

GANGGUAN HUNNINGTU GONGQIAO
GUANJIEDIAN PILAO XINGNENG YANJIU

钢管混凝土拱桥

管节点疲劳性能研究

刁 砚 刘保县 / 著



西南交通大学出版社

钢管混凝土拱桥管节点 疲劳性能研究

刁 砚 刘保县 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

钢管混凝土拱桥管节点疲劳性能研究 / 刁砚, 刘保县著. —成都: 西南交通大学出版社, 2015.4
ISBN 978-7-5643-3860-2

I. ①钢… II. ①刁… ②刘… III. ①钢管混凝土拱桥—节点—疲劳—性能—研究 IV. ①U448.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 076778 号

钢管混凝土拱桥管节点疲劳性能研究

刁 砚 刘保县 著

责任编辑 胡晗欣
封面设计 墨创文化

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市金牛区交大路 146 号)

发行部电话 028-87600564 028-87600533

邮政编码 610031

网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印 刷 成都蜀通印务有限责任公司

成品尺寸 170 mm × 230 mm

印 张 9.25

字 数 208 千

版 次 2015 年 4 月第 1 版

印 次 2015 年 4 月第 1 次

书 号 ISBN 978-7-5643-3860-2

定 价 34.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

随着我国交通运输事业的进步, 钢管混凝土桥作为一种较为新颖的桥型得到了快速发展。近 20 年来, 已建和在建的钢管混凝土拱桥已经超过 200 座。然而必须看到, 对钢管混凝土桥设计理论的研究相对落后于工程实践, 在设计规范方面尤其是针对管节点的疲劳设计不够完善。

对钢管混凝土桥而言, 管节点是承载荷载的关键部位, 也往往是整个结构的薄弱环节。本书根据对国内外钢管混凝土桥疲劳问题的调研, 通过理论分析和试验研究相结合的方法, 对下述问题进行了研究:

1. 广泛收集调研国内外钢管混凝土典型焊接节点疲劳研究的相关成果, 针对实际工程需求 and 有待解决的设计问题, 提出本书研究的相关课题。
2. 通过钢管混凝土管节点静载试验, 实测了钢管混凝土管节点的名义应力、热点应力, 并由此得到钢管混凝土管节点的应力集中系数, 同时还建立了精细的三维有限元模型, 对试验构件进行应力计算, 并与试验实测值进行对比验证。
3. 针对钢管混凝土管节点的应力集中和应力集中系数进行了研究, 分析了应力集中的原因及相应的影响因素, 对比研究了空心管节点和钢管混凝土管节点应力集中的差异性, 提出了应力集中缓减系数 q 的概念, 并运用 APDL (参数化语言) 的方法建立有限元模型, 再通过 NLSF (非线性最小平方拟合) 的方法进行多个独立变量的拟合和相关系数的分析得到 q 的表达式, 在空心管应力集中系数公式的基础上提出了钢管混凝土管节点应力集中系数的计算公式。
4. 通过管节点模型的疲劳试验并对试验数据进行统计分析, 提出了钢管混凝土表面裂纹长度达到 3 倍壁厚时管节点疲劳失效的判别准则。通过疲劳试验加载与裂纹扩展的全过程证明, 对钢管混凝土节点来说, 由于混凝土的约束作用, 疲劳裂纹扩展的寿命还相当长, 因而当疲劳裂纹深度穿透主管壁厚, 表面裂纹长度达到 3 倍壁厚时 (约为 30 mm), 管节点疲劳失效的判别准则对于疲劳荷载作用下的节点是安全的。
5. 以试验现象为基础, 进行管节点的力学模型分析和裂纹开裂点的预测研究, 提出了管节点力学模型和热点区域疲劳裂纹开裂位置的计算公式, 该

模型可解释空心管和钢管混凝土热点位置转移的力学现象，预测管节点疲劳起裂点的位置，并给出解析解。本书用该模型提出的公式计算了曹娥江大桥疲劳试验模型管节点的开裂位置，与试验结果吻合较好；该模型及公式可以对今后类似的管节点疲劳开裂及工程实践起指导作用。

