

7075 铝合金循环载荷下残余应力 松弛的实验研究

胡永会, 吴运新, 郭俊康

(中南大学机电工程学院, 湖南 长沙 410083)



胡永会

摘 要: 采用淬火和喷砂2种强化工艺引入残余应力, 分析循环应力作用下7075 铝合金应力松弛现象。基于应力松弛机理讨论了2种不同强化工艺下残余应力松弛规律的异同。结果表明, 加载应力状态与大小、残余应力的初始分布和冷作硬化是影响残余应力松弛的主要因素。

关键词: 7075 铝合金; 残余应力; 应力松弛; 淬火强化; 喷砂强化

中图分类号: TG115.5; TG146 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2010)06-0050-05

Experimental Study of Residual Stress Relaxation of 7075 Aluminum Alloy under Cyclic Loading

HU Yonghui, WU Yunxin, GUO Junkang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South
University, Changsha 410083, China)

Abstract: Residual stresses of 7075 aluminum alloy were introduced by quenching and shot peening strengthening processes in order to clarify the residual stress relaxation mechanism and laws. And differences of residual stress relaxations under different strengthening technologies were discussed. The results show that state and magnitude of the applied stress, initial distribution of the residual stress and cold working have great influences on stress relaxation. Structural residual stress introduced by quenching relaxes a little under cyclic loading while the stress induced by shot peening relaxes a lot on the same cyclic stress scale.

Key words: 7075 aluminum alloy; residual stress; stress relaxation; quenching; shot peening

1 前 言

结构件中的残余应力一般由焊接、热处理、铸造和机加工等生产过程引入。一方面, 工程实践要求零件投入使用前需要消减存在的结构或表面残余应力^[1]; 另一方面, 工程上一般又通过引入不同大小和分布状态的表面残余压应力有效抑制构件表面裂纹的萌生和发展^[2]。对于经常在交变循环载荷工况下工作的构件, 循环应力引起的残余应力松弛将大大地影响这种有利因素。综合考虑残余应力的利弊, 为了更加完善残余应力在工程实践中的应用, 对循环载荷下的残余应力松弛及其机理的研究就成为重要的突破口。

目前, 大多数研究者关注的对象为焊接钢或表面喷

丸钢的局部残余应力, 如 D. Rao 与 D. Wang^[3] 等人对 314L 不锈钢的应力松弛研究和 Wyman Z. Zhuang 与 Gary R. Halford^[4] 对表面喷丸钢循环载荷下残余应力的松弛研究等。对 7 系高强铝合金的研究也颇多, 如 Sachin R. Shinde 与 David W. Hoepfner^[6] 和 M. Benedetti 与 V. Fontanari^[7] 等人对 7075-T6 的研究, 但主要集中在疲劳特性方面。综合来看, 对 7 系铝合金结构残余应力与表面喷丸局部残余应力松弛及 2 种不同应力状态松弛的对比的研究较少。

7075 铝合金因具有高强、高韧等特点, 目前已成为现代航空航天工业重要的结构材料^[5]。本实验通过研究 7075 铝合金板残余应力在循环载荷下的应力松弛, 探讨应力松弛的规律和机理。实验结果表明, 构件残余应力的松弛很大程度上受外加载荷特性、初始残余应力分布和冷作硬化工艺的影响。包辛格效应下, 交变循环拉压载荷比单向循环拉伸载荷能更有效地释放残余应力, 且轧向应力和横向应力变化规律类似。淬火态铝合金板试

收稿日期: 2010-04-07

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 973 项目(2005CB623708)

通信作者: 胡永会, 男, 1985 年生, 在读硕士

样的残余应力场贯穿整个合金板厚度, 表面为压应力, 心部为拉应力, 应力状态十分稳定, 外部载荷难以释放其应力; 而表面喷砂使铝合金板试样形成局部屈服强度梯度, 残余应力场存在于铝合金板表面一定深度范围内, 且并不十分稳定, 在外部载荷下易发生应力释放现象。

