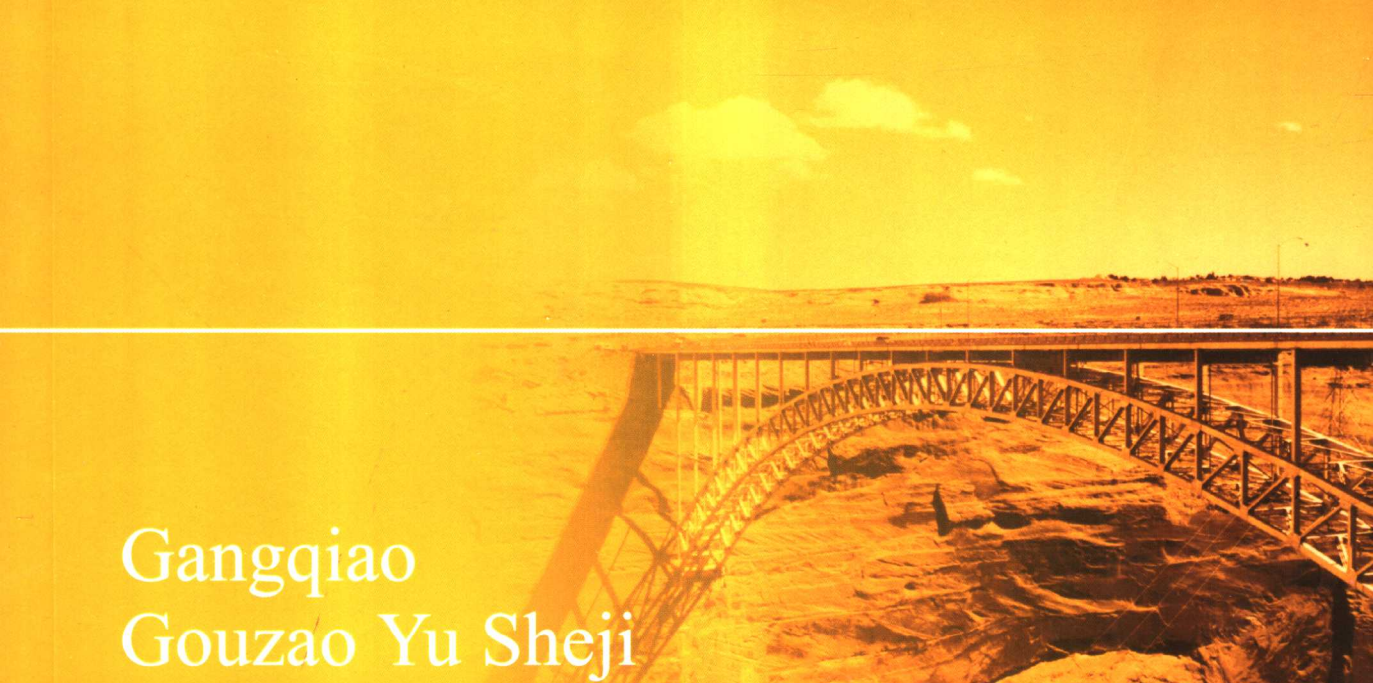




Gangqiao
Gouzao Yu Sheji



高等学校土木工程专业系列教材 —— 桥梁工程

钢桥构造与设计

苏彦江 主编 杨子江 主审



西南交通大学出版社
<http://press.swjtu.edu.cn>



高等学校土木工程专业系列教材——桥梁工程

钢桥构造与设计

苏彦江 主编

杨子江 主审

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 提 要

本书内容主要包括各类钢桥的构造特点、组成部分与功能以及设计计算方法,我国钢桥技术的发展现状,包括新钢材的采用及新的疲劳计算方法等;具体介绍了铁路钢板梁桥、结合梁桥、钢箱梁桥、大跨度及下承式连续钢桁梁桥的构造特点及设计计算方法,同时对钢斜拉桥和悬索桥的构造特点及计算方法也进行了介绍。

本书可作为本科土木专业桥梁工程及铁道工程方向的教材。

图书在版编目(CIP)数据

钢桥构造与设计/苏彦江主编. —成都:西南交通大学出版社, 2006.12
(高等学校土木工程专业系列教材. 桥梁工程)
ISBN 7-81104-358-0

I. 钢... II. 苏... III. ①钢桥—桥梁结构—高等学校—教材②钢桥—桥梁工程—设计—高等学校—教材
IV. U448.36

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第084623号

高等学校土木工程专业系列教材——桥梁工程

钢 桥 构 造 与 设 计

苏彦江 主编

*

责任编辑 刘婷婷

特邀编辑 肖 荣

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 13.25

字数: 327千字 印数: 1—3 000册

2006年12月第1版 2006年12月第1次印刷

ISBN 7-81104-358-0

定价: 19.80元

图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562



前言

本书是根据现有铁路桥梁钢结构设计规范 (TB10002.2—2005) 和公路桥涵钢结构设计规范 (JTJ025—86) 编写而成的。主要介绍了我国现阶段钢桥所用钢材、构造形式及设计计算方法等发展的新成果, 内容以铁路钢桥为主, 同时也兼顾公路钢桥。本书可作为大土木专业桥梁工程及铁道工程方向的本科教材之用。

本书第 1 章介绍了我国钢桥的发展历史及现状、钢材性能及钢桥的疲劳等问题; 第 2 章至第 4 章分别简要介绍了钢板梁桥、结合梁桥及钢箱梁桥的构造特点及设计计算方法; 第 5 章较详细地介绍了下承式简支栓焊钢桁架桥的构造及设计计算方法; 第 6 章简要介绍了连续钢桁架桥的构造特点及设计计算要点; 第 7 章着重对钢斜拉桥的主梁、斜拉索和主塔的锚固构造特点进行介绍; 第 8 章介绍了悬索桥的构造特点及计算方法; 第 9 章简要介绍了钢梁的制造与架设方法。为便于掌握重点, 除第 9 章外, 各章都有本章小节和思考题。同时, 本教材配有相应的多媒体课件。