6. 用传统的 $S-N$ 曲线法和断裂力学的方法对钢管混凝土管节点的疲劳强度及裂纹扩展寿命进行研究，提出了钢管混凝土相应于空心管（DT类）的疲劳强度修正系数，并由此得到钢管混凝土管节点 $S-N$ 曲线的修正方程；从断裂力学的角度提出了钢管混凝土管节点裂纹扩展的计算方法，并通过疲劳试验数据确定了裂纹扩展计算公式的参数取值，使得该方法可运用于管节点的裂纹扩展寿命计算。

7. 在试验和理论研究的基础之上，以曹娥江大桥为例，建立了全桥有限元模型，再分别运用本书所提 $S-N$ 曲线修正方程和断裂力学两种方法计算其疲劳寿命，两种方法互为验证，并由此建立钢管混凝土桥管节点疲劳寿命评估流程。

著者

2015年1月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 课题研究的意义及背景	1
1.2 钢管混凝土管节点研究现状	3
1.3 管节点应力集中研究	5
1.4 管节点疲劳性能及寿命评估的研究	12
1.5 管节点疲劳试验研究	19
1.6 本书的研究工作	21
第 2 章 钢管混凝土管节点静力性能试验研究	23
2.1 钢管混凝土管节点模型设计	23
2.2 静力加载及测试方案设计	25
2.3 静载试验结果	27
2.4 应力集中系数 (SCF)	35
2.5 本章小结	37
第 3 章 钢管混凝土管节点有限元分析及应力集中研究	38
3.1 试验构件有限元模型的建立	38
3.2 管节点的应力分布规律及应力集中	43
3.3 钢管混凝土管节点的应力集中系数研究	46
3.4 本章小结	54
第 4 章 钢管混凝土管节点疲劳试验研究	55
4.1 试验目的及加载方案	55
4.2 疲劳试验结果	60
4.3 疲劳裂纹起裂与裂纹扩展	67
4.4 本章小结	72
第 5 章 管节点力学模型及热点区域受力分析研究	74
5.1 概 述	74

5.2	柱坐标系的建立及假设条件的提出	75
5.3	T型管节点受力分析	75
5.4	Y型管节点受力分析	78
5.5	相贯线上对I型裂纹有效的拉应力分布	80
5.6	力学模型对于疲劳试验结果的解释	81
5.7	本章小结	83
第6章	钢管混凝土管节点疲劳强度及疲劳寿命预测方法	84
6.1	基于S-N曲线的管节点疲劳强度及寿命研究	84
6.2	基于断裂力学的管节点裂纹扩展与疲劳寿命预测	98
6.3	焊接管节点疲劳强度的影响因素与改善措施	103
6.4	小 结	105
第7章	钢管混凝土桥管节点疲劳寿命评估	107
7.1	概 述	107
7.2	疲劳荷载谱与应力历程	107
7.3	曹娥江大桥钢管混凝土管节点疲劳寿命评估	114
7.4	疲劳寿命评估流程	126
7.5	小 结	127
第8章	结论与展望	128
8.1	本书主要内容及研究成果	128
8.2	需进一步研究的内容	129
参考文献		131

第 1 章 绪 论

1.1 课题研究的意义及背景

钢管混凝土作为一种复合型材料,近些年来在土木工程中得到了广泛应用,从 20 世纪 90 年代到目前为止 20 多年的时间里,我国的钢管混凝土拱桥得到了极大的发展。从 1990 年我国第一座大跨度钢管混凝土拱桥——四川旺苍大桥建成至今,已建和在建的钢管混凝土拱桥已经超过 200 多座,其中最大跨度达到 460 m,钢管混凝土桥的建设无论是数量还是跨度都达到了世界领先水平。理论研究和工程实践表明,钢管混凝土拱桥在设计、施工、经济以及美观上具有其独特的优越性^[1-10](见图 1-1)。



图 1-1 大跨度钢管混凝土拱桥

然而，对钢管混凝土桥设计理论的研究目前还落后于桥梁的工程实践。首先，钢管混凝土的规范不完善，虽然国内一些机构如中国工程建设标准化协会、国家建筑材料工业局等颁布了钢管混凝土结构设计与施工方面的规程，但交通运输部和住房和城乡建设部还没有形成统一的规范，特别是针对钢管混凝土管节点的疲劳设计问题还没有形成统一的认识和足够的重视。

