

东南交通青年教师

科研论丛

# 粘贴加固混凝土梁的 疲劳性能

张娟秀 叶见曙 ▶ 编著

TRANSPORT

FATIGUE BEHAVIOR OF  
RC BEAMS WITH EPOXY BONDED  
EXTERNAL REINFORCEMENT

东南大学出版社

东南交通·青年教师·科研论丛

# 粘贴加固混凝土梁的疲劳性能

张娟秀 叶见曙 编著

东南大学出版社

·南京·

## 内 容 介 绍

粘贴钢板加固和粘贴碳纤维复合材料(CFRP)加固技术已被广泛地应用于混凝土旧桥加固改造中。粘贴加固钢筋混凝土构件的疲劳性能及其耐久性是国内外土木建筑领域的前沿课题。本书主要内容包括:粘贴钢板加固混凝土梁的疲劳性能、粘贴 CFRP 片材加固混凝土梁的疲劳性能、冻融条件下 CFRP 片材加固混凝土梁的疲劳性能、冻融条件下粘贴钢板加固混凝土梁的疲劳性能、粘贴加固混凝土梁损伤分析与疲劳分析和粘贴加固混凝土梁疲劳破坏模式。

本书可供研究人员、工程技术人员、土木工程、道路与桥梁工程的学生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

粘贴加固混凝土梁的疲劳性能/张娟秀,叶见曙编  
著. —南京:东南大学出版社, 2014. 11  
(东南交通青年教师科研论丛)  
ISBN 978-7-5641-5228-4

I. ①粘… II. ①张… ②叶… III. ①钢筋混  
凝土桥—梁桥—粘钢加固 IV. ①U448. 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 224838 号

### 粘贴加固混凝土梁的疲劳性能

著 者 张娟秀 叶见曙  
责任编辑 丁 丁  
编辑邮箱 d. d. 00@163. com

---

出版发行 东南大学出版社  
社 址 南京市四牌楼 2 号 邮编:210096  
出 版 人 江建中  
网 址 <http://www.seupress.com>  
电子邮箱 [press@seupress.com](mailto:press@seupress.com)  
经 销 全国各地新华书店  
印 刷 南京玉河印刷厂  
版 次 2014 年 11 月第 1 版  
印 次 2014 年 11 月第 1 次印刷  
开 本 787 mm×1092 mm 1/16  
印 张 8.75  
字 数 116 千字  
书 号 ISBN 978-7-5641-5228-4  
定 价 36.00 元

---

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

# 总 序

在东南大学交通学院的教师队伍中,40岁以下的青年教师约占40%。他们中的绝大多数拥有博士学位和海外留学经历,具有较强的创新能力和开拓精神,是承担学院教学和科研工作的主力军。

青年教师代表着学科的未来,他们的成长是保持学院可持续发展的关键。按照一般规律,人的最佳创造年龄是25岁至45岁,37岁为峰值年。青年教师正处于科研创新的黄金年龄,理应积极进取,以所学回馈社会。然而,青年人又处于事业的起步阶段,面临着工作和生活的双重压力。如何以实际行动关心青年教师的成长,让他们能够放下包袱全身心地投入到教学和科研工作中?这是值得高校管理者重视的问题。

近年来,我院陆续通过了一系列培养措施帮助加快青年人才成长。2013年成立了“东南大学交通学院青年教师发展委员会”,为青年教师搭建了专业发展、思想交流和科研合作的平台。从学院经费中拨专款设立了交通学院青年教师出版基金,以资助青年教师出版学术专著。《东南交通青年教师科研论丛》的出版正是我院人才培养措施的一个缩影。该丛书不仅凝结了我院青年教师在各自领域内的优秀成果,相信也记载着青年教师们的奋斗历程。

东南大学交通学院的发展一贯和青年教师的成长息息相关。回顾过去十五年,我院一直秉承“以学科建设为龙头,以教学科研为两翼,以队伍建设为主体”的发展思路,走出了一条“从无到有、从小到大、从弱到强”的创业之路,实现了教育部交通运输工程一级学科评估排名第一轮全国第五,第二轮全国第二,第三轮全国第一的“三级跳”。这一成绩的取得包含了几代交通人的不懈努力,更离不开青年教师的贡献。