本书第 1、5 章由苏彦江编写, 第 2、3、4、6 章由刘苗编写, 第 7、8、9 章及附录由丁南宏编写, 苏彦江担任全书主编。全书由杨子江教授主审, 他为本书提出了许多宝贵的修改意见, 在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限, 书中错误在所难免, 恳请读者提出宝贵意见。

编 者

2006 年 11 月

目 录

第 1 章 钢桥概述	1
1.1 我国钢桥的发展概况	1
1.2 钢桥的主要特点及发展展望	2
1.3 钢桥的主要类型	3
1.4 钢桥所用的材料	4
1.5 大跨度钢桥连接的若干问题	7
1.6 大跨度钢桥的疲劳问题	8
思考题	11
第 2 章 钢板梁桥	12
2.1 钢板梁桥的类型及构造特点	12
2.2 上承式焊接板梁桥的设计	14
思考题	28
第 3 章 结合梁桥	29
3.1 结合梁桥的构造特点	29
3.2 结合梁桥的计算特点	30
思考题	37
第 4 章 钢箱梁桥	38
4.1 概 述	38
4.2 钢箱梁的构造特点	40
4.3 钢箱梁结构分析方法概述	43
思考题	46
第 5 章 下承式简支栓焊钢桁架桥	47
5.1 下承式简支栓焊钢桁架桥的组成及作用	47
5.2 主桁的几何图式及基本尺寸	49
5.3 主桁杆件内力计算	52
5.4 主桁杆件的截面设计及验算	71
5.5 主桁节点的设计	85
5.6 桥面系	91
5.7 联结系	106
5.8 钢桁架桥的挠度、上拱度及横向刚度	112
思考题	116

第 6 章 连续钢桁架桥	117
6.1 概述	117
6.2 连续桁架桥的构造特点	120
6.3 连续桁架桥杆件截面尺寸的拟定	124
6.4 连续桁架桥上拱度的设置	141
思考题	144
第 7 章 钢斜拉桥	145
7.1 概述	145
7.2 斜拉桥的组成形式及总体布置	145
7.3 钢斜拉桥的构造特点	150
7.4 斜拉桥的设计构思与计算要求简介	159
7.5 斜拉桥钢主梁悬臂拼装法施工简介	160
思考题	164
第 8 章 大跨度悬索桥	165
8.1 概述	165
8.2 悬索桥的构造特点	167
8.3 悬索桥的设计计算要点	172
思考题	182
第 9 章 钢桥的制造与架设	183
9.1 栓焊钢梁的制造	183
9.2 钢梁架设	187
附 录	196
附表 1 铁路桥梁用钢主要技术条件	196
附表 2 钢桥构件或连接疲劳容许应力幅类别	198
附表 3 铁路标准活载 (中 - 活载) 的换算均布活载 (kN/m, 每线)	203
附表 4 中心受压杆件轴向容许应力折减系数 φ_1	204
附表 5 铁路桥梁钢结构杆件容许长细比	204
附表 6 杆件的计算长度	205
参考文献	206

第1章 钢桥概述

1.1 我国钢桥的发展概况

我国使用金属材料建桥具有悠久的历史,最早的金属桥是用铁制成。如在秦末(公元前206年左右)时期,陕西褒城马道驿寒溪上修建的铁链桥;东汉(公元60年左右)时期在云南景东地区澜沧江上的锻铁悬索桥;公元1676年修建的四川泸定大渡河上的铁索桥等。但真正采用钢材修建桥梁是在1888年,到现在已经有100多年的历史了。

解放前我国钢桥建设的发展极为缓慢,所建的钢桥,跨度都很小,建桥的钢材是进口的,结构是铆接的,采用工艺很简陋。跨度稍大一点的桥梁大都是由外国商人设计和监造的。如1896年建成的哈尔滨松花江桥,钢梁为俄国和比利时制造;1905年修建的京汉线上郑州黄河桥(老桥)为比利时公司承建;1911年修建的陇海线黑石关伊洛河桥(老桥)为法国公司设计和承建。我国技术人员自行建造的具有代表性的钢桥是1937年建成的浙赣铁路钱塘江大桥,为我国著名桥梁专家茅以升负责设计和监督施工,该桥全长1072 m,为公、铁两用桥,正桥为16孔65.86 m简支铆接钢桁梁,为我国历史上由自己工程师设计和监造的第一座双层公、铁两用大桥。

解放初期,我国的钢桥技术得到了发展,主跨大于100 m的铁路钢桥就有十余座。如1956年我国借用苏联的钢材和技术,建成武汉长江大桥,全长1670.4 m,正桥由三联 3×128 m连续铆接钢桁梁组成,材料A3钢,公、铁两用;1968年我国用国产16Mnq钢完全依靠自己的力量建成南京长江大桥,包括引桥在内铁路桥梁全长6772 m,公路桥梁全长4589 m,主桥由一孔128 m的简支钢桁梁和三联 3×160 m的连续铆接钢桁梁组成。1969年修建的成昆线三堆子金沙江桥(主跨192 m)、大渡河桥(主跨144 m)及渡口支线雅砻江大桥(主跨176 m)均为下承式简支铆接钢桁梁。1966年我国铁路钢桥开始部分采用栓焊新技术,广西柳州的浪江桥是我国用16Mnq钢制造的第一孔铁路栓焊钢桁梁桥,跨度为61.44 m。在成昆铁路桥梁修建中,进一步研究并发展了栓焊钢桥新技术,普遍采用国产16Mnq钢,建成了各种不同结构形式的栓焊钢桥44座,这在我国钢桥发展史上是一个很大的进步,为我国钢桥技术发展开创了新纪元。具有代表性的桥有沪沽安宁河大桥、桐模甸2号大桥、拉旧大桥和迎水河大桥等,其主桥均为112 m系杆拱栓焊钢桥。

