

ADB 610

钢疲劳裂纹扩展可靠性

ADB 610 GANG

PILAO LIEWEN KUOZHAN KEKAOXING



◎张天会 果霖 张永华 著

云南出版集团公司
云南科技出版社

ADB 610

钢疲劳裂纹扩展可靠性

ADB 610 GANG

PILAO LIEWEN KUOZHAN KEKAOXING

©张天会 果霖 张永华 著

常州大学图书馆
藏书章

云南出版集团公司
云南科技出版社
· 昆明 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

ADB610 钢疲劳裂纹扩展可靠性 / 张天会, 果霖, 张永华著. —昆明: 云南科技出版社, 2016. 9
ISBN 978-7-5587-0106-1

I. ①A… II. ①张… ②果… ③张… III. ①钢-疲劳断裂-研究 IV. ①TG142

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 232915 号

责任编辑: 胡凤丽

罗璇

杨钊

封面设计: 晓晴

责任印制: 翟苑

责任校对: 叶水金

云南出版集团公司

云南科技出版社出版发行

(昆明市环城西路 609 号云南新闻出版大楼 邮政编码: 650034)

北京建宏印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 13.5 字数: 362 千字

2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

定价: 27.00 元

前 言

从对结构件金属材料的应用趋势看,合金结构钢以其量大、面广、性能优良、价格便宜,具有优良的综合使用性能,广泛应用在航空、航天、电力、舰船和精密仪器等领域。近年来,随着设备向高速重载大型化发展,其服役条件也越来越恶劣,使重大疲劳失效事故层出不穷。合金结构钢的发展方向将越来越注重提高其使用的可靠性和经济性,即在满足结构强度要求的前提下提高安全性和寿命。

实践表明即使在严格控制的试验条件下,疲劳裂纹扩展也表现出不确定性,需要用概率统计相关知识来研究疲劳裂纹扩展的不确定性。

ADB610 钢是鞍钢开发的新型低碳贝氏体钢,抗拉强度为 600 级,通过降低碳含量,采用微量合金化技术和控轧控冷技术生产,通过固溶强化、细晶强化等作用,以获得细小的低碳贝氏体,具有优良的低温冲击韧性和焊接性,已经替代同级别进口钢大量应用于金属结构中。

本书针对新型低碳贝氏体 ADB610 钢,分析研究其常规力学性能和疲劳裂纹扩展及可靠性,为 ADB610 钢结构的疲劳裂纹扩展寿命计算、抗断裂设计和安全评定提供依据。各章主要内容涉及:

(1) 对不同板厚的 ADB610 钢进行拉伸和冲击韧性试验,通过分布拟合检验,发现总体上各种板厚下的抗拉强度、屈服强度和冲击韧性较好地服从正态分布,且不同板厚之间强度和冲击韧性的均值之间有一定的差异,也发现时效处理对冲击韧性的影响不显著。

(2) 介绍了疲劳裂纹扩展的基本形式、疲劳裂纹扩展速率定义、影响疲劳裂纹扩展速率的因素、常用的 $a-N$ 曲线拟合和疲劳裂纹扩展速率表达式;并对 ADB610 钢进行不同情况下的多试样疲劳裂纹扩展试验。

(3) 对采用恒幅加载方式下、在不同加载载荷和不同应力比下进行的 ADB610 钢的 7 组疲劳裂纹扩展试验结果,分别采用一次七点拟合法拟合出每个试样基于 Paris 公式的疲劳裂纹扩展速率表达式和均值疲劳裂纹扩展速率表达式。对采用降载加载方式的 ADB610 钢疲劳裂纹扩展试验结果,分别采用一次七点拟合法和割线法拟合出每个试样基于 Paris 公式的疲劳裂纹扩展速率表达式和均值疲劳裂纹扩展速率表达式,且通过统计假设检验发现两种方法计算的结果没有显著性差异,但采用一次七点拟合法相对安全可靠。

(4) 对采用恒幅加载方式下、在不同加载载荷和不同应力比下进行的 ADB610 钢的 7 组疲劳裂纹扩展试验结果,分别采用两次七点拟合法计算出每组试样在同一裂纹长度下的疲劳裂纹扩展速率,以及在 50%、90%、95%、99% 和 99.9% 存活率下的疲劳

裂纹扩展速率和基于 Paris 公式的疲劳裂纹扩展速率表达式；且通过分布拟合检验，发现在相同裂纹长度下，疲劳裂纹扩展寿命和疲劳裂纹扩展速率都服从正态分布、对数正态分布、威布尔两参数和威布尔三参数，但威布尔三参数为最佳分布类型，其次为对数正态分布。对采用降载加载方式的 ADB610 钢疲劳裂纹扩展试验结果，根据一次七点拟合法拟合的每个试样的 Paris 公式，然后取一系列的，带入每个试样的 Paris 公式，分别计算一系列相同下每个试样的疲劳裂纹扩展速率，以及存活率为 50%、90%、95%、99% 和 99.9% 下的疲劳裂纹扩展速率和基于 Paris 公式的疲劳裂纹扩展速率表达式。