2 试样制备与实验方法

2.1 试样制备

实验所用的试样取自 7075 铝合金轧制板, 其主要成分(质量分数): 铜 1.6%, 镁 2.5%, 铬 0.23%, 锌 5.6%, 其余为铝。利用线切割方式取料后, 对表面进行铣削, 以保证表面平整光亮, 最终得到的试样尺寸如图 1 所示。试样分为 2 组, 分别用于淬火强化(Q)与退火后表面喷砂强化(A + SP), 试样的长度方向均为轧向。使用加拿大 Proto 公司生产的 iXRD 衍射仪测量表面残余应力。

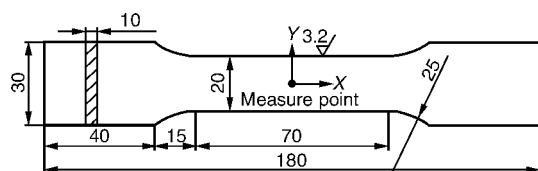


图 1 7075 铝合金板试样尺寸

Fig. 1 Size of 7075 aluminum alloy specimen

7075 铝合金板试样热处理从室温开始, 每小时升温 100 °C, 保温 10 min, 固溶温度达到 480 °C 后保温 2 h, 淬火方式为水浴淬火, 退火工艺为随炉退火。退火试样的表面残余应力水平均在 15 MPa 以下, 可认为无应力板, 然后使用喷砂机对试样的表面进行喷砂处理, 喷料为石英砂, 喷砂压强为 2 MPa。

2.2 实验方法

采用上海华龙 WPL-250 型微机控制电液伺服动静万能试验机标定试样的力学性能及引入动应力幅, 该设备可进行拉伸、压缩、弯曲、断裂韧性的静态试验以及动态疲劳试验。试验过程中加载频率为 10 Hz, 分别在第 100, 500, 1 000, 5 000, 10 000 和 20 000 个加载周期时进行表面残余应力测量。

通过拉伸试验测定 7075 铝合金板淬火试样的名义屈服点 $R_{p0.2} = 295$ MPa, 而退火后表面喷砂试样的名义屈服点 $R_{p0.2} = 175$ MPa。通过层削法与裂纹柔度法测试残余应力后发现, 7075 铝合金板淬火试样初始表面残余压应力 σ_c^E 与内部初始残余拉应力 σ_t^I 大小关系为 $\sigma_t^I = 0.75 \sigma_c^E$ 。2 种应力状态下, 试样初始表面轧向(σ_r^R)与横向(σ_r^T)残余应力及相应的加载应力(σ_d)如表 1 所示。

表 1 试样初始表面残余应力与相应的加载应力

Table 1 Initial surface residual stress of specimens and the corresponding applied stresses

NO.	Specimen state	σ_r^R /MPa	σ_r^T /MPa	σ_d /MPa
1	Q	-132.00	-161.18	-16.5 ~ 16.5
2	Q	-128.54	-178.36	-33.0 ~ 33.0
3	Q	-134.18	-187.60	6.6 ~ 66.0
4	Q	-112.54	-171.84	13.2 ~ 132.0
5	Q	-131.83	-178.75	-132 ~ -13.2
6	Q	-133.66	-160.76	33.0 ~ 330
7	Q	-136.53	-171.25	41.3 ~ 413
1'	A + SP	-115.25	-115.76	2 ~ 20
2'	A + SP	-112.35	-112.46	4 ~ 40
3'	A + SP	-113.56	-113.28	-40 ~ 40
4'	A + SP	-118.74	-118.60	8 ~ 80
5'	A + SP	-114.57	-114.89	-80 ~ 80
6'	A + SP	-116.56	-116.84	14 ~ 140
7'	A + SP	-113.87	-113.23	18 ~ 180

3 实验结果与讨论

3.1 实验结果

按照表 1 中实验设计对每个试样进行相应的应力加载试验, 并进行表面残余应力测量, 得到各个试样在不同应力加载条件下表面残余应力变化(图 2 ~ 5)。

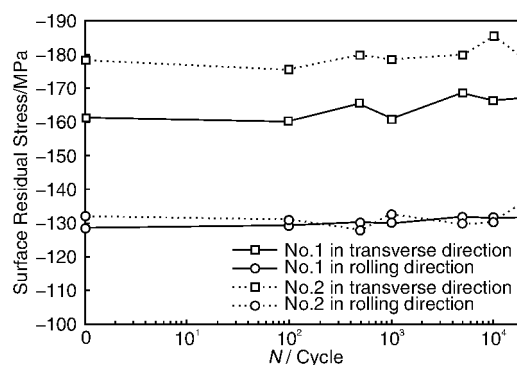


图 2 交变循环载荷下淬火铝合金板试样表面残余应力变化

Fig. 2 Surface residual stress of quenched aluminum plate sample under alternating cyclic loading

