

金属疲劳损伤

——机理、探测、预防和维修——

国防工业出版社

金 属 疲 劳 损 伤

——机理、探测、预防和维修——

〔美〕S. S. 曼森 编

陆 索 译校

国际工业出版社

内 容 简 介

本书是美国材料试验学会编为第495号的特种技术出版物。由美国国家航宇管理局 Lewis 研究中心的 S. S. Manson 主编。共汇集了五篇文章：前两篇综合论述金属疲劳损伤机理及其影响因素；后三篇较系统地介绍疲劳损伤的探测、预防和维修等技术。可供燃气涡轮发动机材料的研制人员和发动机设计、使用与维修方面的技术人员参考。

METAL FATIGUE DAMAGE—Mechanism, Detection,
Avoidance and Repair

S. S. Manson

1971

*

金属疲劳损伤

——机理、探测、预防和维修——

陆 索 译校

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168^{1/32} 印张11 279千字

1976年8月第一版 1976年8月第一次印刷 印数：00,001—11,400册

统一书号：15034·1500 定价：1.40元

译者序

疲劳损伤是机器零件的主要失效机理，经过多年的努力，在与疲劳作“斗争”方面，无论在理论上或实践上都取得了不少成果。在航空部门，由于飞机承受的应力、温度和环境非常复杂，因此，对疲劳损伤的研究显得更为重要。可是，目前有关燃气涡轮发动机零件疲劳的资料发表的很少，为了更好地研究疲劳损伤对燃气涡轮发动机的寿命的影响，遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，我们把这本专辑翻译成中文，供有关人员参考。

本书不仅从理论上论述了疲劳损伤的机理，而且综合了美国前航空管理局早期在空军修理基地所进行的统计工作，结合现在的宇航管理局近期的研究工作，针对燃气涡轮发动机的主要零件——轴承、压气机叶片、燃烧室、涡轮叶片以及涡轮盘等所产生的疲劳损伤问题，从探测、预防和维修方面，进行了较系统的分析阐述，并相应提出了今后研究工作的意见。

应当指出，对待国外资料，“决不能生吞活剥地毫无批判地吸收”，而“应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。”因此，在翻译本书过程中，已注意到这个问题，但由于译者水平有限，错误之处在所难免，希望读者批评指正。

序 言

疲劳是燃气涡轮发动机零件常见的失效机理。无论冷端或热端零件对这种失效都是敏感的，其起因可能是机械的或热学的。

几年前，NACA(NASA 的前身)在所进行的研究中曾经明确地指出，疲劳是喷气涡轮发动机可靠性方面的一个限制因素。该项研究工作是在五十年代中期[●]针对军用喷气发动机进行的，它以空军修理基地统计的分析为基础。所研究的一些主要零件——轴承、压气机叶片、燃烧室、涡轮导向叶片与工作叶片以及涡轮盘——的寿命在很大程度上受疲劳的限制。遇到的问题一些是从军事需要出发，要求发动机具有高的效能；另一些是由于喷气发动机当时还处于发展初期和缺乏经验的缘故。但是，优先考虑疲劳问题的主要原因是和喷气发动机零件在使用中所经受的特殊条件有关。工作条件产生的高的载荷波动、高的温度和温度梯度、频繁的起动和停车以及由于复杂几何形状与表面不连续性造成的应力集中等——所有这些都引起零件的疲劳倾向。除此以外，重量轻和效能高这一现实问题也强烈地推动着燃气涡轮的设计与使用，目前已清楚地看到疲劳将继续成为燃气涡轮发动机寿命的一个重要的限制因素。

实际上，NACA 只是对早期的燃气涡轮发动机进行了研究，所得的资料目前还不能加以引用。再者军用发动机的工作效能是占第一位的；为了得到高的效能要付出一定的代价，检修和频繁地更换零件所造成的花费是允许的。可以恰当地提出问题，为什么近几年来情况仍没有改变？为什么不能象民用燃气涡轮那样在

