

鋼結構設計

Design of Steel Structures

李錫霖・蔡榮根 編著

- 
- 參考規範以AISC 2005年版本為主。
 - 每章皆附有習題，可供讀者自我評量參考。
 - 每章皆有參考文獻，可與內文相互對照，供讀者深入學習。
 - 例題設計配合高普考試及技師考試題型，可為國家考試參考。

TU391.04
20125

鋼結構設計

Design of Steel Structures

李錫霖・蔡榮根 編著

- 
- 參考規範以AISC 2005年版本為主。
 - 每章皆附有習題，可供讀者自我評量參考。
 - 每章皆有參考文獻，可與內文相互對照，供讀者深入學習。
 - 例題設計配合高普考試及技師考試題型，可為國家考試參考。

國家圖書館出版品預行編目資料

鋼結構設計=Design of steel structures / 李錫霖, 蔡榮根編著.

--初版.--臺北市：五南, 2009.09

面：公分

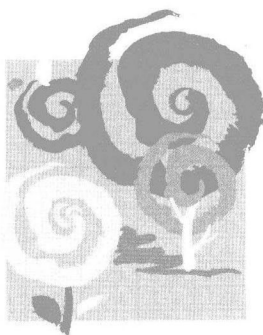
含參考書目

ISBN 978-957-11-5782-5 (平裝)

1. 鋼結構 2. 結構工程

441.559

98016062



5T13

鋼結構設計

編 著 — 李錫霖(96.3) 蔡榮根

發行人 — 楊榮川

總編輯 — 龐君豪

主 編 — 黃秋萍

封面設計 — 莫美龍

出版者 — 五南圖書出版股份有限公司

地 址：106台北市大安區和平東路二段339號4樓

電 話：(02)2705-5066 傳 真：(02)2706-6100

網 址：<http://www.wunan.com.tw>

電子郵件：wunan@wunan.com.tw

劃撥帳號：01068953

戶 名：五南圖書出版股份有限公司

台中市駐區辦公室/台中市中區中山路6號

電 話：(04)2223-0891 傳 真：(04)2223-3549

高雄市駐區辦公室/高雄市新興區中山一路290號

電 話：(07)2358-702 傳 真：(07)2350-236

法律顧問 元貞聯合法律事務所 張澤平律師

出版日期 2009年9月初版一刷

定 價 新臺幣650元

作者序 1

鋼結構設計是大學土木系必選修課程之一，課程內容除了基本理論外，還兼具工程實務應用，特別與現行設計規範更是息息相關，可以說是土木工程科技相關領域中相等重要的應用技術，特別是近代的超高層大樓及大跨距橋樑幾乎都以鋼結構為首選，因此是每位土木及結構工程師必備的基本知識。

作者自民國 79 年回國任教於中華大學(原中華工學院)起就開始教授本課程，當初在選擇教材時，發現內容比較豐富的幾本教科書都是以 FPS 制為計量單位，與國內設計規範使用的 MKS 制有所不同，考慮同學未來參加國內各種就業及技師考試以及到工程界服務的適應性，因此開始編寫講義做為課堂上課的主要教材。

在本教材編製過程中除了廣參國內外相關書籍、文獻及設計規範外，在章節的安排及例題的設計上也儘量由淺入深，循序漸進，使同學能按部就班，充分達到學習效果。在每章後面的習題部分，為使同學熟悉國內高普考試及技師考試的出題型態，也適度的將歷屆考題加入習題內供同學練習解答。在參考規範部分，因目前國內設計規範是以 AISC 1986 年版為主要依據，而 AISC 2005 年版本在內容上有大幅修改，不但 LRFD 及 ASD 已合而為一，另外在公式的常數項已儘量以無因次方式表示，所以就無不同計量單位間之公式轉換問題。因此，本教材之規範參考是以 AISC 2005 年版本(同時包括 LRFD 及 ASD)為主，但為了讓同學充分熟悉國內設計規範，各章節內有關規範之介紹及例題的演練也將國內兩本規範(極限設計法規範及容許應力設計法規範)一併包括在內。另外鑑於型鋼斷面參數在各鋼鐵公司及設計手冊所提供之斷面表內，往往有不一致情況，為避免造成學習上的困擾，因此特別參酌國內鋼構設計手冊及 CNS 標準，將國內常用斷面尺寸參數列在本書附錄，尤其是梁斷面之設計參數表也依 AISC、我國極限設計法規範及容許應力設計法規範分別列舉以方便練習使用。