(5) 通过直观分析和统计对比分析了加载载荷对 ADB610 钢疲劳裂纹扩展及可靠性的影响，发现恒幅加载方式下、不同考虑存活率时，在疲劳裂纹扩展的中前阶段，总体上加载载荷对疲劳裂纹扩展的影响不很明显。但在疲劳裂纹扩展的中后阶段，随着疲劳裂纹的扩展，加载载荷对疲劳裂纹扩展速率的影响逐渐变大，加载载荷小的疲劳裂纹扩展速率更大。在降载加载方式下，在相同下，初始加载载荷对 ADB610 钢疲劳裂纹扩展有影响，初始加载载荷小的疲劳裂纹扩展速率比初始载荷差大的大；不同加载载荷下的曲线变化趋势一致，起始点都在右端，结束点在左端；且加载载荷大的起始点靠右，加载载荷小的结束点靠左。

(6) 采用直观分析和统计对比分析了应力比对 ADB610 钢疲劳裂纹扩展及可靠性的影响，发现：应力比对 ADB610 钢疲劳寿命和疲劳裂纹扩展速率的影响明显，随着应力比的增加，在相同裂纹长度下，疲劳寿命逐渐增大，但疲劳裂纹扩展速率基本上是逐渐减小的；在相同下，应力比对 ADB610 钢疲劳裂纹扩展速率影响的规律性不是非常明显，但总体上，在相同应力强度因子范围下，随着应力比的增加，疲劳裂纹扩展速率基本上是逐渐增大的。但当应力比较大时，应力比对疲劳裂纹扩展速率的影响不明显。应力比对 Paris 公式中参数 $\lg C$ 和 m 的差异显著，对于参数 $\lg C$ ，应力比越大， $\lg C$ 参数的值越小；对于参数 m ，应力比越大，参数 m 的值越大。对影响疲劳裂纹扩展性能的因素进行分析时，应采用两次七点拟合方法，直接根据原始数据进行分析，得到的结论更为准确。

(7) 对不同加载方式下 ADB610 钢疲劳裂纹扩展进行分析，发现采用增 K 法和采用降 K 法进行试验时，两者的变化方向相反，表征了疲劳裂纹扩展的不同阶段，采用增 K 法进行的疲劳裂纹扩展试验，随着疲劳裂纹的扩展，最后进入快速扩展区；而采用降 K 法进行疲劳裂纹扩展试验，随着疲劳裂纹的扩展，最后进入近门槛区。

本书由云南农业大学张天会、果霖和张永华合著，另云南农业大学硕士研究生王强和朱加繁参与部分图的绘制工作。在本书撰写过程中，特别感谢博士生导师昆明理工大学徐人平教授提出的宝贵建议及苏霞和王神洲两位同学的帮助。

由于作者水平有限，缺点和错误在所难免，真诚欢迎广大读者不吝赐教！

作者

2016 年 5 月

目 录

前 言	(1)
第一章 常规力学性能可靠性分析	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 ADB610 钢板化学成分	(1)
1.3 ADB610 钢板拉伸与冲击试验	(4)
1.4 ADB610 钢板力学性能统计分布模型分析	(8)
1.4.1 统计分布模型及检验	(8)
1.4.2 抗拉强度统计分布模型	(12)
1.4.3 屈服强度统计分布模型	(14)
1.4.4 冲击韧性统计分布模型	(15)
1.5 ADB610 钢板力学性能统计对比分析	(18)
1.5.1 F 检验和 t 检验原理	(18)
1.5.2 不同板厚 ADB610 钢板抗拉强度对比分析	(20)
1.5.3 不同板厚 ADB610 钢板屈服强度对比分析	(22)
1.5.4 不同板厚 ADB610 钢板冲击韧性对比分析	(23)
1.5.5 时效处理对 ADB610 钢板冲击韧性的影响	(26)
1.6 小结	(27)
第二章 ADB610 钢疲劳裂纹扩展及试验	(29)
2.1 引言	(29)
2.2 疲劳裂纹扩展速率	(30)
2.3 常用的 $a - N$ 曲线拟合法和 da/dN 表达式	(31)
2.3.1 常用的 $a - N$ 曲线拟合法	(31)
2.3.2 常用的 da/dN 表达式	(32)
2.4 ADB610 钢疲劳裂纹扩展试验	(34)
2.4.1 试验材料	(34)
2.4.2 试样	(35)
2.4.3 相关术语定义	(36)