● 国家宇航管理局 Lewis 中心工作者：《影响喷气发动机使用可靠性的一些因素》，NASA TR R-54 1960。

地面上和飞机上达到效能与寿命之间的合理平衡？对这两个问题的回答在一定程度上是肯定的。自从 NACA 研究工作开始以后一段时期内，人们曾进行了大量的研究，这些资料可以很好地用来提高零部件的疲劳寿命。此外，这类平衡常数已合理地建立起来，并可以合理地确定降低温度所能提高的寿命。但是效能仍然是一个十分诱人的推动力，所以人们比以往更加重视高温飞行用的发动机的高温和工作效率。再者，涡轮也日趋复杂化；冷却涡轮叶片要求具有复杂的、造成应力集中的通道，同时要求材料性能在温度和温度梯度方面都达到了极限。看来，作为一种重要的机理——疲劳，无论是降低使用的严酷性或者选用更好的材料，都是不大可能排除的。

假使真正要与疲劳问题进行斗争的话，必须面对现实并以完备的知识加以探讨。对所涉及到的机理必须进行了解，从而根据这些机理提出防止或延缓的方法。在本技术专题资料的评述中也考虑到这一目的。根据“温度对材料性能的影响联合委员会”成员们所提出的紧急要求，我们决定对燃气涡轮零件的疲劳问题进行科技动态的评述。这一评述可以很好地作为这个课题今后研究的纲目。它应当包括以下几个方面：

1. 在亚蠕变范围内的疲劳机理

由于许多燃气涡轮零件是在中等温度以下工作的，在这一温度范围内的疲劳机理应当予以确定。此外，在较低温度下的机理可以作为在较高温度下需要叠加另一些效应的疲劳机理的基础。

2. 在蠕变范围内的疲劳机理

许多零件，如导向叶片、工作叶片和燃烧室等，是在蠕变成为重要因素（假使不是主导的话）的温度下工作的。人们通常把绝对温度之半假定为蠕变开始成为重要因素的温度。在该温度以上，新的机理会影响疲劳寿命。因此，建立这些机理和揭示它们与疲劳寿命的关系是重要的。

3. 疲劳损伤的探测

疲劳造成的损伤有多种形式,其范围由较小的原子错排到大的裂纹。关于疲劳损伤的探测曾发表过大量的文献,其中包括对零件或试样进行金相检验或者在某种程度上使零件不可能再继续使用。无损检验技术近年来已有较大的发展,并对损伤进展到一定程度的疲劳探测方法进行了改进。无损检验技术也曾用于观察一些缺陷,如夹杂物,这些缺陷将有可能成为疲劳破坏的核心。对这些最新的和行之有效的技术应当进行收集并加以评价。

4. 疲劳损伤外场维修的研究

只有通过实际外场调查,才可以看到在外场使用中遇到的疲劳损伤的特征,和了解目前外场维修这种疲劳损伤的限度。NACA 的研究运用了军用维修基地发表的报告和现场调查,以便取得切实的资料。为了使这种资料符合当前情况,看来需要安排对民用航空维修中心的调查。这种调查,假使由一个发动机工厂的人员去进行,可以作到有关原始设计与使用操作之间的配合。

5. 疲劳损伤的防止、控制与维修

防止疲劳或一旦疲劳生核后加以维修是一个十分广泛的课题。但是如现在所进行的研究一样,甚至在初步调查中许多有用的资料可以归纳为一个结论。凭借对疲劳机理的理解来得到最有效的解决途径。最重要的准则是:防止疲劳是设计人员、工艺人员、使用人员和维修人员的共同职责。如果某一方没有尽到自己的责任,那就会破坏其他人员所进行的最精心的工作。因此,重要的是,不仅要对目前所采用的解决途径加以评述,也要提出一些没有完全探索过的而又可能出现的问题。

将以上所述作为基础,把每一部分交给一个人或一个小组,把他们在这方面所受到的训练、兴趣和积累的经验编写成一篇有用的文章。我们也曾意识到,由于时间和篇幅的限制以及情况在不断地发展,还不可能作更详尽的论述。但是考虑到对已有成就的评述和指出那些需要补充的空白是一件有益的事。

在这些章节中重点放在对航空燃气涡轮的应用方面，许多资料不仅适用于地面上的燃气轮机，也适用于在控制寿命中疲劳起主导作用的一些其它机器。我们希望这一专集能够对那些在金属疲劳问题方面有兴趣的人们有所补益。

S. S. Manson

目 录

译者序·····	4
序言·····	5
亚蠕变范围内的疲劳机理·····	9
蠕变范围内的疲劳机理·····	65
疲劳损伤的探测·····	129
喷气发动机疲劳损伤零件的外场维修·····	233
疲劳损伤的预防、控制和修理·····	261

