地址：香港理工大学第八期
电话：(852) 3400 8451　电子邮箱：cnerc.steel@polyu.edu.hk　网站：https://www.polyu.edu.hk/cnerc-steel/

国家钢结构工程技术研究中心香港分中心
2025 年 2 月通讯 – 号外

香港分中心的文章 – 「S690 高强钢在工程中的高效应用」，荣获英国结构工程师学会《结构工程师》出版物刊登为 2025 年 2 月号的封面故事。

《结构工程师》是结构工程师协会会员的独家出版物，发布了经过同行评审的技术以及一系列引人入胜的结构工程项目的专业指导和案例研究。它是全球公认的结构工程文献库。

原文网页链接：https://doi.org/10.56330/WJHB1752

下列为中文翻譯版。

The Institution of StructuralEngineers

February 2025
Volume 103 | Issue 2

The StructuralEngineer

Reusing steel for a footbridge

President's Inaugural Address

Industry CPD: LVL beams

S690高强钢在工程中的高效应用

Contents page

Profile: Leroy Gardner

Within the next five years, structural steel designers will be making greater use of advanced design methods and 3D printing to achieve more efficient structures and reduce embodied carbon, believes Leroy Gardner. Helena Russell finds out more.

Viewpoint: Are you working to a CPD plan?

Kate Wise explains why a methodical approach to Continuing Professional Development can reap career dividends.

Verulam (readers' letters – February 2025)

This month's letters feature comment on modelling errors, masonry transfer slabs, a CROSS Safety Alert and more.

Library update: Steel structures

The Library holds books on all aspects of steel – from old Dorman Long section books to modern design, construction and maintenance practice – and there is also currently a lot of interest in steel reuse.

S690高强钢在工程中的高效应用

钟国辉教授
国家钢结构工程技术研究中心（香港分中心）
香港理工大学土木及环境工程学系

摘要

随着冶金和炼钢技术的发展，许多国家（如中国、法国、德国、印度和日本）的钢厂已可量产屈服强度高达690N/mm²的高强钢，S690高强钢屈服强度是常规S355结构钢（屈服强度为355N/mm²）的两倍。高强钢起初主要应用于各种移动结构中，如矿山和港口的重型起重设备、风力发电塔的框架和构件，以及集装箱拖车和客运列车。在这些移动结构中使用高强钢有很大优势，因为单位自重下可以承受更多荷载，进而减少日常运行的能耗。对于土木工程结构而言，使用S690高强钢可显著减轻结构自重，并减轻支撑结构和基础结构的负荷。近年来，S690高强钢的生产成本有所下降，这提高了其相对于S355钢的竞争地位。过去五年中，中国产S690钢的单位成本是S355钢的1.25到1.35倍。S690钢的强度相较于S355钢提高一倍，S690用钢量只需S355的一半。从而前者成本是后者的1.3乘以0.5或0.65倍，这大大节省了材料成本。

国家钢结构工程技术研究中心（香港分中心）对S690钢焊接构件的机械性能和结构行为进行了系统的研究分析，发现只要焊接过程控制适当，就可以最大限度地减少甚至消除由于钢材在焊接过程中因微观结构变化而导致的“强度和延性”的降低。分中心还开展了大量的研究工作以促进690钢在土木工程领域中的应用。香港的一座跨海钢桥使用了4,400吨S690钢材，澳门的一座跨海钢桥使用了1,625吨Q690钢材。在此需要感谢香港特区政府发展局在推广S690高强钢工程应用上做出的巨大贡献。

引言

自20世纪80年代以来，S355普通强度钢（屈服强度为355N/mm²）被广泛应用于工程建设中。随着冶金和炼钢技术的发展，钢厂成功研制出S690高强度钢（屈服强度为690N/mm²）。近年来，许多钢厂已可量产化学成分和机械性能都符合BS EN 10025-6[1]和GB/T 19879 [2]要求的高强钢材。许多地区，特别是香港和中国大陆的结构工程师，都希望在高层建筑和大跨度桥梁中使用高强度钢材，因为它们具有优异的机械性能，特别是单位重量下的高强度。

