

文章编号:1005-0523(2016)05-0051-07

加载环境对合金超高周疲劳行为的影响

何柏林,张枝森,谢学涛,封亚明

(华东交通大学机电与车辆工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:疲劳断裂涉及到能源动力、交通运输、海洋工程、冶金工程等领域,其中对关键部件材料在特定环境下承受低应力、高周期变载作用的研究显得尤为重要。传统的疲劳均是在疲劳循环周次小于 10^7 次,属低周或高周疲劳范畴。近年来材料的超高周疲劳研究表明,很多金属材料在 10^7 周次以上仍然发生疲劳断裂,不存在疲劳极限,用 10^7 的条件疲劳极限对长寿命构件进行无限寿命设计并不安全。本文综述了近 20 年国内外学者对合金在特定加载环境(温度与介质)下超高周行为的研究现状,并对其研究前景进行了展望。

关键词:加载环境;温度;合金;超高周疲劳行为

中图分类号: TG113.2

文献标志码: A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.05.009

20 世纪 80 年代,日本学者 Naito 等^[1]发现了渗碳钢在承受了 10^8 周次的应力循环后依旧会发生疲劳破坏的现象。此后,各国学者对多种金属材料进行的大量疲劳试验证明,许多材料只有耐久极限或疲劳强度,传统规范中的“疲劳极限”并不存在,由此开辟了新的研究热点领域——超高周疲劳(Very high cycle fatigue, 又称 Ultra-high cycle fatigue, Gigacycle fatigue 或 Ultra-long life fatigue)。目前,针对合金超高周疲劳的研究主要集中在以下方面: S-N 曲线的特征,疲劳裂纹源的萌生机理,裂纹萌生阶段和裂纹扩展阶段的准确界定以及其寿命预测的数学模型,影响超高周疲劳行为的因素等。

虽然近些年来超高周疲劳的研究取得了丰硕的成果,但其试验数据大都是在常温大气环境下测量所得。实际上,工程中的许多合金构件需要在特定的加载环境(环境温度、环境介质)下服役。比如:现代超超临界汽轮机的转子在服役期内需要在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下承受 $10^{10}\sim 10^{11}$ 周次的疲劳载荷^[2]。航空发动机在服役期内,压气机叶片在腐蚀环境中要承受的疲劳载荷高达 $10^9\sim 10^{12}$ 周次^[3]。海上石油平台的系泊链在服役 30 年间要经受海浪 $9.5\times 10^7\sim 9.5\times 10^8$ 次的小载荷冲击^[4]。随着工业化技术的发展,高龄化设备的开发涉及到了能源动力、交通运输、海洋工程、生物医药等领域,其中对关键部件材料在特定环境下承受低应力、高周期变载作用的研究显得尤为重要。本文综述了近 20 年国内外学者对合金在特定加载环境下超高周行为的研究现状,并对其研究前景进行了展望。

1 环境温度的影响

合金的超高周疲劳行为会受到加载方式、加载频率等试验方法的影响,也会受到材料强度、表面状况、化学成分、组织结构等材料自身性能的影响。目前国内外学者对上述问题进行了大量研究,但是关于环境温度影响合金超高周疲劳行为的报道相对较少。

收稿日期:2016-06-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51365014);江西省工业支撑重点项目(20161BBE50072);江西省自然科学基金项目(20151BAB206007)