金 属 疲 劳 损 伤

——机理、探测、预防和维修——

〔美〕S. S. 曼森 编

陆 索 译校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是美国材料试验学会编为第495号的特种技术出版物。由美国国家航宇管理局 Lewis 研究中心的 S. S. Manson 主编。共汇集了五篇文章：前两篇综合论述金属疲劳损伤机理及其影响因素；后三篇较系统地介绍疲劳损伤的探测、预防和维修等技术。可供燃气涡轮发动机材料的研制人员和发动机设计、使用与维修方面的技术人员参考。

METAL FATIGUE DAMAGE—Mechanism, Detection,
Avoidance and Repair

S. S. Manson

1971

*

金属疲劳损伤

——机理、探测、预防和维修——

陆 索 译校

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168^{1/32} 印张11 279千字

1976年8月第一版 1976年8月第一次印刷 印数：00,001—11,400册

统一书号：15034·1500 定价：1.40元

目 录

译者序·····	4
序言·····	5
亚蠕变范围内的疲劳机理·····	9
蠕变范围内的疲劳机理·····	65
疲劳损伤的探测·····	129
喷气发动机疲劳损伤零件的外场维修·····	233
疲劳损伤的预防、控制和修理·····	261

译者序

疲劳损伤是机器零件的主要失效机理，经过多年的努力，在与疲劳作“斗争”方面，无论在理论上或实践上都取得了不少成果。在航空部门，由于飞机承受的应力、温度和环境非常复杂，因此，对疲劳损伤的研究显得更为重要。可是，目前有关燃气涡轮发动机零件疲劳的资料发表的很少，为了更好地研究疲劳损伤对燃气涡轮发动机的寿命的影响，遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，我们把这本专辑翻译成中文，供有关人员参考。

本书不仅从理论上论述了疲劳损伤的机理，而且综合了美国前航空管理局早期在空军修理基地所进行的统计工作，结合现在的宇航管理局近期的研究工作，针对燃气涡轮发动机的主要零件——轴承、压气机叶片、燃烧室、涡轮叶片以及涡轮盘等所产生的疲劳损伤问题，从探测、预防和维修方面，进行了较系统的分析阐述，并相应提出了今后研究工作的意见。

应当指出，对待国外资料，“决不能生吞活剥地毫无批判地吸收”，而“应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。”因此，在翻译本书过程中，已注意到这个问题，但由于译者水平有限，错误之处在所难免，希望读者批评指正。

序 言

疲劳是燃气涡轮发动机零件常见的失效机理。无论冷端或热端零件对这种失效都是敏感的，其起因可能是机械的或热学的。

几年前，NACA(NASA 的前身)在所进行的研究中曾经明确地指出，疲劳是喷气涡轮发动机可靠性方面的一个限制因素。该项研究工作是在五十年代中期[●]针对军用喷气发动机进行的，它以空军修理基地统计的分析为基础。所研究的一些主要零件——轴承、压气机叶片、燃烧室、涡轮导向叶片与工作叶片以及涡轮盘——的寿命在很大程度上受疲劳的限制。遇到的问题一些是从军事需要出发，要求发动机具有高的效能；另一些是由于喷气发动机当时还处于发展初期和缺乏经验的缘故。但是，优先考虑疲劳问题的主要原因是和喷气发动机零件在使用中所经受的特殊条件有关。工作条件产生的高的载荷波动、高的温度和温度梯度、频繁的起动和停车以及由于复杂几何形状与表面不连续性造成的应力集中等——所有这些都引起零件的疲劳倾向。除此以外，重量轻和效能高这一现实问题也强烈地推动着燃气涡轮的设计与使用，目前已清楚地看到疲劳将继续成为燃气涡轮发动机寿命的一个重要的限制因素。

实际上，NACA 只是对早期的燃气涡轮发动机进行了研究，所得的资料目前还不能加以引用。再者军用发动机的工作效能是占第一位的；为了得到高的效能要付出一定的代价，检修和频繁地更换零件所造成的花费是允许的。可以恰当地提出问题，为什么近几年来情况仍没有改变？为什么不能象民用燃气涡轮那样在