為避免理論與實務間的斷層，本教材所有圖說均經台灣省結構工程技師公會蔡榮根理事長增刪校正，特別從結構設計及施工的實務需求角度提供必要的協助，在他的督促下，本書才得以順利出版。另外好友賴光博協理提供了不少現場施工照片，讓本書內容增色不少。文稿部分，從本系第一屆到本屆的大學部及碩士班同學都花了相當多的心力協助打字及繪圖，最後完稿的整理是在謝東軒、李昀融及楊捷宇等同學的大力協助下完成。對於本書的工作伙伴，謹在此致上最大謝意。

本教材從課堂講義開始到出書，前後超過十五年以上的時間，也意味超過十五屆以上同學的錘鍊。對所有為本書貢獻心力的同學謹致最大謝意。最後謹以此書獻給我最摯愛的父母及家人，您們的支持是完成本書的最大動力。希望本書的出版能帶給土木工程教育及工程界一點小小的助益。本書出版前雖已多次校核，但疏漏在所難免，敬祈各界先進不吝指教。

李錫霖 於新竹中華大學土木工程學系
中華民國九十八年五月一日

作者序 2

鋼結構已廣泛應用於國內之房屋與橋樑設計上，尤其在 921 地震後建築投資業者紛紛以耐震能力佳之鋼結構或鋼骨鋼筋混凝土結構大樓為廣告訴求，讓國內鋼結構之運用推進一新的里程碑。因此編纂一符合實務需求之鋼結構設計教材，變得刻不容緩。

鋼結構設計課程由於公式多且繁複，細部圖說多，修習本課程一向被土木系學生視為畏途。即使工程實務界，剛入行之工程師面對多且細如牛毛之繁複規範，也不知如何開始手中之設計案，現場工程師不了解鋼結構者更是比比皆是。

中華大學土木系李錫霖教授講授鋼結構設計二十年，且曾擔任知名鋼構廠顧問多年，盛情邀本人共同編纂此一理論與實務兼具之課程教材。本人除已執業結構技師二十年外，很榮幸能先後主持台北市與台灣省結構技師公會。得以彙整多年來有關鋼結構方面之特殊結構審查圖說，瞭解設計及施工實務現況，提供作為本教材範例設計之參考，以符合工程實務的需求。相信本教材將可提升土木系學生修習鋼結構設計的興趣，設計及現場工程師更可引用本教材為入門工具書，由淺入深加以觸類旁通，以克服工作上遇見之難題。

李錫霖教授與本人編纂本教材雖力求完美，但若有疏漏敬請各界工程先進加以指正。

蔡榮根 於台灣省結構工程技師公會
中華民國九十八年五月一日

目 錄

第一章 緒論

1-1 鋼鐵的歷史.....	1
1-2 鋼鐵結構案例.....	9
1-3 工程用鋼材種類.....	28
1-4 結構鋼之應力-應變.....	36
1-5 結構鋼之其他性質.....	41
1-6 鋼構種類.....	45
1-7 設計規範與法規.....	47
1-8 載重及安全條款.....	53
1-9 計量單位.....	58
參考文獻.....	62
習題.....	66

第二章 張力桿件

2-1 概述.....	69
2-2 標稱強度.....	71
2-3 淨斷面與有效淨斷面積.....	72
2-4 螺栓孔之塊狀撕裂破壞.....	80
2-5 勁度要求.....	87
2-6 載重之傳遞.....	88
2-7 張力桿之設計－極限設計法 LRFD.....	90
2-8 張力桿之設計－容許應力設計法 ASD.....	95
參考文獻.....	98
習題.....	99

第三章 壓力桿件

3-1 概述.....	105
3-2 歐拉彈性彎曲.....	106
3-3 壓力桿件強度.....	108
3-4 柱強度曲線.....	113
3-5 有效長度.....	121
3-6 壓力桿設計－極限設計法.....	127

3-7	受壓板之強度.....	134
3-8	AISC 對板寬/厚比之限制.....	140
3-9	含細長受壓肢壓力桿件之設計.....	146
3-10	柱底板之設計.....	157
3-11	壓力桿件設計－容許應力法.....	167
	參考文獻.....	193
	習題.....	195

第四章 梁

4-1	概述.....	201
4-2	梁之行爲.....	202
4-3	完全側向支撐梁之設計.....	219
4-4	不完全側向支撐梁之設計.....	230
4-5	梁之剪力設計.....	268
4-6	承受集中載重之梁腹板及翼板.....	273
4-7	撓度.....	279
4-8	雙向彎曲.....	287
4-9	梁之設計－容許應力設計法.....	291
	參考文獻.....	314
	習題.....	315