2.4.4 相关符号说明	(38)
2.4.5 试验设备及试验条件	(38)
2.4.6 试验结果	(40)
2.5 小结	(53)
第三章 ADB610 钢疲劳裂纹扩展	(55)
3.1 引言	(55)
3.2 一次七点拟合法拟合 Paris 公式的基本原理	(56)
3.3 恒幅加载疲劳裂纹扩展	(57)
3.3.1 应力比 0.1 的疲劳裂纹扩展	(57)
3.3.2 应力比 0.2 的疲劳裂纹扩展	(64)
3.3.3 应力比 0.3 的疲劳裂纹扩展	(66)
3.3.4 应力比 0.4 的疲劳裂纹扩展	(68)
3.3.5 应力比 0.5 的疲劳裂纹扩展	(71)
3.4 降 K 加载疲劳裂纹扩展	(73)
3.4.1 最大载荷 15kN 的疲劳裂纹扩展	(73)
3.4.2 最大载荷 22.5kN 的疲劳裂纹扩展	(74)
3.5 小结	(81)
第四章 ADB610 钢概率疲劳裂纹扩展	(82)
4.1 引言	(82)
4.2 考虑概率疲劳裂纹扩展速率表达式的研究方法	(83)
4.3 基于两次七点拟合法概率疲劳裂纹扩展	(84)
4.3.1 一次七点拟合计算相同裂纹长度下多试样 da/dN 的局限	(84)
4.3.2 两次七点拟合法计算 $a - da/dN$ 基本思路	(85)
4.3.3 两次七点拟合计算 $P - a - da/dN$ 基本思路	(86)
4.3.4 两次七点拟合法计算 $P - a - da/dN$ 实例	(87)
4.4 疲劳裂纹扩展寿命统计分布模型研究	(89)
4.5 疲劳裂纹扩展速率统计分布模型研究	(90)
4.6 恒幅加载概率疲劳裂纹扩展	(92)
4.6.1 应力比 0.1 的概率疲劳裂纹扩展	(92)
4.6.2 应力比 0.2 的概率疲劳裂纹扩展	(101)
4.6.3 应力比 0.3 的概率疲劳裂纹扩展	(104)
4.6.4 应力比 0.4 的概率疲劳裂纹扩展	(107)
4.6.5 应力比 0.5 的概率疲劳裂纹扩展	(110)

4.7 降 K 加载概率疲劳裂纹扩展	(113)
4.8 小结	(116)
第五章 加载载荷对疲劳裂纹扩展的影响	(117)
5.1 引言	(117)
5.2 恒幅加载载荷下载荷对疲劳裂纹扩展的影响	(117)
5.2.1 不考虑概率时加载载荷对疲劳裂纹扩展的影响	(117)
5.2.2 加载载荷对概率疲劳裂纹扩展的影响	(121)
5.3 降 K 加载载荷下载荷对疲劳裂纹扩展的影响	(130)
5.4 小结	(132)
第六章 应力比对疲劳裂纹扩展的影响	(133)
6.1 引言	(133)
6.2 直观分析	(134)
6.3 应力比对疲劳寿命的影响	(135)
6.4 基于两次七点拟合法应力比对 da/dN 的影响	(135)
6.4.1 相同裂纹长度下 da/dN 的变化规律	(135)
6.4.2 相同 ΔK 下 da/dN 的变化规律	(138)
6.4.3 相同裂纹长度下 da/dN 的统计对比分析	(142)
6.4.4 ΔK 对 da/dN 的统计对比分析	(144)
6.5 Paris 公式的对比分析	(147)
6.6 两种计算方法的差异	(150)
6.7 小结	(150)
第七章 加载方法对疲劳裂纹扩展的影响	(152)
7.1 引言	(152)
7.2 初始加载载荷相同时对疲劳裂纹扩展的影响	(152)
7.3 初始加载载荷不同时对疲劳裂纹扩展的影响	(153)
7.4 小结	(157)
参考文献	(158)
附录 A	(165)
附录 B	(175)

第一章 常规力学性能可靠性分析

1.1 引言

一般说来，力学性能是工程结构、材料研究和应用中最为关键性的问题。这是因为：力学性能通常是工程结构或部件设计中最重要数据和依据。力学性能通常是新材料能否由研制状态进入工程应用的基本考核指标，尤其是其综合性能（包括强度和塑性）的优劣常常是决定性因素。任何机器结构的失效（包括不能满足设计的工作能力或未达到预期的工作寿命而损坏）一般都归因于在服役中的载荷形式下和环境条件下未能达到要求的力学性能。所以，通常的失效分析在很大程度上是围绕载荷和环境以及相关力学性能分析而展开的。

可靠性设计与常规设计的主要不同点，在于可靠性设计考虑到载荷、零部件尺寸及材料性能数据的分散性。在可靠性研究中，必须对产品的某些性质（例如寿命、强度等）的分散度进行研究，其分散的形态，大多可用几种类型的分布模型来近似地反映。

产品的许多可靠性特征量及其统计推断方法，往往与产品的失效分布密切相关。若已知失效分布函数，则相应的可靠度函数、失效率函数以及各种寿命特征值均可求得。即使具体的分布函数尚不清楚，但只要已知失效分布类型，即可通过参数估计求得这些分布的参数估计值或数字特征量的估计值，从而掌握分布函数或各种可靠性特征量。

本章对 ADB610 钢进行了化学成分检测，并在强度和冲击韧性常规力学性能进行检测的基础上，对强度和冲击韧性进行概率统计模型研究，并采用 F 检验和 t 检验进行不同板厚和时效处理对常规力学性能的影响分析。

