残余应力对疲劳的影响

中国科学院力学研究所　曾春华*

前　言

残余应力对疲劳的影响是长期以来人们十分关注的课题，因为人们逐渐认识到许多疲劳现象都与残余应力相关。例如疲劳裂纹的形成与扩展、少数极高应力、平均应力、加载次序、裂纹迟滞效应、缺口应力集中等都与残余应力有密切关系。残余应力是影响疲劳的一个重要因素。因此，弄清残余应力的大小和分布，以及残余应力与上述疲劳现象之间的关系，对于评价结构的疲劳强度是十分有意义的。

最近二十年来，随着断裂力学的发展，对断裂材料和承受疲劳载荷构件的研究不断深入，对伴随塑性变形和疲劳裂纹同时出现的残余应力的研究也有较大的进展。特别是Elber发现裂纹闭合现象[1,2]和Wheeler等人发现高载停滞效应[3]以后，人们对于残余应力的探索更加深入，集中力量研究了疲劳裂纹附近、裂纹尖端的残余应力。现在，不论是残余应力的测量或计算，还是残余应力对疲劳强度的影响研究，都取得了许多有启发性的成果[16~18]。

本文归纳和分析了目前疲劳研究中残余应力的测量方法、计算方法以及残余应力对疲劳强度影响等方面的成果，并通过大量试件试验和计算探讨了残余应力对疲劳裂纹形成寿命、疲劳累积损伤、疲劳裂纹扩展以及裂纹扩展迟滞效应的影响，得到了一些定量的结果。

一、残余应力的测量与计算方法

在去除产生应力的原因后，物体内部仍然保留的平衡应力称为残余应力。或者按照Orowan定义，残余应力就是存在于物体而无外力作用的应力。在多数情况下，残余应力的形成是因材料发生不可逆体积变化，使物体塑性变形不均匀所致。造成这种不均匀的原因有：冷热变形时沿截面塑性变形不均匀；零件加热、冷却时，沿体积内温度分布不均匀；加热、冷却时，零件截面内相变过程不均匀等。

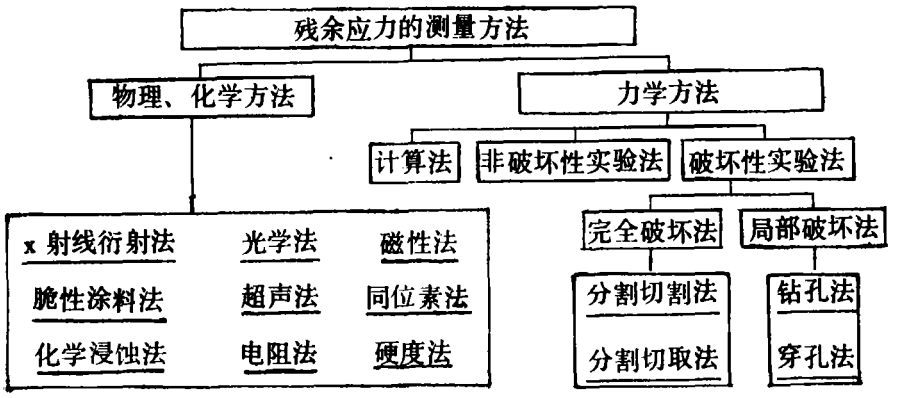
目前，在疲劳研究中，测量残余应力的方法很多，但可以归纳为两大类：一类是物理、化学测量法，或称非破坏性测量方法；另一类是力学测量法，或称破坏性或局部破坏性测量方法。这两类测量方法可用表1[4]示出：

就目前情况看，在物理、化学测量方法中，x射线衍射法应用最广。这种方法根据x光衍射线条相对退火材料同类线条的位移、宽度和强度测量晶体点阵的变形，便可得出残余应力。其它物理、化学方法，由于一系列的原因，尚未得到广泛的应用。在力学方法中，钻孔法用得较多，例如Sachs法和米谷法[5]，它在试验的材料中间钻孔，在钻孔的过程中，由测量圆筒的直径和长