通过采用新型结构形式，S690高强钢有望更广泛地应用于建筑和桥梁结构，从而显著减少用钢量中，并减轻支撑结构和基础结构的负载。不仅如此，使用S690高强钢还可以降低钢板的厚度，从而减少焊材的消耗和焊接工时，进一步提升加工和运输的便捷性，并提升车间预制和现场拼装的安全性。通常情况下，S690焊接截面可有效应用于柱结构。因为其不仅强度高，而且杨氏模量仍与S275和S355钢的杨氏模量相同，即205kN/mm²。另外，在S690高强钢用作长跨度梁的情况下，需采取预弯曲措施降低其设计挠度。欧标[3]中对S690焊接H型钢和箱型钢的截面和构件承载力的设计要求相对保守，因此可直接采用。

有趣的是，虽然S355钢是现代土木建设中最为常用的结构钢材，但在20世纪70年代，许多钢结构采用S235钢，当时S355钢被各国的建设行业视为“高强钢”。

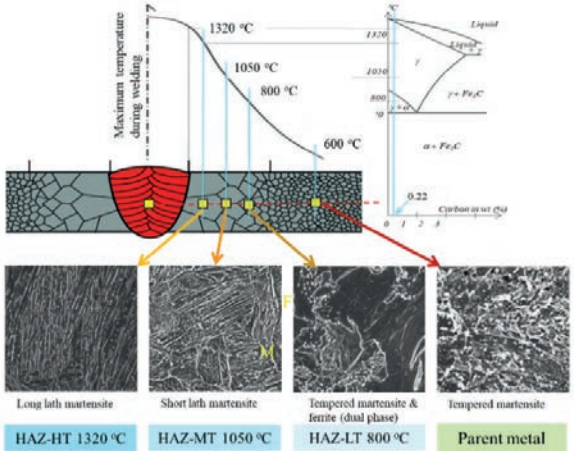


图 1: S690高强钢因焊接产生的微观结构改变

图 2: 高精度机器人焊接系统

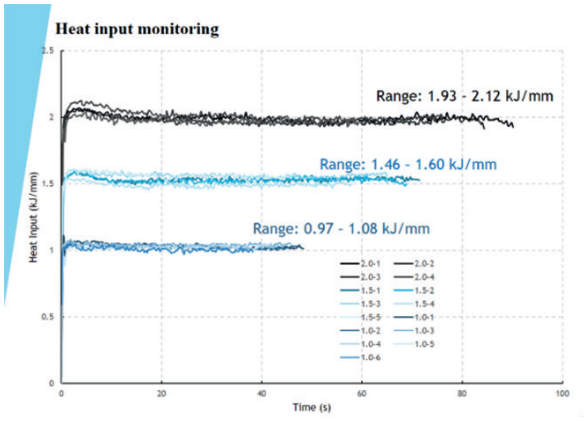


图 3: 焊接热输入量

高强钢的多学科研究

国家钢结构工程技术研究中心香港分中心成立于2015年10月，致力于推动S690高强钢在工程建设中的有效应用。香港分中心的重点研发项目[4,5]包括：

→ 提升结构工程师对S690高强钢的认知，了解其在工程应用中的优势和难点；

“S690高强钢的应用将越来越广泛

→ 确定S690钢及其焊接构件的力学性能，及其在各工况下的结构行为和工程数据；

→ 制定S690焊接构件的设计准测，并向相关机构证明其可行性及高效性；

→ 制定S690钢板（厚度不超过70毫米）焊接工艺标准，并建立质量保证体系；

→ 与结构工程师合作，推广S690钢在土木工程建设中的创新型工程应用；

→ 与钢厂合作，研发抗震结构用高强钢，开发高性能的新钢材。

英国钢结构研究所的一份研究报告[6]全面介绍了香港分中心在S690高强钢的研发工作。为促进香港及亚洲周边国家对S690高强钢结构的设计与应用，香港分中心还出版了高强钢结构设计及施工的技术指南[7,8,9]。

高强钢的焊接

S690高强钢通常采用两种不同的热处理生产工艺，即淬火回火（QT）工艺，和热机械控制（TM）工艺。通过在钢材生产过程中对温度和时间的精准控制，可以控制钢材的微观结构以保证其力学性能，主要是强度、韧性和延性。