在成昆铁路修建成功的基础上,1977年用国产高强度新型钢材15MnVN建成密云水库白河桥,为 3×128 m连续栓焊钢桁梁;1982年建的安康汉江桥为176 m斜腿刚构箱形梁桥;1993年用国产高强度新钢材15MnVN厚板建成九江长江公、铁路大桥;2000年又以14MnNbq钢建成芜湖长江公路、铁路钢斜拉桥,主梁为钢桁梁,主跨312 m。

公路钢桥在解放后也获得了较大的发展。如1955年建成的武汉汉水桥,为55 m+88 m+54 m刚性梁柔性拱组合体系;1966年修建的广西东兰红水河桥,为上承式钢桁梁与钢筋混凝土板相结合的结合梁桥,跨度66 m;1966年修建的四川渡口二号桥,为跨度180 m的公路钢

拱桥；1969年修建的四川渡口三号桥为跨度181m的公路钢拱桥；1972年修建的山东北镇黄河桥，主跨112.7m的连续钢桁梁桥；1984年修建的拉萨河达孜悬索桥，主索跨度500m。

改革开放后，公路钢桥的发展更快，桥梁结构形式愈来愈多样化，设计方法更加先进合理，钢材采用高强度钢，如1987年建成东营黄河公路钢斜拉桥，主跨288m；1991年建成南浦公路斜拉桥，主梁采用工字钢组合梁，主跨423m；1993年建成杨浦公路斜拉桥，主梁采用钢-混凝土结合梁，主跨602m；1996年建成长江西陵峡公路悬索桥，主梁为全焊钢箱梁，主跨900m；1997年建成香港青马公路悬索桥，主跨1377m；1999年建成江阴长江公路悬索桥，主跨1385m；2000年建成南京长江公路斜拉桥，主梁为全焊钢箱梁，主跨628m；2002建成的上海卢浦大桥是跨度为550m的中承式钢箱拱桥。

我国现代钢桥技术和国外相比，起步虽然晚了150多年，但建国后吸收、总结了许多建桥经验，发展进步很快。当前，钢桥的设计理论、国产钢材的采用、制造及安装工艺、科研手段已基本达到了国际先进水平。在钢桥的结构形式方面，更多地采用了大跨度悬索桥、斜拉桥及梁-拱组合等结构。具有整体性好、抗扭刚度大的箱形梁结构形式得到了进一步的发展。连接方面逐渐由栓焊向全焊过渡，全焊钢桥的特点是节约钢材、提高疲劳强度、加快工程进度、改善劳动条件。部分钢桥采用正交异性钢桥面板以充分发挥薄板良好的力学性能。计算理论方面逐步由空间计算代替平面计算，特别是由于联合结构的采用，各部件相互约束程度增大，平面计算方法已不再适用。大跨度钢桥使用的设计理论，有容许应力理论和极限强度理论。目前，铁路大跨度钢桥的设计主要采用容许应力理论，而公路大跨度钢桥的设计已经采用极限强度理论。自20世纪80年代开始研究用可靠度理论，预计近年内各设计规范将以可靠度理论为基础。在使用的初期将会采用基于可靠度理论的多系数极限状态设计表达式，分别对承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计。在疲劳可靠度理论设计方面，铁路部门根据我国的实际情况，制定了铁路疲劳荷载谱和疲劳抗力方程，但设计方法目前仍采用容许应力法。

我国公路、铁路要跨越的大江、大河、深谷很多，要建的桥当然也很多，现在的进步只是一个开始。根据客观需要和已具备的人力、物力，今后我国钢桥在设计、建设水平将会有更大幅度提高。

1.2 钢桥的主要特点及发展展望

1.2.1 钢桥的主要特点

由于钢材具有强度高、材质均匀、塑性及韧性良好和可焊性好等诸多优点，因此，用钢材建造的桥梁——钢桥具有如下特点：

(1) 跨越能力大。由于钢材的强度高，在相同的承载能力条件下，与钢筋混凝土桥梁相比，钢桥构件的截面较小，所以钢桥的自重较轻，最适合于建造大跨度的桥梁。

(2) 最适合于工业化制造。钢桥构件一般都是在专业化的工厂由专用设备加工制作，不受季节的限制，加工制造速度快、精度高，质量容易得到控制，因而工业化制造程度高。

(3) 便于运输。由于钢桥构件的自重较轻，特别是在交通不便的山区便于汽车运输。

(4) 安装速度快。钢桥构件便于用悬臂施工法拼装，有成套的设备可用，拼装工艺成熟，

安装速度快，工期短。

(5) 钢桥构件易于修复和更换。

(6) 钢材易锈蚀，故钢桥的养护费用高。

另外，钢桥须防火，在列车通过时噪音大，故不宜在闹市区建造铁路钢桥。

1.2.2 钢桥的发展展望

我国地域辽阔，所建铁路、公路需要跨越大江大河、高山峡谷等不同地域和高原、严寒等不同环境条件。随着我国经济的飞速发展和钢产量的进一步提高，可以预计本世纪我国钢桥在如下几个方面将会有一个更加瞩目的发展：① 桥梁跨度将进一步加大，铁路钢桥的跨度将达 500 m 左右，公路钢桥跨度将达 1 800 m 左右；② 对钢桥的使用功能要求将更加明显，如高速铁路对大跨度钢桥刚度的要求要保证舒适性、桥梁形式与周围景观的协调性、特殊环境（如青藏铁路）对钢材及结构的特殊要求等；③ 桥梁建造费用和寿命周期内维护费用的通盘考虑将会使桥梁设计更加合理；④ 焊接在钢桥制造和施工中所占比例将进一步加大，将由栓焊向全焊过渡；⑤ 新的结构和构造形式将使桥梁结构形式更丰富；⑥ 桥梁设计手段、制造技术、施工管理水平等的更新和提高将会更加保证桥梁的总体质量和使用要求；⑦ 设计理论的更新与科研成果的应用将带动钢桥技术的整体发展。