*参加试验工作的有郭康民等同志

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1　　残余应力测量方法分类



度的变化就可算出残余应力，十分简便。

目前，裂纹尖端或表面残余应力的计算方法也有两种：一种是有限元法，另一种是解析法。在有限元法中，田中道夫认为，在淬火焊接过程中产生的残余应力，可用热传导、热弹性、塑性和蠕变理论来描述[6]。这样，就可按下列步骤进行残余应力的有限元计算。假设将某个瞬时作为其初始状态，已知材料的温度、相变量、塑性应变以及蠕变应变的分布。在一般情况下，在时间间隔非常小时，随时间变化的边界条件可以认为是一定的，那么就可用由初始状态决定的物性常数，通过热传导求出经过微小时间间隔后的温度和相变量，并通过应力计算去求在这一时间间隔内产生的塑性应变和蠕变应变。如果计算的温度、相变量与初始状态的值非常接近。由于在这个时间间隔内的物性常数认为是一定的，所以由此得到的结果是正确的，因此就能确定经过短时间后的温度、相变量、塑性应变和蠕变应变。以此作为其后的初始条件，就可以进一步计算经过非常短的时间后的状态。按照这种步骤逐次进行下去直至所需要的时刻为止，便可算出残余应力。

在计算残余应力的解析法中，目前常用的方法是[7]：假定试样处于平面应力状态，试样裂纹附近小范围屈服，裂纹尖端塑性区符合D－M模型，在外力作用下位移符合D－M模型给出的位移。疲劳卸载后残余应力所造成的裂纹变形、位移与外载所造成的裂纹变形位移形状相似。然后使用Airy函数，建立平面应力问题的平衡方程，取适当的应力函数ϕ代入平衡方程，再根据具体的边界条件，便可计算出缺口根部的残余应力。

二、残余应力对疲劳抗力的影响

在所有影响疲劳抗力的因素中，残余应力是最重要的因素之一。但是，由于实际零件的条件和环境不同，残余应力对疲劳的影响是复杂的。不仅跟残余应力本身的大小、分布及残余应力的产生过程有关，而且跟材料本身的机械性能、外加应力和使用环境相关。目前，无论是从实验还是从理论分析定量的研究残余应力对疲劳的影响，还是有不少困难。

1．残余应力对疲劳强度的影响

一般说，承受疲劳载荷的零件，若存在压缩残余应力，会提高零件的疲劳强度；若存在拉伸残余应力，则会使疲劳强度下降。

应该看到，在循环应力作用下，零件中的残余应力会发生显著的变化。图1示出了经过喷丸强化处理，圆棒试样施加旋转弯曲交变应力时，表面残余应力的变化情况[8]。图2示出了喷丸后