第五章 梁－柱

5-1	概述.....	323
5-2	強度交互影響公式.....	325
5-3	彎矩放大係數.....	329
5-4	有側撐及無側撐構架.....	336
5-5	極限設計法(LRFD).....	341
5-6	容許應力設計法(ASD).....	379
	參考文獻.....	395
	習題.....	397

第六章 螺栓接合

6-1	概述.....	409
-----	---------	-----

6-2	高強度螺栓之施工.....	413
6-3	螺栓之標稱強度.....	416
6-4	臨界滑動型接合.....	424
6-5	拉力桿件接合設計－螺栓受剪力作用.....	426
6-6	高強度螺栓受張力設計.....	429
6-7	螺栓受剪力及張力聯合作用.....	431
6-8	螺栓接合受偏心載重之設計.....	439
6-9	螺栓容許應力設計法.....	457
	參考文獻.....	475
	習題.....	476

第七章 銲接接合

7-1	概述.....	487
7-2	接合方式及銲接種類.....	493
7-3	銲接實務.....	496
7-4	銲道之標稱強度.....	508
7-5	銲接接合設計－極限強度設計法.....	514
7-6	銲接接合設計－容許應力設計法.....	536
	參考文獻.....	547
	習題.....	548

附錄一	國內常用型鋼斷面表.....	561
-----	----------------	-----

附錄二 H 熱軋型鋼梁設計參數表

(一)	AISC-LRFD 規範.....	584
(二)	我國極限設計規範.....	589
(三)	我國容許應力設計規範.....	594

附錄三 H 銲接組合型鋼梁設計參數表

(一)	AISC-LRFD 規範.....	597
(二)	我國極限設計規範.....	602
(三)	我國容許應力設計規範.....	607

緒論

1-1 鋼鐵的歷史

通常一般人所稱的鐵或鋼，其實是一種合金，其主要成份為鐵元素，再加上錳、鉻、鎢等金屬元素及碳、矽、硫、磷等非金屬元素所組成。其中碳扮演著最重要的角色，它決定鐵的展延性及熔點。鋼與鐵的區別主要在其含碳量之多寡如圖1-1-1所示。鑄鐵(Cast Iron)是指一般含碳量大於2%的鐵碳合金，性脆無法鍛造、軋製或壓製，不允許任何形式的機械變形，大部份用作煉鋼原料，一部份則作為鑄造鐵器。純鐵(Pure Iron)是指鐵中含碳低於0.0218%的鐵碳合金，呈灰白色，強度低用處不大，僅用於需要特殊性能的材料上，例如做為合金鐵的原料或電氣材料。鋼(Steel)是指含碳量在純鐵與生鐵之間的鐵碳合金，性質既硬且韌[1.1]。



圖1-1-1 鋼與鐵之碳含量

(一)古代煉鐵

人類的文明如果依照所使用工具來區分的話，依序為石器時代、青銅器時代、鐵器時代一直進展到現代。鐵(Iron)的開始使用，大約距今五千多年前。據推測最早使用的鐵，是天上掉下來的隕石(Meteorite)又稱隕鐵(Metallic Meteorite)，其中鐵成份可高達90%以上，鍛造性能好，強度高，但因來源有限，大多數只用在刃部。在中國、埃及及伊朗等地區出土之早期鐵器大部份是隕鐵所打造[1.1,1.2]。鐵元素(Fe)約佔地球地殼元素總量之5.5%，世界上金屬總產量的99.5%，是地球上儲存量最豐富的金屬元素。但自然界中自然鐵(Native Iron)非常少，甚至比隕鐵還少，一般皆以氧化之赤鐵礦(Hematite, Fe_2O_3)或磁鐵礦(Magnetite, Fe_3O_4)方式存在礦石(Ores)中[1.1,1.2]。我們的祖先早在4萬年前，就已把赤鐵礦從豐富的自然界中辨認出來，北京周口店的山頂洞人已經知道用赤鐵礦作顏料和裝飾物了。赤鐵礦是自然界中含鐵礦物最容易還原成金屬的一種，在有碳存在的環境下，一般在800~1000℃就可將鐵熔出。根據推測，人類最早是在一種偶然的情況下，在

燃燒材薪時將鐵從礦石中熔出。另一種說法認為鐵用火提煉赭色顏料的副產品。西元前3500年古埃及人就已知道開採鐵礦及熔煉鐵，在最初因產量很少，非常貴重，只供裝飾或儀式使用[1.1,1.3]。

