业大学材料科学与工程学院，辽宁 沈阳 110870，E-mail: lxy_941203@163.com

的标距部分长为 14 mm，宽为 8 mm，厚为 11 mm。

试样加工完成后，首先用 SiC 砂纸研磨试样表面，去除试样表面的加工痕迹。低周疲劳实验所用的设备为 MTS Landmark 370.10 型微机控制电液伺服疲劳试验机，疲劳实验温度为 650 ℃。采用轴向拉-压全反向外加总应变幅控制模式，外加总应变幅（$\Delta\varepsilon_t/2$）分别为 0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%。采用 3 种应变波形，分别为慢拉快压的锯齿波（ST）、快拉慢压的锯齿波（FT）和拉压对称的三角波（TR），相应的应变波形示意图如图 1 所示，相应的拉伸（ε_t）和压缩（ε_c）应变速率如表 1 所示。所有的疲劳实验均进行到循环应力幅下降至整个疲劳变形过程当中所达到的循环应力幅峰值的 80%的时候停止，并以此时对应的循环周次来作为 Inconel 625 合金在相应的实验条件下的疲劳寿命 N_f。为了确定疲劳断裂的模式，对疲劳试样的断口形貌进行观察，所用仪器为 S-3400N 型扫描电子显微镜。

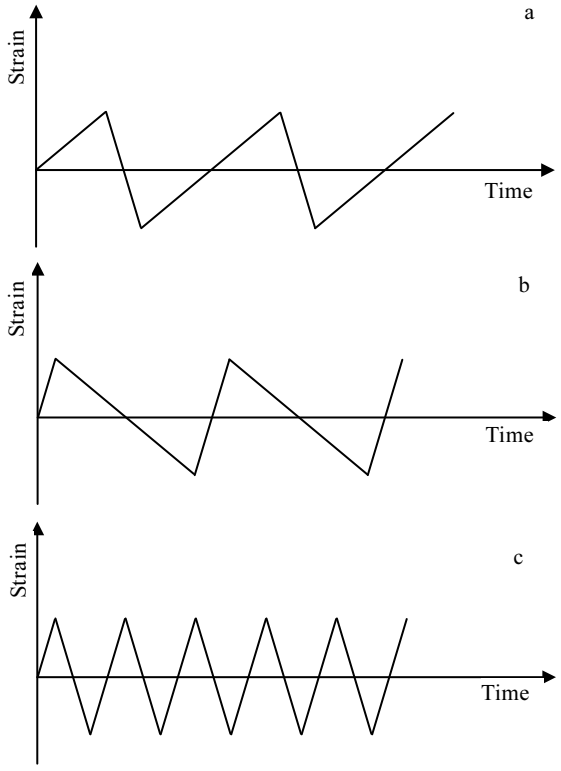

图 1　应变波形示意图

Fig.1　Schematic illustrations of strain waveforms: (a) ST, (b) FT, and (c) TR

表 1　3 种应变波形的拉伸和压缩应变速率

Table 1　Tensile and compression strain rate for three strain waveforms

Waveform	$\dot{\varepsilon}_t$ /s^{-1}	$\dot{\varepsilon}_c$ /s^{-1}
ST	0.001	0.004
FT	0.004	0.001
TR	0.004	0.004

Note: $\dot{\varepsilon}_t$ - tensile strain rate; $\dot{\varepsilon}_c$ - compression strain rate

2　实验结果

2.1　循环应力响应行为

图 2 为外加总应变幅分别为 0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%时 Inconel 625 合金在 3 种应变波形下的循环应力响应曲线。由图可见，在不同的外加总应变幅下，3 种应变波形下的 Inconel 625 合金在疲劳加载过程中均表现出循环硬化行为。