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

钢板残余应力，随循环应力而发生的变化[9]。图3示出了低温淬火产生残余应力的试样，施加旋转弯曲交变应力时，残余应力的变化情况[10]。

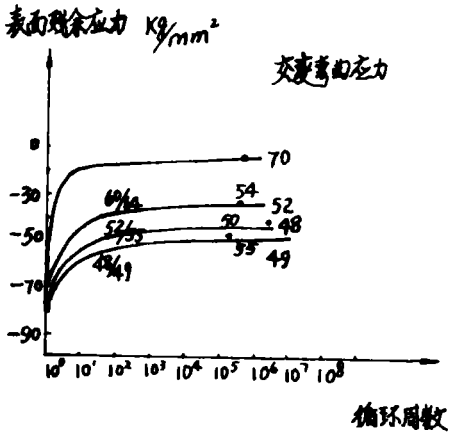


图1 钢棒经喷丸处理后残余应力随循环应力的变化
材料为 Cr－Mo钢

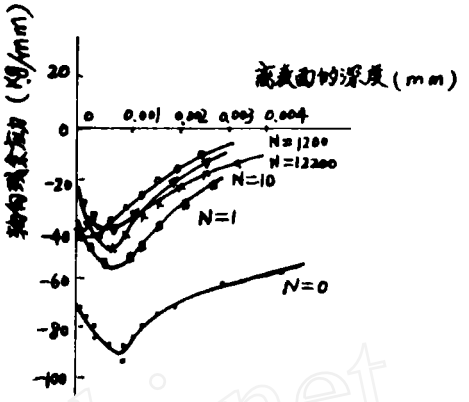


图2 钢板经喷丸处理后，因应力循环而产生的残余应力的变化
材料为SAE 4343 板

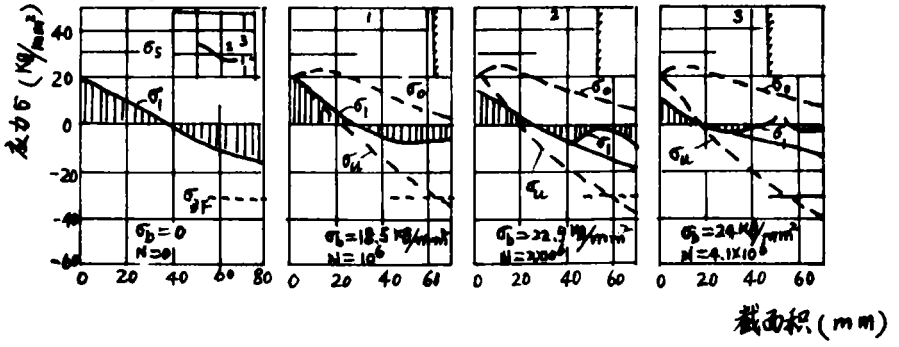


图3 具有热应力型残余应力的试样，因应力循环而产生的残余应力的变化
材料为0.105 % C，σ_1为轴向残余应力，σ_0为循环前残余应力＋外加应力，
σ_u为循环前残余应力－外加应力。σ_{dF}为材料拉伸和压缩屈服应力。

对于缺口试样，由于循环应力的作用，残余应力的变化更大，即使在疲劳极限下进行应力循环，也可明显地观察到缺口根部残余应力的变化情况。图4示出了铝合金61S，预先拉伸产生残余应力，然后施加应力循环时，缺口根部残余应力的变化情况[11]。这种变化对于软钢，就更为明显[12]。图5示出了薄钢板在喷丸处理和锤击处理后各种残余应力的分布以及残余应力与疲劳极限的关系[13]。

图6示出了拖拉机连杆经喷丸处理产生残余压应力后，疲劳极限明显提高的情况[14]。

还应指出，表面硬化处理产生的残余应力，可以大大改善零件的疲劳强度。但是并不是说硬化层越深越好，当深度达到最大值时，残余压应力的有利影响反而会减少。图7就可以清楚地说明这一结论[15]。

此外，电镀处理产生的残余应力，对疲劳强度也有很大的影响。研究表明，电镀后的零件残余应力和疲劳强度的关系随电镀工艺（电流、溶解液种类、温度等）的变化而变化。表2示出了

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

这方面的研究结果[19]。

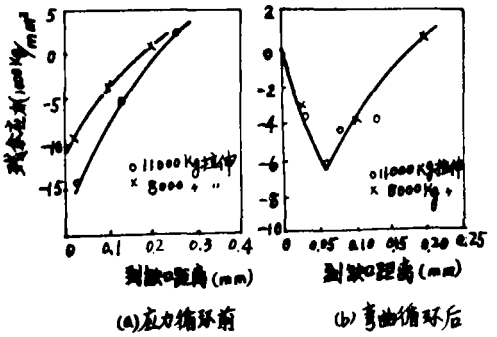


图4　具有切口的铝合金61S板，在循环应力下的残余应力及其变化。

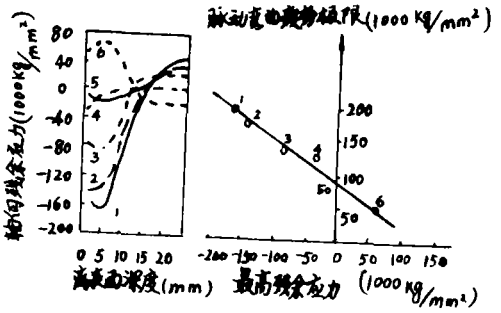


图5　SAE 5160薄板喷丸和锤击处理试样的残余应力与疲劳强度的关系

表2　电镀产生的残余应力与疲劳强度的关系（钢材）

电镀金属	残余应力（kg/mm²）	疲劳强度变化（%）
Cr	+100～−15	+12～−60
Ni	+50～−10	0～−60
Fe	拉伸	−
Co	拉伸	−
Cu	+2～−2	−
Zn	0～−3	+10～−15
Cd	压缩	+22～−15
Ag	拉伸	−
Sn	−	+10～−8