● 国家宇航管理局 Lewis 中心工作者：《影响喷气发动机使用可靠性的一些因素》，NASA TR R-54 1960。

地面上和飞机上达到效能与寿命之间的合理平衡？对这两个问题的回答在一定程度上是肯定的。自从 NACA 研究工作开始以后一段时期内，人们曾进行了大量的研究，这些资料可以很好地用来提高零部件的疲劳寿命。此外，这类平衡常数已合理地建立起来，并可以合理地确定降低温度所能提高的寿命。但是效能仍然是一个十分诱人的推动力，所以人们比以往更加重视高温飞行用的发动机的高温和工作效率。再者，涡轮也日趋复杂化；冷却涡轮叶片要求具有复杂的、造成应力集中的通道，同时要求材料性能在温度和温度梯度方面都达到了极限。看来，作为一种重要的机理——疲劳，无论是降低使用的严酷性或者选用更好的材料，都是不大可能排除的。

假使真正要与疲劳问题进行斗争的话，必须面对现实并以完备的知识加以探讨。对所涉及到的机理必须进行了解，从而根据这些机理提出防止或延缓的方法。在本技术专题资料的评述中也考虑到这一目的。根据“温度对材料性能的影响联合委员会”成员们所提出的紧急要求，我们决定对燃气涡轮零件的疲劳问题进行科技动态的评述。这一评述可以很好地作为这个课题今后研究的纲目。它应当包括以下几个方面：

1. 在亚蠕变范围内的疲劳机理

由于许多燃气涡轮零件是在中等温度以下工作的，在这一温度范围内的疲劳机理应当予以确定。此外，在较低温度下的机理可以作为在较高温度下需要叠加另一些效应的疲劳机理的基础。

2. 在蠕变范围内的疲劳机理

许多零件，如导向叶片、工作叶片和燃烧室等，是在蠕变成为重要因素（假使不是主导的话）的温度下工作的。人们通常把绝对温度之半假定为蠕变开始成为重要因素的温度。在该温度以上，新的机理会影响疲劳寿命。因此，建立这些机理和揭示它们与疲劳寿命的关系是重要的。

3. 疲劳损伤的探测

疲劳造成的损伤有多种形式,其范围由较小的原子错排到大的裂纹。关于疲劳损伤的探测曾发表过大量的文献,其中包括对零件或试样进行金相检验或者在某种程度上使零件不可能再继续使用。无损检验技术近年来已有较大的发展,并对损伤进展到一定程度的疲劳探测方法进行了改进。无损检验技术也曾用于观察一些缺陷,如夹杂物,这些缺陷将有可能成为疲劳破坏的核心。对这些最新的和行之有效的技术应当进行收集并加以评价。

4. 疲劳损伤外场维修的研究

只有通过实际外场调查,才可以看到在外场使用中遇到的疲劳损伤的特征,和了解目前外场维修这种疲劳损伤的限度。NACA 的研究运用了军用维修基地发表的报告和现场调查,以便取得切实的资料。为了使这种资料符合当前情况,看来需要安排对民用航空维修中心的调查。这种调查,假使由一个发动机工厂的人员去进行,可以作到有关原始设计与使用操作之间的配合。

5. 疲劳损伤的防止、控制与维修

防止疲劳或一旦疲劳生核后加以维修是一个十分广泛的课题。但是如现在所进行的研究一样,甚至在初步调查中许多有用的资料可以归纳为一个结论。凭借对疲劳机理的理解来得到最有效的解决途径。最重要的准则是:防止疲劳是设计人员、工艺人员、使用人员和维修人员的共同职责。如果某一方没有尽到自己的责任,那就会破坏其他人员所进行的最精心的工作。因此,重要的是,不仅要对目前所采用的解决途径加以评述,也要提出一些没有完全探索过的而又可能出现的问题。

将以上所述作为基础,把每一部分交给一个人或一个小组,把他们在这方面所受到的训练、兴趣和积累的经验编写成一篇有用的文章。我们也曾意识到,由于时间和篇幅的限制以及情况在不断地发展,还不可能作更详尽的论述。但是考虑到对已有成就的评述和指出那些需要补充的空白是一件有益的事。

在这些章节中重点放在对航空燃气涡轮的应用方面，许多资料不仅适用于地面上的燃气轮机，也适用于在控制寿命中疲劳起主导作用的一些其它机器。我们希望这一专集能够对那些在金属疲劳问题方面有兴趣的人们有所补益。

S. S. Manson