我国社会经济的快速发展为青年人的进步提供了广阔的空间。一批又一

批青年人才正在脱颖而出,成为推动社会进步的重要力量。世间万物有盛衰,人生安得常少年?希望本丛书的出版可以激励我院青年教师更乐观、自信、勤奋、执着地拼搏下去,搭上时代发展的快车,更好地实现人生的自我价值和社会价值。展望未来,随着大批优秀青年人才的不断涌现,东南大学交通学院的明天一定更加辉煌!



2014年3月16日

# 前 言

在公路混凝土旧桥的加固中,粘贴钢板或碳纤维复合材料法的粘贴加固技术运用广泛。粘贴加固法的基本原理是对公路混凝土旧桥构件采用外贴钢板或 CFRP 片材,来恢复或提高混凝土构件的承载力和刚度,这正是桥梁工程师所期盼的,已有大量试验与研究证明粘贴加固法确能达到效果。但是,就桥梁加固构件而言,加固后的构件因采用粘贴加固方法也有本身引起的结构特性问题,例如在混凝土受弯构件受拉区表面粘贴钢板或 CFRP 片材,在竖向荷载作用下会出现钢板或 CFRP 片材的剥离,从而导致被加固的混凝土梁提前破坏,这种破坏一般是突然的。因此,必须重视结构在加固后的受力特性变化,研究变化产生的机理及规律,进而采取有效的技术措施,以保证结构加固后的效果。

桥梁是始终处于车辆、人群荷载和各种自然环境的共同影响下工作的人工构造物,尤其在恶劣环境下,结构的长期性能会有所下降。混凝土结构的冻融损伤及破坏现象已广泛存在。由于采用粘贴加固技术加固后混凝土构件出现疲劳受力特性问题,加之冻融环境的影响是客观存在的。本书作者对粘贴加固混凝土梁疲劳性能以及冻融循环作用对其疲劳性能的影响展开研究,取得了本书所介绍的研究成果。

本书内容包括:绪论,粘贴钢板加固混凝土梁的疲劳性能,粘贴 CFRP 片材加固混凝土梁的疲劳性能,冻融条件下 CFRP 片材加固混凝土梁的疲劳性能,冻融条件下粘贴钢板加固混凝土梁的疲劳性能,粘贴加固混凝土梁损伤分析与疲劳分析和粘贴加固混凝土梁疲劳破坏模式,共 7 章。其中第 1 章由叶见曙撰写,第 2~3 章、第 5~7 章由张娟秀撰写,第 4 章由叶见曙和张娟秀共同撰写,全书最后由张娟秀统稿。

本书研究工作得到了旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室(北京)开

放课题基金和江西省交通科技项目的支持,在此表示衷心的感谢。本书研究工作是在东南大学道桥实验室老师和南航耿飞老师的帮助下完成的,在此对他们所作出的贡献表示衷心的感谢。

本书有幸出版,得到了江苏省优势学科建设资助,还要感谢东南大学交通学院青年教师发展委员会给予青年教师专著出版的支持与帮助。

由于作者水平所限,书中难免有疏漏及不足之处,敬请读者批评指正。

作者

2014年6月

# 目 录

总序

前言

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 粘贴加固混凝土梁疲劳性能研究意义 .....	1
1.2 粘贴加固混凝土梁疲劳性能研究现状 .....	6
1.3 小结 .....	24
第 2 章 粘贴钢板加固混凝土梁的疲劳性能 .....	25
2.1 疲劳试验方案 .....	25
2.2 疲劳破坏 .....	28
2.3 裂缝分布 .....	31
2.4 挠度分析 .....	33
2.5 钢筋应变分析 .....	34
2.6 粘贴钢板的应变分析 .....	35
第 3 章 粘贴 CFRP 片材加固混凝土梁的疲劳性能 .....	37
3.1 疲劳破坏 .....	38
3.2 裂缝分布 .....	40
3.3 挠度 .....	41
3.4 钢筋应变 .....	43
3.5 CFRP 片材应变 .....	44
3.6 粘贴加固混凝土梁疲劳性能对比分析 .....	46