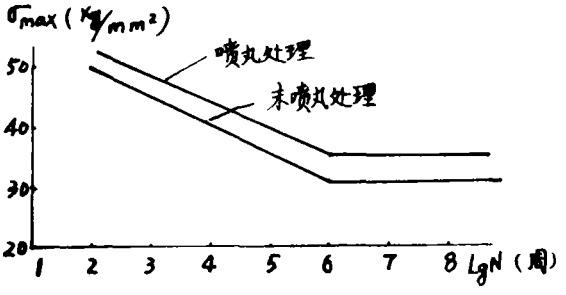


图6　钢材经喷丸处理产生残余应力后，疲劳强度的变化

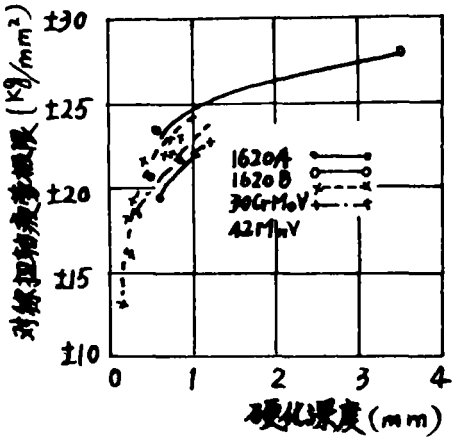


图7　硬化深度对高频淬火圆棒试样扭转疲劳强度的影响

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.残余应力对疲劳寿命的影响

为了探讨残余应力对疲劳的影响，我们以15 MnV N，28 Cr Ni 3 MoV，25 Cr2Ni MoV合金钢和L Y 12 C Z铝合金的疲劳试验为基础，研究了单独拉伸超载产生的残余应力对疲劳裂纹形成寿命、疲劳裂纹扩展寿命、疲劳累积损伤和裂纹迟滞效应的影响。

（1）残余应力对疲劳裂纹形成寿命的影响

对15 MnV N，28 Cr Ni 3 MoV，25 Cr2Ni MoV边缘单边切口板试样分别施加不同的拉伸超载量，用x射线应力分析仪测出试样缺口根部的残余应力分布和大小，然后在Schenck疲劳机上施加等幅弯曲疲劳载荷。用工具显微镜仔细观察到出现1毫米裂纹为止，记下此时的循环次数，并与未加超载的试样试验结果比较，分析残余应力对裂纹形成寿命的影响。试验结果见表3。

表3　残余应力对疲劳裂纹形成寿命影响的试验结果

材料 / 试验结果 / 试样号	15 MnV N		28 Cr Ni 3 MoV		25 Cr 2Ni Mo V	
	单独超载量	形成寿命（周）	单独超载量	形成寿命（周）	单独超载量	形成寿命（周）
1	无	0.087×10^5	无	0.28×10^5	无	1.359×10^5
2	41%σ_s	0.795×10^5	32.7%σ_s	0.47×10^5	60%σ_s	3.46×10^5
3	48.3%σ_s	1.243×10^5	38.4%σ_s	0.925×10^5	70%σ_s	9.659×10^5
4	55.2%σ_s	1.620×10^5	43.6%σ_s	1.07×10^5		

注：σ_s为材料屈服极限

（2）残余应力对裂纹扩展寿命的影响

这里所指的裂纹扩展寿命就是出现1毫米长以后至最后断裂的寿命。把出现1毫米长裂纹的上述试样再施加与表3相同的拉伸超载量，在x射线应力分析仪上测出残余应力，然后继续进行疲劳试验，裂纹每扩展一段距离，记录一次载荷循环的次数，直至试样破坏，以此分析残余应力对疲劳裂纹扩展寿命的影响。试验结果见图8～10。