約在西元前一千五百年，亞美尼亞(Armenia)出現改良的熔煉鐵技術稱為米坦尼製程(Mitanni Process)，提供了再加熱(Reheating)及錘打(Hammering)技巧，使鐵具備了比銅(Copper)及青銅(Bronze)更優越的使用性質。西元前一千四百年，西臘的多利安人(Dorian)利用鐵製武器征服了只擁有銅製武器的米諾人(Minoans)，並造成米諾文明在西元前一千一百年的消失瓦解。在當時鐵製武器技術是一項高度的機密，一直到了西元前一千二百年代，這項技術才廣為流傳，不再是機密，而人類歷史開始進入所謂的鐵器時代(Iron Age)[1.3]。歐洲最早使用的鐵爐是穴式爐(Pit Type Furnace)或用土石塊堆砌而成的低軸式(Low-Shaft Type)鍛鐵爐。將礦石洗淨後，與木炭一起放入爐中點火熔煉。利用自然氣流供給燃燒所需空氣，或者用手拉風箱鼓入空氣，空氣中的氧和木炭中的碳作用生成一氧化碳，將氧化鐵還原成鐵。這種方式所生產的鐵塊一般都夾雜著爐渣(Slag)，把這塊鐵反覆地加熱捶打，將大部份的爐渣擠出後，就可打製成所需要的成品[1.14]。

根據「尚書」禹貢篇的記載，中國人在夏禹時代(約西元前2000年~前1560年)已開始使用鐵製農具。古代煉鐵多採用鼓風爐(Blast Furnace)，最初由於鼓風工具效率不佳，煉鐵技術的發展並不是很順利，一直到了周朝(西元前1066~前771)風箱(古稱橐)發明後，煉鐵工業才逐漸興盛及成長[1.1,1.5]。古代鐵爐的構造誠如「天工開物」[1.6]第十四卷五金編鐵節所言「凡鐵爐用鹽做造和泥砌成。其爐多傍山穴為之，或用巨木匡圍塑造鹽泥，窮月之功不容造次，鹽泥有罅盡全功。凡鐵一爐載土二千餘斤，或用硬木柴或用煤炭或用木炭，南北各從其便。扇爐風箱必用四人六人帶拽。土化成鐵之後，從爐腰孔流出。爐孔先用泥塞，每旦晝六時一時出鐵一陀。既出即又泥塞，鼓風再熔。凡造生鐵為冶鑄用者，就此流成長條圓塊，範內取用。」這種鐵爐爐身只五六尺高，鼓風少，爐過低，只能出產白口鐵(White Pig Iron)(生鐵的一種，因其斷面呈白色之碳化鐵，碳與矽含量較灰口鐵(Gray Pig Iron)少，質硬不易切削)，效率低產量少，極不經濟。在鐵器時代早期的鐵是無法熔化及模鑄，因為純鐵(Pure Iron)熔點是 1535°C ，對當時的鑄造廠來說，這個溫度是很難達到的。一直到西元前300年(戰國時期)，中國鐵匠發現在熔煉鐵礦時加入木炭(Charcoal)會產生糊狀的金屬液體，也就是當木炭中的碳元素(Carbon)跟鐵混合時，可以產生融點為 1130°C 的合金，這溫度是燃燒木炭可達到的溫度，因此開始可以模鑄來生產鑄鐵(Cast Iron)[1.4,1.6]。

歐洲一直到西元800年才在北歐的斯堪的那維亞(Scandinavia)出現類似鼓風爐的鑄鐵煉冶技術，在西元1200年西班牙出現以水力推動鼓風的的煉鐵技

術以生產製作熟鐵(Wrought Iron)所需的鐵料。在水力取代人力，以帶動鍛錘進行鍛造工作後，鍛鐵爐的截面積與高度也逐漸增加，再加上爐中熱效率的改進，爐溫因而提高，這時還原所得的鐵熔為液體匯集在爐底，其他的成份則成為爐渣而浮在鐵液表面。這時所煉得的鐵不再含有爐渣，但其含碳量卻增加。因含碳量提高，所以失去延展性，必須經過精煉手續以除去過剩的碳、矽等元素來恢復其延展性，慢慢的鍛鐵爐便發展成為高爐(或稱鼓風爐)(Blast Furnace)。當高爐問世後，接著就發展出鐵的鑄造技術，將高爐煉得的鐵，放入熔鐵爐(Lowshaft Furnace)重熔後，倒進砂模中即得鑄鐵[1.4]。歐洲真正的鼓風爐是在西元1340年出現於比利時。在歐洲開始知道如何製造鑄鐵時，中國的鑄鐵年產量已達15萬噸[1.3]。