作者简介:何柏林(1962—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为材料强度与断裂。

谢少雄等^[5-7]利用旋转弯曲疲劳试验机,对 CrMoW 转子钢在常温和 600 °C 两种环境下进行了 50 Hz 的疲劳试验,结果表明温度对转子钢的超高周行为有显著的影响。如图 1 所示,两条 S-N 曲线都不存在传统的“疲劳极限”,高温下的 S-N 曲线呈直线下降的趋势。在同一循环周次下,高温环境下对应的疲劳强度远低于常温下的疲劳强度。由试样表面分析发现,经过 600 °C 下的超高周疲劳试验后,试样表面覆盖了一层脆性的氧化膜,如图 2 所示。氧化膜附近存在许多空穴和孔洞会促进疲劳裂纹的萌生。观察 600 °C 条件下的试样断口形貌发现,疲劳裂纹的萌生区和初始扩展区普遍存在非金属夹杂物。侯方等^[2]对 CrMoW 钢开展的高温超声疲劳试验发现,这些内部萌生的非金属夹杂物的临界尺寸会因为温度的升高而降低,并且夹杂物尺寸会随着保温时间的延长而增大,这为诱发疲劳微裂纹创造了条件。在进行高温疲劳试验过程中,试样表面和次表面的夹杂都会形成疲劳微裂纹,并且各自沿着原有路径进行扩展,接着两部分的裂纹会逐渐汇合,使得初始裂纹扩展迅速,导致疲劳寿命的降低。文献^[7]计算 600 °C 下 CrMoW 钢裂纹扩展门槛值为 $\Delta K_{th}=2.685 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,次表面临界夹杂物直径 $\phi_{inc}=4.1 \text{ }\mu\text{m}$ 。文献^[5]利用高精度位移传感器监测试样扰度的变化,以确定裂纹萌生和扩展的分界点。结果证明当疲劳寿命 N_f 大于 10^7 时,裂纹萌生阶段的时间占了疲劳寿命的 99%。温度几乎不影响裂纹萌生寿命的占比。

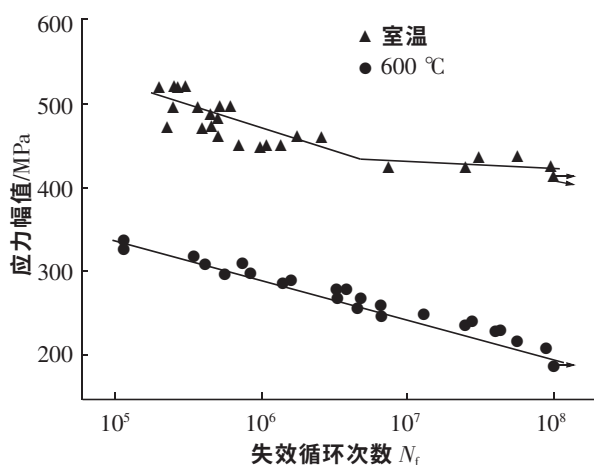


图 1 CrMoW 钢的旋转弯曲疲劳数据^[5]

Fig.1 Rotating bending fatigue data of CrMoW steel^[5]

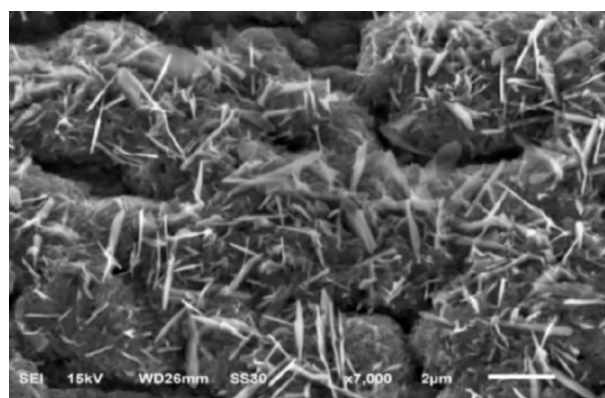
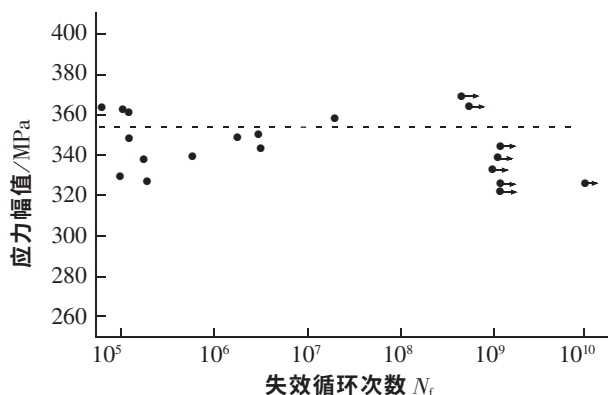
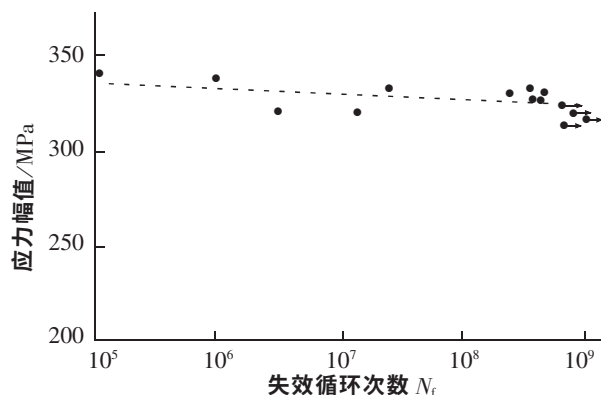


