

高性能钢材 在钢结构中的应用

Use and Application of
High-Performance Steels
for Steel Structures

[瑞士] 国际桥梁与结构工程协会 编著
施 刚 译

中国建筑工业出版社

高性能钢材 在钢结构中的应用

Use and Application of
High-Performance Steels
for Steel Structures

[瑞士] 国际桥梁与结构工程协会 编著

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2010-0751 号

图书在版编目 (CIP) 数据

高性能钢材在钢结构中的应用/(瑞士) 国际桥梁与结构工程协会编著;
施刚译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2010. 10

ISBN 978-7-112-12182-3

I. ①高… II. ①国…②施… III. ①钢结构—研究 IV. ①TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 116045 号

Use and Application of High - Performance Steels for Steel Structures, Hans - Peter Günther

Copyright © 2005 by

International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)

All rights reserved. No part of this book may be reproduced in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

Peprinted in Chinese by China Architecture & Building Press (CABP).

Translation copyright © 2010 China Architecture & Building Press

本书经瑞士 IABSE 授权我社翻译出版

责任编辑: 白玉美 率 琦

责任设计: 赵明霞

责任校对: 赵 颖

高性能钢材在钢结构中的应用

Use and Application of High - Performance Steels for Steel Structures

[瑞士] 国际桥梁与结构工程协会 编著

施 刚 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京嘉泰利德公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 8 字数: 200 千字

2010 年 10 月第一版 2010 年 10 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-12182-3

(19438)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序

高性能钢材（HPS）由于具有卓越的材料性能和加工制作性能，在结构工程中的应用不断增加，特别是在桥梁设计中。但是，世界上不同国家和地区的发展需要和制定规范的要求各不相同。

在这一背景下，国际桥梁和结构工程协会（IABSE）第二工作委员会的委员，特别是来自巴黎 SETRA 的 Joël Raoul 教授，产生了要撰写一本介绍这些新一代钢材应用的最新技术发展文献的想法。这一提议得到了第二工作委员会主席 Ulrike Kuhlmann 教授的支持，这成为本书的开端。

与现有的结构工程系列文献仅仅由一或两位专家撰写不同，本书包括了来自世界各地的多位作者的贡献，展示了世界范围内高性能钢材的发展。

我衷心感谢所有作者特别是 Bernt Johansson 教授和 Chitoshi Miki 教授，感谢他们对于本书撰写工作的贡献和支持，感谢他们为本书所做的组织工作。我还要衷心感谢 Joël Raoul 教授，是他最初提出了这个想法；感谢 Ulrike Kuhlmann 教授，是他给了我机会和时间整理全书。另外，非常感谢 Geoff Taplin 博士、Sylvie Boulanger 博士、Tomonori Tominaga 博士和 Roger Pope 博士，他们为审阅整本书花费了很长时间。

最后，我要感谢国际桥梁和结构工程协会（IABSE）出版了这本结构工程文献。

斯图加特，2005 年 10 月

Hans - Peter Günther

斯图加特大学

目 录

第 1 章 导言和目标	1
第 2 章 美国的高性能钢材	3
2.1 简介	3
2.2 HPS 的研究和发展项目	4
2.2.1 HPS 70W	5
2.2.2 HPS 50W	6
2.2.3 HPS 100W	6
2.2.4 疲劳和断裂性能	7
2.2.5 可焊性	8
2.2.6 耐候性能	9
2.3 设计和施工规范	10
2.4 HPS 的设计经验	11
2.4.1 第一座 HPS 70W 桥梁	11
2.4.2 内布拉斯加州 HPS 两箱梁体系 [2.15]	11
2.4.3 HPS 成本研究 [2.16]	12
2.4.4 田纳西州的经验 [2.17]	12
2.4.5 宾夕法尼亚州的经验 [2.18]	13
2.4.6 纽约州高速公路局的经验 [2.19]	14
2.5 HPS 加工制作的经验	15
2.6 可获性和成本	15
2.6.1 可获性	15
2.6.2 成本	15
2.7 生产商和行业组织	16
2.8 相关网站	17
2.9 后续研究	17
2.10 结语	17
2.11 参考文献	19
2.12 致谢	20
2.13 附录	21