<b>第 4 章</b>	<b>冻融条件下 CFRP 片材加固混凝土梁的疲劳性能</b>	48
4.1	冻融试验	48
4.2	疲劳试验过程	53
4.3	裂缝分布	57
4.4	冻融循环作用对 CFRP 片材加固梁挠度的影响	58
4.5	冻融循环作用对 CFRP 片材加固梁钢筋应变的影响	60
4.6	冻融循环作用对 CFRP 片材应变的影响	61
4.7	冻融循环作用对粘贴 CFRP 片材加固梁刚度影响的理论分析	62
4.8	CFRP 片材加固冻融作用后混凝土梁的疲劳剥离破坏	67
<b>第 5 章</b>	<b>冻融条件下粘贴钢板加固混凝土梁的疲劳性能</b>	71
5.1	冻融试验结果	71
5.2	疲劳试验过程	72
5.3	裂缝分布	74
5.4	挠度	75
5.5	钢筋应变	76
5.6	钢板应变结果	77
5.7	冻融循环作用的粘贴加固混凝土梁疲劳性能比较分析	79
<b>第 6 章</b>	<b>粘贴加固混凝土梁损伤分析与疲劳分析</b>	81
6.1	混凝土冻融损伤理论背景	81
6.2	粘贴加固混凝土梁混凝土冻融损伤分析	90
6.3	粘贴加固混凝土梁疲劳损伤分析	92
6.4	冻融作用的粘贴加固混凝土梁数值模拟与疲劳分析	98
6.5	一般条件下的粘贴加固混凝土梁疲劳分析	105
<b>第 7 章</b>	<b>粘贴加固混凝土梁疲劳破坏模式</b>	110
7.1	粘贴加固混凝土梁常见静力破坏模式	110
7.2	粘贴加固混凝土梁疲劳破坏模式	112
7.3	疲劳破坏模式的影响因素	121
<b>参考文献</b>		123

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 粘贴加固混凝土梁疲劳性能研究意义

混凝土桥梁占我国现役桥梁的绝大多数。随着国民经济的发展,对公路交通安全的要求越来越高,而许多运营的公路混凝土旧桥,特别是有些混凝土旧桥原设计荷载偏低,再加上超载车辆行驶,以及大气环境等外界因素的影响,导致桥梁结构产生病害和缺陷,严重影响到桥梁结构的安全性、适用性和耐久性。既有混凝土桥梁的维修加固具有深刻的工程背景和工程研究价值。

在公路混凝土旧桥的加固中,目前常用的加固方法是加大截面法、粘贴钢板或碳纤维复合材料法、预应力加固法、改变结构受力体系加固法等,特别是粘贴钢板或碳纤维复合材料法的粘贴加固技术运用广泛。在国内成功研制出了建筑结构胶后,粘贴钢板加固技术也迅速发展起来,20 世纪 90 年代,粘贴钢板加固技术在公路旧桥加固中得到充分发展,成为桥梁结构加固常用的方法之一。

粘贴钢板是采用环氧树脂系列黏结剂将钢板粘贴在混凝土结构物的受拉缘或薄弱部位,使之与结构物形成共同受力的整体,以提高刚度,改善原结构混凝土的应力状态,提高结构承载力,达到补强效果

的一种加固方法。粘贴钢板加固在混凝土旧桥加固中的常用形式<sup>[1]</sup>有：主梁梁底粘贴纵向钢板加固(图1.1)、箱梁或T梁(或工字梁)腹板粘贴斜向钢板加固、悬臂梁牛腿处(图1.2)或挂梁端部粘贴钢板加固等。