图 2 和图 3 为淬火铝合金板试样结构残余应力松弛曲线。从图 2 可以看出, 当复合应力达到材料屈服强度一半时, 试样 1, 2 在较低循环加载应力下, 经过 20 000 次交变应力加载, 其表面残余应力没有明显减小, 可以预知其内部残余应力场也无明显改变。从图 3 可以看出,

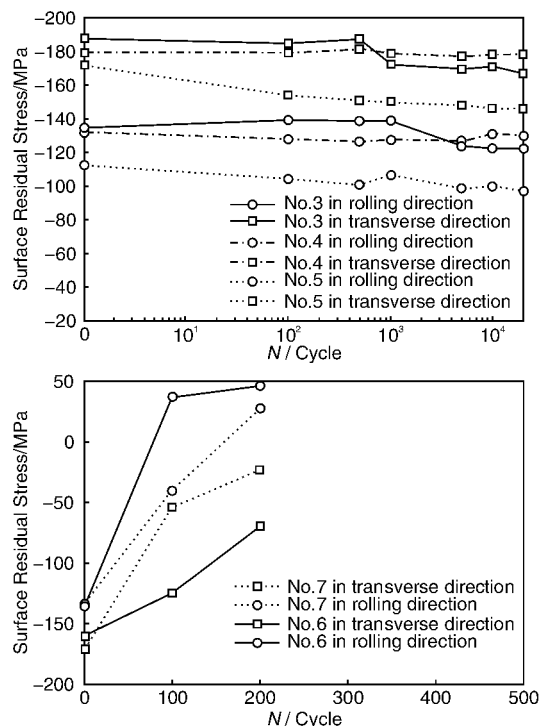


图3 单向循环载荷下淬火铝合金板试样表面残余应力变化

Fig. 3 Surface residual stress of quenched aluminum plate sample under unidirectional cyclic loading

加载应力加大时, 试样3, 4经过20 000次加载, 此时复合应力分别约为材料屈服强度的70%与80%, 表面应力有所减小, 约为15% (10~20 MPa)。而且1 000个加载周期后表面应力保持稳定, 这是因为残余应力发生松弛, 复合应力又远小于材料屈服强度所致。虽然在试验过程中试样只承受轧向应力加载, 但残余应力使材料处在高弹性势能状态, 外力触发下有利于破坏晶粒横向平衡, 故轧向残余应力和横向残余应力的变化一致^[8]。当试样5承受压应力交变加载时, 虽然加载应力也较大, 但表面残余应力并没有明显减小, 说明残余应力松弛受到残余应力场的分布状态影响。由于包辛格效应, 初始表面状态为压应力的试样在外加拉应力加载下容易发生应力松弛现象。加载应力继续增加, 复合应力超过材料的屈服强度时, 试样6, 7在应力加载前几十个周期中残余应力即明显减小, 此时材料残余应力松弛的主要原因是材料的整体塑性变形。

图4, 5为退火后表面喷砂处理的铝合金板试样的残余应力松弛曲线。由图4可知, 试样1'和2'分别在2种较低单向循环应力下加载, 此时材料表面应力历程仍处于压应力状态, 经过20 000次交变应力加载, 其表面残余应力并没有明显减小。当单向循环加载应力逐渐