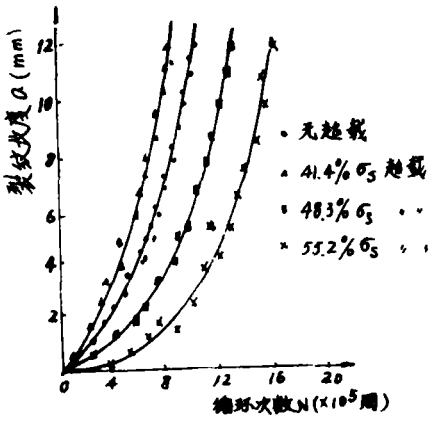


图8　15 MnV N钢缺口试样的a～N关系曲线

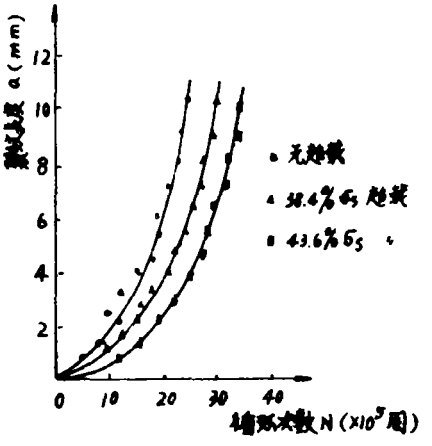


图9　28 Cr Ni 3 MoV钢缺口试样的a～N关系曲线

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

（3）残余应力对疲劳累积损伤的影响

疲劳累积损伤就是指在交变载荷作用下，材料损坏程度的累加。最早提出这个问题的是Miner，所以又叫Miner累积损伤理论。他认为，当材料承受循环载荷作用时，各个应力水平下的疲劳损伤是独立进行的，总的损伤可以线性地累加起来，当材料整个损伤完毕时，即$\sum\frac{n_i}{N_i}=1$时就发生疲劳破坏。式中n_i为某一应力下的循环周数，N_i为这一应力下循环到破坏的周数。

我们选用LY12 CZ铝合金中心孔板试样，在Amsler疲劳试验机上进行五级程度加载试验，试样每循环到一定循环块数时，加一次不同的单独拉伸超载，产生残余压应力，接着继续试验，如此循环直至破坏，计算出$\sum\frac{n_i}{N_i}$值，以此分析残余应力对累积损伤的影响。试验和计算结果见表4。

表4　残余应力对累积损伤影响的试验结果

拉伸超载量 \ 疲劳损伤 $\sum\frac{n_i}{N_i}$ 试样	1	2	3	4	5	6	7	8	平均
45% σ_s	1.6373	2.4845	1.7715	3.8839	3.1217	2.2622	1.780	1.671	2.30
55% σ_s	6.7685	7.1510	6.953	6.957	6.949				6.953
75% σ_s	8.9670	4.380	16.850	46.405	13.344				12.96

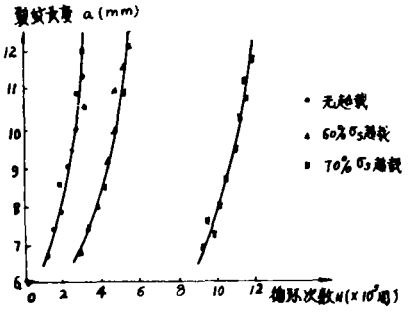


图10　25 Cr 2Ni MoV钢缺口试样的a～N关系曲线

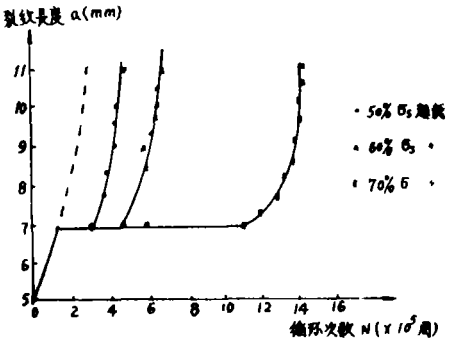


图11　25 Cr2NiMoV钢切口试样的裂纹迟滞曲线

（4）残余应力对裂纹扩展迟滞效应的影响

在等幅加载过程中，引入一次或几次拉伸超载后，紧接其后的疲劳裂纹扩展速率将会显著地变缓或停止扩展，直到相当循环次数以后，才能慢慢地恢复到原来的水平，这种由于拉伸超载产生残余应力而使裂纹扩展速率变缓的现象，称为裂纹扩展迟滞效应。