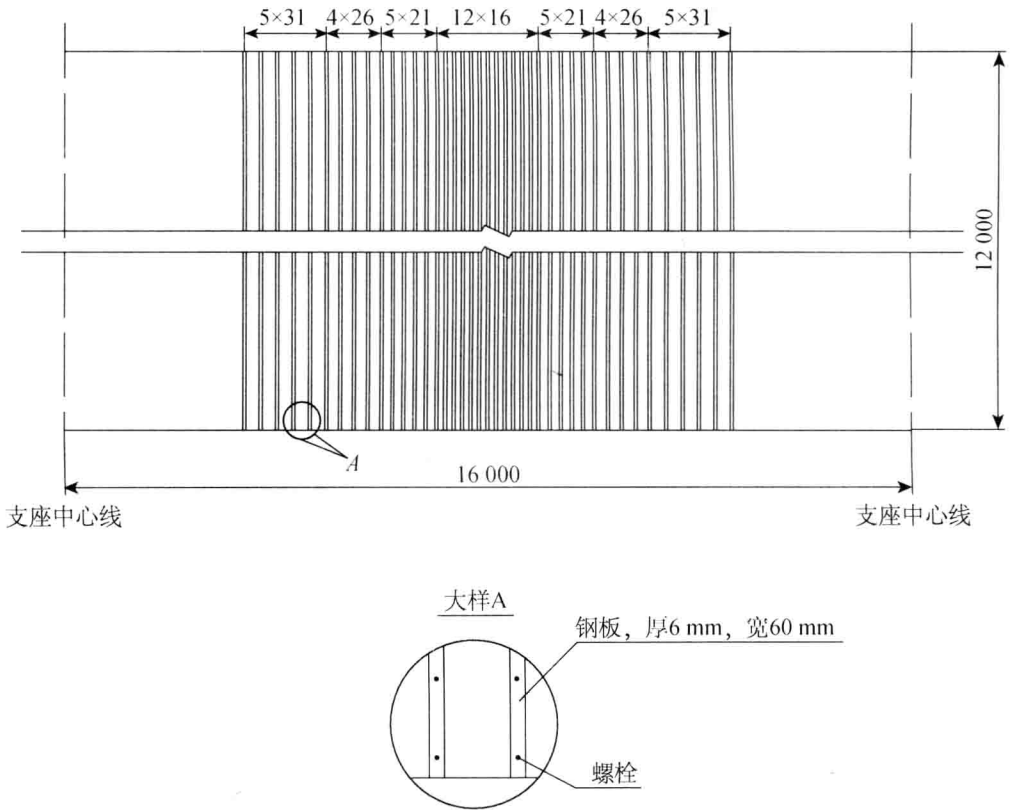


图 1.1 主梁梁底粘贴钢板加固示意图(单位:mm)

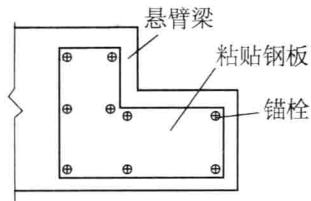


图 1.2 悬臂梁牛腿粘贴抗剪钢板加固示意图

20 世纪 90 年代以来,纤维增强复合材料(FRP)在土木工程中应用一直是国内外研究的热点。根据纤维种类的不同将 FRP 材料分为三类:玻璃纤维增强复合材料(GFRP)、碳纤维增强复合材料(CFRP)和芳纶纤维增强复合材料(AFRP)。其中碳纤维增强复合材料(CFRP)片材在混凝土旧桥结构加固工程方面应用最多,包括混凝土旧桥的基本构件和节点的加固补强,以提高构件的抗弯承载力(图 1.3)、抗剪承载力以及构件的刚度和延性。CFRP 片材包括用环氧树脂浸渍固化的碳纤维板或未经树脂浸渍固化的碳纤维布。