从图 2a 可以看出，当外加总应变幅为 0.3%时，疲劳加载前期，3 种应变波形下的循环应力幅相差不多；疲劳加载中期，TR 波形下的循环应力幅最高，其次是 ST 波形下的循环应力幅，最低的是 FT 波形下的循环应力幅；疲劳加载后期，ST 波形下的循环应力幅最高，其次是 TR 波形下的循环应力幅，最低的仍是 FT 波形下的循环应力幅。从图 2b 可以看出，当外加总应变幅为 0.4%时，疲劳加载前、中期，3 种应变波形下的循环应力幅亦相差不大；疲劳加载后期，ST 波形下的循环应力幅最高，其次是 TR 波形，最低的是 FT 波形。从图 2c 和 2d 可以看出，当外加总应变幅为 0.5%和 0.6%时，疲劳加载前期，3 种应变波形下的循环应力幅也相差不大；疲劳加载中、后期，ST 波形下的循环应力幅最高，其次是 TR 波形，最低的是 FT 波形。从图 2e 可以看出，当外加总应变幅为 0.7%时，疲劳加载前期，ST 波形下的循环应力幅稍高些，而其他 2 种应变波形下的循环应力幅则相差不大；疲劳加载中、后期，ST 波形下的循环应力幅最高，其次是 FT 波形，最低的是 TR 波形。

图 3 为 3 种应变波形和不同总应变幅下 Inconel 625 合金低周疲劳变形后的位错亚结构。从图中可以看出，Inconel 625 合金在 3 种应变波形下疲劳变形后均具有较高的位错密度，并且位错之间产生了交互作用，形成了明显的位错缠结（如图 3a）；位错由于受到晶界的阻碍作用，在晶界处产生塞积现象（如图 3b~3e）；同时，位错运动受到第二相的阻碍作用，故在第二相周围亦产生明显的位错塞积（如图 3f）。因此，3 种应变波形下的 Inconel 625 合金在疲劳变形过程中均表现出循环硬化行为。此外，由图 3 可知，3 种波形下的位错密度有所不同，其中 ST 波形下的位错密度更高，且存在大量位错缠结，位错滑移阻力相对更大，故发生疲劳变形时所需的循环应力幅值更高。