对钢管混凝土管结构而言，节点是承载并传递荷载的关键部位，因此，往往也是整个结构的薄弱环节。如图 1-2 所示，国内建成的钢管混凝土拱桥中已有节点疲劳裂纹发生。

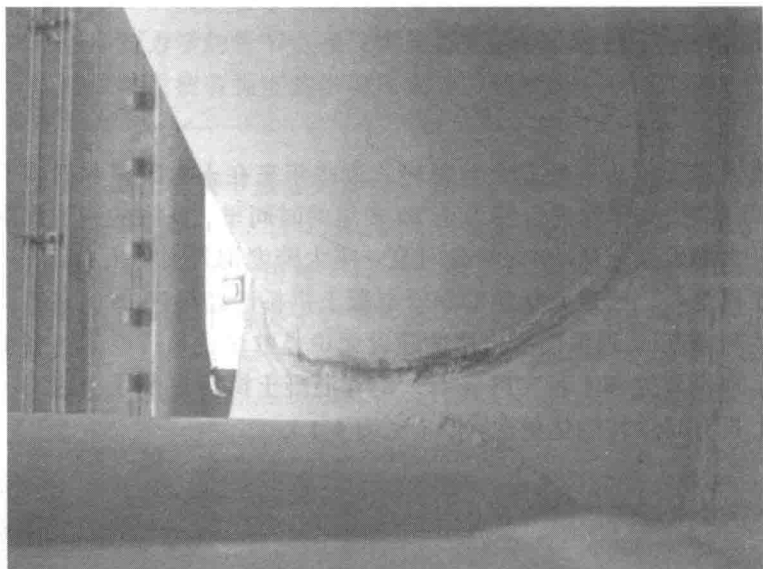


图 1-2 钢管混凝土拱桥管节点相贯线焊缝开裂

在钢管混凝土桥管节点中，管管相连的形式主要是两管之间相贯连接。管节点连接的形式也多种多样，平面节点较为典型的有 T 型、Y 型、K 型和 X 型等。在这些焊接节点处，应力分布非常复杂，往往有很高的应力集中现象，加上相贯节点多由焊接而成，因此相贯线焊缝位置多存在焊接残余应力和焊接缺陷等，在外部交变荷载作用下，很容易引起疲劳裂纹的发生和扩展，并最终导致整个结构丧失承载力。因此，焊接钢管桁架节点的疲劳问题应引起桥梁建设和设计者的高度重视。然而，目前对于钢管混凝土拱桥中的钢管混凝土节点和空心管—钢管混凝土管节点的应力集中及其疲劳寿命的研究还很不充分，同时对于钢管混凝土自身的问题对疲劳产生的影响也缺乏研究；目前对管结构的计算方法也不利于疲劳问题的验算，因现有的管结构计算模型依然是将原有结构简化为传统的杆梁体系进行分析，节点接头处的热点应

力和应力集中自然就缺乏必要的设计检算,为结构的疲劳问题埋下隐患。因此,考虑到我国钢管混凝土拱桥的大量建设和管结构的普遍使用,其节点的静力强度和疲劳寿命已成为设计中越来越重要和紧迫的研究课题,但是由于管结构节点的复杂性,受控参数多,研究工作尚需针对不同的工程背景进一步完善和深化。

随着时间的推移,已建成的钢管混凝土拱桥管节点的疲劳问题必将会在桥梁后期的运营中慢慢体现,对于一些建设时间较长的钢管混凝土拱桥,其疲劳损伤甚至已经得到了体现。所以,钢管混凝土拱桥疲劳的研究对我国既有的大量钢管混凝土拱桥进行疲劳验算和安全评估具有重要的理论意义和实用价值。本课题研究拟以钢管混凝土桥管节点的模型试验为基础,结合相应的理论分析,有针对性地对钢管混凝土管节点疲劳强度和寿命预测进行深入研究。