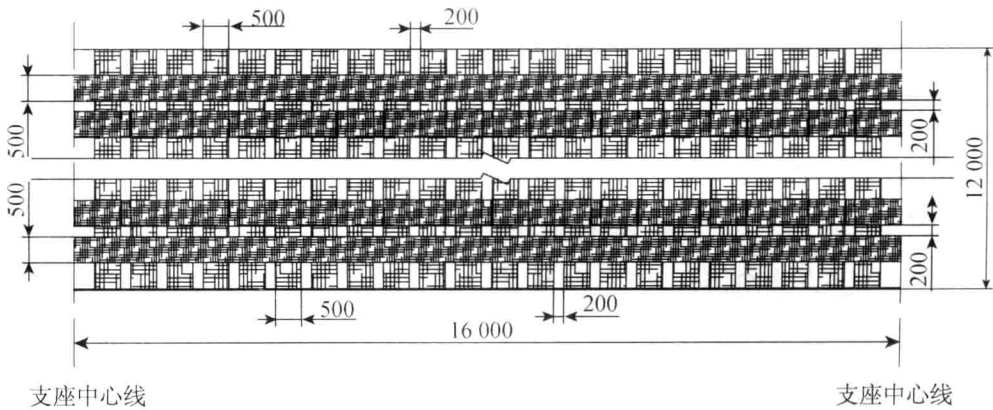


图 1.3 主梁梁底粘贴 CFRP 布(呈网格状)加固示意图(单位:mm)

粘贴碳纤维增强复合材料(CFRP)片材加固法是将片材用专门配制的粘贴树脂或浸渍树脂粘贴在桥梁混凝土构件需补强加固部位的表面,树脂固化后与原构件形成新的受力复合体,共同工作。粘贴 CFRP 片材加固法是粘贴钢板加固法的发展,除了碳纤维增强复合材料的强度比建筑用钢板强度高,弹性模量与钢材在同一水平上外,CFRP 用于加固混凝土旧桥结构的优点主要是密度小、重量轻,易于施工操作,并且有良好的抗腐蚀性能及耐老化性能。另外,由于需要加固和修复的混凝土桥梁结构是具有确定的形状和外观的,一般不允许加固改变其既有状态,采

用柔性的纤维增强复合材料片材可广泛地适用于各种结构形状及结构部位的加固修补。碳纤维材料的这些优点,恰恰弥补了在桥梁结构加固上的不足之处。

粘贴加固法的基本原理是对公路旧桥构件采用外贴钢板或 CFRP 片材,来恢复或提高混凝土构件的承载力和刚度,这正是桥梁工程师所期盼的。目前从结构胶的基本力学性质,到粘贴钢板加固混凝土梁的黏结应力分布、承载能力、刚度提高、破坏机理等都进行了静力试验研究。理论上也研究得到了粘贴钢板锚固长度计算公式和相关加固设计计算公式<sup>[2]</sup>。CFRP 加固混凝土梁的静力试验研究、理论分析涉及构件的极限承载力、破坏模式、黏结构造、锚固技术等方面,研究了加固形式、锚固方式、加固量、纤维方向等因素的影响。已有大量静力试验与研究证明粘贴加固法确能达到效果。

但是,就桥梁加固构件而言,加固后的构件因采用粘贴加固方法也有本身引起的结构特性问题,例如在混凝土受弯构件受拉区表面粘贴钢板或 CFRP 片材,在竖向荷载作用下会出现钢板或 CFRP 片材的剥离,从而导致被加固的混凝土梁提前破坏,这种破坏一般是突然的。因此,必须重视结构在加固后的受力特性变化,研究变化产生的机理及规律,进而采取有效的技术措施,以保证结构加固后的效果。

在公路混凝土桥梁设计上,一般不考虑结构的疲劳问题,这是因为混凝土桥梁由可变作用引起的应力水平与永久作用引起的应力水平相比是比较低的,所以在公路桥梁设计规范<sup>[3-4]</sup>中,并没有规定构件设计疲劳验算。当采用粘贴加固技术对混凝土桥梁构件加固后,在粘贴加固锚固区存在应力集中以及加固截面与相邻原构件截面存在突变等原因,可能引起应力重分布从而导致局部区域处于高应力状态下工作,并使工作应力幅越来越接近疲劳应力幅而发生疲劳破坏。文献<sup>[5]</sup>的研究结果表明,经粘贴钢板补强的加固梁,则常因为梁端剪力区补强方式不够妥善,