古時煉鋼，將生鐵(鑄鐵)炒成熟鐵是第一步，熟鐵性軟易錘，適合錘製成各種型態的器物，但在錘製過程中為保持高溫，常將鐵埋到燒紅的炭裏頭，結果熟鐵中慢慢滲入了碳份而逐漸變硬，這就是古代所謂「百鍊成鋼」的由來。生鐵性脆，熟鐵性韌，鋼的性質硬而且韌，古人雖不知道是因為含碳量多寡的關係，但卻知道「凡鐵分生熟；出爐未炒則生，即炒則熟。生熟相和，煉成則鋼」(「天工開物」第十四卷五金編鐵節)。因為古時設備不夠好，爐溫太低，熟鐵又不容易熔，於是想出生鐵淋刃的辦法。「天工開物」第十卷錘鍛篇鋤鑄節言「凡治地生物用鋤鑄之屬，熟鐵鍛成，鎔化生鐵淋口，入水淬健即成剛勁」[1.6]。

西元前770年到西元前221年是中國歷史上的春秋戰國時期，是一個百家爭鳴，百工爭妍的時代，也是中國歷史上第一次科學技術高度發展的時期。它與幾乎同期的古希臘分別在世界的東西兩端形成了兩個科學文明代表。第一次出現「鐵」字是在「左傳」裏，記錄了西元前513年晉國鑄刑鼎的事件。中國古代的冶鐵技術在漢朝(西元前206年至西元220年)前後約四百年間逐漸發展成熟。在河南鄭州市郊古滎鎮出土的漢代高爐，其爐缸橫截面積為橢圓型，根據遺址的殘跡和積鐵等資料將此高爐復原，其容積約44立方米，是2000年前世界上最大的高爐。高爐斷面由圓發展到橢圓，在鼓風機械能力很弱的古代，可稱是強化高爐的一個有效途徑。中國在2000年前發明橢圓高爐，遠比西方整整早了1800年，美國是在西元1850年才建成兩座橢圓形高爐，英國建成一座，其後不久，瑞典和俄國也相繼出現了橢圓形高爐。在這時期中國煉鐵技術的另一項突破是使用石灰石當作助煉劑，在爐料中加入石灰石，可降低爐渣熔點，改善高爐操作，另外還能降低生鐵中含硫量，改善生鐵的品質，是冶金史上一重大的發明。使用水推動風機，大量節省人力，對冶鐵工業發展有著很大的影響，中國早在東漢(西元25年至西元220年)即開始使用水力鼓風，而歐洲大約在12世紀才開始用，英國第一個水力鼓風的煉鐵爐是建於西元1408年 [1.1,1.3]。

早期煉鐵燃料是以木炭為主，鐵礦附近的山林常常被砍成為童山，礦山因無燃料而報廢。到了魏晉南北朝(西元265年至西元581年)以煤炭(Coal)取

代木炭的煉鐵技術的成熟後，才使煉鐵工業更往前推進了一大步。而在歐洲一直到了十七世紀初，於1611年才在英國出現了以煤炭取代木炭的煉鐵製程專利，在十七世紀以前歐洲也是以木炭煉鐵，英國在1600年時幾乎耗盡了大部份的森林[1.3]。唐朝時期(西元618年至西元907年)大型鑄件的發展也很突出，武則天曾在洛陽徵民間銅鐵鑄造「天樞」，高達37公尺，直徑3.5公尺，上刻頌文[1.3,1.7]。宋朝(西元960年至西元1279年)時期發明了由木箱和木扇組成結構較堅固的木風扇，其剛性較皮囊好，操作方便，風量大，漏風少，使冶煉過程得以強化。宋代煉鐵所用的豎爐稱蒸礦爐，爐的內形已接近於近代的高爐[1.1]。