1.2 钢管混凝土管节点研究现状

钢管混凝土管节点是将混凝土填充于空心管中,属于一种特殊的管节点,除具有空心管的特点外,由于其填充了混凝土,增强了节点刚度,因此还具备了很多优于空心管的特性。同时由于空心管节点的研究较为成熟,因此,目前对于钢管混凝土管节点的研究,均是建立在空心管节点的研究基础之上的。

对于空心管结构的研究,从20世纪六七十年代开始,国际上几大机构如国际焊接学会(IIW),美国焊接学会(AWS),欧洲钢结构协会(ECCS)等均进行了大量的试验研究工作,形成了一系列成熟完备的规范,这些规范对空心管结构的疲劳强度及疲劳验算有明确的规定,而针对钢管混凝土管节点的研究还相对较少,更多的是针对具体的工程进行模型试验,以达到校核结构疲劳强度的目的。文献[11]详细介绍了管节点的疲劳问题以及相应的计算和设计理论。文献[12]运用有限元的方法对管节点的疲劳进行模拟分析,通过对该桥管节点所承受的外部循环荷载的统计和初始缺陷的假定,计算得到了其节点疲劳寿命。文献[13-14]对两组钢管混凝土桁架进行疲劳试验,主要考察了焊接接头的疲劳强度及加设连接腋板对接头疲劳强度的提高和疲劳性能的改善。文献[15-18]分别研究了管—管节点,管—板节点,空心管—实心管节点,实心管—板节点,并采用有限元和疲劳试验相结合的方法进行研究,得

到了不同组合下节点的疲劳寿命和裂纹扩展方式,最后基于空心管节点的疲劳强度,修正得到了钢管混凝土管节点的疲劳强度^[15]。

目前,国内的桥梁设计规范对钢管混凝土管结构设计尤其是疲劳验算尚无规定,进行的相关试验研究也还很少,因此,对钢管混凝土管节点疲劳性能的研究资料还非常匮乏。在桥梁焊接钢管节点疲劳试验研究方面,以西南交通大学的研究在国内最具代表性,近些年来,其先后进行了多项富有成效的研究:1998年承担了我国首座采用空间三角形焊接钢管桁架为加劲梁的忠县长江公路大桥管节点的疲劳试验研究;2000年,承担了目前我国最大跨度铁路钢管混凝土拱桥——北盘江铁路大桥的焊接钢管节点疲劳试验研究;2002年,承担了跨度居世界同类桥型之首的巫山长江大桥钢管节点疲劳试验研究;2003年,承担了交通部西部交通建设科技项目“钢管混凝土拱桥设计、施工及养护关键技术研究”的子课题“钢管混凝土节点的力学行为及其疲劳寿命研究”。

由于焊接管节点的几何形状和各种参数对其疲劳性能的影响十分复杂,因此对其进行精确理论分析目前尚有很大难度。现在各国规范中所推荐使用的疲劳强度验算公式,主要是根据典型焊接节点的疲劳破坏试验和理论分析相结合,用数理统计方法得到的。由于各规范在进行管节点试验时的条件和所采用的分析方法不尽相同,导致这些公式之间也存在不少差异,因此,如何参考国外的规范,并结合我国的实际情况,在空心管节点的基础上,开展对钢管混凝土桥管节点的疲劳性能研究,进而对我国既有的大量钢管混凝土桥进行疲劳验算和安全评估就显得非常必要。

而目前的钢管混凝土管节点的疲劳研究工作还存在一些问题和不足,主要表现在以下几个方面:

(1) 钢管混凝土节点与空心管节点的差异。目前空心管的研究较为成熟,不管是试验研究还是理论研究,都形成了较为完整的理论体系,而钢管混凝土的研究则相对滞后,钢管混凝土与空心管有相似性,但也有较大的差异,明确二者的差异,深刻理解钢管混凝土的特点是首要解决的问题。

(2) 钢管混凝土的应力集中系数的问题。空心管在这方面的研究非常详细,有各种类型管节点的应力集中系数计算公式,但钢管混凝土的应力集中系数公式目前还是空白。空心管填充了混凝土之后,应力集中的情况得到了缓解,但缓解的程度是多少,却没有一个量化的指标,是否能将应力集中缓解的程度进行量化,从而得到钢管混凝土管节点的应力集中系数公式,是一个非常值得思考的问题。