而使疲劳破坏多发生在梁端附近弯剪作用区,且破坏面约呈 $45^\circ$ 。因此必须注意粘贴加固后混凝土梁的疲劳受力特性。

桥梁是始终处于车辆、人群荷载和各种自然环境的共同影响下工作的人工构造物,尤其在恶劣环境下,结构的长期性能会有所下降。在我国北方寒冷地区,桥梁结构在服役期内可能遇到的恶劣环境条件之一是冻融环境,混凝土可能受到冻融损伤甚至冻融破坏。还有一种冻融条件为盐冻,所谓盐冻是指盐类化合物和冻融的共同作用,这是一种最严酷的冻融环境,混凝土的破坏程度和速度比普通冻融大好几倍,甚至10倍。在寒冷地区,多在城市道路或立交桥中使用除冰盐融化冰雪,也会加速混凝土冻融破坏,其损害表现为由于除冰盐使混凝土表面水融化,引起混凝土表面温度显著下降,造成对混凝土温度冲击,使混凝土外层开裂;或者是随混凝土表面深度增加除冰盐浓度降低,对水的融点影响也不同,可能出现各层混凝土在不同时间内冻结现象,形成混凝土分层剥落。

混凝土产生冻融损伤甚至破坏有两个必要条件,一个必要条件是混凝土必须接触水或混凝土中有一定的含水量;另一个必要条件是混凝土结构所处的自然环境必须存在反复交替的正负温度。地处温度正负交替作用地区的混凝土桥梁结构接触了雨水、蒸气或受渗水作用的部分,也就会受到冻融作用。在我国,东北、华北、西北地区的混凝土结构遭受不同程度的冻融损伤甚至破坏,经相关调查<sup>[6]</sup>研究发现,在长江以北黄河以南的中部地区,混凝土结构的冻融损伤及破坏现象也广泛存在。

对于位于寒冷地区的公路混凝土桥梁,当其结构构件需采用粘贴加固方法以恢复或提高承载力时,面临的是受到冻融损伤的混凝土构件粘贴加固效果问题及技术对策,另一个是混凝土构件粘贴加固后,在冻融环境条件下的影响,应该看到,由于采用粘贴加固技术加固后混凝土构

件出现疲劳受力特性问题,加之冻融环境的影响是客观存在的,应当明确冻融损伤对粘贴加固混凝土梁疲劳性能的影响,对客观存在的冻融环境下的混凝土桥梁加固具有十分重要的工程意义。

## 1.2 粘贴加固混凝土梁疲劳性能研究现状

目前与粘贴加固混凝土梁疲劳性能方面有关的研究主要涉及疲劳累积损伤理论分析研究、疲劳试验研究、冻融试验研究以及疲劳寿命预测。

### 1.2.1 疲劳累积损伤理论

适当的累积损伤模型是正确描述结构或构件在循环荷载作用下的疲劳累积损伤发展过程,进行结构抗疲劳设计或结构寿命评估的基础。

损伤(damage)<sup>[7]</sup>,通常解释为受损伤物体的价值或用途减小了。其物理解释通常将损伤概念与失去完整性相联系,例如,微观裂纹的形成、物理性能的下降(如强度退化)等。疲劳损伤在物理上其形式是多种多样的,这是疲劳强度和疲劳寿命分析困难的根本所在。目前定义损伤变量有两种途径:①微观的或物理的;②宏观或唯象的。从微观或物理角度定义疲劳损伤有很多方式,如:在疲劳损伤区内微观裂纹的密度、空洞体积(面积)比、声发射量、超声波等。从宏观和唯象的角度定义疲劳损伤主要有:Miner 损伤为  $\frac{1}{N}$  ( $N$  是对应于给定应力水平的材料的疲劳寿命)、剩余刚度、剩余强度、循环耗散能、阻尼系数滞后能(滞后相位角)等。