1.3 钢桥的主要类型

钢桥可以根据不同的条件要求建成多种形式，其种类比其他材料制造的桥梁更多，主要可分为梁式体系、拱式体系及组合体系。

1. 梁式体系

按力学图式分梁式体系又可分为简支梁、连续梁、悬臂梁（见图 1.1）；按主梁的构造形式分有板梁桥、桁梁桥、箱梁桥、结合梁桥。

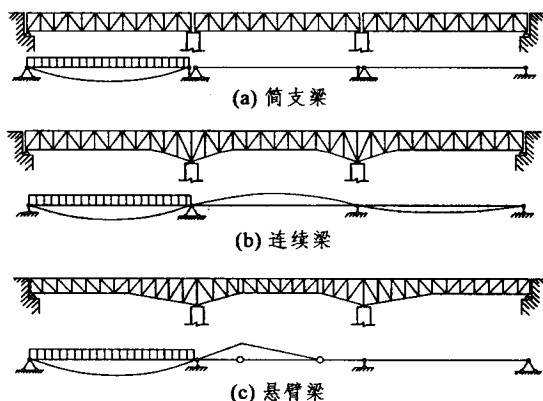


图 1.1 梁式体系

2. 拱式体系

按力学图式分拱式体系可分为有推力拱和无推力拱（见图 1.2）；按拱肋的构造形式分有板式、桁式、箱式。

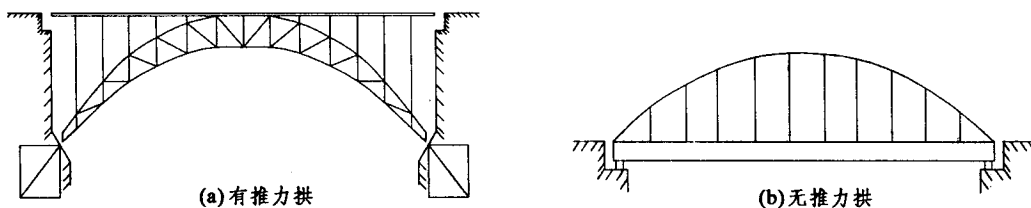


图 1.2 拱式体系

3. 组合体系

这类桥型包括吊桥和斜拉桥（见图 1.3），都是利用高强钢索来承重，吊桥（又称悬索桥）的承重构件是高强度钢索，恒载轻，跨越能力大。斜拉桥的承重构件是斜拉索和梁，其钢梁可以是板式、桁式或箱式，恒载较轻，风动力性能较吊桥好，故发展很快。

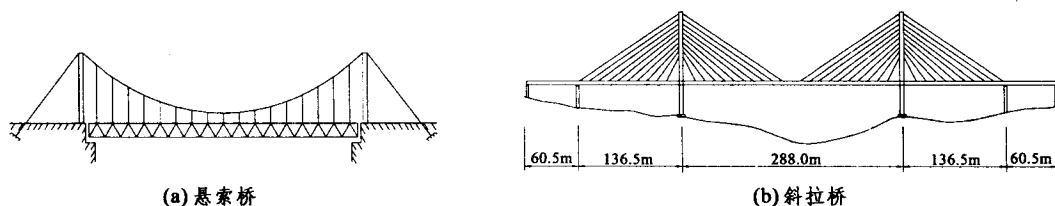


图 1.3 组合体系

1.4 钢桥所用的材料

钢桥主体结构所用的钢材主要是碳素钢和低合金钢。20 世纪 50 年代我国钢桥主要采用普通碳素钢——A3 钢，该钢材由于含碳量较高（0.14%~0.22%），可焊性差，只能进行铆接连接，如武汉长江大桥的主桥采用 A3 钢，该桥为连续铆接钢桁梁。用 A3 钢建造大跨度桥梁时，构件截面尺寸大，从而增加用钢量并使钢桥的自重加大，因此，20 世纪 50 年代后期，我国开始研究在钢桥上采用能够焊接的国产高强度低合金钢——16Mnq 钢和 16Mnq 钢，如南京长江大桥采用 16Mnq，屈服点为 340 MPa，它比用 A3 钢节约钢材约 15%。20 世纪 70 年代，我国又成功研制出强度更高的 15MnVNq 钢，屈服点是 420 MPa，又比用 16Mnq 钢节约钢材 10% 以上。21 世纪初，我国研制出另一种新型的桥梁用钢——14MnNbq 钢，屈服强度为 340 MPa，该钢材的主要特点是可焊接的最大板厚可达 50 mm，已成功用于芜湖长江大桥（公、铁两用钢斜拉桥）上。

为了和国际标准接轨，国家在上述钢材的基础上制定了《桥梁用结构钢》（GB/T714—2000）。新的《桥梁钢结构设计规范》（TB1002.2—2005）（以后简称《桥规》）采用该国标表