1.2 ADB610 钢板化学成分

试验钢板为鞍钢生产的低碳贝氏体钢 ADB610，其化学成分标准见表 1.1。对每种厚度和每批次钢板进行化学成分进行检测，结果见表 1.2 ~ 表 1.6 所示。

表 1.1 ADB610 钢板的化学成分标准（质量分数，%）

成分	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	B
标准值	≤0.09	0.15 ~ 0.40	1.00 ~ 1.60	≤0.01	≤0.015	≤0.30	≤0.50	≤0.30	≤0.3	≤0.08	≤0.08	≤0.003

注：Pcm=0.20%。Pcm=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Cr/20+Ni/60+Mo/15+V/10+5B

ADB610 钢疲劳裂纹扩展可靠性

表 1.2 38mm 厚 ADB610 钢板的化学成分 (质量分数, %)

序号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	B	Ceq
1	0.04	0.25	1.55	0.008	0.001	0.16	0.28	0.04	0.28	0.02	0.04	0.001	0.4
2	0.06	0.26	1.52	0.01	0.0001	0.15	0.24	0.031	0.24	0.04	0.02	0.001	0.41
3	0.06	0.27	1.54	0.009	0.0002	0.14	0.21	0.034	0.25	0.04	0.023	0.001	0.42
4	0.07	0.26	1.56	0.01	0.0001	0.13	0.2	0.031	0.24	0.04	0.021	0.001	0.42
5	0.07	0.26	1.56	0.009	0.0001	0.15	0.24	0.036	0.25	0.038	0.025	0.001	0.42
6	0.07	0.26	1.5	0.01	0.0001	0.14	0.23	0.13	0.25	0.038	0.019	0.001	0.42
7	0.07	0.26	1.56	0.008	0.0001	0.14	0.24	0.034	0.24	0.037	0.023	0.001	0.4
8	0.07	0.24	1.54	0.01	0.0001	0.15	0.26	0.034	0.24	0.04	0.021	0.001	0.4
9	0.06	0.27	1.53	0.011	0.0001	0.16	0.23	0.034	0.24	0.04	0.022	0.001	0.41
10	0.06	0.27	1.57	0.012	0.0001	0.14	0.22	0.032	0.25	0.044	0.022	0.001	0.42
11	0.07	0.26	1.47	0.009	0.0001	0.14	0.24	0.14	0.25	0.05	0.017	0.001	0.41
12	0.06	0.27	1.54	0.011	0.0002	0.16	0.24	0.036	0.24	0.04	0.023	0.001	0.41
13	0.06	0.26	1.53	0.01	0.0001	0.15	0.24	0.034	0.24	0.04	0.02	0.001	0.4
14	0.06	0.27	1.53	0.009	0.0001	0.15	0.26	0.038	0.24	0.04	0.02	0.001	0.42
15	0.08	0.26	1.54	0.01	0.0005	0.15	0.26	0.036	0.24	0.04	0.024	0.0001	0.42
16	0.07	0.26	1.55	0.011	0.001	0.13	0.23	0.036	0.25	0.04	0.022	0.001	0.42
17	0.07	0.27	1.56	0.011	0.0001	0.14	0.22	0.036	0.25	0.05	0.023	0.001	0.42
18	0.07	0.26	1.56	0.01	0.0001	0.16	0.25	0.036	0.24	0.04	0.023	0.001	0.42
19	0.07	0.26	1.56	0.01	0.0001	0.16	0.26	0.038	0.24	0.038	0.022	0.0001	0.41
20	0.07	0.24	1.53	0.011	0.0001	0.14	0.234	0.026	0.25	0.048	0.027	0.001	0.29
21	0.04	0.24	1.48	0.007	0.001	0.15	0.27	0.03	0.26	0.03	0.04	0.001	0.31
22	0.06	0.26	1.49	0.008	0.0002	0.14	0.25	0.04	0.25	0.04	0.02	0.001	0.31
23	0.06	0.28	1.49	0.008	0.001	0.15	0.24	0.04	0.25	0.04	0.02	0.001	0.3
24	0.05	0.27	1.48	0.009	0.001	0.15	0.24	0.04	0.25	0.04	0.02	0.001	0.29
25	0.05	0.24	1.44	0.008	0.001	0.15	0.23	0.04	0.25	0.04	0.02	0.001	0.3
26	0.04	0.25	1.51	0.01	0.001	0.14	0.24	0.04	0.25	0.04	0.01	0.001	0.29
27	0.04	0.22	1.47	0.007	0.002	0.16	0.31	0.04	0.26	0.03	0.04	0.001	0.3
28	0.04	0.26	1.56	0.008	0.008	0.15	0.27	0.04	0.25	0.02	0.03	0.001	0.29
29	0.04	1.22	1.48	0.008	0.003	0.16	0.31	0.04	0.26	0.03	0.04	0.001	0.29
30	0.04	0.25	1.46	0.006	0.001	0.16	0.28	0.04	0.25	0.02	0.03	0.001	0.29
31	0.04	0.23	1.46	0.007	0.003	0.15	0.29	0.04	0.26	0.03	0.04	0.001	0.29