(3) 疲劳强度和疲劳寿命的问题。钢管混凝土在应力集中大大缓解的情

况下, 疲劳强度得到了提高, 但提高的程度和倍数, 相比空心管的疲劳强度是否存在某种联系, 通过这种联系修正已有的空心管疲劳强度计算公式, 从而建立起钢管混凝土管节点的疲劳强度计算公式, 是解决钢管混凝土管节点疲劳问题一个很重要的技术手段。

(4) 裂纹扩展和疲劳断裂的问题。以往有过空心管和钢管混凝土裂纹扩展的对比试验, 钢管混凝土裂纹的发生与发展与空心管类似, 二者之间从受力规律上有哪些差异, 起裂点的位置是否能够从力学原理上进行解释。

(5) 钢管混凝土管节点的试验研究。目前钢管混凝土管节点的疲劳试验还是太少了, 虽然有有限元的方法辅助, 但试验是最能反映和说明结构疲劳性能的研究方式, 理论的方法到最后必须通过试验来验证才能证明其有效性和合理性。特别是焊接管节点, 疲劳的影响因素较多, 与焊缝的工艺和焊后处理等有很大关系, 有很多影响因素是有限元模型无法完全真实模拟的。同时, 钢管混凝土管节点在疲劳开裂后裂纹的扩展情况, 是有限元无法模拟的, 其裂纹扩展速率涉及断裂力学的计算参数取值, 只有通过试验数据的整理才能获取, 否则是没有说服力的。有限元方法可以作为一种有效的方法与试验结果相互验证并可以通过试验的情况对模型进行优化和改进, 但不能替代试验研究, 因此, 钢管混凝土管节点的疲劳问题进行试验研究是非常必要的。

(6) 钢管混凝土桥的疲劳寿命评估。目前对钢管混凝土桥的强度校核和寿命评估还没有一个系统的方法和流程, 通过对钢管混凝土管节点这种关键受力节点的研究来推动钢管混凝土桥疲劳寿命研究的进步, 具有重要的实际意义。

1.3 管节点应力集中研究

在管节点疲劳破坏的成因中, 应力集中是导致结构疲劳破坏的一个重要参考因素, 而应力集中系数 (SCF) 则是将这个因素进行具体量化。国内和国际上广泛运用的评价管节点疲劳寿命的方法是 $S-N$ 曲线法^[24]。在 $S-N$ 曲线中, S 表示外加荷载所导致的节点应力幅, N 为外荷载作用于节点所产生的应力循环次数。 S 所代表的应力幅可以是名义应力幅, 也可以是热点应力幅, 而热点应力幅即是名义应力幅乘上节点应力集中系数所得。目前, 工程设计上多以名义应力幅为标准来评价结构的疲劳强度, 但热点应力幅对于研究结构疲劳裂纹开裂和最终寿命预测具有重要意义。因此, 研究钢管混凝土管节点的应

力集中和应力集中系数，对于深入了解和研究钢管混凝土的疲劳开裂和寿命预测具有重要意义。

1.3.1 管节点的应力集中及常用的分析方法

在钢管混凝土桥的管节点中，管管连接形式主要是钢管直接相贯焊接连接，由于焊缝的存在，也使得这些钢管连接成为疲劳研究的重点。常见的管节点连接形式有 T 型、Y 型及 K 型。管节点的连接处，焊缝也处于空间曲面上，因此应力的分布就变得非常复杂，图 1-3 示出了 T 型管节点的应力分布示意图。管管相贯处一般都有很高的应力集中，空心管的应力集中系数高的可达 20 以上。管管相贯处如此高的应力集中必然会严重影响节点的疲劳强度，因此，深入研究管节点的应力分布情况、确定不同类型管节点的应力集中系数对掌握管节点的疲劳寿命有着重要意义。