第 3 章 加拿大有关高性能钢材疲劳性能的研究	31
3.1 简介	31
3.2 阿尔伯塔大学的 HPS 研究工作	32
3.2.1 概述	32
3.2.2 试验项目综述	32
3.2.3 化学组成、断裂韧性和拉伸性能	32
3.2.4 FR 系列疲劳试验	33
3.2.5 FL 系列疲劳试验	34
3.2.6 疲劳裂纹增长率试验	35
3.2.7 疲劳寿命预测	36
3.2.8 阿尔伯塔大学研究的观测结果	37
3.3 女王大学的 HPS 研究工作	37
3.4 加拿大第一座 HPS 示范桥梁	38
3.5 结语	38
3.6 参考文献	39
 第 4 章 日本的高性能钢材	 41
4.1 桥梁高性能钢材 (BHS) 的概念	41
4.2 日本新型桥梁高性能钢材	42
4.2.1 过去传统高性能钢材在桥梁领域的应用	42
4.2.2 新型桥梁高性能钢材的提出和所需性能	43
4.2.3 总结	48
4.3 BHS 的制造技术和已验证的性能	48
4.3.1 BHS 制造技术的生产过程	48
4.3.2 BHS500 的已验证的性能	50
4.3.3 BHS700 钢的设计	53
4.3.4 BHS 的焊接材料	53
4.3.5 总结	54
4.4 高等耐候钢	55
4.4.1 高等耐候钢材的性能以及目前的应用状况	55
4.4.2 耐候性指标	60
4.4.3 总结	62
4.5 疲劳强度的提高	62
4.5.1 疲劳强度提高的目标	62
4.5.2 低温转化焊接材料的机理及基本特性	63
4.5.3 基于疲劳试验的研究	66

4.5.4 总结	68
4.6 应用实例	69
4.6.1 未来的 BHS 工程	69
4.6.2 目前含镍高等耐候钢的状况	69
4.7 参考文献	72
第 5 章 欧洲的高性能钢材	75
5.1 生产过程、力学性能、化学特性和加工性能	75
5.1.1 引言	75
5.1.2 高强度钢材的生产过程	75
5.1.3 钢材类别和性能	78
5.1.4 加工性能	81
5.1.5 结论	84
5.2 结构应用的韧性要求	84
5.2.1 概述	84
5.2.2 避免脆性断裂的断裂力学安全评估背景	86
5.2.3 屈服比要求	90
5.3 高强钢结构的屈曲承载力	93
5.3.1 引言	93
5.3.2 Eurocode 3 中稳定承载力计算公式	94
5.3.3 弯曲屈曲承载力	94
5.3.4 局部屈曲承载力	96
5.3.5 剪切屈曲承载力	98
5.3.6 讨论和结论	99
5.4 疲劳承载力的改善	99
5.4.1 引言	99
5.4.2 构造措施	100
5.4.3 焊接步骤和工艺	101
5.4.4 焊后改善方法	101
5.4.5 结论	105
5.5 应用实例	106
5.5.1 瑞典 48 号快速安装军用桥 [Höglund]	106
5.5.2 瑞典 Mittådalen 混合梁桥 [Collin]	107
5.5.3 德国 Düseldorf-Ilverich 跨越莱茵河的公路桥 [Müller]	108
5.5.4 德国因戈尔施塔特附近的组合桥 [Müller]	109
5.5.5 德国柏林索尼中心的屋顶桁架 [Müller]	110

5.5.6 法国米劳高架桥 [Schröter]	111
5.5.7 意大利 Verrand 高架桥 [Miazzon]	112
5.6 参考文献	113
第 6 章 总结和结论	116
6.1 概述	116
6.2 HPS 的发展、研究和应用	116
6.2.1 HPS 在美国	116
6.2.2 HPS 在加拿大	116
6.2.3 HPS 在日本	116
6.2.4 HPS 在欧洲	117
6.3 高性能钢材的性能	117
6.3.1 力学性能	117
6.3.2 化学性能	118
6.3.3 可焊性和加工性能	118
6.3.4 疲劳性能	119
6.3.5 耐候性能	119
6.4 HPS 的应用	119
6.5 结语	120

第1章 导言和目标

Hans - Peter GÜNTHER

博士，斯图加特大学结构设计研究所，D - 70569 斯图加特，德国

Joël RAOUL

教授，SETRA，F - 92225 Bagneux Cedex，法国巴黎

Ulrike KUHLMANN

教授，博士，斯图加特大学结构设计研究所，D - 70569 斯图加特，德国

为了满足设计团队的性能要求，法国的米劳高架桥（如图 5.5.12 和图 5.5.13 所示）建造时应用了超过 15000t 的“高性能钢材”（HPS）。该类等级钢材的应用通常能够降低成本、减小构件尺寸、减轻结构重量以及减少焊接作业量。最为重要的是，由于这些新等级的钢材改善了耐久性能并减少了材料用量，对环境的可持续发展有很大的贡献。对于中长跨度的桥梁，重量的减轻可以达到 20%。