2.2　低周疲劳寿命行为

图 4 为 Inconel 625 合金在 3 种应变波形下的外加

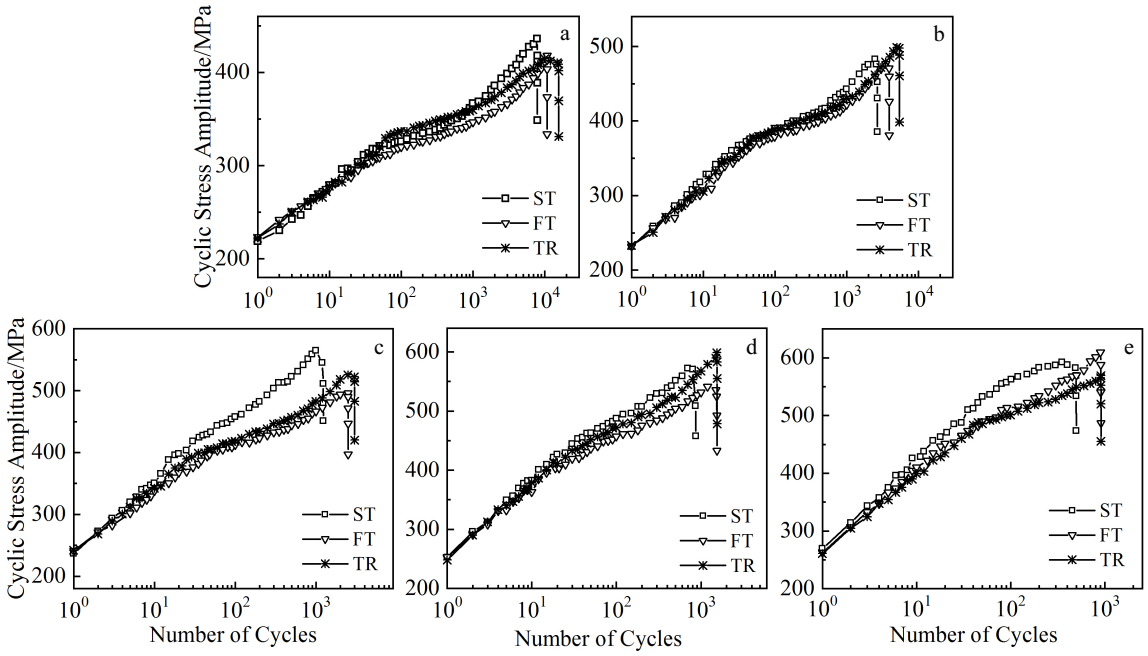

图 2　Inconel 625 合金在 3 种应变波形不同外加总应变幅时的循环应力响应曲线

Fig.2　Cyclic stress response curves of Inconel 625 alloy under three strain waveforms and different total strain amplitudes: (a) $\Delta\varepsilon_t/2$ = 0.3%, (b) $\Delta\varepsilon_t/2$ = 0.4%, (c) $\Delta\varepsilon_t/2$ = 0.5%, (d) $\Delta\varepsilon_t/2$ = 0.6%, and (e) $\Delta\varepsilon_t/2$ = 0.7%

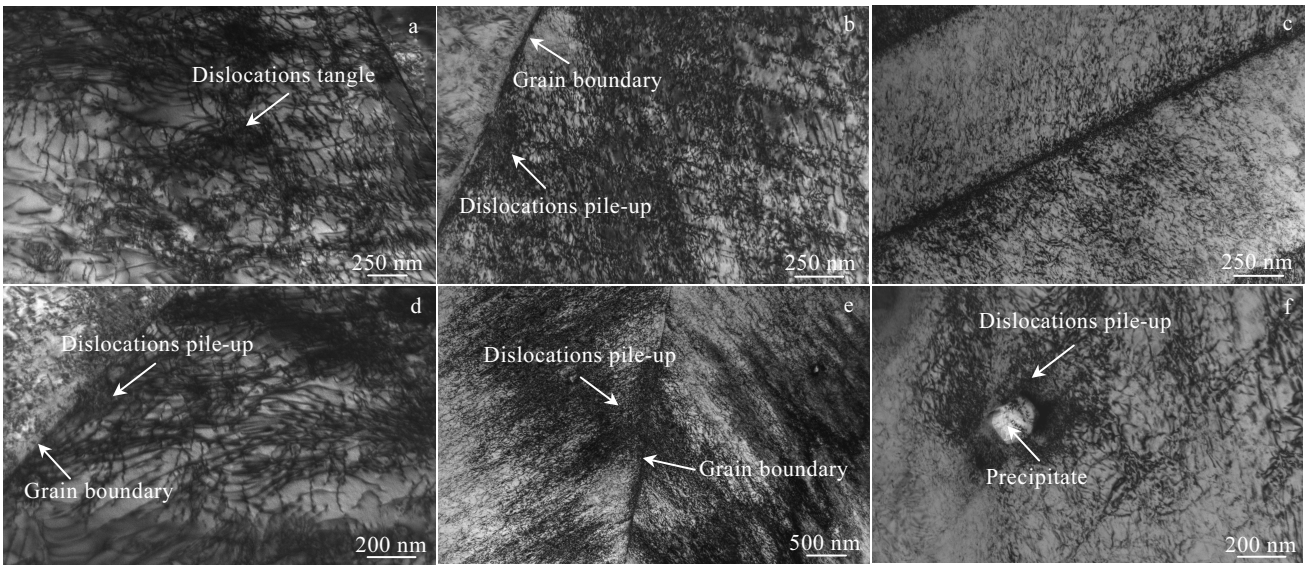

图 3　3 种应变波形和不同总应变幅下 Inconel 625 合金低周疲劳变形后的微观结构

Fig.3　Microstructures of Inconel 625 alloy after low cycle fatigue deformation under three strain waveforms and different total strain amplitudes: (a) ST, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.4%; (b) FT, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.4%; (c) TR, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.4%; (d) ST, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.6%; (e) FT, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.6%; (f) TR, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.6%

总应变幅-疲劳寿命曲线。可以看出，在 0.3%~0.7%的外加总应变幅下，采用 TR 波形时，合金的疲劳寿命最长，合金在 FT 波形下的疲劳寿命次之，而采用 ST 波形时，合金的疲劳寿命最短。