图 2 600 °C 条件下试样的表面形貌^[6]

Fig.2 Specimen surface morphology at 600 °C^[6]

顾玉丽等^[8]研究了不同温度下 DZ125 高温合金超高周疲劳裂纹的萌生机制与扩展特征。室温下,疲劳裂纹皆萌生于试样表面;700 °C 下,疲劳裂纹皆萌生于试样亚表面。超高周范围内,不同温度下的断口源区都没发现高强钢裂纹内部萌生的“鱼眼”形貌特征。一般合金材料超高周疲劳裂纹更趋向于在内部萌生,在低载荷的循环作用下表面难以形成驻留滑移带“PSB 极限”,而夹杂物或小晶粒等材料内部缺陷反而更易诱发疲劳微裂纹^[9]。Bathias^[10]认为,材料在低载荷高周期的作用下,材料内部的晶粒更容易因为承受应力集中而产生塑变,进而萌生疲劳裂纹。Murakami^[11]则提出了材料缺陷处应力强度因子幅 ΔK_{inc} 的计算公式,当 $\Delta K_{inc} > \Delta K_{th}$,裂纹便在此处萌生和扩展,材料内部和外部缺陷尺寸的大小决定了疲劳源的位置。顾玉丽认为,试样在高温下承受的载荷较低(高温下载荷范围:290~250 MPa;室温下载荷范围:500~290 MPa),表面难以形成“PSB 极限”。而且在低载荷范围内,试样整体处于弹性应变的状态,此时材料内部弹性应变的差异是导致裂纹萌生的主因。不同温度下,DZ125 高温合金裂纹扩展方式均分为两个阶段:剪切模式扩展与拉伸模式扩展。室温下裂纹以拉伸模式扩展为主,而高温下裂纹以剪切模式扩展为主。

Wagner 等^[12]分别将奥氏体钢在室温和 700 °C 条件下进行超高周疲劳试验,并分别得到两种条件下的 S-N 曲线。如图 3 和图 4 所示,室温下的试验数据较为离散,在超高周范围内的试样并未发生疲劳破坏;高温下的 S-N 曲线则呈直线下降的趋势。几乎所有失效试样的疲劳裂纹皆萌生于表面,这主要与其表面形成的 PSB 有关。室温下试样在 N_f 大于 10^8 时不发生疲劳失效,这是因为试样中部在经历了高周期的加载后产生了形变孪晶,形变孪晶的出现阻碍了 PSB 的形成。文献^[13]认为,常温下奥氏体钢层错能较低,形变过程中会

图 3 奥氏体钢在室温下的 S - N 曲线^[12]Fig.3 S - N curve of austenitic steel at room temperature^[12]图 4 奥氏体钢在 700 °C 下的 S - N 曲线^[12]Fig.4 S - N curve of austenitic steel at 700 °C^[12]

产生形变孪晶,但这部分孪晶会在退火过程中消失。Wagner 认为,试样在 700 °C 条件下进行超高周疲劳试验,奥氏体钢具有较高的层错能,其交叉滑移极可能形成 PSB,并最终形成主裂纹,导致疲劳失效。

Zimmermann^[14]和 Stocker^[15]分别探讨了温度对镍基合金 80A 超高周疲劳行为的影响。研究发现在同一循环周次下,高温(800 °C)会极大地降低试样的疲劳强度。一般在高温环境下,合金材料的抗拉强度会降低,会相应地减弱其抗疲劳性能^[15-16]。高温导致材料内部热激活过程较为活跃,有利于位错的运动,增大了疲劳裂纹萌生的机会^[14,17]。高温条件下,裂纹尖端处金属会因为暴露在空气中而被氧化变脆,导致裂纹尖端的塑性变形钝化困难,使得裂纹扩展迅速,从而降低材料的疲劳寿命^[5,18]。综上所述,温度会极大影响合金的超高周行为,由于高温带来的试样表面氧化与材料内部劣化,会改变疲劳裂纹的萌生与扩展。超高周范围内,试样疲劳失效的主因是低载荷与温度共同作用的结果。