“高性能钢材”（HPS）是指那些抗拉强度、韧性、可焊性、冷成型性和耐腐蚀性能比传统的低碳钢更为优质的钢材。在过去的 15 年中，钢材的制造技术已经有了重大的进步，冶金学以及钢材轧制和热处理工艺均有进步和发展。其中一项非常重要的技术就是热机械控制工艺（TMCP），其通过在钢板生产中适当地控制轧制和冷却，得到良好的微观结构。热机械控制工艺（TMCP）有助于使钢材强度更高、可焊性和韧性更好。只有取得了这些技术突破，才使得生产用于建筑行业的 HPS 成为可能。

HPS 的发展使得在设计中长跨桥梁和多层建筑时可以采用细长的轻型结构，向满足社会的新需求迈进了一大步。在这样的结构中，不仅十分需要使用高强度材料，而且同时还要满足安装和加工的要求。HPS 充分满足了这些要求，使得这些具有较好经济性的桥梁和建筑结构拥有广阔的应用前景，并提供了新型、高效、美观的结构解决方案。

为了鼓励工程师在设计中，尤其是在桥梁建造领域考虑使用 HPS，分享和普及这种新钢材的专业知识是必要的。目前，现有的设计规范并没有包含充分阐述 HPS 特性的相关指导。因此，本书涵盖的内容包括：

- 生产过程的信息及其对钢材性能的影响；
- HPS 的化学成分，强度和韧性等力学性能，可焊性和耐腐蚀性；
- 在现有规范和研究成果基础上对设计、加工和安装的建议；
- 针对不同工程应用的实际案例和技术解决方案；
- 在一些国家可采用的高性能钢材的总结。

本书的目的在于提供国际范围内 HPS 发展和应用的总体概述。本书并不是一本专著，

而是不同国家论文的汇编，重点研究 HPS 的材料、标准和应用。一些论文属于研究性质，而另一些偏重于实践。

HPS 的设计和应用经常需要新的设计理念以及更为先进的结构和技术解决方案。本书中的工程应用实例在现有经验的基础上提供了更多的细节和参考。读者可以发现大部分的例子与桥梁结构有关，因为在桥梁结构中可以充分发挥 HPS 优越的性能，在桥梁结构中减轻重量是一个很重要的方面，并且在很多情况下挠度控制并不是设计过程中的决定性因素。本书分为六章，分别由北美、日本和欧洲的作者所撰写，其目标就是评论目前的技术水平。

第2章 美国的高性能钢材

M. Myint LWIN, 作者
主任, 美国联邦公路管理局桥梁技术部, 美国华盛顿特区
Alexander D. WILSON, 特约作者
经理, 国际钢铁集团技术部, 美国宾夕法尼亚州科茨维尔
Vasant C. MISTRY, 特约作者
结构工程师, 美国联邦公路管理局桥梁技术部, 美国华盛顿特区

2.1 简介

1992 年, 美国联邦公路管理局 (FHWA)、美国钢铁学会 (AISI) 和美国海军 (Navy) 开展了合作研究项目, 以拓展高性能钢材 (HPS) 在桥梁中的应用。项目的目的在于开发具有更高强度、更好可焊性和韧性的钢材, 用以改善美国桥梁用钢的整体性能和加工性能。此外, 这种钢材还需要有“耐候性”。耐候性是指在正常大气环境中, 不进行涂装情况下的工作性能。HPS 项目的时间进度如图 2. 1. 1 所示。

在美国, 主要的钢桥设计规范为美国试验与材料协会 (ASTM) A709 和美国国家公路与运输协会 (AASHTO) M270。现在, 这些规范中有最低屈服强度 (Y. S.) 为 36、50、