基于相同外加总应变幅下对应于 3 种应变波形下的循环滞后回线，可以获得 3 种应变波形下的塑性应变范围，进而计算出采用 ST 波形时所引入的拉伸蠕变分量数值（TR 波形与 ST 波形的塑性应变范围之差）

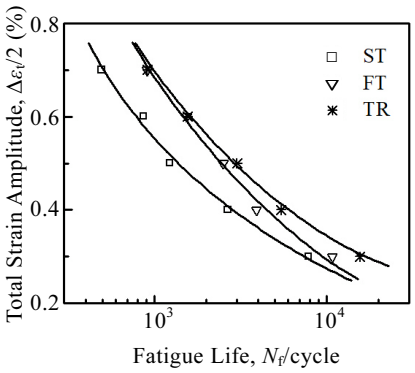

图 4　3 种应变波形下 Inconel 625 合金的外加总应变幅-疲劳寿命曲线

Fig.4　Total strain amplitude ($\Delta\varepsilon_t/2$)-fatigue life (N_f) curves of Inconel 625 alloy under three strain waveforms

和采用 FT 波形时所引入的压缩蠕变的分量数值（TR 波形与 FT 波形的塑性应变范围之差），如表 2 所示。显然，无论是采用拉伸应变速率低的 ST 波形还是压缩速率低的 FT 波形，由于均引入了蠕变应变分量而导致蠕变损伤，其与疲劳造成的损伤相互叠加，因此，与采用拉压对称的三角波形相比，采用 ST 和 FT 2 种锯齿波形时，合金的疲劳寿命缩短。此外，由表 2 中可以看出，在 0.3%~0.7%的外加总应变幅下，采用 ST 波形时，相应的拉伸蠕变分量均较大，即拉伸蠕变损伤作用更为显著，故合金的疲劳寿命最短。而采用 FT 波形时，相应的压缩蠕变分量较小，压缩蠕变损伤作用低于拉伸蠕变，故疲劳寿命的缩短幅度相对较小。

表 2　不同外加总应变幅下对应于 3 种应变波形的塑性应变范围与蠕变分量

Table 2　Plastic strain range and creep component corresponding to three strain waveforms at different applied total strain amplitudes

$\Delta\varepsilon_t/2$	Waveform	$\Delta\varepsilon_p$/mm·mm^{-1}	$\Delta\varepsilon_p^{tc}$/mm·mm^{-1}	$\Delta\varepsilon_p^{cc}$/mm·mm^{-1}
	TR	0.0009185	-	-
0.3%	ST	0.0012577	0.0003392	-
	FT	0.0009661	-	0.0000476
	TR	0.0024445	-	-
0.4%	ST	0.0027893	0.0003448	-
	FT	0.0025191	-	0.0000746
	TR	0.0037704	-	-
0.5%	ST	0.0041383	0.0003679	-
	FT	0.0038949	-	0.0001245
	TR	0.0055704	-	-
0.6%	ST	0.0059527	0.0003823	-
	FT	0.0057715	-	0.0002011
	TR	0.007128	-	-
0.7%	ST	0.007532	0.000404	-
	FT	0.007411	-	0.000283

Note: $\Delta\varepsilon_t/2$-applied total strain amplitude; $\Delta\varepsilon_p$-plastic strain range; $\Delta\varepsilon_p^{tc}$-tensile creep component; $\Delta\varepsilon_p^{cc}$-compression creep component

图 5 为 Inconel 625 合金在 3 种应变波形下的塑性应变幅 ($\Delta\varepsilon_p/2$)-疲劳寿命曲线。可以看出，3 种应变波形下，Inconel 625 合金的塑性应变幅和疲劳寿命之间均呈现单斜率的线性关系。