明朝時期(西元1368年至西元1644年)煉鐵工業的發展是和焦炭(Coke)煉鐵技術分不開的。在方以智所著之「物理小識」[1.8]曾敘述煉焦及用焦炭煉鐵的過程：「煤則各處產之，臭者燒熔而閉之成石，再鑿而作爐曰礪，可五日不絕火，煎礦煮石，殊為省力」。煉焦是將含揮發物較多的煉焦煤(有臭味的煤)在密閉條件下，高溫煅燒煉成堅硬的焦炭，不但使其含硫量大為降低，且其火力旺盛耐久，是煉鐵的優質燃料。焦炭也不像木炭和煤炭那樣易碎，造成爐內氣流不暢甚至堵塞煉爐。中國發明焦炭，最少比西方早100年，在歐洲一直到1709年才由英國的亞伯拉罕(Abraham Darby)發現了使用焦炭產製高品質鑄鐵的方法[1.1,1.3]。明朝末年宋應星的「天工開物」是中國古代比較完整的生產技術百科全書，在其五金、冶鑄及錘鍛篇中對鐵的冶煉及鍛造技術皆有詳細的介紹，圖1-1-2為「天工開物」中有關中國古代煉鐵的圖解說明[1.6,1.7,1.9,1.10]，英國學者李約瑟把宋應星跟十八世紀法國主編「百科全書」的狄德羅(Denis Diderot)相比擬，稱宋應星為中國的狄德羅[1.11]。

明末清初，即16世紀末到18世紀初(明萬曆到清康熙，西元1573~1722)的一百多年間，西方科技知識開始傳入中國，為中國傳統科學技術注入新血。但到清朝中葉後，因採閉關自守政策，使西方科學技術的傳入停頓了一百多年之久。在中國閉關自守期間，特別是在十八世紀中葉(西元1750年)以後，歐洲展開了工業革命，其鑄鐵生產技術也漸趨成熟，因鑄鐵可以輕易模製成各種形狀，因此在工業革命中大量的被應用在各種新發明的機器上，例如蒸汽機的發明，機器逐漸取代人力，中國便失去了礦冶技術的長期領先地位。



(1) 冶煉生鐵



(2) 炒熟鐵

圖1-1-2 天工開物冶煉生熟鐵示意圖[1.6]

(二)古代煉鋼

鋼的機械性能遠高於鑄鐵，中國在春秋戰國時期(西元前770年至西元前221年)就已掌握了製鋼技術，後漢的史書「吳越春秋」和東漢的吳、越兩國史書「越絕書」中，都記載了春秋時期吳國著名匠師干將和歐冶子製鋼劍的傳說。「吳越春秋」闔閭內傳言：「於是干將妻乃斷髮剪爪，投於爐中，使童女童男三百人鼓橐裝炭，金鐵乃濡。遂以成劍，陽曰干將，陰曰莫耶，陽作龜文，陰作漫理」，這就是武俠小說中大家所熟知的干將及莫耶陰陽二劍。從出土實物得知春秋戰國時期的製鋼工藝有鑄鐵脫碳和滲碳製鋼兩種。鑄鐵脫碳鋼是由鑄鐵(生鐵)柔化技術發展來的，它是將生鐵的鑄件經過脫碳退火，通過適當控制時間和溫度，使生鐵中多餘的碳被氧化成氣體脫出而成鋼。滲碳製鋼是將以塊煉法煉出的熟鐵加熱滲碳以得到鋼的技術，中國最早期的煉鐵因溫度較低在與生鐵冶煉技術發展的同期，還有一種稱作塊煉鐵冶煉技術，是用木炭把煉爐中的鐵礦石加熱到攝氏800到900度，讓鐵礦石還原得到鐵，這種鐵含有大量雜質，且含碳量不高，必需經由反覆錘打擠出雜質，再鍛打成器，這種材質含碳量低，近於純鐵，需要經由滲碳處理使其碳

分增高成為鋼製品。1976年湖南長沙出土了一把春秋末期的鋼劍，含碳量為百分之0.5~0.6，為中碳鋼。漢朝(西元前206年至西元220年)時期的炒鋼技術是把生鐵加熱到熔化後，在熔池中加入攪拌，促使空氣中的氧氣將生鐵中所含的碳氧化掉，以降低生鐵的碳含量，再經反覆鍛打以得到組織較為均勻的鋼材，該項技術可以生產出大量的鋼(Steel)或熟鐵(Wrought Iron)。掌握炒鋼的火候需要很高的技術和豐富的經驗，火候過了頭，碳的逸出過多，就成了熟鐵。所以常常乾脆炒成熟鐵，再以熟鐵為原料鍛製百煉鋼。百煉鋼是我國古代質量最好的鋼材，其冶煉方法是把熟鐵反覆加熱鍛打，在加熱的過程中碳逐漸滲入鐵中，而鍛打則可減少其中雜質，使鋼的組織致密、成份均勻，歷史上很多名劍就是用這種方法煉製的。鋼的出現使得人們可以製造更精良的工具和兵器 [1.1]。在歐洲一直到了西元1614年才出現滲碳處理的滲碳鋼(Cementation Steel)技術專利，在西元1742年，英國的班哲明(Benjamin Huntsman)發明了坩堝煉鋼法(Crucible Process)，其法是把小片生鐵放在耐火泥做的閉合坩堝內，然後放到焦炭火內，其溫度可達1600 °C，這是在當時第一次達到可以熔鋼的高溫，可以生產品質均勻的鋼或合金材料，用於製造鐘錶所需彈簧，後經改良，是二十世紀電爐出現以前，製造高品質工具鋼及高速鋼的最完全方法[1.3,1.4,1.11]。