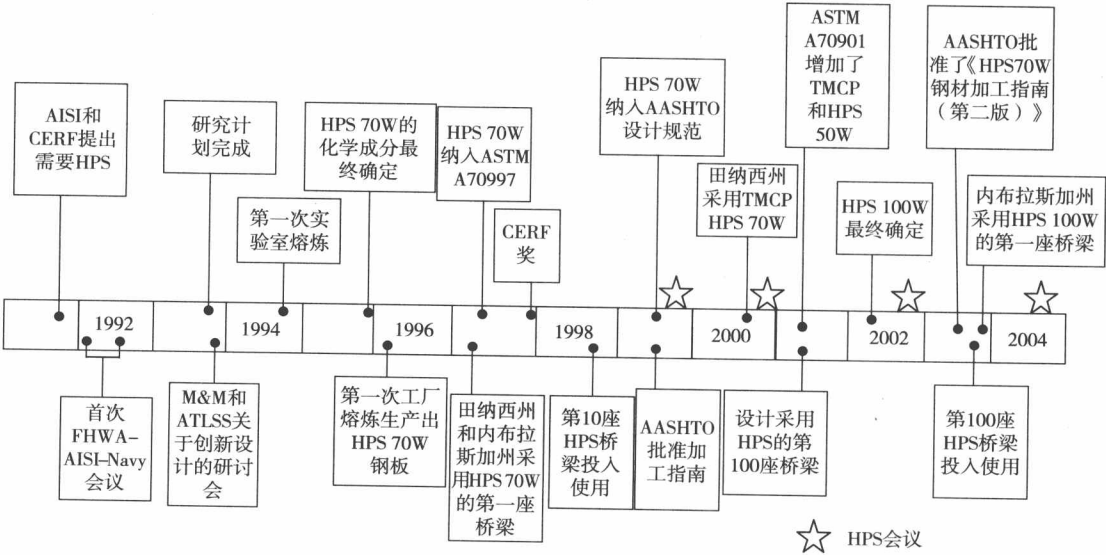


图 2. 1. 1 美国 HPS 发展的时间线

70、100ksi（250、345、485、690MPa）的钢材。这些最低屈服强度也是钢材等级的标志。此外，当钢材具有耐候性时，在等级编号后会加上 W 的标识，如 50W 和 100W 级。在美国，通过夏比 V 型缺口（CVN）冲击试验对桥梁钢材的要求把全国分成了三个区域。这些区域包括了从北方气候（3 区）到南方气候（1 区），并且具有特定的 CVN 冲击试验温度要求。指导委员会决定 HPS 设计的目标是研制出能够满足最严格的 3 区要求的钢材。

2.2 HPS 的研究和发展项目

指导委员会由上述三个团体的代表组成，同时还有来自制造商、焊接材料供应商和大学的代表。他们确定了研究项目的目标——研制最低屈服强度为 50、70 和 100ksi（345、485、690MPa）的耐候钢材，使之具有能满足 3 区标准要求的韧性和大大改善的可焊性 [2.1]。这些力学特性的目标详见表 2.2.1。

高性能钢材的力学性能 表 2.2.1

	HPS 50W 最厚 4in (101mm)	HPS 70W 最厚 4in (101mm)	HPS 100W 最厚 2.5in (64mm)
最低屈服强度 ksi (MPa)	50 (345)	70 (485)	100 (690)
极限抗拉强度 ksi (MPa)	70 min. (485)	85 ~ 110 (586 ~ 760)	110 ~ 130 (760 ~ 895)
CVN 35ft - lbs (48J)	+ 10°F (- 12°C) *	- 10°F (- 23°C)	- 30°F (- 34°C)

* 30 ft - lbs (41J)

这些目标代表了强度等级，而强有力的 CVN 韧性要求对这些改良后的钢材尤为重要。项目的另一个重要目标是研制具有良好可焊性的钢材，这就要求更低的碳含量和碳当量。参考图 2.2.1，即 Granville 可焊性图 [2.2]，新的 HPS 钢材对桥梁钢材碳含量和碳当量的传统分布范围进行了改进。

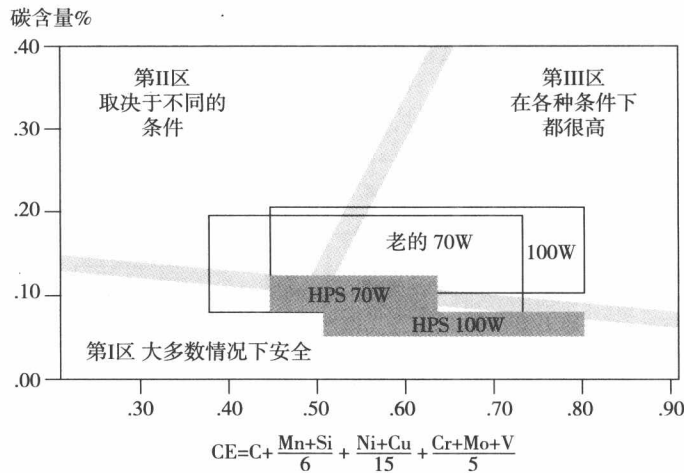


图 2.2.1 Granville 可焊性图

新型钢材在大气环境中具有耐候性，这要求新钢材的研制应以现有的 70W 和 100W 级为基础。这些等级钢材中包含的 Cr、Cu、Ni 及 Mo 等元素对钢材的耐候性起到很大的作用。上述所有强度等级的改进后的耐候钢都是桥梁钢结构所需要的。