低周疲劳加载条件下，材料的塑性应变幅和其疲劳寿命之间的关系可以用下式表示：

$$\Delta\varepsilon_p/2 = \varepsilon_f' N_f^c \quad (1)$$

式中：N_f 为材料的疲劳寿命；ε'_f 为疲劳延性系数；c 为疲劳延性指数。基于图 5 中的实验数据，通过线性回归方法即可确定出 3 种应变波形下合金的应变疲劳参数 ε'_f 和 c 的值，如表 3 所示。

图 6 为 Inconel 625 合金在 3 种应变波形下的弹性应变幅($\Delta\varepsilon_e/2$)-疲劳寿命（N_f）曲线。可以看出，Inconel 625 合金的弹性应变幅和疲劳寿命之间亦呈现单斜率的线性关系。

而材料的弹性应变幅和其疲劳寿命之间的关系可

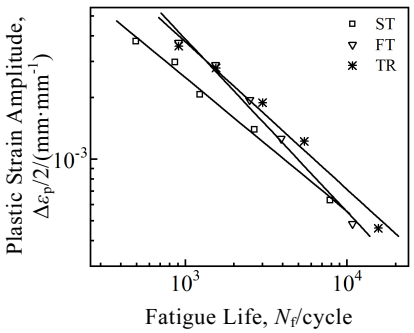

图 5　3 种应变波形下 Inconel 625 合金的塑性应变幅-疲劳寿命曲线

Fig.5　Plastic strain amplitude ($\Delta\varepsilon_p/2$)-fatigue life (N_f) curves of Inconel 625 alloy under three strain waveforms

表 3　Inconel 625 合金在 3 种应变波形下的应变疲劳参数

Table 3　Strain fatigue parameters of Inconel 625 alloy under three strain waveforms

Parameter	ST	FT	TR
ε'_f/%	0.211	0.634	0.586
c	–0.648	–0.745	–0.728
σ'_f/MPa	915.7	1063.0	880.1
b	–0.120	–0.131	–0.102
K'/MPa	1981.2	1439.4	1309.1
n'	0.217	0.175	0.151

Note: ε'_f-fatigue ductility coefficient; c-fatigue ductility index; σ'_f-fatigue strength coefficient; b-fatigue strength index; K'-cycle strength coefficient; n'-cyclic strain hardening index

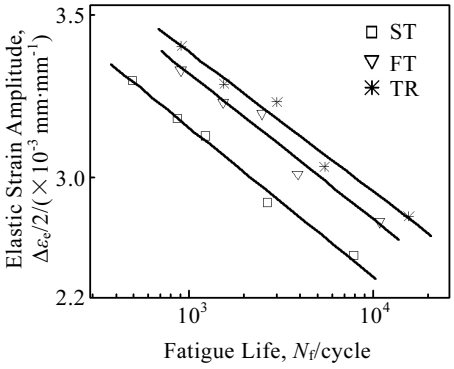

图 6　3 种应变波形下 Inconel 625 合金的弹性应变幅-疲劳寿命曲线

Fig.6　Elastic strain amplitude ($\Delta\varepsilon_e/2$)-fatigue life (N_f) curves of Inconel 625 alloy under three strain waveforms

以用下式表示：

$$\Delta\varepsilon_e/2=\frac{\sigma'_f}{E}N_f^{\ b} \tag{2}$$

式中，N_f 为材料的疲劳寿命；σ'_f 为疲劳强度系数；b 为疲劳强度指数；E 为弹性模量。基于图 6 中的实验数据，通过线性回归方法即可确定出 3 种应变波形下合金的应变疲劳参数 σ'_f 和 b 的值，如表 3 所示。

2.3　循环应力-应变行为

低周疲劳变形时，材料的实际应力-应变特征可以由循环应力-应变曲线来表示，而材料的循环应力和应变之间的关系则可用下式表征：

$$\Delta\sigma/2=K'\left(\Delta\varepsilon_p/2\right)^{n'} \tag{3}$$

式中，$\Delta\sigma/2$ 为循环应力幅；K'为循环强度系数；$\Delta\varepsilon_p/2$ 为塑性应变幅；n'为循环应变硬化指数。

图 7 为 Inconel 625 合金在 3 种应变波形下的循环应力-应变曲线。其中，循环应力幅和塑形应变幅都是在对应实验条件下的中值寿命处获得[12-14]。可以看出，合金的循环应力幅和塑性应变幅之间呈现单斜率的线性关系。同样地，基于图 7 中的实验数据，利用线性回归分析方法可确定出 Inconel 625 合金在 3 种应变波形下的应变疲劳参数 K'和 n'的值，如表 3 所示。