续表 1.2

序号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	B	Ceq
32	0.04	0.25	1.5	0.008	0.001	0.16	0.28	0.04	0.27	0.03	0.04	0.001	0.32
33	0.06	0.27	1.51	0.009	0.001	0.14	0.25	0.04	0.26	0.04	0.02	0.001	0.31
34	0.06	0.26	1.49	0.007	0.001	0.16	0.25	0.05	0.25	0.04	0.05	0.001	0.31
35	0.05	0.28	1.51	0.008	0.001	0.15	0.25	0.04	0.26	0.04	0.02	0.001	0.32
36	0.07	0.27	1.47	0.008	0.003	0.14	0.27	0.05	0.26	0.02	0.03	0.001	0.3
37	0.05	0.24	1.45	0.009	0.0006	0.14	0.24	0.04	0.25	0.04	0.02	0.001	0.3
38	0.05	0.24	1.47	0.006	0.0004	0.16	0.24	0.04	0.26	0.04	0.02	0.001	0.3
39	0.05	0.24	1.49	0.007	0.0005	0.15	0.23	0.04	0.25	0.04	0.02	0.001	0.3
40	0.05	0.24	1.46	0.008	0.0002	0.14	0.23	0.04	0.25	0.04	0.02	0.001	0.3
41	0.05	0.24	1.48	0.008	0.001	0.14	0.23	0.04	0.26	0.04	0.02	0.001	0.31
42	0.06	0.28	1.5	0.009	0.001	0.15	0.24	0.05	0.25	0.04	0.02	0.001	0.3
43	0.04	0.28	1.51	0.009	0.002	0.14	0.28	0.04	0.26	0.02	0.03	0.001	0.29

表 1.3 42mm 厚 ADB610 钢板的化学成分标准 (质量分数,%)

序号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	B	Ceq
1	0.06	0.28	1.48	0.009	0.0001	0.14	0.25	0.033	0.23	0.05	0.02	0.001	0.39
2	0.05	0.26	1.49	0.007	0.001	0.15	0.24	0.04	0.26	0.04	0.02	0.001	0.3
3	0.05	0.25	1.52	0.008	0.001	0.15	0.29	0.04	0.26	0.02	0.04	0.001	0.3
4	0.05	0.25	1.49	0.008	0.001	0.15	0.29	0.04	0.26	0.02	0.04	0.001	0.29
5	0.05	0.25	1.5	0.008	0.001	0.15	0.29	0.04	0.25	0.02	0.04	0.001	0.3
6	0.04	0.25	1.51	0.007	0.002	0.16	0.28	0.04	0.25	0.02	0.03	0.001	0.3

表 1.4 65mm 厚 ADB610 钢板的化学成分标准 (质量分数,%)

序号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	B	Ceq
1	0.03	0.2	1.54	0.007	0.001	0.17	0.3	0.04	0.28	0.02	0.04	0.001	0.29
2	0.04	0.23	1.53	0.006	0.0008	0.15	0.29	0.03	0.27	0.02	0.04	0.001	0.3
3	0.08	0.28	1.55	0.012	0.005	—	—	—	—	—	—	—	—
4	0.06	0.23	1.58	0.011	0.004	—	—	—	—	—	—	—	—
5	0.06	0.23	1.55	0.012	0.003	—	—	—	—	—	—	—	—
6	0.07	0.23	1.56	0.011	0.004	—	—	—	—	—	—	—	—
7	0.06	0.23	1.58	0.011	0.003	—	—	—	—	—	—	—	—
8	0.06	0.24	1.55	0.012	0.002	—	—	—	—	—	—	—	—

表 1.5 70mm 厚 ADB610 钢板的化学成分标准（质量分数，%）

序号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	B	Ceq
1	0.05	0.22	1.58	0.006	0.0006	0.16	0.28	0.04	0.28	0.02	0.05	0.001	0.32
2	0.04	0.25	1.54	0.007	0.0002	0.15	0.26	0.03	0.29	0.03	0.04	0.001	0.3
3	0.06	0.22	1.55	0.011	0.001	—	—	—	—	—	—	—	—
4	0.06	0.24	1.52	0.011	0.003	—	—	—	—	—	—	—	—
5	0.07	0.23	1.6	0.012	0.002	—	—	—	—	—	—	—	—
6	0.06	0.22	1.59	0.012	0.003	—	—	—	—	—	—	—	—
7	0.05	0.26	1.55	0.01	0.003	—	—	—	—	—	—	—	—