为了提供更好的韧性，需要钢材有更低的硫元素含量。这些等级钢材的目标为：硫含量不高于 0.006%，并进行钙处理以控制夹杂物形状。这对于传统的硫含量不高于 0.05% 是一个很大的改进。

最初的关于 HPS 候选配方的评价研究是在钢铁公司的研究实验室里用小型实验室规模的熔炼进行的。这些最初的研究确定了为了达到目标特性候选钢材配方所需具备的能力。在确定了这些等级钢材需要的化学成分组成和加工工艺后，针对候选的化学成分组成配方进行了足尺规模的工厂熔炼，生产出足尺的钢板进行评估，并用于钢梁试验。最终，鉴别了一座示范桥梁作为这种新型钢材的最初应用。

2.2.1 HPS 70W

在 HPS 项目中，HPS 70W 等级是第一个开发并进行商业化应用的。这个等级现在已经被编入规范 ASTM A709 - 01a [2.3] 和 AASHTO M270 - 02。表 2.2.2 给出了它的化学组成，并与它所取代的传统 70W 等级钢材进行了比较。HPS 70W 可以通过淬火及回火 (Q&T) 或者热机械控制工艺 (TMCP) 生产。HPS 70W 钢材现在可以从很多钢材制造商那里买到。图 2.2.2 表示的是超过 700 块钢板的夏比 V 型缺口试验 (CVN) 结果分布，显示了这种钢材优越的性能，均远大于规范规定的最小值。更多关于通过淬火回火制造的 HPS 70W 钢材的特性已经在前文介绍过，见 Wilson [2.4]。在美国淬火回火工艺限制了钢板长度不超过 50ft. (15.2m)，因此，开发了热机械控制工艺，可以采用同样的 HPS 70W 配方制造厚度达到 2in. (50mm) 且长度更长的钢板。淬火回火和热机械控制工艺的区别见图 2.2.3 所示。现在，已发展到可采用热机械控制工艺生产长度为 1500in (38m) 的 HPS 70W 钢板，其长度取决于重量。长度超过 50ft (15.2m) 的淬火回火钢板梁也可以生产了，但是需要在工厂进行焊接拼接。

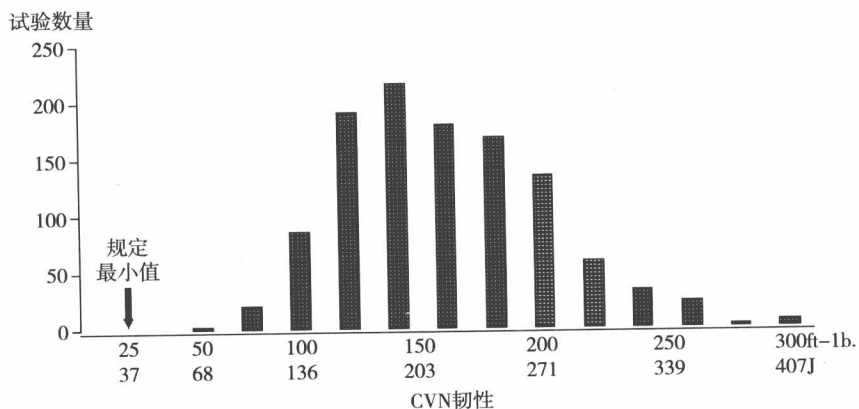


图 2.2.2 HPS 70W 淬火回火钢板 CVN 结果分布

HPS 70W 优越的可焊性已被证实，在焊接时，只需对厚度超过 2.5in(64mm) 的钢板进行预热，而之前的 70W 级钢板，厚度超过 0.75in(19mm) 时都需要预热。为了利用这种优越的可焊性，已经为在低氢条件下的埋弧焊开发了新的焊接材料，见 James [2.5]。HPS 70W 加工方法的总结可以从美国国家公路与运输协会 (AASHTO) [2.6] 得到。