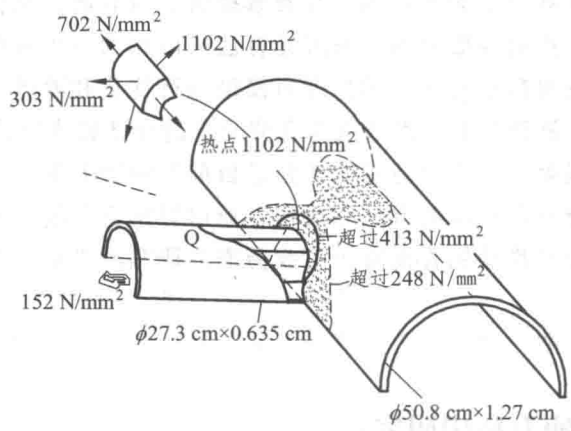
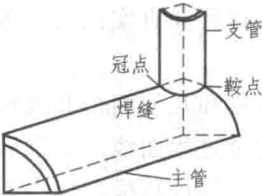


图 1-3 T 型节点的应力分布

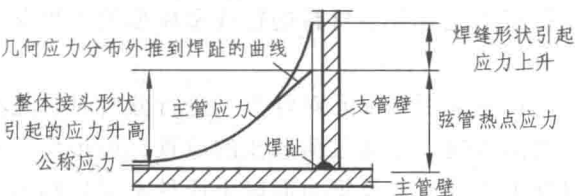
管节点中的应力组成一般有三部分，即名义应力、几何应力和缺口应力。名义应力又被称为公称应力，即是结构在远离截面突变处的均匀应力，可以将结构用传统的杆梁模型计算得到。几何应力是由于在靠近截面突变处由于几何形状的突然改变而导致剧烈变化的应力。缺口应力是由于焊缝缺陷的影响而产生的应力，这种应力受焊缝尺寸的影响较大。三种应力的分布示意图如图 1-4 所示。

在管节点中，荷载的传递是由支管通过主管进行的。由于支管在其轴向刚度远大于沿相贯线处的主管的径向刚度，故支管沿相贯线上的轴向位移，可认为基本上是均匀的，因此可认为主管是支持支管的弹性基础。而主管沿

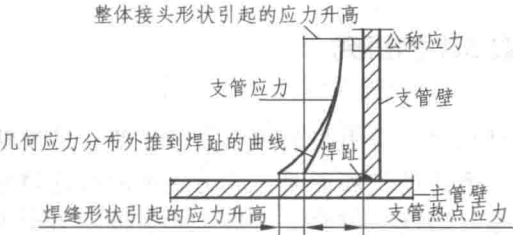
支管轴向的刚度，在沿相贯线一周处是不均匀的，所以主管相贯线上沿支管轴向的反作用力是不同的，在相贯线上，沿支管轴向的刚度愈大，反作用力愈大，每一点上的反作用力可分解成沿主管切向的力和沿主管径向的力；径向的力是导致主管管壁弯曲的主要因素，而切向的力则是导致主管产生中面应力的主要因素，这两种应力叠加后形成了主管在相贯线上的力。



(a) 主管及相贯线焊缝



(b) 主管应力分布图



(c) 支管应力分布图

图 1-4 主管和支管的应力分布图

从 20 世纪 50 年代至今，许多学者对管节点的应力分析进行了研究，提出了很多有价值的方法，主要分为试验研究和有限元分析两大类：

1. 试验研究

试验研究是最常用、最直观也最有效的方法。采用试验方法来研究管节点的应力分布情况，承载能力以及在试验过程中的结构刚度，不仅能获取各种类型管节点的力学性能参数，同时还让研究者可以根据试验结果调整和改进行试验模型，进而对管节点的设计进行优化。目前试验研究的管节点模型一般都采用钢模型。

在模型试验中，模型的大小对试验结果也有一定的影响，模型太小会导致应变测量困难和不准确，焊缝、荷载大小都会因此而改变，因此，小模型需考虑和计算的细节要更多一些，此外，加载装置的设计等问题也需周密考虑。模型试验经常使用的比例为 1:6 至 1:2.5。

2. 有限元分析

对于管节点来说,由于节点类型和结构参数众多,要对各种不同类型和同一类型不同参数的管节点进行试验研究势必耗费巨大的人力物力和财力,因此,利用有限元进行分析就成了一个很好的选择。随着计算机技术的发展和普及,有限元分析已经广泛运用到了工程和科研领域,运用有限元建模,在程序中充分考虑材料的特性和模型的边界条件,可以得到和真实试验同等的效果。