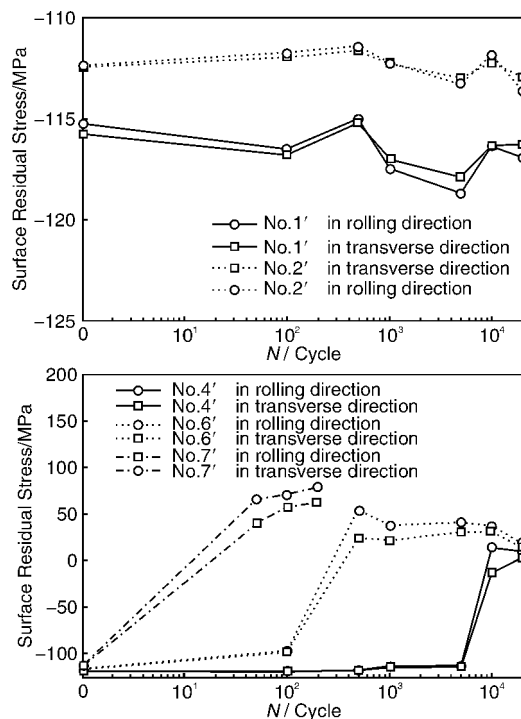


图4 单向循环载荷下退火后表面喷砂处理铝合金板试样残余应力变化

Fig. 4 Surface residual stress of annealed and shot-peened aluminum plate sample under unidirectional cyclic loading

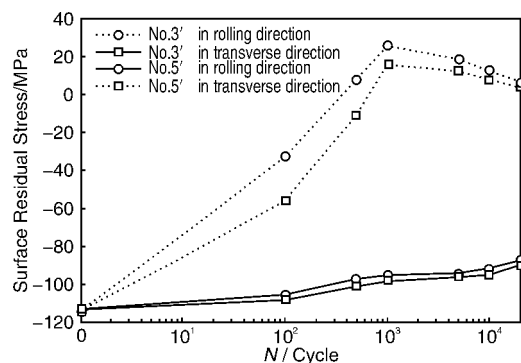


图5 交变循环载荷下退火后表面喷砂处理铝合金板试样残余应力变化

Fig. 5 Surface residual stress of annealed and shot-peened aluminum plate sample under alternating cyclic loading

加大接近材料屈服强度时, 前若干个周期内试样表面残余应力变化缓慢, 但是当试样4', 6'与7'分别经过10 000, 500与50次交变应力加载后, 表面应力迅速下降, 且出现拉伸应力状态。继续加载时, 表面应力状态变化不大, 趋于稳定。从图5可以看出, 在较大交变循环加载应力下, 试样3'表面残余应力持续松弛, 此时复合应力约为材料屈服强度的87%, 20 000个周期后应力松弛率达到20%; 而试样5'在更高的交变应力下表

面残余应力迅速下降,此时复合应力超过材料屈服强度的10%,第1次循环即已发生塑性变形,所以残余应力迅速松弛,且在500次循环后应力完全松弛,继续加载出现拉伸应力状态,但逐渐趋于稳定,20 000次循环后可认为表面残余应力仍处于完全松弛状态,整体上残余应力与载荷周期成指数线性下降关系。实验结果与 Kodama^[11]用X射线衍射技术测得喷丸试样表面残余应力下降的实验数据变化趋势相符合。

3.2 循环载荷下残余应力松弛机理

构件上应力集中处在加载应力与残余应力叠加超过其屈服强度后将发生塑性变形,使这些点的约束变形得以释放,从而降低最大残余应力。同时,由于包辛格效应,当拉伸加工硬化使材料的拉伸屈服强度提高时,相应的压缩屈服强度会降低,即拉伸加工硬化程度越高,压缩屈服强度降低越多。由于压缩屈服强度降低,在交变应力作用下初始压缩残余应力就有逐次降低的倾向。残余应力峰值的下降,改变了内应力场,构件内部应力降低并重新分布,在较低的应力水平上得到了平衡,从而使残余应力分布均匀^[9-10]。

外加应力下位错不断发生塞积和移动,一方面使应力集中得以释放,残余应力得以调整;另一方面使位错移动所受阻力增大,最后与外加应力和应力集中处的残余应力叠加相平衡,此时晶粒内组织变化停止,结构稳定。在循环交变应力的作用下,位错克服点阵阻力、摩擦阻力和界面阻力而运动,并产生滑移使晶体发生微观塑性变形,初期位错密度变化明显,随后位错运动阻力加大,内耗(振动阻尼)减少,并使金属晶体的抗变形能力增强^[11-13]。