2.2.2 HPS 50W

随着 HPS 70W 的成功应用，很多桥梁的业主希望能针对应用更为广泛的 50W 等级钢材开发相应的 HPS 钢材。他们对于 HPS 优越的可焊性和韧性非常感兴趣。钢铁公司采用传统的热轧或控轧技术，并采用与 HPS 70W 相同的化学成分生产 HPS 50W 钢材（见图 2.2.3）。HPS 50W 最初的产品就显示出良好的 CVN 韧性，很容易达到规范的要求。

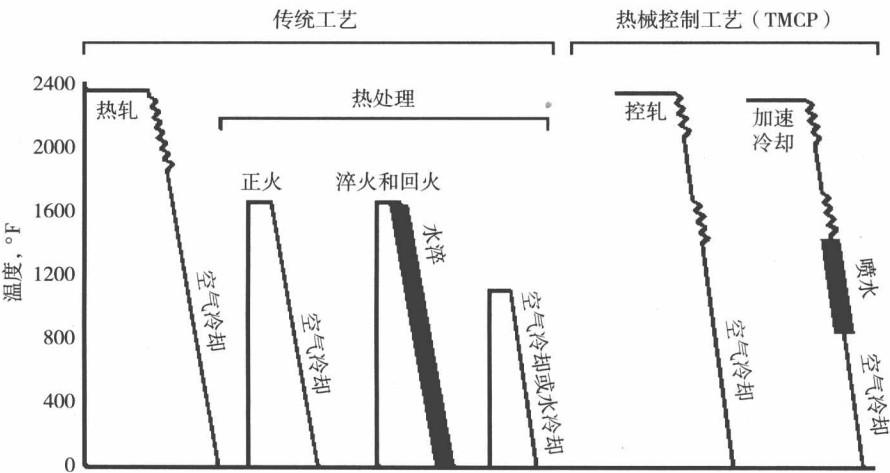


图 2.2.3 钢板生产工艺

2.2.3 HPS 100W

更高等级的 HPS 100W 钢材是最初研究项目的一部分。现在利哈伊 (Lehigh) 大学研究的基于 Cu - Ni 的钢材等级已经应用于制造 0.25 ~ 2.5in(6.4 ~ 64mm) 厚的钢板以及无缝钢管，见 Wilson 等 [2.7]。这种新钢材等级的化学成分组成见表 2.2.2。这种钢材的初步应用正在进行中。

传统钢材和高性能钢材的化学组成对比 表 2.2.2

		C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V
原有的 70W	Min.	—	0.80	—	—	0.25	0.20	—	0.40	—	0.02
	Max.	0.19	1.35	0.035	0.04	0.65	0.40	0.50	0.70	—	0.10
HPS 70W 和 HPS 50W (a)	Min.	—	1.10	—	—	0.30	0.25	0.25	0.45	0.02	0.04
	Max.	0.11	1.35	0.020	0.006	0.50	0.40	0.40	0.70	0.08	0.08
ASTM A 1010 (Duracorr®) (b)	Min.	—	—	—	—	—	—	—	10.5	—	—
	Max.	0.03	1.50	0.04	0.030(c)	1.00	—	1.50	12.5	—	—

续表

		C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V
传统的 100W (e, f)	Min.	0.10	0.60	—	—	0.15	0.15	0.70	0.40	0.40	0.03
	Max.	0.20	1.00	0.035	0.035	0.35	0.50	1.00	0.65	0.60	0.08
HPS 100W, Cu-Ni (d, e, g)	Min.	—	0.95	—	—	0.15	0.90	0.65	0.40	0.40	0.04
	Max.	0.08	1.50	0.015	0.006	0.35	1.20	0.90	0.65	0.65	0.08

- (a) 钙处理以控制夹杂物形状，同时需要 0.010 ~ 0.040 的 Al 和最高 0.015 的 N；
- (b) 最高 0.030 的 N；
- (c) 应用于桥梁时最高为 0.005；
- (d) 钙处理以控制夹杂物形状；
- (e) 最大厚度为 2.5in (65mm)；
- (f) 含有 0.001 的 B；
- (g) 含有 0.01/0.03 的 Nb, 0.02/0.05 的 Al 和最高 0.015 的 N。