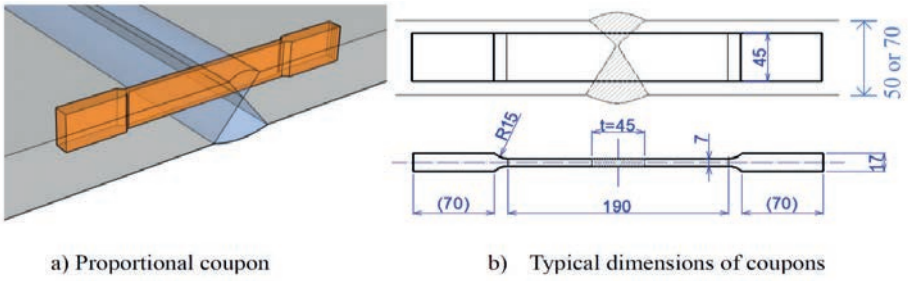
然而，在焊接过程中钢材被加热到1350至1500℃，这将引起钢材热影响区（HAZ）微观结构的变化（图1）。

为保证S690高强钢热影响区的力学性能，应尽量减少甚至避免钢材在焊接过程中发生任何冶金变化。因此，应严格控制热影响区内的相变、再结晶和晶粒变大。所以，应根据板的厚度和焊接接头的不同几何参数在焊接过程中采用合适的热输入能量q。

使用机器人焊接系统（图2）进行高强钢板的焊接，对6至70mm厚的S690-QT和S690-TM钢板焊后力学性能进行了大量的实验研究。通过调整焊接参数，即电压、电流和焊接速度，可以控制焊接过程中的热输入能量q，并表现出良好的精度和稳定性（图3）。

从S690对接焊钢板的焊接部位加工出标准拉伸试样（图4），并根据BS EN 6892[10]进行标准拉伸试验。典型的失效模式如图5所示。

对S690焊接件热影响区内微观结构变化的研究表明，当最高温度超过钢材的转变温度Ac3时（主要取决于化学成分），相变会发生在焊接过程中和焊接后。



a) Proportional coupon　　b) Typical dimensions of coupons

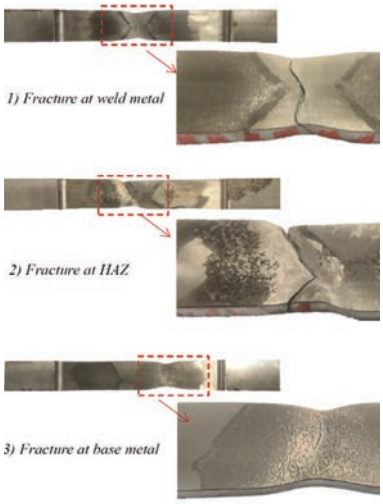


图 4: S690焊接件的标准拉伸试样

图 5: 70mm厚S690-QT焊接件的失效模式

如果焊接件的热影响区从800到500的冷却速率（t_8 /5）不超过15秒，则热影响区内的微观结构变化不大，即焊接件的机械性能几乎没有折减（图6）。

值得注意的是，钢材的相变过程已进行相应的数值模拟[12]以评估焊接过程对不同板厚S690钢力学性能的影响。数值模拟结果为进一步了解S690钢焊接后的微观结构变化提供了科学依据。

对于各种焊接构造和接头类型，应根据相关标准和规范，如BS EN ISO 15607[13]和BS EN ISO 15614[14]，建立焊接工艺标准（WPS）。并参考专业焊接学会和协会出版的焊接技术手册，使用合规的焊接工艺标准可确保S690焊接构件的结构性能，充分发挥其截面及构件承载力