2 环境介质的影响

近年来,国内外学者研究了合金材料在真空、水蒸气、NaCl 溶液、乙醇、海水、生物燃料等不同环境介质下的超高周行为,并分析了机械力与介质的相互作用,探索了超高周疲劳裂纹萌生与扩展的机理。

Nakajima 等^[19]分别在干燥空气、实验室空气、蒸馏水 3 种介质中对高强钢进行 52.5 Hz 下的旋转弯曲疲劳试验,结果如图 5 所示。空气湿度显著影响高强钢的 S-N 特征,干燥空气和实验室空气下的 S-N 曲线皆呈“阶梯状”,但湿度较大的 S-N 曲线平台应力要小于相应干燥空气下的平台应力。由于蒸馏水能活化试样表面,疲劳裂纹均在表面萌生,导致试样在 N_f 大于 10^5 后的疲劳强度要远低于空气中的疲劳强度,蒸馏水环境下的 S-N 曲线呈现连续下降的趋势。Tokaj 等^[20]进一步探究了湿度对高强钢疲劳裂纹萌生位置的影响,如图 6 所示。在干燥空气下,超高周疲劳裂纹均萌生于材料内部。随着湿度的增大,高强钢疲劳裂纹更趋向于在表面萌生。湿度越大,高强钢相应的疲劳强度越低。

Petit 等^[21]探究了真空和空气中 Ti-6Al-4V 合金裂纹扩展速率的差异,如图 7 所示。研究发现,频率的不同不会影响裂纹的扩展速率,而且合金在空气中的 ΔK_{th} 值为 $2.6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,在真空中的 ΔK_{th} 值为 $2.7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。虽然两种环境下的 ΔK_{th} 值相差无几,但其扩展速率却有显著的差异,空气中裂纹扩展速率最大要高于真空中扩展速率 3 个量级。空气中水蒸气的吸附作用是导致疲劳裂纹快速扩展的主因。近期,Geathers 等^[22]对 Ti-6242S 合金在不同压强的水蒸汽环境下进行超声疲劳试验,结果发现水蒸气压强越大,材料的疲劳裂纹扩展速率也越大。

Holper 等^[23]以不同的加载频率(20 Hz 和 20 kHz)研究了铝合金在真空和空气中的超高周疲劳行为。结果证明加载频率的不同(即应变率的不同)并不影响铝合金的 ΔK_{th} 值,湿度会明显影响其 ΔK_{th} 值和裂纹扩展速率 $\Delta a/\Delta N$ 。真空中最大的扩展速率为 $5 \times 10^{-12} \text{ m/cycle}$,空气中最大扩展速率为 $5 \times 10^{-10} \text{ m/cycle}$ 。当 $\Delta a/\Delta N = 3.5 \times 10^{-13} \text{ m/cycle}$ 时,空气中对应的 ΔK_{th} 值为真空中的 60%~90%。随后进一步探讨了应力比($R=-1, 0.05$,

0.5)对铝合金在这两种环境介质下的影响^[24],研究显示当 $R=0.5$ 时相应的疲劳裂纹扩展速率最大。这与文献^[25]的研究结论一致。Stanzl-Tschegg 等^[26]对高强钢在裂纹扩展近门槛区的研究发现,加载环境湿度越大,材料相应地具有更高的裂纹扩展速率和更低的应力强度因子门槛值。