表 1.6 其他板厚 ADB610 钢板的化学成分标准（质量分数，%）

板厚 (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	B	Ceq
20	0.06	0.2	1.5	0.01	0.001	0.16	0.25	0.04	0.29	0.03	0.04	0.001	
30	0.04	0.25	1.55	0.008	0.001	0.16	0.28	0.04	0.28	0.02	0.04	0.001	0.3
30	0.06	0.31	1.54	0.009	0.004	—	—	—	—	—	—	—	—
35	0.06	0.3	1.52	0.01	0.003	—	—	—	—	—	—	—	—
35	0.06	0.31	1.53	0.01	0.003	—	—	—	—	—	—	—	—
35	0.06	0.3	1.53	0.01	0.002	—	—	—	—	—	—	—	—
35	0.06	0.3	1.51	0.009	0.004	—	—	—	—	—	—	—	—
45	0.06	0.32	1.52	0.009	0.004	—	—	—	—	—	—	—	—
45	0.06	0.25	1.53	0.012	0.003	—	—	—	—	—	—	—	—
46	0.08	0.29	1.58	0.008	0.0001	0.15	0.23	0.029	0.24	0.04	0.02	0.001	0.42
46	0.07	0.26	1.48	0.01	0.0001	0.15	0.24	0.13	0.25	0.04	0.02	0.001	0.42
50	0.06	0.26	1.51	0.009	0.004	—	—	—	—	—	—	—	—
50	0.06	0.26	1.54	0.01	0.004	—	—	—	—	—	—	—	—
50	0.06	0.25	1.55	0.011	0.002	—	—	—	—	—	—	—	—
60	0.07	0.28	1.55	0.008	0.0005	0.17	0.29	0.04	0.28	0.02	0.03	0.001	0.33
60	0.06	0.24	1.54	0.007	0.002	0.14	0.29	0.04	0.27	0.02	0.03	0.001	0.32

1.3 ADB610 钢板拉伸与冲击试验

ADB610 钢的力学性能标准见表 1.7 所示。

要测定钢材的屈服强度和抗拉强度，就必须进行拉伸试验。这是测定钢的力学性能的重要试验方法之一。

抗拉强度 σ_b 是指试样拉断过程中最大拉力所对应的应力, 对塑性较好的材料, 它还表征材料最大塑性变形的抗力, 在静拉伸条件下实际零件所承受的最大负荷。所以在工程设计中是重要的力学性能指标, 而且由于 σ_b 易于测定, 重现性好, 又是一种组织较敏感的力学性能, 因而也是常用的材料产品规格和质量控制指标。

大量试验表明,试件的尺寸和形状对试验结果有影响。为了避免这种影响和便于使材料力学性能的测试结果具有可比性,国家标准对试件的尺寸和形状做了统一的规定,常用的拉伸试件有矩形和圆形截面,国家标准《金属材料拉伸试验试样》(GB/T228-2002)规定了矩形截面形状或圆形截面比例试样。

试验试样采用矩形截面试样，试样原始标距与原始截面面积 $L_0 = k\sqrt{S_0}$ （ S_0 为平行长度的原始横截面积的关系称为比例试样）。本章采用国际上常用的比例系数 $k = 5.65$ 。如图 1.1 所示。

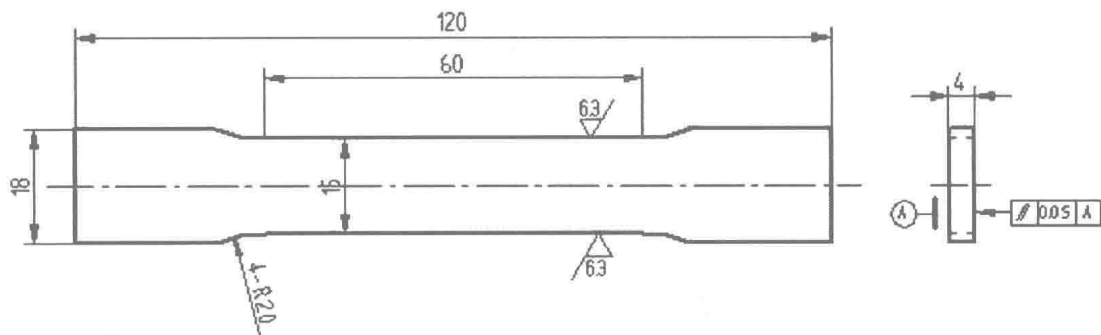


图 1.1 矩形截面拉伸试样

将经过 TMCP+回火处理及应变时效 (5%) 处理后的 ADB610 钢的棒材机加工成 10mm×10mm×55mm 标准 V 形缺口夏比冲击试样 (如图 1.2), 制作缺口的目的是为了研究在界面面积有急剧改变而产生高度应力集中的情况下材料抵抗冲击的能力和产生催化的情况, 试验过程中使试样的长度方向平行于轧向。将试验母材炉号和板厚列于表 1.9, 每种条件钢板取三个试样。