2.2.4 疲劳和断裂性能

与传统钢材一样，高性能钢材的疲劳承载力取决于节点的焊接构造和应力幅。疲劳承载力不受钢材种类和强度影响。由高性能钢材的疲劳试验可以得出结论，AASHTO LRFD 规范的 6.6.1 疲劳一节中给出的疲劳等级分类同样适用于高性能钢材的焊接构造。高性能钢材的断裂韧性比传统桥梁钢材高得多。这点从图 2.2.4 可以明显看出，图中比较了 HPS 70W 和传统的 AASHTO M270 50W 级钢材夏比 V 型缺口冲击试验的转变曲线。与传统的 50W 级钢材相比，HPS 的脆性 - 延性转变温度要低得多。这意味着在较低温度下当传统的 50W 级钢材开始显示脆性时，HPS 70W 仍然具有很好的延性性能。

现行的 AASHTO CVN 韧性要求规定了钢桥在高于最低预期工作温度下避免脆性破坏。工作温度分为 3 个区，见表 2.2.3。

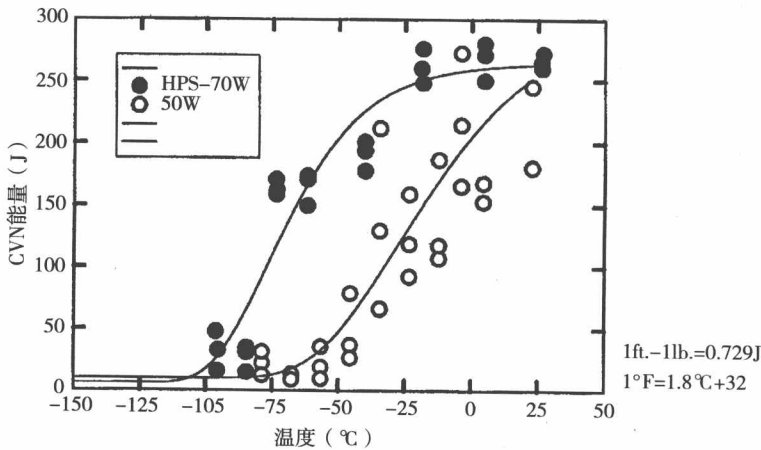


图 2.2.4 CVN 转变曲线 [2.8]

根据 CVN 要求的温度分区

表 2.2.3

最低工作温度	温度区
0°F 及以上 (-17°C 及以上)	1
-30°F 至 -1°F (-34°C 至 -18°C)	2
-60°F 至 -31°F (-51°C 至 -35°C)	3

AASHTO 对于这些温度分区的 CVN 要求列于 AASHTO LRFD 中表 6.6.2-2 断裂韧性要求中。到目前为止的实验结果显示, HPS 70W 钢材在 3 区 -60°F (-51°C) 的极限工作温度下仍然具有良好的延性。这是 HPS 研究的一项主要成果, 也是 HPS 在控制脆性断裂上的一个重要优势。

由于拥有更高的断裂韧性, 高性能钢材比传统等级的钢材具有更高的裂纹允许值。在实验室中对用 HPS 70W 制造的足尺工字形梁试件进行了疲劳和断裂试验, 试验结果表明, 即使当裂纹已经导致受拉翼缘发生 50% 的净截面损失时, 梁试件仍可以承受全部的设计荷载 [2.8]。HPS 对大裂纹的允许值使得人们有更多的时间在桥梁变得不安全之前发现并维修疲劳裂纹。

2.2.5 可焊性

HPS 研究项目的一个核心内容是开发焊接性能大大改善的桥梁钢材。为了减少高预热温度和层间温度、高热输入、焊后处理以及其他严格控制措施带来的高昂的加工制作成本, 并且为了消除焊件中的氢致裂纹, 改善钢材的可焊性尤为必要。

氢致裂纹, 也被称为延迟裂纹或冷裂纹, 已经成为桥梁钢材焊接中遇到的最为普遍和严重的问题之一。氢最普遍的来源是湿气。润滑油、氧化物和其他污染物也是潜在的氢来源。这些来源的氢可以通过焊接电极、保护材料、母材金属表面和大气环境进入到焊接区域。

氢致裂纹可能发生在焊接热影响区 (HAZ) 和熔合区 (FZ)。尽管开裂的原因相同, 控制导致开裂的因素对于焊接热影响区和熔合区可能有所不同。对于焊接热影响区, 裂纹的控制是通过现代钢铁制造过程来实现的, 同时采取措施避免产生易受影响的微观结构, 消除母材 (钢) 中氢的来源。对于熔合区, 控制氢致裂纹的敏感度是通过在焊接材料中加入合金元素并使用适当的焊接技术 (包括预热和热输入) 来实现的。