张彭一^[27]和 Qian^[28-30]在空气和 3.5%NaCl 溶液中分别对钢进行了常规的旋转弯曲疲劳测试($f=52.5$ Hz),分析了钢在不同环境介质下疲劳裂纹萌生与扩展的机理。张彭一发现两种环境下获得的 2Cr13 钢 S-N 曲线都呈现“阶梯状”:在 $N_f=10^6\sim 10^8$ 范围内,腐蚀环境下的疲劳极限为 250 MPa,远小于空气环境下 530 MPa 的疲劳极限,两者在 N_f 大于 10^8 后依旧会发生疲劳失效。空气环境下,疲劳裂纹皆萌生于试样表面或亚表面,断口中并未发现类似“鱼眼”的形貌特征。腐蚀环境下,裂纹主要在表面或表面夹杂处萌生,且疲劳裂纹源的个数会随着应力水平的提高而增加。Qian 等^[28]在 3.5%NaCl 溶液中获得 45Cr 结构钢 S-N 曲线呈连续下降的趋势,并不存在所谓的疲劳极限,如图 8 所示。腐蚀环境明显弱化了试样的疲劳强度,当 $N_f=10^7$,腐蚀环境下的疲劳强度仅为空气中的 10%,当 $N_f=10^8$ 时,这一比值降到了 5.8%。在超高周范围内,空气环境下的疲劳裂纹趋向于在内部萌生并具有“鱼眼”形貌。与张彭一的发现一致:腐蚀环境下疲劳裂纹的萌生具有多裂纹源的特征,在稳定扩展阶段,裂纹沿晶界扩展并发现有沿晶二次裂纹。在载荷与介质的相互作用下,疲劳裂

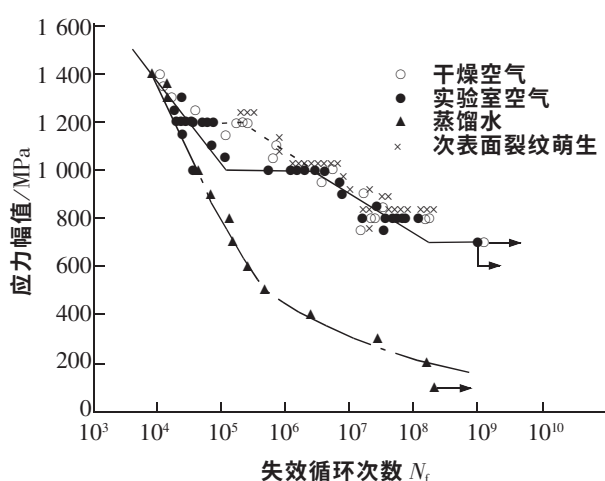


图 5 高强钢在不同环境介质的 S-N 曲线^[19]

Fig.5 S-N curve of high strength steel in various environmental media^[19]

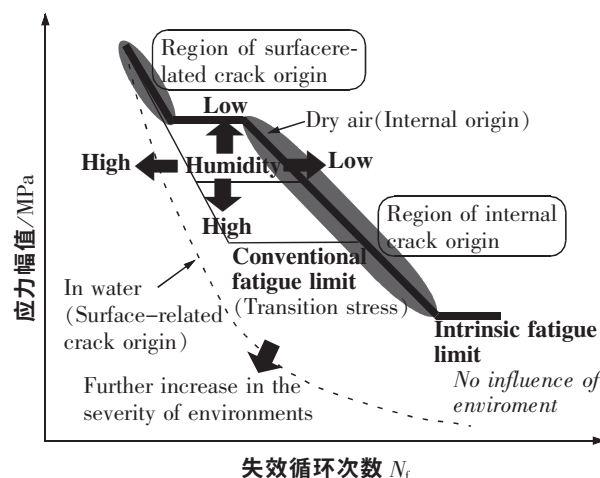


图 6 空气湿度对高强钢裂纹萌生的影响^[20]

Fig.6 Effects of humidity on crack initiation behavior in high strength steel^[20]

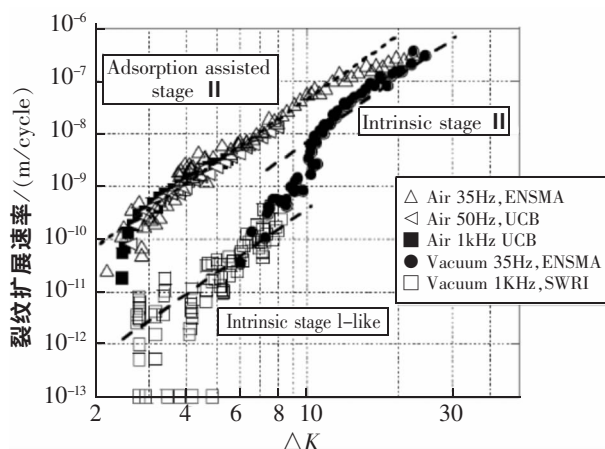


图 7 实验环境对钛合金疲劳裂纹扩展速率的影响^[21]