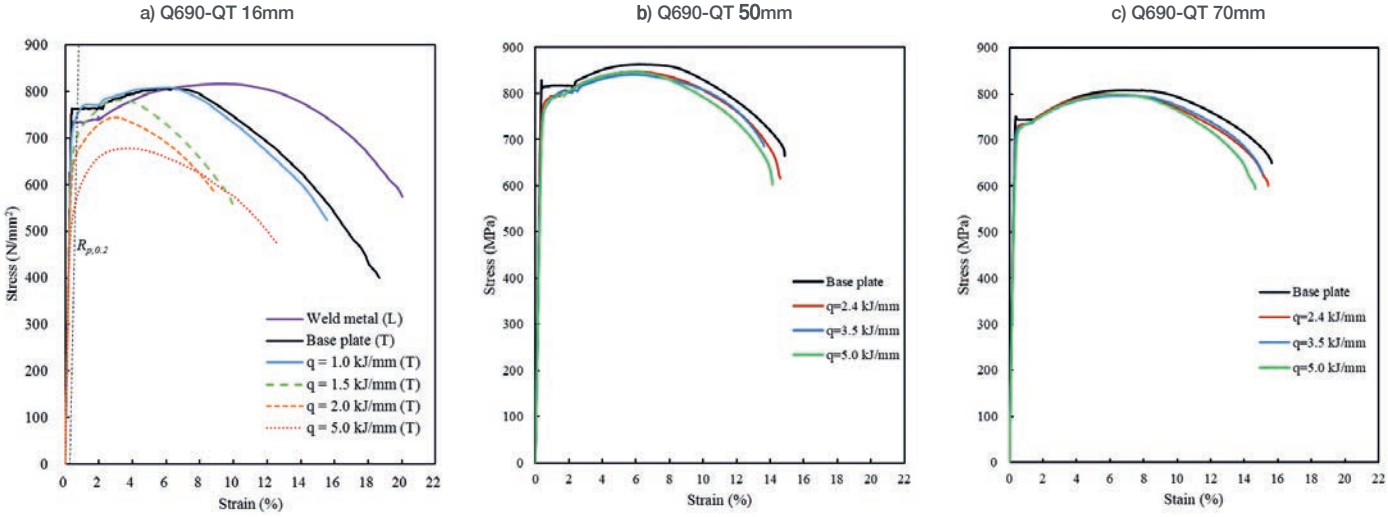
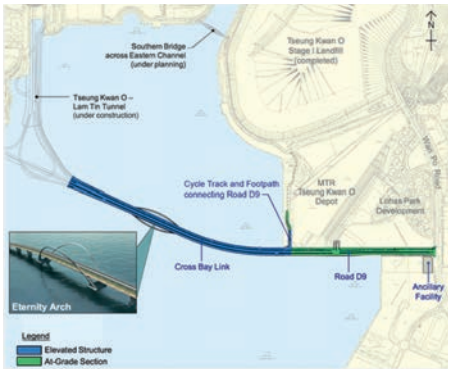
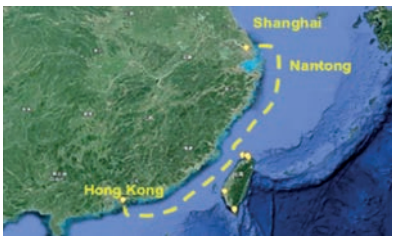


图 6: 多种板厚的S690焊接件在不同热输入量下的应力-应变曲线



↗图 7: 将军澳跨湾连接路



© COURTESY OF CRBC

↗图 8: 双拱钢桥的建造及运输过程

使用S690高强钢的道路桥梁

S690高强钢有优异的强重比，是适合重载结构的优秀材料。使用S690高强钢的示范工程包括香港的将军澳跨海大桥、澳门的澳门大桥。香港分中心为两座桥梁使用S690高强钢提供了专业技术指导，包括焊接和结构设计。

香港特别行政区 将军澳跨湾连接路

该跨湾连接路位于将军澳海湾，是香港东九龙地区重点基建项目。该工程由香港特别行政区政府土木工程拓展署负责，全长1.8公里的跨湾连接路旨在对接由蓝田至将军澳长达3.8公里的隧道交通。

除了一部分跨海的混凝土桥段外，还有一座214米长的双拱钢桥，其使用S690高强钢来减轻自重，从而降低整体成本。

双拱钢桥

这座214米钢桥的桥面板、钢索及双拱部分采用S690-QT高强钢。双拱部分是长230米变截面箱形结构，中跨处的最大高度约40米。拱两端的截面尺寸为3.5×3.5 m，厚度为70mm；中跨截面尺寸为3.0×3.0 m，厚度为50mm，总重量为4,400吨。

2018年6月，香港土木工程拓展署经过严格的招标程序，将跨湾连接路的建设项目承包给中国路桥工程有限责任公司，项目建造成本为25亿港币。该项目于2018年8月启动，竣工日期为2022年。钢桥由上海振华重工制造（图8），S690-QT钢材由江苏江阴兴澄特钢公司提供。