目前采用有限元对管节点进行分析时,充分考虑材料和几何两个非线性因素的影响,并通过荷载步的设置,可得出节点受载的全过程曲线,对钢管混凝土节点,涉及钢与混凝土两种不同材料的力学行为,其计算模型比空心管节点要复杂。

1.3.2 应力集中系数 SCF 的研究

应力集中系数是结构热点应力与公称应力的比值,是反映结构应力集中程度的一个重要参数。大量的试验证明,应力集中的程度与结构的疲劳强度及疲劳寿命有密切联系,因此,研究应力集中并求得应力集中系数对分析结构的疲劳强度和估算疲劳寿命有重要意义。

对于管节点来说,载荷一般是从支管传至主管,而应力由支管传向主管的过程中,由于主管连接处的几何截面发生突变,导致应力也在该处发生突变。试验及理论研究表明,管节点的热点通常在主支管相交处,应力集中系数通常就是热点应力集中系数,热点应力集中系数反映了应力集中的程度,它的大小与管节点材料、几何尺寸、焊接工艺等有关。应力集中系数反映的是管节点本身的特性,与外荷载的大小关系不大。从以往的试验研究来看,空心管节点的应力集中系数可达到 10~15;钢管混凝土节点的应力集中系数则会大大小于这个值,一般为在 2~6。

在管节点的疲劳研究方法中,热点应力法被认为是分析圆管接头疲劳问题较为精确与可靠的方法。这一方法首先由国际焊接协会分委员会 XV-E (IIW1985) 推荐用于所有的空心管接头中。在这些建议中,对不同的接头类型, SCF 值(应力集中系数)取为所连接杆件壁厚比的函数。然后这些 SCF 值可用于桁架腹杆的名义应力幅上以决定热点应力幅,从而从一组应力幅与 N 的曲线中可决定疲劳寿命(即失效循环数), N 为载荷的循环数。

管节点中几何应力最大的点称为热点,相应的最大几何应力称为热点应

力, 用 σ_G 表示, 相应的几何应力集中系数用 SCF_h 表示, 则

$$\sigma_G = SCF_h \sigma_N \quad (1-1)$$

其中, σ_N 为名义应力; σ_N 可由材料力学中梁单元的理论简单计算得到; 而对于管节点热点应力 σ_G 则有不同的说法: Den^[16] 推荐热点应力为“沿着焊缝处的极值应力”, 它“考虑了管节点的几何参数的影响”, 也就是最大主应力值。Van Wingerde 等^[27] 提出的热点应力的定义为“垂直于焊缝的结构应力的外推插值结果”, 这种定义与国际焊接结构 (IIW)^[28] 的疲劳设计原则相一致, 在工程实践中也被大多数设计者和研究者所采用。

从以往的管节点疲劳试验的开裂情况来看, 管节点在发生疲劳破坏时, 表面疲劳裂纹均沿着焊缝处萌生并扩展, 节点中的裂纹模式主要为 I 型裂纹, 即断裂力学中所讲的张开型裂纹, 因此, 垂直于焊缝的应力是这种张开型裂纹的主要驱动力, 热点应力 σ_G 的值可以通过垂直于焊缝的插值得求。

J. A. Packer 等人曾提出两种插值: 线性插值和二次插值^[29]。线性插值一般用于圆管节点^[30], 而国际上对于由试验值进行外插从而推定焊趾端部最大几何应力 σ_G 的试验测试方法也做了相应的规定 (见图 1-5), 支管上测得 A_1 、 B_1 或 A_2 、 B_2 的应力数值后再往焊趾方向直线外插得到支管最大几何应力; 弦管上测得 A_3 、 B_3 的应力数值后再往焊趾方向直线外插得到主管最大几何应力, 测点的布置方式及最小间距均作出了明确规定。