任何一个疲劳累积损伤理论必定以疲劳损伤  $D$  的定义为基石,以

疲劳损伤的演化为基础。一个合理的疲劳累积损伤理论,其疲劳损伤  $D$  应该有比较明确的物理意义,有与试验数据比较一致的疲劳损伤演化规律,同时使用比较简单。

按照疲劳累积损伤规律,目前所提出的疲劳累积损伤理论可归纳为以下常用的几类疲劳累积损伤理论。

### 1) 线性疲劳累积损伤理论

线性累积损伤理论就是指在循环荷载作用下,疲劳损伤是可以线性地累加的,各个应力之间相互独立,互不相干,当累加的损伤达到某一数值时,试件或构件就发生疲劳破坏。

疲劳过程既可以看成是损伤趋于一个临界损伤值的累积过程,也可以看成是材料固有寿命的消耗过程。疲劳损伤积累是线性的这一假设最初是 Palmgren 于 1924 年提出的。他在估算滚动轴承的寿命时,假设损伤积累与转动次数成线性关系。1945 年 Miner 又根据材料吸收净功的原理给出了疲劳线性累积损伤的数学表达式,并进一步提出:在疲劳试验中,试件在给定应力水平的反复荷载作用下,其损伤可以认为与应力循环次数成线性积累的关系,当损伤积累到某一临界值时,就产生破坏。因此线性累积损伤准则又称为 Palmgren - Miner 线性累积损伤准则。简称为 P-M 准则。

P-M 准则认为一个应力循环所引起的损伤为  $\frac{1}{N_i}$  ( $N_i$  为某应力水平  $S_i$  下等幅荷载作用下疲劳破坏所需的荷载循环次数)。利用这一准则,就可以根据等幅疲劳试验得出的 S-N 曲线,判别在变幅重复荷载作用下是否发生疲劳破坏,从而我们可以得到多级循环应力水平下的损伤为<sup>[8]</sup>

$$D = \sum_i D_i = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (1.1)$$

式中  $D_i$  ——在应力水平  $S_i$  下的损伤分数;



$n_i$  —— 在  $S_i$  下试件经历的实际循环次数;

$N_i$  —— 在  $S_i$  下试件到达破坏时的循环次数。

当损伤分数的和达到某一临界值(按照 P-M 准则,通常取为 1),即满足  $D \geq 1$  时便可认为发生疲劳破坏。

实际上,Miner 理论中还假设不同载荷水平的载荷引起失效所需要的能量相同(即外力做的功相同),以及在整个寿命过程中无论是第一循环还是最后一个循环引起的损伤相同。显然 Miner 的假设显著简化了疲劳机理。

另外,从理论和试验<sup>[9-10]</sup>都可以证明疲劳损伤不仅与变幅疲劳荷载的大小有关,而且还与其加载顺序有关。大量的试验证明疲劳损伤随着加载次数呈递增变化,损伤的累积过程表现为非线性规律,因此 Miner 准则并不完全适用。

如果把 Miner 理论用曲线图表示出来,令损伤  $D$  为纵坐标,寿命分数  $\frac{n}{N}$  为横坐标,结果是一条直线(图 1.4)。事实上,根据试验结果,疲劳损伤一般是以非线性的形式累积的,如图 1.2 中曲线 1 或曲线 3 所示。图中较低的曲线 3 对应较低的应力水平。

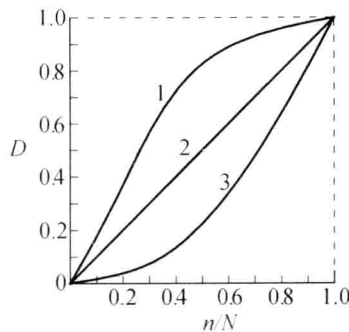


图 1.4 损伤曲线图

## 2) 双线性疲劳累积损伤理论<sup>[8]</sup>

上面提到的线性疲劳累积损伤理论,没有考虑载荷顺序对疲劳损伤