加上钢桥面板和钢索，钢桥的总重量约为10,000吨。整座钢桥在南通的钢厂制造，所有的焊接工作均由经验丰富的焊工完成，并经过无损检测进行检查，确保了加工质量。整个制造过程约18个月，高峰期约有170名焊工和30名检测人员同时工作。

↗图 9: 已完工的跨湾连接路

制造完成后的钢桥由一艘半潜式驳船拖至香港的将军澳海湾，距离约900海里。根据近60年的气候记录，海上航行日期选在台风发生频率最低的2021年2月。钢桥于2021年2月8日凌晨从南通出发，历时8天，于2月16日抵达安装现场。在2021年2月26日上午的涨潮期开始安装钢桥于两个预安装的预制桥墩上，并在五个小时内精准安全地吊装于预定位置上。该跨湾连接路已于2022 年12月11日通车（图9）。

该钢桥共用4,400吨S690钢材，与使用S355钢材相比节省了约4,400吨钢材，节省的建设成本为1亿港元。同时还减少了12,000吨碳排放，即12,000吨二氧化碳。

澳门特别行政区
澳门大桥

澳门大桥前称澳门氹仔第四大桥，是一座大型桁架钢桥。全长3.1公里，跨海长度2.9公里（图10）。共有8跨，两个主跨的长度为280米。大桥的整体建造成本约为52亿港币。大桥的设计和施工均严格按照澳门特别行政区政府的公共基础设施建设要求进行，总承包商为中国土木工程集团有限公司，于2020年8月开始施工。

澳门大桥亦由上海振华重工制造，而Q690-TM钢材由武汉宝武钢铁公司提供。该桥梁中的重载构件使用了1,625吨Q690-TM钢，钢板厚28 ~ 44 mm（图11），无现场焊接工作。澳门大桥已于2024年10月1日向公众开放（图12）。

↗图 10: 连接澳门和氹仔的澳门大桥

土木工程建设中应用S690高强钢

香港特别行政区政府发展局致力采用新型材料、高效设计和建造方法。鼓励所有工务部门在土木工程项目中采用创新技术。

2021年，政府设立“工务工程应用研发专责小组”以推动技术创新，并批准S690高强钢作为工务工程试点项目，具体如下：

→ 人行天桥，其自重显著降低，可使用移动式起重机在夜间一次性吊装到位；

→ 大跨度屋顶结构，减少现场焊接工作及现场安装时对起重能力的要求；

→ 嵌套H型桩，每根桩的承载力显著提高，进而减少了总桩数；

→ 大型隔音屏障，每部分的承载力显著提高，进而减少了钢框架和总桩数。

香港分中心于2021年11月获项目策略及控处委任，为各工务部门的项目团队提供专业技术指导：包括S690高强钢的选材和供应、结构设计方案、连接与节点设计、焊接质量控制。此外，香港分中心亦对工务部门的各项标准和规范进行审查，并提出修订建议，以便在土木工程建设项目中采用国产S690钢。

截至目前，S690钢已用于约30个土木工程项目中。现场焊接工艺标准也已通过专业实验室的认证，可在现场进行合规的焊接及焊前、焊后热处理。

使用S960高强钢的试点项目

成功应用S690钢后，政府又开始探索S960高强钢的应用，其屈服强度是S355钢的近3倍，所以S960用钢量只需S355的三分之一，而其单位成本仅为S355钢的1.7倍，因此材料成本大约是0.3或0.5乘以1.7倍。因此，土木工程拓展署于2023年10月决定在香港新界粉岭北部使用S960高强钢作为试点项目，以箱梁桥的结构形式设计及建造两座人行天桥，即F4及F6 号人行天桥。

该项目共采用630吨S960高强钢，采用机器人现场焊接。通过合理的结构分析和设计，该箱梁桥在承载力极限状态和正常使用极限状态下的结构表现均令人满意，包括挠度和振动。与起初的混凝土箱梁桥设计方案相比，F4人行桥（图13）自重降低70%，桩数也减少了30%。整体建造成本降低28%，约280万港币，并缩减了3个月的建造时间，两座人行天桥都预计于今年内向公众开放使用。该项目为香港的设计和营建工程师及各种技术人员提供了使用S960高强钢的宝贵机会。为未来几年的大型土木结构和桥梁建设项目打下坚实基础和树立典范作用。