炒鐵時，若炒得過火，含碳量太低，就要加入一些生鐵來補救，久而久之，便發明了灌鋼技術。所謂灌鋼，是將生鐵熔化灌注到熟鐵料中，使生鐵中的碳以較快速度滲入熟鐵中，再經反覆鍛打，使其成分均勻，煉得品質較好的鋼。這種方法至遲出現於南北朝時期(西元265年至西元581年)，也許可以上溯到晉代或漢末。在「天工開物」中詳細介紹了生熟鐵連續生產的技術如圖1-1-2，若要煉熟鐵，便應按生鐵流向，在離爐子數尺遠，低數寸的地方築一個方塘，四周砌短牆，讓鐵水流入塘內，幾個人拿著柳木棍站在牆上，一個人迅速把用污潮泥晒磨成的粉灰均勻撒播在鐵水面上，另幾個人就用柳木棍疾攪，這樣生鐵就「炒成熟鐵」了。其中的「污潮泥」應是含有矽酸鐵和氧化鐵的泥土，它能促使生鐵中的碳氧化成二氧化碳，後來污潮泥改用鐵礦粉。由於碳的含量減少，生鐵就成熟鐵了。這種將煉鐵爐和炒鋼爐串連起來使用，可以免去生鐵再熔化的過程，既降低了耗費，又提高了生產率。到清初康熙年間，方法再經過改良，不加鐵礦粉也不用木棍，只將生鐵打碎再加熱氧化就變成熟鐵。灌鋼(團鋼)技術在明朝時期也被進一步改進，在「天工開物」中提到先將熟鐵打成薄片如指頭寬，長約一寸半，然後以鐵片包緊，再將生鐵放置在包緊的熟鐵上及覆蓋上塗有泥土破草鞋，鐵片下還要塗上泥漿，放進熔爐用力鼓風，當到達需要溫度時，生鐵便先熔化而滲入熟鐵內，兩者互相結合後取出錘打，反復多次的再煉及再錘，就可得到所謂團鋼或灌鋼，用塗泥的破草鞋覆蓋，可使生鐵在還原環境下逐漸熔化且不致於立即被燒毀。新灌鋼法最大的優點是使生鐵液能夠均勻地灌到熟鐵薄片的

夾縫中，增加了生熟鐵之間的接觸面積，使生鐵中的碳能更迅速均勻地滲入熟鐵中[1.1,1.6,1.10,1.12]。

(三)近代煉鐵與煉鋼

所謂近代是指工業革命以後的時期，在煉鐵技術上有相當大的進展。十八世紀上葉在法國及瑞典出現了吹氣煉鋼的直吹爐(Converter)又稱魯崔式直吹爐(Reaumur-Swedenbergs Converter)，以木炭為燃料，可傾動拆卸，爐缸上有風管，出鐵口位在風管對面，礦料由爐口加入。西元1784英國人亨利(Henry Cort)發明了攪煉法(Puddling Process)，是歐洲第一個真正的工業化煉鐵製程，可以直接把生鐵煉製成鋼或熟鐵，其技術與中國在第三世紀(漢朝)所使用的炒鐵技術類似，在反射爐(Reveratory Furnace)內以棍子攪拌熔化的生鐵使其接觸空氣中的氧來控制其含碳量，該法可以獲得含碳量控制的高品質鋼鐵，特別適合刀箭及武器製造。西元1776年瓦特發明了蒸汽機之後，便開始利用蒸汽引擎鼓風[1.1,1.3]。

西元1856年英國柏塞麥(Henry Bessemer)提出柏塞麥轉爐煉鋼法，柏塞麥轉爐煉鋼法成功的找到吹氣入爐內的訣竅而煉出鋼，此為酸性轉爐法，是世界上首次出現的商業化大量製鋼技術，只要20分鐘，就能達到過去使用攪拌煉鋼爐24小時的產量，大大提升了煉鋼的效率，大量煉鋼的時代，由此開始[1.1,1.3,1.13]。