Fig.7 Effect of experimental environment on fatigue crack growth rate of titanium alloy^[21]

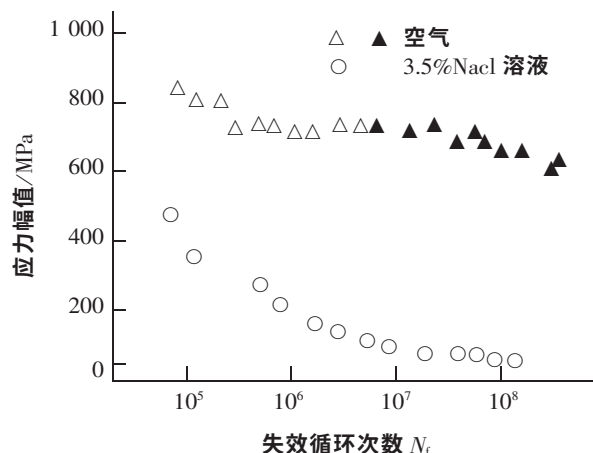


图 8 45Cr 结构钢在不同环境介质的 S-N 曲线^[28]

Fig.8 S-N curve of 45Cr structural steels in various environmental media^[28]

纹面比值随着循环周次的增加而增加。近期,Qian等在文献[29-30]中建立了高强钢在不同环境介质下超高周疲劳寿命的数学预测模型,模型预测结果与试验观测结果相吻合。

曹小建^[31]在对医用植入材料 TC4 钛合金超高周疲劳性能的研究发现,试样经生理盐水浸泡 24 h 后,其超高周疲劳行为与未经浸泡试样并无明显区别,且皆为穿晶塑性断裂。文献[32]研究表明,纯乙醇对 TC4 钛合金疲劳寿命无明显影响,但其疲劳性能对含水乙醇溶液具有一定的敏感性。在 $N_f=10^4\sim 10^9$ 范围内,经医用酒精浸泡后的 TC4 钛合金 S-N 曲线呈连续下降趋势,且在应力范围 300~700 MPa 内下降快速,而没有酒精浸泡材料 S-N 曲线则为缓慢下降趋势。董鑫等^[3]发现酸性溶液(PH=4)会降低 TC17 钛合金的超高周疲劳性能,但降低的幅度不大。因腐蚀产生的微小点蚀坑增大了试样表面的粗糙度,疲劳裂纹一般就在这些蚀坑中形成。

法国的相关学者^[4,33-34]发现海水会显著影响不锈钢的超高周疲劳性能。试验采用系泊链用 R5 钢,分别在空气、预腐蚀条件以及模拟海水流动条件下进行超高周疲劳试验。结果显示:当 $N_f=3\times 10^8$ 时,模拟海水流动条件下的疲劳强度相对于预腐蚀条件和无腐蚀条件下分别降低了 71%和 74%。试样表面腐蚀坑的形成是疲劳寿命显著降低的主因。德国的学者 Schmid 等^[35-36]研究表明,在无加载的情况下,生物燃料 E85(即 85%乙醇和 15%汽油)并不会对 X90CrMoV18 钢产生明显的腐蚀损坏,但是它会显著降低其超高周疲劳性能,其机械力与腐蚀介质共同作用的机理尚需进一步研究。

3 结束语

合金的超高周疲劳行为受到诸多因素的影响,国内外学者对此进行了大量研究,但关于加载环境影响合金超高周疲劳行为的报道相对较少。随着工业化技术的发展,高龄化设备的开发涉及到了能源动力、交通运输、海洋工程、生物医药等领域,其中对关键部件材料在特定环境下承受低应力、高周期变载作用的研究显得尤为重要。以目前的研究成果作为基础,以下几个方面值得关注。

1) 相比低周和高周疲劳阶段,加载环境对合金材料超高周疲劳行为的影响更加显著,其机械力与环境介质、温度相互作用的机理更加复杂。在借鉴加载环境对低、高周疲劳行为的大量研究成果上,有助于探索特定环境下合金超高周疲劳裂纹的萌生与扩展机制。

2) 目前探索环境因素影响超高周疲劳行为的研究材料仅限于钢、铝合金和钛合金等少数合金,需要加强其它常用金属这方面的研究力度。

3) 开发新型的超高周疲劳试验机,以测试合金材料在模拟真实工况下的超高周疲劳数据,并且发展微小裂纹的测量和连续监测技术。

4) 研发适合特定加载环境下的高强度材料。

参考文献:

- [1] NAITO T, ASAMI K, KIKUCHI M. Fatigue behavior of carburized steel with internal oxides and nonmartensitic microstructure near the surface[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1984, 15(7): 1431-1436.
- [2] 侯方, 李久楷, 谢少雄, 等. 汽轮机转子钢常温与 600 ℃超高周疲劳行为研究[J]. 中国测试, 2016, 42(2): 9-14.
- [3] 董鑫, 李培源, 王旭, 等. 腐蚀对 TC17 钛合金超高周疲劳性能的影响[J]. 机械工程材料, 2014, 38(11): 76-94.
- [4] RUBEN PEREZ-MORA, THIERRY PALIN-LUC, CLAUDE BATHIAS, et al. Very high cycle fatigue of a high strength steel under sea water corrosion, a strong corrosion and mechanical damage coupling[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 74: 156-165.
- [5] 谢少雄, 李久楷, 侯方, 等. CrMoW 转子钢高温超高周裂纹扩展及疲劳行为研究[J]. 实验力学, 2016, 31(1): 1-8.
- [6] 谢少雄, 李久楷, 侯方, 等. CrMoW 转子钢高温超高周疲劳与微观组织研究[J]. 四川大学学报, 2016, 48(1): 187-192.
- [7] 谢少雄, 李久楷, 侯方, 等. CrMoW 转子钢高温超长寿命疲劳行为[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(2): 77-83.
- [8] 顾玉丽, 陶春虎, 余力, 等. DZ125 高温合金超高周疲劳裂纹萌生与扩展[J]. 失效分析与防护, 2014, 9(6): 323-329.

- [9] MUGHRABI H. On the life-controlling microstructural fatigue mechanisms in ductile metals and alloys in the gigacycle regime[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1999, 22: 633–641.
- [10] BATHIAS C. There is no infinite fatigue life in metallic materials[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1999, 22: 559–565.
- [11] MURAKAMI Y, KODAMA S, KONUMA S. Quantitative evaluation of effects of non-metallic inclusions on fatigue strength of high strength steels (I)[J]. *International Journal of Fatigue*, 1989, 11(5): 291–298.
- [12] WAGNER D, CAVALIERIA F J, BATHIAS C, et al. Ultrasonic fatigue tests at high temperature on an austenitic steel[J]. *Propulsion and Power Research*, 2012, 1(1): 29–35.
- [13] 杨钢, 孙利军, 张丽娜, 等. 形变孪晶的消失与退火孪晶的形成机制[J]. *钢铁研究学报*, 2009, 21(2): 39–43.
- [14] Zimmermann M, Stöcker C, Christ H J. On the effects of particle strengthening and temperature on the VHCF behavior at high frequency[J]. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(1): 42–48.
- [15] STOCKER C, ZIMMERMANN M, CHRIST H J. Influence of prestraining on the high-temperature fatigue behaviour of polycrystalline nickel-based superalloys in the VHCF range[J]. *Procedia Engineering*, 2010, 2: 1383–1392.
- [16] 熊茹, 乔英杰, 赵宇翔, 等. 6XN 不锈钢与 825 合金的高周疲劳行为研究[J]. *核动力工程*, 2013, 34(5): 76–79.
- [17] ZHAO Aiguo, XIE Jijia, SUN Chengqi, et al. Effects of strength level and loading of frequency on very-high-cycle fatigue behavior for a bearing steel[J]. *International Journal of Fatigue*, 2012, 38: 46–56.
- [18] 肖乾, 方俊. 铁道车辆轮轨滚动接触疲劳裂纹研究综述[J]. *华东交通大学学报*, 2015, 32(1): 16–19.
- [19] NAKAJIMA M, TOKAJI K, ITOGA H, et al. Morphology of step-wise S-N curves depending on work-hardened layer and humidity in a high-strength steel[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2003, 12(1): 1113–1187.
- [20] TOKAJI K, KO H N, NAKAJIMA M, et al. Effects of humidity on crack initiation mechanism and associated S-N characteristics in very high strength steels[J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, 345: 197–206.
- [21] PETIT J, SARRAZIN-BAUDOUX C. An overview on the influence of the atmosphere environment on ultra-high-cycle fatigue and ultra-slow fatigue crack propagation[J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28: 1471–1478.
- [22] GEATHERS J, TORBET C J, JONES J W, et al. Investigating environmental effects on small fatigue crack growth in Ti-6242S using combined ultrasonic fatigue and scanning electron microscopy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 70: 154–162.
- [23] HOLPER B, MAYER H, VASUDEVAN A K, et al. Near threshold fatigue crack growth in aluminium alloys at low and ultrasonic frequency: Influences of specimen thickness, strain rate, slip behaviour and air humidity[J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(5): 397–411.
- [24] HOLPER B, MAYER H, VASUDEVAN A K, et al. Near threshold fatigue crack growth at positive load ratio in aluminium alloys at low and ultrasonic frequency: influences of strain rate, slip behaviour and air humidity[J]. *International Journal of Fatigue*, 2004, 26(1): 27–38.
- [25] STANZL-TSCHEGG S. Fatigue crack growth and thresholds at ultrasonic frequencies[J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28: 1456–1464.
- [26] STANZL-TSCHEGG S, SCHONBAUER B. Near-threshold fatigue crack propagation and internal cracks in steel[J]. *Procedia Engineering*, 2010(2): 1547–1555.
- [27] 张彭一. 不同介质环境下马氏体不锈钢 2Cr13 钢的超高周疲劳研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [28] QIAN Gui'an, ZHOU Chen gen, HONG Youshi. Experimental and theoretical investigation of environmental media on very-high-cycle fatigue behavior for a structural steel[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59: 1321–1327.
- [29] QIAN Gui'an, ZHOU Chen gen, HONG You shi. Crack propagation mechanism and life prediction for very-highcycle fatigue of a structural steel in different environmental medias[J]. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2013, 25: 7–14.
- [30] QIAN Gui'an, ZHOU Chen gen, HONG You shi. A model to predict S-N curves for surface and subsurface crack initiations in different environmental media[J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 71: 35–44.
- [31] 曹小建, 王清远, 陈国平, 等. 生理盐水浸泡对 Ti-6Al-4V 钛合金超高周疲劳性能的影响[J]. *西南科技大学学报*, 2007, 11(2): 5–8.
- [32] 曹小建, 蒋泉, 金江, 等. 乙醇对 TC4 钛合金超高周疲劳性能的影响[J]. *理化检验*, 2015, 51(6): 410–415.