结论

随着各国对基础设施的发展需求不断增加，结构工程师通常面临设计和建造高层建筑和大跨度桥梁的挑战：降低材料用量、缩短工期和降低造价。我们在香港的相关经验证明了使用S690高强钢是很好的解决方案，可大大减少钢材用量和建造成本。

我们鼓励结构工程师使用高强度钢材，为客户提供高效解决方案的同时还可以减少碳排放量。

致谢

国家钢结构工程技术研究中心（香港分中心）由香港特别行政区政府创新科技署和香港理工大学共同资助。感谢香港特别行政区政府发展局提供的技术和经费支持。也十分感谢香港分中心的何浩祥博士、胡亦非博士、金皓博士和朱梦飞博士在本文所提及的科研项目中做出的贡献。

© COURTESY OF CCECC

↗图 11：澳门大桥巨型桁架结构的制造及安装

© COURTESY OF CCECC

↗图 12：澳门大桥通车

↗图 13：全长34.1米的人行天桥F4段吊装

参考文献

1) British Standards Institution (2023) *BS EN 10025-6:2019+A1:2022 Hot rolled products of structural steel. Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steel in the quenched and tempered condition*, London: BSI

2) Standardization Administration of the People's Republic of China (2023) *GB/T 19879 Steel plates for building structures*, Beijing: Standards Press of China [in Chinese]

3) British Standards Institution (2023) *BS EN 1993-1-1:2022 Eurocode 3. Design of steel structures. General rules and rules for buildings*, London: BSI

4) Chung K.F. (2022) 'Effective use of high strength S690 to S960 steel in construction', *The Hong Kong Engineer*, 50 (5), pp. 8–19

5) Chinese National Engineering Research Centre for Steel Construction (Hong Kong Branch) (2023) 'Design and construction in Hong Kong using high strength S690 steel', *The Hong Kong Engineer*, 51 (11), pp. 8–16

6) Badoo N. and Meza F. (2022) *Technical Report RT-1907: High strength steel structures: A summary of research carried out at CNERC from 2015 to 2021*, Ascot: Steel Construction Institute and Hong Kong: Chinese National Engineering Research Centre for Steel Construction (Hong Kong Branch)

7) Chung K.F., Ho H.C. and Feng W. (2021) *Professional guide PG-003: Selection of equivalent steel materials to European steel materials specifications*, 2nd edn, Chinese National Engineering Research Centre for Steel Construction (Hong Kong Branch), and Chinese National Engineering Research Centre for Steel Construction

8) Chung K.F., Yam M.C.H. and Ho H.C. (2021) *Technical guide on effective design and construction to structural Eurocodes: EN 1993-1-1 Design of steel structures – S235 to S690*, 2nd edn, Construction Industry Council, Hong Kong SAR, and Chinese National Engineering Research Centre for Steel Construction (Hong Kong Branch)

9) Chung K.F., Feng W., Wang Y.C. and Ho H.C. (2021) *Introduction to Chinese steel construction industry: Steel production and technical specifications*, Chinese National Engineering Research Centre for Steel Construction (Hong Kong Branch)

10) British Standards Institution (2020) *BS EN ISO 6892-1:2019 Metallic materials. Tensile testing. Method of test at room temperature*, London: BSI

11) Jin H., Zhu M.F., Hu Y.F. *et al*. (2024) 'Investigations into mechanical properties of 50 and 70 mm thick high strength S690 butt-welded sections', *Eng. Struct*., 314, 118363; https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118363

12) Zhu M.F., Chung K F., Hu Y.F. *et al*. (2025) 'Advanced numerical simulation on effects of welding onto high strength S690 and S960 steel welded H-sections', *Eng. Struct*., 323, 119236; https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119236

13) British Standards Institution (2019) *BS EN ISO 15607:2019 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. General rules*, London: BSI

14) British Standards Institution (2019) *BS EN ISO 15614-1:2017+A1:2019 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Welding procedure test. Arc and gas welding of steel and arc welding of nickel and nickel alloys*, London: BSI