2.4　低周疲劳断口形貌观察

图 8 为 3 种应变波形和不同总应变幅下 Inconel 625 合金低周疲劳裂纹萌生区的形貌。可以清晰地看

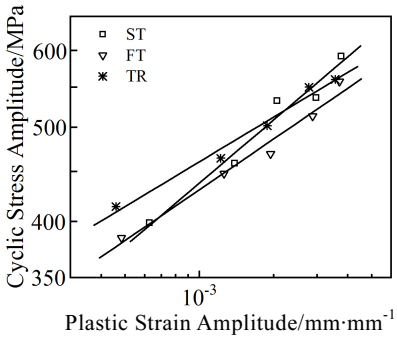

图 7　3 种应变波形下 Inconel 625 合金的循环应力-应变曲线

Fig.7　Cyclic stress-strain curves of Inconel 625 alloy under three strain waveforms

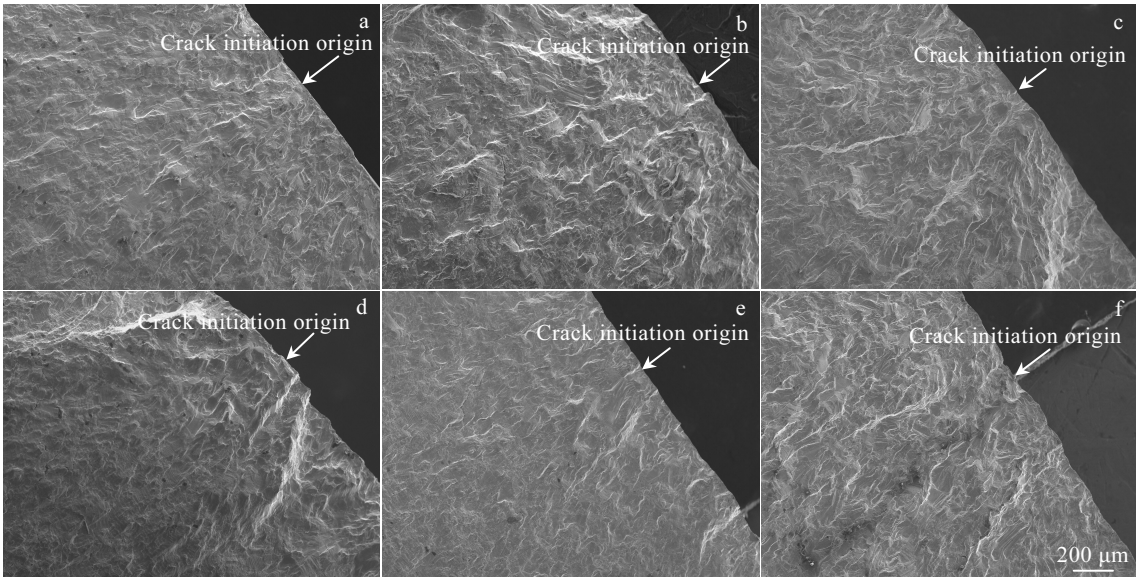

图 8　3 种应变波形和不同总应变幅下 Inconel 625 合金低周疲劳裂纹萌生区的形貌

Fig.8　Morphologies of low cycle fatigue crack initiation zone of Inconel 625 alloy under three strain waveforms and different total strain amplitudes: (a) ST, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.4%; (b) FT, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.4%; (c) TR, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.4%; (d) ST, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.6%; (e) FT, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.6%; (f) TR, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.6%