示钢号。国标的钢号是以屈服点命名的,如 Q235qD,钢号的第一个字母 Q 为汉语拼音屈服点的首写字母,第二个数字为板厚 16 mm 时的屈服点大小(以 MPa 或 N/mm² 为单位),第三个字 q 为汉语拼音桥梁用钢首写字母,最后一个字母是钢材的等级。国标桥梁结构钢共有四个钢号,它们分别是 Q235q、Q345q、Q370q 和 Q420q。每一个钢号有 A、B、C、D、E 五个等级。新钢号与原钢号对化学成分、冲击韧性的规定均不相同,尤其是冲击韧性。国标规定采用 V 形缺口冲击试验,试件是纵向取样;原《桥规》规定除 14MnNbq 外,其余钢号均采用 U 形缺口冲击试验,试件是横向取样。这两种标准如何对应,需要积累大量的数据。目前根据现有的试验数据和国内外资料,暂时认为 Q235q 相当于过去的 A3 钢和 16q 钢, Q345q 相当于过去的 16Mnq 钢, Q370q 相当于 14MnNbq 钢, Q420q 相当于 15MnVNq 钢。今后还需进一步试验验证。铁路钢桥所用的基本材料详见表 1.1^[2] 所列。书后附录 1 中的附表 1.1 和附表 1.2 分别给出了桥梁用钢的力学性能和化学成分。表 1.2 给出了桥梁用钢设计时所采用的基本容许应力。

表 1.1 铁路钢桥所用的基本材料

名 称		钢材牌号	质量等级	应符合的标准
钢梁主体结构		Q235q	D 级	《桥梁用结构钢》(GB714—2000); 实物交货技术条件见附录 1; Q420qD 仅用于受压非断裂控制部件
		Q345q	D、E 级	
		Q370q	D、E 级	
		Q420q	D、E 级	
钢梁辅助结构		Q235 - B · Z		《碳素结构钢》(GB700)
连接型钢		Q345c		现行《低合金结构钢》(GB1591)
铆 钉		BL2 (铆螺 2) BL3 (铆螺 3)		现行《标准件用碳素热轧圆钢》(GB715)
精制螺栓		BL2 (铆螺 2) BL3 (铆螺 3)		现行《标准件用碳素热轧圆钢》(GB715)
粗制螺栓		BL2 (铆螺 2) BL3 (铆螺 3)		现行《标准件用碳素热轧圆钢》(GB715)
高强度螺栓	螺 栓	20MnTiB (20 锰钛硼)		现行《合金结构钢技术条件》(GB3077)
		35VB (35 钒硼)		现行 GB/T1231 中附录 A
	螺母及垫圈	35、45 15MnVB (15 锰钒硼)		现行《优质碳素结构钢钢号和一般技术条件》(GB699)
铸件 (支座的上、下摆, 摇轴,座板等)		ZG230 - 450 II ZG270 - 500 II		现行《碳素钢铸件分类及技术条件》(GB5676)
销、铰、辊轴		35 号锻钢		现行《优质碳素结构钢钢号和一般技术条件》(GB699)

注:经过试验取得充分依据也可采用符合桥跨结构要求的其他钢材。

表 1.2 钢材基本容许应力

单位: MPa

序号	应力种类	单位	钢 材 牌 号						
			Q235D	Q345qD Q345qE	Q370qD Q370qE	Q420qD Q420qE	ZG230 - 450 II	ZG270 - 500 II	35 号 锻钢
1	轴向应力 $[\sigma]$	MPa	135	200	210	230	—	—	—
2	弯曲应力 $[\sigma_w]$	MPa	140	210	220	240	125	150	220
3	剪应力 $[\tau]$	MPa	80	120	125	140	75	90	110
4	端部承压(磨光顶紧) 应力 $[\sigma_c]$	MPa	200	300	315	345	—	—	—
5	销孔承压应力	MPa	—	—	—	—	—	—	180
6	辊轴(摇轴)与平板 自由接触的径向受压	kN/cm	—	—	—	—	0.55d	0.61d	0.60d
7	铰轴放置在铸钢铰轴 颈上时的径向受压	kN/cm	—	—	—	—	—	—	8.4d

注: 表中符号 d 为辊轴、摇轴或铰轴的直径, 以厘米计。

现代钢桥用材最多的是钢板。用钢材制造成钢桥, 要经过许多机械加工工艺和焊接工艺。制成的钢桥要承受很大的静、动力荷载与冲击荷载, 因此被选作造桥的钢材, 既要能适应制造工艺要求, 又要满足使用要求。为了满足这些要求, 对钢的化学成分、力学性能(包括强度、塑性、韧性及疲劳性能等)和工艺性能(包括冷弯性能和可焊性)都有严格的规定。

钢桥在使用时, 不仅要求钢材具有较高的强度, 而且还要求具有良好的塑性; 对低温下工作的钢桥, 要求钢材具有良好的低温冲击韧性; 对于焊接钢桥, 要求钢材具有可焊性。塑性是钢结构的安全性指标, 因为在桥梁结构的局部应力集中处或存在焊接残余应力的地方, 应力值可能超过屈服点, 塑性好的钢材可以通过塑性变形使应力重新分布, 避免结构的局部破坏而导致整个结构的失效。韧性不好的钢材, 在低温或快速加载等不利的条件下, 容易使钢材发生脆性断裂。因此, 常用低温冲击韧性来判断钢材的脆性断裂倾向。钢材随着使用年限的延长, 会发生老化、韧性下降, 为此, 还要有时效冲击韧性要求。现代钢桥所用的钢材, 还必须具有良好的可焊性, 通过一定的焊接工艺能形成优质的焊接接头。