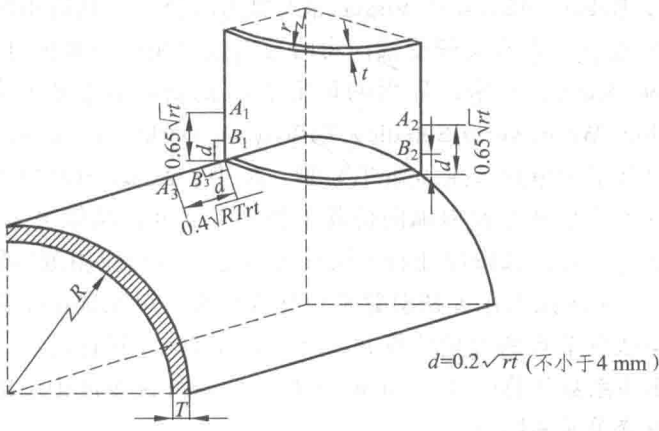


图 1-5 应变片贴片位置图

对于焊接管节点来说, 除最大几何应力外, 由于焊缝的形状或是局部的焊缝几何缺陷, 会导致应力在焊趾处进一步升高, 考虑这一影响的最大应力称之为缺口应力, 又叫局部应力, 通常用 σ_L 表示, 相应的应力集中系数为

SCF_w , 则

$$\sigma_L = SCF_w \sigma_G \quad (1-2)$$

在对管节点进行应力分析的过程中, 更多的时候是选择热点应力而不是缺口应力, 这是因为, 相较于缺口应力, 热点应力显然要更容易准确的测得, 而缺口应力则受到诸多不利因素的影响:

(1) 焊缝的形状、焊接质量及初始缺陷等导致 σ_L 的值变化很大, 而根据大量的试验表明, σ_G 值在邻近焊趾部分是稳定的, 基本上沿垂直焊缝方向是按线性变化的, 所以可以很容易地用直线外插的方法较为准确和方便的测得。

(2) σ_L 取决于焊缝形状和初始缺陷等因素, 用有限元的方法也难以准确的建模, 而 σ_G 则主要取决于管节点的几何形状, 无论建模还是计算都很方便。

(3) 从断裂力学的角度来说, σ_L 只对初始裂纹的萌生有较大影响, 而对裂纹萌生之后的扩展影响较小, 而对裂纹扩展起主要作用, 因此, 更多的时候是将 σ_G 作为主要的研究对象。

由于管节点应力集中系数的重要性, 人们对其进行了深入研究, 20 世纪 70 年代 Kuang 等人提出了管节点的应力集中系数公式, 各船级社如 DNV, LR 等基于各自的试验提出了各种类型管节点的应力集中系数计算公式, 并建立了管节点的疲劳强度校核方法。

目前管节点应力集中系数的计算公式很多, 但 Kuang 之前的公式, 如 Beale-Toprac, Reber, Mitsui 和 Visser 等人提出的公式, 其适用的范围较窄, 仅仅对于 T/Y 型管节点在支管受轴向力时节点应力集中系数的计算, 并且精度也不高; 从 Kuang 开始, 后面的研究者所提出的管节点计算公式, 如 Gibstein, Hellier, Wordsworth-Smedley, Efthymiou-Durkin, 以及 Smedley-Fisher 等人, 不仅包含了简单管节点 (如 T/Y 型、K 型、X 型、TK 型), 而且节点所受外荷载的形式也从平面内轴向荷载扩展到平面外, 从解决工程问题的实用性来看, 这些计算公式较以往有了明显的改进, 因而应用范围较广。

Kuang 公式是采用有限元法对管节点建立模型, 单元选用是薄壁壳单元, 通过对不同参数管节点的大量计算并将计算结果进行回归拟合, 得出简单管节点的应力集中系数计算公式, Kuang 的模型是沿杆件厚度中心的平面模型, 并且忽略了焊缝单元的影响。

文献[35]采用壳单元建立模型, 重点研究 X 型和 DT 型管节点, 通过计算得到了管节点在不同工况下的应力分布以及相应的应力集中系数公式。这些公式可以分别计算出撑杆和弦杆在不同载荷作用下的应力集中系数, 甚至还可以得到热点在相贯线上的位置、角度; 该文献还从断裂力学的角度对有缺