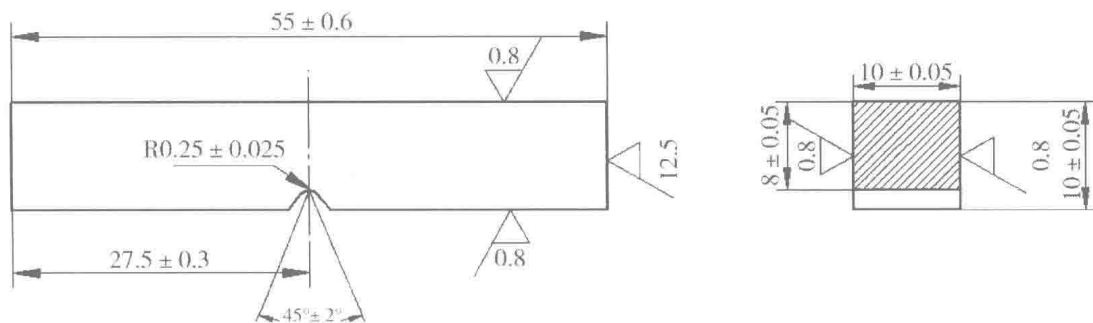


图 1.2 V 形缺口冲击试件

将实验数据列于表 1.8 ~ 表 1.11。

表 1.8 38mm 厚 ADB610 钢板抗拉强度 (σ_b) 数据表 (MPa)

610	615	615	630	630	630	630	630	630	630
640	640	640	640	640	640	640	645	645	645
645	645	650	650	652	655	655	655	660	665
665	665	665	670	675	675	675	680	680	685
685	700	715							

表 1.9 38mm 厚 ADB610 钢板屈服强度 (σ_s) 数据表 (MPa)

520	520	535	535	540	540	540	545	550	560
560	565	565	565	565	565	570	570	570	575
575	575	575	575	580	580	580	580	580	590
590	590	595	600	605	605	610	615	615	620
630	630	650							

表 1.10 38mm 厚 ADB610 钢板冲击功 (-20°C)

Akv (J)	Avs (J)
269, 288, 261, 254, 280, 273, 277, 294, 252, 290, 275, 290, 220, 212, 247, 293, 295, 290, 290, 234, 241, 240, 290, 291, 293, 295, 290, 212, 225, 223, 236, 236, 224, 174, 242, 238, 295, 290, 290, 158, 254, 252, 286, 290, 290, 290, 281, 290, 234, 226, 234, 290, 290, 290, 286, 290, 236, 248, 274, 276, 297, 285, 294, 242, 266, 242, 236, 220, 229, 297, 270, 282, 208, 70, 58, 294, 296, 297, 247, 296, 226, 297, 295, 296, 226, 250, 230, 295, 297, 294 294, 296, 295, 174, 157, 34, 55, 102, 63, 225, 78, 104, 286, 298, 272, 228, 298, 238, 242, 236, 206, 232, 220, 253, 296, 294, 297, 264, 297, 295, 234, 251, 234, 297, 296, 216, 245, 270, 274	276, 286, 264, 262, 244, 270, 236, 238, 260, 262, 257, 290, 222, 267, 280, 290, 292, 291, 258, 246, 260, 297, 298, 240, 286, 270, 276, 253, 235, 254, 290, 274, 274, 244, 244, 244, 290, 294, 293, 258, 277, 245, 262, 257, 277, 251, 272, 286, 210, 213, 210, 245, 264, 283 238, 247, 216, 293, 297, 268, 247, 230, 226 62, 219, 234, 232, 204, 233, 295, 296, 298, 222, 230, 216, 268, 278, 260, 269, 250, 238, 240, 234, 220, 216, 236, 212, 270, 272, 294, 297, 295, 294, 48, 69, 113, 30, 170, 50, 105, 58, 142, 220, 226, 215, 213, 258, 249, 232, 236, 216, 236, 279, 243, 295, 283, 283, 285, 296, 247, 258, 249, 233, 256, 267, 210, 222, 224, 236

表 1.11 其他板厚钢板力学性能数据表

板厚 (mm)	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	A_{kv} (J)	$\alpha_{A_{VS}}$ (J)
20mm	580	650	240, 290, 286	
30mm	595, 600, 635	600, 650, 680	297, 295, 296, 164, 172, 255	250, 252, 260
35mm	600, 605, 605, 610, 610, 610, 625, 625	660, 660, 660, 660, 665, 670, 680, 680	198, 134, 141, 92, 192, 226, 163, 150, 144	
42mm	530, 555, 560, 570 675, 625	625, 625, 630, 630, 640, 690	291, 295, 290, 156, 253, 230, 294, 298, 296, 295, 286, 297, 276, 256, 298, 247, 296, 294	190, 274, 290, 132, 136, 236, 237, 294, 270, 296, 297, 298, 297, 296, 294, 288, 278, 287
45mm	560, 570, 615, 620	635, 640, 670, 680	180, 208, 190, 280, 213, 244	
46mm	585, 600	660, 665	290, 273, 290, 215, 237, 212	270, 224, 290, 218, 222, 212
50mm	530, 530, 560, 560, 565, 570	620, 625, 630, 630, 635, 640	280, 259, 290, 263, 254, 290, 251, 242, 290	
60mm	575, 615	645, 685	255, 268, 224, 84, 205, 220	234, 248, 226, 190, 197, 190
65mm	50, 580, 580, 580, 585, 585, 590, 590, 590, 590, 590, 590, 595, 595, 600, 600, 600, 610	650, 650, 650, 655, 655, 655, 660, 660, 660, 660, 665, 665, 665, 665, 665, 670, 670, 680	214, 230, 195, 170, 243, 210, 240, 206, 225, 240, 230, 295, 124, 180, 175, 163, 125, 124, 290, 270, 290, 173, 155, 253	
70mm	560, 580, 580, 585, 590, 590, 600, 610, 625	600, 655, 655, 660, 665, 665, 670, 675 690	126, 136, 200, 280, 212, 290, 140, 58, 235, 164, 154, 162, 250, 203, 207, 114, 283, 236, 266, 235, 239	268, 240, 282, 206, 243, 120