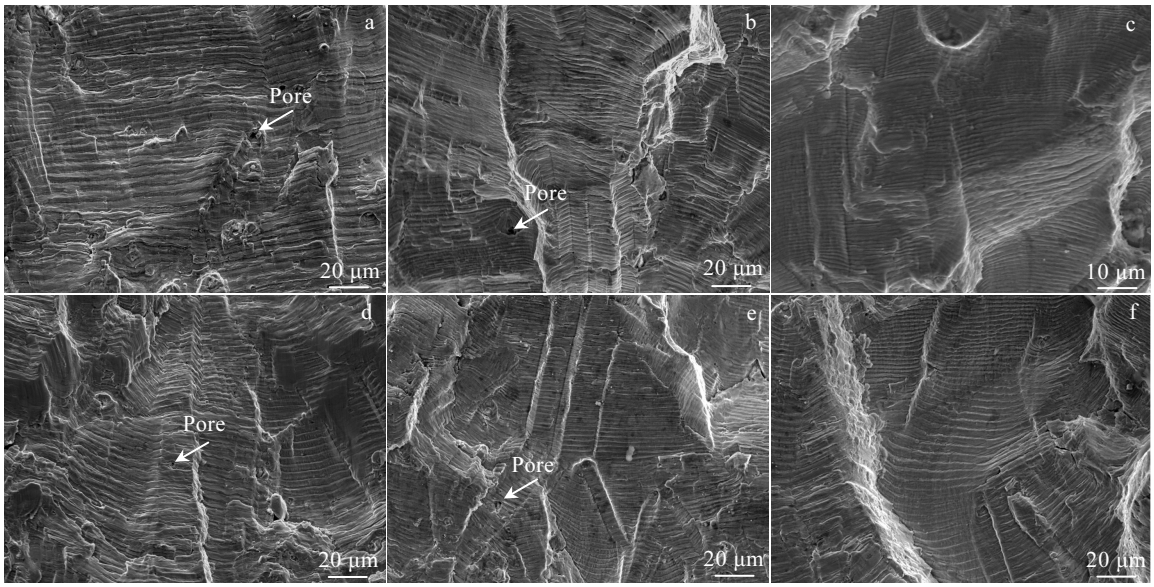

图 9　3 种应变波形和不同总应变幅下 Inconel 625 合金低周疲劳裂纹扩展区的形貌

Fig.9　Morphologies of low cycle fatigue crack growth zone of Inconel 625 alloy under three strain waveforms and different total strain amplitudes: (a) ST, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.4%; (b) FT, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.4%; (c) TR, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.4%; (d) ST, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.6%; (e) FT, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.6%; (f) TR, $\Delta\varepsilon_t/2$=0.6%

出，疲劳裂纹源区呈现了典型的穿晶断裂特征，故可以判断在 3 种应变波形下，疲劳裂纹均是以穿晶模式萌生在试样自由表面的。

图 9 为 3 种应变波形和不同总应变幅下 Inconel 625 合金低周疲劳裂纹扩展区的形貌。从图中可以看出，疲劳裂纹扩展区存在清晰可见的疲劳辉纹，说明在 3 种应变波形下，Inconel 625 合金的低周疲劳裂纹的扩展方式均是穿晶型的。此外，如图 9a，9b，9d，9e 所示，在断口表面亦可观察到孔洞，可以认为这些孔洞的形成与蠕变损伤密切相关。在循环载荷的作用下，由孔洞堆积而成的大尺寸韧窝分布在裂纹扩展区。裂纹通过韧窝的连接沿着不垂直于加载应力的方向扩展，在复杂应力状态下同时形成变形韧窝。这些变形韧窝在形成过程中产生较大的应力集中，加速了裂纹的扩展。同时，由于韧窝的存在，裂纹在整个扩展过程中不断发生偏转，最终导致断口形貌的不均匀。从断口形貌可以看出，疲劳和蠕变的交互作用对材料的损伤机理有很大的影响。