3.3 结果分析

7075 铝合金残余应力的松弛效果主要与以下因素有关。

首先是加载应力的大小和状态。当加载应力较小时,并不能改变残余应力状态,这对淬火态结构残余应力与喷砂表面残余应力试样同样适用;当加载应力增大但复合应力仍低于材料屈服强度时,经过一定的加载周期,由于包辛格效应残余应力有所降低;加载应力继续增大,当复合应力接近或超过材料屈服强度时,残余应力完全释放并出现反向拉伸应力状态,此时材料已发生塑性变形。不论对于淬火结构残余应力还是喷砂表面残余应力,由于包辛格效应,交变循环拉压载荷开始屈服时的应力较低,引入更多的局部微观塑性变形,比单纯的循环拉伸载荷能更容易引起残余应力松弛。

其次是残余应力的初始分布状态与大小。通过实验发现,淬火态试样残余应力贯穿整个试样厚度且应力梯

度较平缓,大小均匀稳定。实验中当复合应力接近材料屈服强度时,残余应力才有所下降,但应力下降只有15%左右。而表面喷砂试样的残余应力只分布在材料表面,类似于整个面的应力集中现象,容易消减。通过电解抛光的方法,对喷砂处理的铝合金板试样表面进行不同深度的表面残余应力测量,修正值如图8所示。表面喷砂试样的残余应力存在于表面以下约300 μm 范围内,残余应力变化梯度较大,可认为是表层应力集中,在较低的应力状态下即可发生松弛。

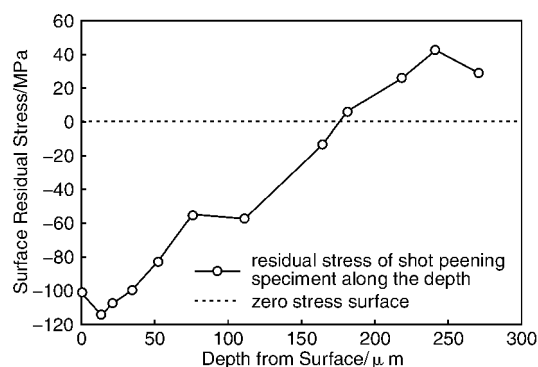


图6 表面喷砂处理的7075铝合金板残余应力分布

Fig. 6 Residual stress distribution of shot-peened 7075 aluminum alloy

最后是材料本身的性质。冷作硬化工艺对材料屈服强度有显著影响^[14],一般表面经冷作处理产生的屈服强度在表面最高而随深度逐渐减小,因此,表面处理后的构件内部存在局部屈服强度梯度。加工过程中材料表面已经承受复杂的应变历程,表面应力状态为双轴压缩,可能表现为屈服面状态^[15],从而造成表面微观屈服强度低于整体材料的屈服极限,这就解释了表面喷砂试样在复合应力低于材料宏观屈服强度时,残余应力也有大幅下降甚至应力反向的现象。

4 结 论

(1) 复合应力低于材料屈服强度一半时,残余应力几乎不发生松弛;复合应力接近或稍大于屈服强度时,残余应力与载荷周期呈有规律的指数线性下降关系;复合应力超过材料屈服强度时,残余应力迅速下降甚至有可能出现反向应力状态。

(2) 残余应力的松弛很大程度上受到原始应力水平与分布的限制,即初始残余应力的大小与分布状态严重影响到机械载荷作用下的应力释放效果。

(3) 包辛格效应下,交变循环拉压载荷比单向循环拉伸载荷能引入更多的局部微观塑性变形,因此也能更有效地释放残余应力。且残余应力松弛过程中,轧向应

力和横向应力相互关联且同时变化,二者变化规律类似。

(4) 表面冷作硬化引起材料局部屈服强度梯度,造成表面微观屈服强度低于整体材料的屈服极限,残余应力更容易松弛。

(5) 对于 7075 铝合金板淬火结构残余应力,机械载荷对残余应力的均化作用较强;而对于喷砂件,表面冷作硬化引起材料局部屈服强度梯度,造成表面微观屈服强度低于整体材料的屈服极限,残余应力更容易发生松弛并趋于均匀化。