1.4 ADB610 钢板力学性能统计分布模型分析

在参数统计问题中,总是假定总体分布为某种类型的分布,但这个假定本身需要根据样本来检验。为了反映实际数据与原假设的分布之间拟合的优劣程度,还应当进行分布函数的拟合性检验。

假设 ADB610 钢力学性能分别服从正态分布、对数正态分布、威布尔三参数和威布尔两参数分布,先用参数估计方法中的最小二乘法分别拟合出正态分布、对数正态分布、威布尔三参数和威布尔两参数分布模型的参量,然后用相关系数法和柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验(K-S 检验)法检验分布模型。

1.4.1 统计分布模型及检验

(1) 正态分布模型

正态分布又叫高斯分布,是可靠性分析中最重要的一个理论频率分布。多年来对各种研究对象,如零件尺寸、材料性能、化学成分、测量误差等进行的大量统计分析表明,这些研究对象做出的试验频率曲线大多具有正态分布特征。

正态分布函数形式见公式(1.1):

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx \quad (1.1)$$

式(1.1)中 $F(x)$ 为累计分布函数, μ 为均值, σ 为标准差。

若随机变量 x 服从正态分布,则其上的 p 分位点 x_p 与标准正态分布的 p 分位点的 u_p 存在线性关系: $x_p = A + u_p \times B$, 根据平均秩理论即 $p_i = 1 - i/(n+1)$ 将其序号 i 代入算出超越分布函数的估计值 p_i , 再求出相应的标准正态分布变量取值 u_i , 最后将 (x_i, u_i) 进行线性回归, 所得线性相关系数越接近于 1, 则随机变量 x 服从正态分布的结论越可信。对 (x_i, u_i) 数据进行线性回归, 便得到线性相关系数及回归方程。其中线性相关系数 r 定义为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(u_i - \bar{u})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}} \quad (1.2)$$

r 的取值在 0~1 之间, r 越接近 1, 表明 x, y 越接近线性关系, 即在概率纸上呈现较好的线性分布。一定显著水平 α 和样本容量下的临界相关系数 R_c 可以查正态分布表得到。

回归直线方程是由最小二乘法求得, 式 $x_p = A + u_p * B$ 中, 参数 A 和 B 分别为:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^n y_i^2 \right) - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2} \quad (1.3)$$

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{b}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (1.4)$$

(2) 对数正态分布模型

对数正态分布的累积分布概率密度函数，也是可靠性试验数据分析中的一类重要分布函数。在公式 (1.1) 正态分布函数中设随机变量 $Y = \log(X)$ ，随机变量 X 的对数正态分布函数形式见公式 (1.5)：

$$F(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^y \exp\left[-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dy \quad (1.5)$$

(3) 威布尔三参数分布模型

威布尔分布是瑞典物理学家 W. Weibull 在分析材料强度及链条强度时推导出的一种分布函数。由于威布尔分布对于各种类型的试验数据拟合的能力强，因此，它的应用范围很广，是在可靠性工程中广泛使用的连续性分布。三参数威布尔分布函数形式见公式 (1.6)：

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-\varepsilon}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (1.6)$$

式 (1.6) 中 ε 为位置参数， α 为形状参数， β 为尺度参数。

在威布尔分布中，函数 $F(x)$ 为破坏率，相当于存活率的超值累计频率函数 $\tilde{F}(x) = 1 - F(x)$ ，用 p 来表示 $\tilde{F}(x)$ ，即

$$p = \exp\left[-\left(\frac{x-\varepsilon}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (1.7)$$

改写其形式为：

$$\frac{1}{p} = \exp\left[\left(\frac{x-\varepsilon}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (1.8)$$

然后取两次自然对数，并将等式右边转换为常用对数。

$$-\ln\left(\ln \frac{1}{p}\right) = \alpha \ln \beta - \alpha \ln 10 \lg(x - \varepsilon) \quad (1.9)$$

令

$$\begin{aligned} Y &= -\ln\left(\ln \frac{1}{p}\right), \quad X = \lg(x - \varepsilon) \\ -\ln\left(\ln \frac{1}{p}\right) &= \alpha \ln \beta - \alpha \ln 10 \lg(x - \varepsilon) \end{aligned} \quad (1.9)$$

即

$$\left. \begin{aligned} A &= \alpha \ln \beta \\ B &= -\alpha \ln 10 \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

得

$$Y = A + BX \quad (1.11)$$

由线性回归分析，可以确定出待定系数 A 、 B 和线性相关系数 r 。