钢桥是主要承受动荷载的结构, 钢材的抗疲劳性能对于桥梁十分重要。钢桥承受的动荷载大小虽低于结构的名义承载能力, 但由于结构中有微小的缺陷或应力集中, 易产生塑性变形, 从而萌生裂纹, 随着外力循环次数的增加, 微小的裂纹会逐渐扩展, 最后导致钢桥的疲劳断裂。在结构上出现可以看得见的裂纹时的荷载循环次数称为结构的疲劳寿命。影响结构疲劳寿命的因素除材料的韧性外, 还与材料的化学成分、强度、结构的构造细节、荷载类型、板厚及工作环境等有关。

冷弯性能是钢材承受弯曲变形的能力, 并能显示钢板中是否有缺陷、有无夹渣或分层。它既是一项工艺指标, 也是一项质量指标, 冷弯性能好的材料有利于制造。

1.5 大跨度钢桥连接的若干问题

大跨度钢桥根据运输条件和工地起重能力分为若干组单元，工厂制造的焊接单元运送到工地后用高强度螺栓组装成整体。随着焊接技术的发展，钢桥焊接的部分会越来越多。特别是近 10 年来，钢桥整体节点的出现使得焊接不但用于构件组成，而且用于构件的连接，从而节省了钢材用量、缩短了工期，并使结构整体质量更加易于保障。例如，京九铁路的孙口黄河大桥，正桥 4×108 m 无竖杆三角形双线钢桁梁首次采用了整体节点及节点外拼接新技术，杆件为箱形截面，在工厂焊接制造成节段，采用整体节点使高强度螺栓节省 30%，钢材节省 4%。芜湖长江大桥主桥也普遍采用了整体节点。同时，在秦沈客运专线上实现了钢桥现场的全断面焊接，为铁路钢桥的现场断面焊接打下了良好的基础。

钢桥的焊接方法有埋弧自动焊、半自动焊和手工焊。每一种焊接方法根据所用材料、焊缝形式的不同而采用不同的焊条型号或焊丝，具体见表 1.3 所列，其焊接性能应与基材相匹配。选用的焊接材料、焊接工艺，均应根据设计要求通过焊接工艺评定。为提高焊缝的韧性，焊丝的碳（C）、硫（S）、磷（P）含量均取下限。由于大跨度钢桥部件一般都很大，焊后不再进行热处理来消除焊接应力。

表 1.3 钢桥钢材焊接所用的焊条及焊剂

钢 号	埋弧自动焊或半自动焊		手工焊	线 能 量 (kJ/cm)
	焊 丝	焊 剂		
Q345q (热轧钢)	H08MnA、H08A(坡口对接或箱形角接) H08A(不开坡口对接或角接)	HJ431	T-50-2 焊条	40 000
Q370q (正火钢)	H08Mn2E 焊丝或 H08MnE 焊丝 (对接、角接、棱角焊)	SJ01Q	SHJ507Ni 焊条	32 000 ~ 36 000
Q420q (正火钢)	H08MnMoA 焊丝	HJ350	T-557MoV 焊条	

焊接接头的质量是保证大型钢桥安全的基础。钢桥的焊缝往往存在初始缺陷并处于应力集中的位置，因而是结构的薄弱环节。近年来，我国钢桥的防断裂设计采用 V 形缺口冲击值来确定韧性指标，同时将焊缝的韧性值与基材的韧性值匹配考虑，从而使桥梁结构的整体力学性能达到最优。现行《桥规》所要求的 Q345q、Q370q、Q420q 钢焊接接头冲击韧性质量标准见表 1.4 所列。

表 1.4 焊接接头冲击韧性

钢 材 牌 号		Q345q		Q370q		Q420q	
质 量 等 级		D	E	D	E	D	E
试 验 温 度 (°C)		- 20	- 40	- 20	- 40	- 20	- 40
冲击 韧性 (J)	整体节点的焊接接头	34		41		47	
	散装节点垂直于应力方向的熔透 对接焊、T 形角焊、棱角焊焊接接头	34		41		47	
	散装节点顺应力方向未熔透的 T 形角焊、棱角焊焊接接头	29		35		40	

对焊缝的强度要求是：对接焊缝的屈服强度、极限强度均不低于基材标准，并不超过基材标准 100 MPa；角接焊缝屈服强度、极限强度不低于基材标准，并不超过基材标准 120 MPa。对焊缝的伸长率要求是：板厚为 6~16 mm 时， $\delta_s \geq 20\%$ ；板厚为 17~50 mm 时， $\delta_s \geq 19\%$ 。对焊缝的冷弯性能要求是：对接焊冷弯 180° 不开裂，角接焊按国标 0 级要求；对接接头的时效拉伸（10%）冲击功不低于基材标准。

工厂制造好的钢桥构件或组装单元运送到工地后，通常用抗滑型高强度螺栓连接。高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈应符合现行国家标准 GB/T1228—1231 的规定。高强度螺栓的安装常用扭矩法拧紧工艺，连接部位的钢板表面要喷涂抗滑材料，抗滑移系数根据表面处理通过试验确定。如当板面除锈后采用热喷铝涂层时，抗滑移系数可取 0.45。高强度螺栓常采用 10.9 级，常用型号为 M22、M24、M27 和 M30 四种，它们的预拉力设计值分别为 200 kN、240 kN、290 kN 和 360 kN。在抗滑型高强度螺栓连接中，每个高强度螺栓的容许抗滑承载力应按式计算：