参考文献 References

- [1] Smith D J, Farahi G H, Zhu W X, *et al.* Experimental Measurement and Finite Element Simulation of the Interaction between Residual Stresses and Mechanical Loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23: 293-302.
- [2] Wang Yanan(王亚男), Chen Shujiang(陈树江), Dong Xichun(董希淳). *Dislocation Theory and Its Applications*(位错理论及其应用)[M]. Beijing: China National Metallurgy Industry Press, 2007.
- [3] Rao D, Wang D, Chen L, *et al.* The Effectiveness Evaluation of 314L Stainless Steel Vibratory Stress Relief by Dynamic Stress[J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29: 192-196.
- [4] Zhuang W Z, Halford G R. Investigation of Residual Stress Relaxation under Cyclic Load[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23: S31-S37.
- [5] Zhu Wei(朱伟), Pen Dashu(彭大暑), Zhang Hui(张辉), *et al.* 7075 铝合金厚板淬火残余应力消除工艺的研究[J]. *Aluminum Fabrication*(铝加工), 2002(2): 25-28.
- [6] Shinde Sachin R, Hoepfner David W. Fretting Fatigue Behavior in 7075-T6 Aluminum Alloy[J]. *Wear*, 2006, 261: 426-434.
- [7] Benedetti M, Fontanari V, Scardi P, *et al.* Reverse Bending Fatigue of Shot Peened 7075-T651 Aluminum Alloy: The Role of Residual Stress Relaxation[J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31: 1125-1126.
- [8] Wu Yunxin(吴运新), Liao Kai(廖凯). 铝合金厚板拉伸过程横向残余应力消减分析[J]. *Journal of Materials Engineering*(材料工程), 2008(10): 45-48.
- [9] Prime M B, Hill M R. Residual Stress, Stress Relief, and Inhomogeneity in Aluminum Plate[J]. *Scripta Materialia*, 2002, 46(1): 77-82.
- [10] Kocks U F. Laws for Work-Hardening and Low-Temperature Creep[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1976, 98: 76-85.
- [11] Yang Junbao(杨君宝). 基于位错理论的振动消应力的机理研究[J]. *Mechanical Research & Application*(机械研究与应用), 2007, 20(2): 62-64.
- [12] Chen Sencan(陈森灿), *et al.* *Metal Plastic Processing Principle*(金属塑性加工原理)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991.
- [13] Kodama S. *The Behavior of Residual Stress during Fatigue Stress Cycle*[C]//In: *Proceedings of the International Conference on Mechanical Behavior of Metals II*. Kyoto: Society of Material Science, 1972, 2: 111-118.
- [14] Science and Technology Committee of Aeronautical Ministry(航空工业部科学技术委员会编). *Strain-Fatigue Analysis Manuals*(应变疲劳分析手册)[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [15] Wang Hongwei(王宏伟), Ma Jinsheng(马晋生), Nan Junma(南俊马), *et al.* 表面微观屈服强度与疲劳极限的关系[J]. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报), 1991, 27(5): A365-A369.

中科院重要方向项目“纳米光信息存储及其原型器件的基础研究”通过验收

近日,中国科学院基础局在上海对由上海光学精密机械研究所和国家纳米中心联合主持的中国科学院知识创新工程重要方向项目“纳米光信息存储及其原型器件的基础研究”进行了结题验收。以解思深院士为组长的专家组听取了项目负责人和课题负责人的结题报告,认为该项目全面达到任务书中的预定目标和技术考核指标,取得了一些有实用前景的创新性成果,一致同意通过验收。上海光机所所长李儒新等也出席了验收会,并对项目的后续发展提出了建议。

在该项目执行过程中,上海光机所高密度光存储技术实验室研制出了具有我国自主知识产权的新型超分辨掩膜材料和记录材料体系。在深入研究纳米光存储的超分辨微观机理和超快响应特征等重要基础性问题的基础上,采用自行研制的新材料设计、制备的纳米光信息存储器件原型实现最小信息位尺寸 60 nm 的超分辨动态记录和读出(存储密度达 50 Gb/in² 以上),为形成我国具有自主知识产权的纳米光信息存储器件的核心技术、推动我国未来超高密度光存储器的发展奠定了基础。

专家组建议在本项目取得的很有价值的研究结果的基础上,推动成果的应用和转化。(摘自中国科学院网站)