3　结　论

1) 实验温度为 650 ℃时，3 种应变波形下，Inconel 625 合金在本实验的所有外加总应变幅下均呈现循环硬化行为。

2) 3 种应变波形下，Inconel 625 合金的塑性应变幅与弹性应变幅均和疲劳寿命呈单斜率的线性关系，其循环应力幅和塑性应变幅之间亦呈单斜率的线性关系；采用 ST 锯齿波形时，由于拉伸蠕变分量的引入造成疲劳寿命显著缩短，而采用 FT 锯齿波形时，由于压缩蠕变分量的引入，亦可导致疲劳寿命缩短。

3) 3 种应变波形下，Inconel 625 合金中的疲劳裂纹以穿晶方式萌生并以穿晶方式进行扩展，均呈现出典型的疲劳断裂特征。

参考文献　References

[1] Cai Haopeng(蔡浩鹏). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018

[2] Garcia-Fresnillo L, Chyrkin A, Böhme C *et al*. *Journal of Materials Science*[J], 2014, 49(17): 6127

[3] Liu Erliang(刘二亮), Liu Xia(刘　霞), Zhao Liguo(赵立国) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(7): 2192

[4] Maj P, Koralnik M, Adamczyk-Cieslak B *et al*. *International Journal of Material Forming*[J], 2019, 12(1): 135

[5] Liu D X, Cheng X W, Zhang X *et al*. *Journal of Wuhan University of Technology, Materials Science*[J], 2016, 31(6): 1368

[6] Gao Y B, Ding Y T, Meng B *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2019, 48(4): 1079

[7] Liu D X, Zhang X, Qin X Q *et al*. *Materials Science and Technology*[J], 2017, 33(14): 1610

[8] Wang Yuanyuan(王媛媛), Chen Lijia(陈立佳), Wang Baosen (王宝森) *et al*. *Journal of Shenyang University of Technology* (沈阳工业大学学报)[J], 2016, 38(2): 170

[9] Nagesha A, Parameswaran P, Kumar N *et al*. *Materials at High Temperatures*[J], 2014, 29(1): 49

[10] Wang Yuanyuan(王媛媛), Chen Lijia(陈立佳), Wang Baosen (王宝森). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2014, 50(12): 1485

[11] Gorbovets M A, Khodinev I A, Belyaev M S *et al*. *Russian Metallurgy, Metally*[J], 2019, 2019(9): 889

[12] Zhang Yong(张 勇). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016

[13] Yang Gongxian(杨功显), Xu Yongfeng(徐永锋), Jiang Lei (江 雷) *et al*. *Transactions of Materials and Heat Treatment* (材料热处理学报)[J], 2012, 33(8): 45

[14] Zhang Shichao(张仕朝), Yu Huichen(于慧臣), Li Ying(李影). *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2013, 33(1): 100

Effect of Strain Waveform on Low-Cycle Fatigue Properties of Inconel 625 Alloy

Liu Xueying[1], Chen Lijia[1], Zhou Ge[1], Wang Baosen[2]

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

(2. Institute for Welding and Surface Technology of R & D Center, Baoshan Iron & Steel Co. Ltd Research Institute, Shanghai 201900, China)

Abstract: The low-cycle fatigue tests for the Inconel 625 alloy were performed at 650 °C under three strain waveforms including triangular waveform as well as two sawtooth waveforms with slow-tension followed by fast-compression and fast-tension followed by slow-compression. And the low cycle fatigue deformation and fracture behaviors of the alloy under different strain waveforms were investigated. The results show that the Inconel 625 alloy exhibits the cyclic hardening at different strain waveforms and applied total strain amplitudes from 0.3% to 0.7%. When two sawtooth waveforms are adopted, the fatigue life of the alloy will shorten due to the introduction of either tensile or compressive creep strain component. In addition, the relation between the plastic or elastic strain amplitudes and fatigue life as well as between the cyclic stress amplitude and plastic strain amplitude exhibits a single slope linear behavior. The observations on the fatigue fracture surfaces reveal that under three strain waveforms, the fatigue cracks initiate and propagate in a transgranular mode.

Key words: Inconel 625 alloy; low-cycle fatigue; strain waveform; fracture morphology; failure mode

Corresponding author: Chen Lijia, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, P. R. China, E-mail: chenlj-sut@163.com