对25 Cr 2NiMoV钢单边切口板试样进行疲劳试验，当裂纹扩展到一定长度后，卸载并对试样施加单独拉伸超载，测出残余应力，再接着进行疲劳试验，直至破坏，这样便可观察到残余应力对裂纹迟滞效应的影响。试验结果示于图11。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

结 束 语

从上的试验结果和分析可以看出，在循环载荷作用下，零件上的残余应力大小和分布会发生显著的变化。残余应力不仅对疲劳强度的影响很大，对疲劳寿命（包括形成寿命和扩展寿命）的影响也很大。以15 MnV N钢为例，施加55.2% σ_s的拉伸超载，它的形成寿命可比无残余应力试样高19倍，它的扩展寿命也比无残余应力试样高4倍多。此外，残余应力对疲劳累积损伤和裂纹扩展迟滞效应的影响也十分明显。实验表明，超载量越大，即残余应力越大，迟滞时间就越长。这是因为残余应力多半是由非均匀的塑性变形引起的，在一定范围内，拉伸超载量越大，在缺口根部造成的塑性变形就越大，迟滞时间的长短取决于裂纹穿过塑性区的距离的大小，塑性区越大，迟滞时间就越长。

应当看到，虽然人们很早就接触到了疲劳的残余应力问题，并做了大量的实验工作，取得了一些定性的结果。但是，由于残余应力与塑性变形密切相关，加上疲劳的影响因素很多，这就使研究变得更加复杂。要想彻底弄清残余应力对疲劳的影响，还需作出很大的努力。

参 考 文 献

[1] W.Elber ., Eng. Frac. Mech. 2 .1970

[2] W.Elber ., ASTM.STP 486. 1971

[3] D.C. Wheeler., ASME. D. 1972

[4] Я.Б.Фридман., Механические Свойства Металлов , 1974

[5] 构造物における为残留应力とその对策，第二章

[6] 三菱重工技报，1974. 11 .№6

[7]《脉动疲劳循环下缺口根部及裂纹附近的残余应力》，戚启山、师昌绪，1981

[8] H.Hemple ., Arch .Eisenüthenw, 22 . (1951) .425

[9] T.M.Elsesser., Aran .ASME (1957) .1904

[10] H.Neerfeld, H.Möller., Arch. Eisenüthenw, 20 (1949) .205

[11] D.Rosenthal, G.Sines, G.Zizica., Welding J .28 (1949) .98 - S

[12] D.S.Dugdale. Welding J . (1959) 45 - S

[13] A.Fichinger ., VOI - Z, 92 (1950) 35

[14]《拖拉机连杆喷丸与未喷丸疲劳对比试验》，曾春华，中国科学院力学所 1972

[15] F.Bollenrath ., Arch. Eisenhüttenw .28 . (1957) 801

[16]《金属机械性能》，机械工业出版社，上册，P 259 , 1982

[17]《变应力幅值下的疲劳问题》，曾春华、邓蓉英等，固体力学学报，1981 .第一期

[18]《疲劳设计》科学出版社， P 539 . 1982

[19] H.Buhler., H.G.Pfalzgraf , VDI - Forschung (1962) H. 494

《机械振动与冲击国际标准译文集》征订启事

国际标准化组织ISO/ TC 108 "机械振动与冲击"技术委员会，到1983年止已出版有关国际标准ISO 19篇，国际标准草案DIS 9篇。机械工业部标准化研究所和郑州机械研究所组织翻译了其中的24篇，汇编成"机械振动与冲击国际标准译文集"(铅印)。其内容包括：名词术语，振动与冲击的测试装置，采用平衡、隔振、阻尼等来消除、减小或控制振动与冲击，评定人在机器、运载物体、建筑结构中可承受的振动与冲击限度，以及测量与校准方法、试验方法等。出版时间1984年9月，定价每本5元。需要者请向北京清华东路机械工业部标准化研究所技术服务部索取订单。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net