$$N_v^b = m\mu_0 P/K \quad (1.1)$$

式中 m ——高强度螺栓连接处的抗滑面数；

μ_0 ——高强度螺栓连接的钢材表面抗滑移系数；

P ——高强度螺栓的设计预拉力；

K ——安全系数，取 1.7。

大跨度钢桥由于荷载大，连接螺栓数多，因而栓接接头的排数很多，多排螺栓顺受力方向力的分布不均匀，两端大，中间较小，成马鞍形。经试验研究表明，当螺栓排数超过 6 排时，即使排数再增加，第 1 排螺栓承受的力总要占到外力的 30% 左右。当该值大于第 1 排螺栓的抗滑移极限时，即由螺栓群的端（末）排向中间各排螺栓进行力的重分布，即出现所谓“解扣滑移”现象，引起构件板层间接触面的磨损，直接影响抗滑移系数，同时预紧力也受到一定的损失。为安全，该排螺栓不宜计入有效数量中，而应另行增补。因此对长大螺栓节点设计有以下要求：顺轴力方向的双抗滑面连接的螺栓排数超过 6 排或单抗滑面连接的螺栓排数超过 4 排时，第 1 排螺栓的抗滑极限强度不得小于活载作用力的 30%，即：

$$0.3S_L < n\mu_0 P \quad (1.2)$$

式中 S_L ——螺栓接头在活载（包括冲击）作用下的轴向力；

n ——第 1 排螺栓总数。

否则应采用调整措施，以免板层发生滑移而导致疲劳破坏。

1.6 大跨度钢桥的疲劳问题

作用在大跨度钢桥上的动荷载使钢桥结构中的应力反复变化，这种反复变化的应力（通常称为疲劳应力）会使钢桥结构在应力集中处或存在缺陷处的局部产生微小裂纹并使裂纹发生扩展，最终导致疲劳破坏。钢桥中易发生疲劳裂纹的部位包括钢桁梁主桁杆件栓接接头处、桥面系纵梁竖向加劲肋角焊缝下端焊趾处、钢板梁主梁变截面盖板端部焊缝处、主梁变截面附近竖向加劲肋角焊缝下端焊趾处以及平纵联节点板与竖向加劲肋或腹板连接焊缝处等。铁

路桥梁由于活载所占比例较大, 疲劳问题更为突出。

研究钢桥的疲劳问题, 离不开疲劳试验, 通过疲劳试验可以获得钢材或构件在给定应力水平下发生疲劳破坏时的应力循环次数 (通常称为疲劳寿命), 也可以得到钢材或构件在给定应力循环次数下的疲劳极限。疲劳极限与疲劳寿命之间的关系曲线称为疲劳 $S-N$ 曲线, 如图 1.4 所示。

疲劳 $S-N$ 曲线通常用幂函数方程

$$NS^m = C \quad (1.3)$$

的形式来表达。式中 m 、 C 为方程参数, 可由疲劳试验点 (S_i, N_i) ($i=1, 2, \dots, n$) 进行拟合得到。

上述 $S-N$ 曲线方程是在等幅应力下得到的, 而实际作用在钢桥上的应力并不是等幅应力, 而是变幅应力, 这时可将变幅应力化为等效的等幅应力, 然后利用上述 $S-N$ 曲线方程进行疲劳分析。

另外, 应该注意到, 由于材料疲劳性能的分散性, 相同的一批试件即使在同一应力水平下其疲劳寿命也是不同的, 说明疲劳寿命实际上是一个随机变量。因此, 为了反映 $S-N$ 曲线的概率机制, 必须在不同的应力水平下分别采用一组试件测定相应的疲劳寿命, 得出疲劳寿命的概率统计分布规律, 求得指定概率 p 下的疲劳寿命 N_p , 这样就得到概率疲劳 $S-N$ 曲线, 通常称为 $p-S-N$ 曲线 (见图 1.5)。 $p-S-N$ 曲线的方程为:

$$NS^{m_p} = C_p \quad (1.4)$$

式中, m_p 、 C_p 为给定可靠度 p 时的方程参数, 有了材料或构件的 $p-S-N$ 曲线, 就可以进行钢桥的疲劳可靠性分析, 预测钢桥的概率疲劳寿命。

研究结果表明, 影响焊接钢桥疲劳强度的外因是疲劳应力幅, 因此, 钢桥的疲劳验算原则是对焊接结构受拉或以拉为主的构件及构造细节, 疲劳按应力幅控制设计; 以压为主的构件及构造细节, 疲劳按最大应力控制设计; 对非焊接结构受拉构件也按应力幅作疲劳验算; 拉压构件按最大应力作疲劳验算。我国在解放后历次的建桥过程中, 做了近 40 多组的各种类型的疲劳试验, 对这些数据经过分析, 整理出了我国自己的疲劳抗力方程 12 个, 分别对应于 12 个疲劳容许应力幅类别, 见表 1.5, 相应的构件及连接形式类别见附录中附表 2 所示。

《桥规》中的疲劳检算公式如下:

(1) 焊接及连接的疲劳检算公式:

拉-拉循环 ($\rho > 0$) 和拉-压循环以拉为主 ($-1 < \rho < 0$):

$$\gamma_d \gamma_n (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \leq \gamma_t [\Delta \sigma] \quad (1.5)$$

拉-压循环以压为主 ($\rho < -1$):

$$\gamma_d \gamma_n' \sigma_{\max} \leq \gamma_t \gamma_p [\Delta \sigma] \quad (1.6)$$

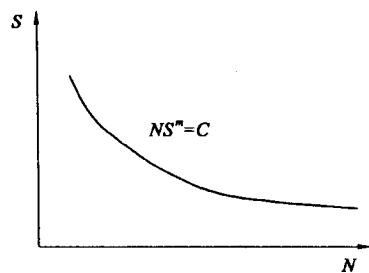


图 1.4 疲劳 $S-N$ 曲线

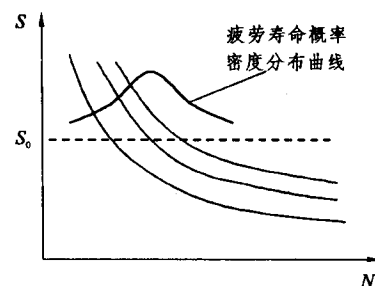


图 1.5 $p-S-N$ 曲线

表 1.5 各种构件及连接的疲劳容许应力幅

疲劳容许应力幅类别	疲劳容许应力幅 $[\Delta\sigma]$ (MPa)	构件及连接形式 (参见附表 2)
I	149.5	1
II	121.7	5.1 5.2 5.3
III	130.7	4.2
IV	110.3	6.1 6.2 6.3 7.1 7.2
V	109.6	4.1
VI	114.0	2
VII	99.9	8 9
VIII	91.1	3
IX	71.9	10 12
X	72.9	11.1
XI	60.2	11.2
XII	80.6	13