消除氢致裂纹最普遍最有效的方法是规定焊接的最低预热温度和层间温度。总体来说, 预热温度越高, 脆性微观结构形成的可能性越小, 氢从焊缝扩散出来的时间也越长。但是, 预热不仅耗时, 而且还会增加成本。开发高性能钢材的目标之一就是减少或避免预热。这个目标已经成功实现, 见表 2.2.4。

最低预热温度

表 2.2.4

	可扩散氢		
	H4 *	H8 *	H16 *
AASHTO M270 70W 级	212°F (100°C)	248°F (120°C)	248°F (120°C)
HPS 70W	70°F (21°C)	100°F (38°C)	150°F (66°C)

* 表示试验室中量测得到的氢含量, 用毫升每 100 克熔敷焊缝金属的形式来表达, 例如, H4 表示在焊接金属中有 4 ml/100g 的可扩散氢。

2.2.5.1 AASHTO HPS 指南和 AWS 规范

AASHTO HPS 指南和 AWS 规范包含了适用于 HPS 的附加焊接条款。设计者应该确认合同文件中包含上述两个文件中的适用条款。属于 HPS 焊接的一些重要因素包括：

—焊接工作只能在低氢条件下进行。

—目前 HPS 推荐的焊接工艺只有埋弧焊 (SAW) 和手工电弧焊 (SMAW)。熔化极气体保护电弧焊 (GMAW) 工艺的应用正在研究中。

—可扩散氢的含量限制在最高为 8mL/100g (H8)；埋弧焊的焊接材料应该经过处理使得可扩散氢的等级控制在最高为 H4 的范围内；手工电弧焊的焊接材料可以满足 H4 或者 H8 级。

—在采用埋弧全熔透坡口焊焊接 HPS 70W 钢板时，推荐采用具有相应焊缝强度的焊接材料。对于所有的角焊缝，强烈推荐采用具有低匹配焊缝强度的焊接材料。当允许或要求采用低匹配强度级别的角焊缝时，设计者应该在合同图纸或特别条款中明确说明。

—当 HPS 70W 钢材和 50W 级钢材连接时，认为与 50W 钢材母材相匹配的焊接材料是具有相匹配的强度的。但是推荐可扩散氢的等级控制在 H4 或 H8。

2.2.5.2 经验总结

—由 Lincoln LA85 电极和 MIL800HPNi 焊剂所组合成的埋弧焊的焊接材料可以得到质量合格的焊缝金属。这一点也同时适用于 Q&T 和 TMCP 工艺生产的钢材。

—要求制造商对足尺的 HPS 对接焊缝、HPS 与 50W 级钢材之间的对接焊缝和角焊缝采用制作焊缝所建议的焊接耗材组合进行焊接工艺评定试验是有益的。

—良好的可焊性仍然需要细致优良的操作工艺以保证焊接质量。

—HPS 的成本效率已经在美国很多个州设计建造的 HPS 钢桥中得到了证明。

2.2.6 耐候性能

HPS 的耐候性能作为最初研究目标的一部分，意味着 HPS 应该具有在正常大气环境中不进行涂装即可以正常工作的能力。ASTM G101 [2.10] 中给出了钢材作为耐候钢所需要的最小合金含量的预测公式。Townsend [2.11] 则提出了改进后的一系列预测公式，更适合于关键合金元素含量更高的情况。HPS 钢材比传统的 50W 和 70W 级钢材具有更好的抵抗大气腐蚀的能力。

日本的最新进展报道了改进后的“沿海”耐候钢材 [2.12]。这些等级的钢材比传统的耐候钢材具有更高的合金含量，据报道这些钢材在适度含氯的环境中具有良好的工作性能。因为具有更高的合金含量，所以不能再使用原有的 G101 中的预测公式。然而 Townsend 的公式可以采用，现在它在 G101 中作为一种替代公式。图 2.2.5 对这些日本的更好的耐候钢材与 HPS70W、HPS100W 进行了对比。预计这两种 HPS 等级钢材在大气腐蚀环境中将具有良好的工作性能。一种新型的屈服强度为 50ksi (345MPa) 的结构用不锈钢正在应用于桥梁。ASTM A1010 (ISG Plate Duracorr) 钢材在普通环境甚至在含氯环境中表现出超强的耐腐蚀性，已经被指定用于加利福尼亚州和伊利诺伊州的两座桥梁。它的化学成分见表 2.2.2。图 2.2.5 显示了 A1010 出色的耐候性能，在长期暴露试验中它的耐候性能比 HPS 70W 和日本的沿海耐候钢材有一定程度改善。