- [33] EMIN BAYRAKTAR, RUBEN MORA, GARCIA I M, et al. Heat treatment, surface roughness and corrosion effects on the damage mechanism of mechanical components in the very high cycle fatigue regime [J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31: 1532–1540.
- [34] THIERRY PALIN-LUC, RUBEN PEREZ-MORA, CLAUDE BATHIAS, et al. Fatigue crack initiation and growth on a steel in the very high cycle regime with sea water corrosion[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77: 1953–1962.
- [35] SCHMID S, HAHN M, ISSLER S, et al. Effect of frequency and biofuel E85 on very high cycle fatigue behaviour of the high strength steel X90CrMoV18[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 60: 90–100.
- [36] MANFRED BACHER-HOECHST, STEPHAN ISSLER. Assessment of very high cycle fatigue (VHCF) effects in practical applications[J]. Procedia Engineering, 2013(66): 26–33.

Influence of Loading Environment on Ultra-High-Cycle Fatigue of Alloy Material

He Bolin, Zhang Zhisen, Xie Xuetao, Feng Yaming

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Fatigue fracture is related to the energy power, transportation, ocean engineering, metallurgical engineering and other fields, which is particularly important in the study of influence concerning low stress and high cycle loading on materials of the key parts in a certain environment. The fatigue cycle is less than 10^7 , which belongs to the category of low cycle or high cycle fatigue. Recent researches on ultra-high cycle fatigue have indicated that the metal materials can fail after 10^7 cycles, which breaks the traditional perception of infinite life. The condition fatigue limit of 10^7 cycles is not safe for the design of long-life components. In this paper, the research status of the ultra high cycle behavior of the alloy material in the special loading environment (temperature and medium) is reviewed in recent twenty years, and its prospect is discussed.

Key words: loading environment; temperature; alloy material; ultra high cycle behavior

(责任编辑 刘棉玲)