(2) 非焊接及连接的疲劳检算公式:

拉 - 拉循环 ($\rho > 0$):

$$\gamma_d \gamma_n (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \leq \gamma_t [\Delta\sigma] \quad (1.7)$$

拉 - 压循环 ($\rho < 0$) (包括以拉为主、以压为主):

$$\gamma_d \gamma'_n \sigma_{\max} \leq \gamma_t \gamma_p [\Delta\sigma] \quad (1.8)$$

式中, $\rho = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$, $\sigma_{\max}$ 及 $\sigma_{\min}$ 的意义如图 1.6 所示,

以拉为正, 以压为负。 γ_d 、 γ_n 、 γ_p 为双线修正系数、损伤修正系数及应力比修正系数, 取值分别见表 1.6、表 1.7 及表 1.8 所示。

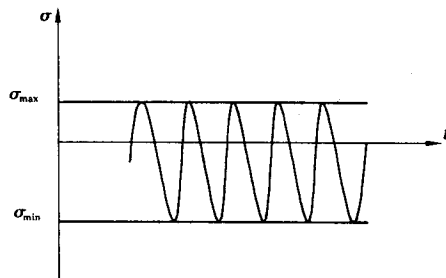


图 1.6 疲劳应力循环

表 1.6 钢梁双线修正系数 γ_d

δ_1/δ_2	3/7	4/8	5/9
γ_d	1.13	1.16	1.19

注: δ_1/δ_2 为一线作用下, 按杠杆原理计算两片主桁或主梁各自承受的荷载比。

表 1.7 损伤修正系数 γ_n 、 γ'_n

跨度	γ_n	γ'_n		
		恒:活 (2:8)	恒:活 (3:7)	恒:活 (4:6)
>20	1.00	1.00	1.00	1.00
16	1.10	1.08	1.07	1.06
12	1.15	1.12	1.11	1.09
8	1.30	1.24	1.21	1.18
5	1.45	1.36	1.32	1.27
4	1.50	1.40	1.35	1.30

表 1.8 应力比修正系数 γ_ρ

ρ	-1.8	-1.6	-1.4	-1.2	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2
焊接构件 γ_ρ	0.38	0.41	0.43	0.46	—	—	—	—	—
非焊接构件 γ_ρ	0.45	0.48	0.52	0.56	0.60	0.65	0.71	0.79	0.88

γ_t 为板厚修正系数, 当板厚 $t \leq 25$ mm 时, $\gamma_t = 1$; 当板厚 $t > 25$ mm 时, $\gamma_t = \sqrt[4]{\frac{25}{t}}$; $[\Delta\sigma]$

为常幅疲劳容许应力幅, 参见表 1.5。

关于公路钢桥中疲劳检算方法参看相关规范^[3]。

本章小结

(1) 我国钢桥的建设已有 100 多年的历史。目前, 我国的钢桥技术在钢桥材料的开发利用、设计理论、设计手段和施工、制造水平等方面有了很大的提高, 结构形式多样化、桥梁规模大型化、部分钢桥连接全焊化, 无论是跨度还是设计、制造技术都正在迅速向世界水平接近。

(2) 钢桥的主要特点是跨越能力大, 自重轻, 最适合于工业化制造, 安装速度快, 工期短且易于修复, 但钢桥的养护费用高。

(3) 目前, 我国的桥梁用钢系列按屈服强度已形成四级, 分别是 Q235q 钢、Q345q 钢、Q370q 钢、Q420q 钢。

(4) 对桥梁用钢, 既要满足制造工艺要求, 又要满足使用要求。因此, 对钢的化学成分、力学性能 (包括强度、塑性、冲击韧性及疲劳性能等) 和工艺性能 (包括冷弯性能和可焊性) 都有严格的规定。

(5) 大跨度钢桥的连接方法有焊接和高强度螺栓连接。焊接时根据所用材料、焊缝形式的不同应采用不同的焊条型号或焊丝, 严格执行焊接接头质量标准, 确保焊缝的韧性。高强度螺栓连接采用 10.9 级的抗滑型高强度螺栓, 连接部位的钢板表面要进行特殊处理以保证抗滑性。当螺栓排数超过 6 排 (双抗滑面连接) 或 4 排 (单抗滑面连接) 时, 要验算第 1 排螺栓的抗滑极限强度。

(6) 随着铁路、公路运输向高速、重载方向的发展, 大跨度钢桥的疲劳问题愈来愈突出, 疲劳破坏常发生在钢桥结构的应力集中处或存在缺陷处, 产生微小裂纹并在反复荷载的作用下发生扩展, 最终导致疲劳破坏。因此, 应对钢桥进行抗疲劳设计, 并积极探索提高构造细节疲劳强度的措施。

思考题

1. 简述钢桥的主要特点。
2. 钢桥的主要类型有哪些?
3. 钢桥所用的钢材主要有哪些? 对其工作性能有何要求?
4. 通过网络查找有关我国钢桥发展现状的文献, 了解我国钢桥技术在哪些方面取得了进展?