西元1868年，德國的威廉西門(William Siemens)和佛里得瑞西門(Freidrich Siemens)兄弟為了克服柏塞麥法煉鋼品質十分不穩定的問題，在英國的伯明罕發明了平爐法(Open Hearth Process)煉鋼，是由柏塞麥法煉鋼中演變而來，其原理是按照炒熟鐵的方法把生鐵、廢鋼和鐵礦石一起熔化炒煉，其作用一方面是除碳，另一方面是保留適當的含碳量，該法能提煉出含碳量適當且品質優良的軟鋼，在西元1950年以前，85%的鋼料是使用平爐法提煉的，十八世紀末迄二十世紀之七〇年代，平爐煉鋼仍然扮演相當吃重的角色，尤其在二次大戰之前，先進國家的鋼鐵一半以上產自平爐。直到西元1980年代末期絕大多數的共產國家如前蘇聯中亞地區、烏克蘭、中國大陸、波蘭、捷克等，還有若干平爐煉鋼在使用中，不過進入二十一世紀之後，平爐煉鋼由於能源利用與生產效率均不佳，目前幾乎已完全淘汰。柏塞麥轉爐煉鋼法，只能煉低磷硫生鐵，但歐洲的鐵礦都含有高量磷硫，如果鋼中含有大量磷硫會造成熱脆冷裂的不良特性，西元1877年蘇格蘭湯馬斯(Sidney Gilchrist Thomas)發表「柏塞麥爐中去磷法」論文，其法係採用鹼性爐襯解決去磷問題，且可利用脫磷反應熱作熱源[1.1,1.3]。

在西元1831年法拉第(Michael Faraday)發現了電磁感應(Electromagnetic Induction)而發明發電機後，在1879年威廉西門(William Siemens)發明了電爐(Electric Furnace)煉鋼，用電發熱煉鋼，好處是爐溫可以提高、熔化迅速、不會有雜質進入鋼鐵內、且能熔化熔點較高金屬藉以製成各類合金鋼，現代

煉鋼廠所用的電弧爐(Arc Furnace)基本上都是威廉西門電爐的改良。十九世紀未到二十世紀初出現的感應爐(Induction Furnace)，係利用電磁感應原理以熔化金屬，採用的交流電源有基頻(50或60赫)、中頻(60~10000赫)和高頻(高于10000赫)三種，西元1930年以後高週波爐變成了高級合金鋼冶煉的標準設備。在西元1980年之前，幾乎所有之電弧爐均屬交流式，但當直流式電爐出現後，由於其具有有噪音少、閃爍電震低、能源效率高等優點，故目前已有逐漸興起之勢[1.1,1.3]。

西元1950年以後，工程師發現將氧氣直接吹入爐內，所得到鋼的品質更勝過平爐所煉之鋼，其熱效率及產量較轉爐高，但建造費較平爐為低，因此柏塞麥轉爐煉鋼法又大為盛行。本煉鋼法最早是由奧地利聯合鋼廠(Voest Steelwork)，在林茨(Linz)和多那維茨(Donarwitz)兩地工廠聯合研究開發成功的，因此取兩廠字首而命名為LD轉爐法(LD Converter)。此法是將純氧經由水冷式的吹氧管(Oxygen Lance)，從爐口以高速吹進爐中之熔鐵中。LD轉爐法迄今風行全球，使煉鋼技術邁進一個新紀元。1977年7月，中國鋼鐵公司，也引進150噸的LD頂吹氧氣轉爐[1.1,1.3]。

1-2 鋼鐵結構案例

(一) 光孝寺東西鐵塔(西元963年) [1.7,1.14,1.15]

全稱為報恩光孝禪寺，是廣州市歷史最悠久的寺院建築，為廣州市四大叢林(光孝、六榕、華林、海幢)之一。西元246年，交州分為交、廣兩州，合浦以北屬廣州，管轄有南海、蒼梧、鬱林、合浦四郡。廣州又稱羊城，所以有「未有羊城，先有光孝」的諺語。五代南漢時，在大寶六年(西元963年)和十年(西元967年)，先後建造東西兩座鐵塔，各七層，高約二丈(7.69公尺)，精刻細作，惟妙惟肖。可惜西鐵塔已倒塌，只剩餘塔基部分。這座塔的基座上有盤龍圖案和蓮花寶塔，鑄造得十分精細，是國內目前發現最大、最古老及最完整的鐵塔。

在中國佛教史上，光孝寺的地位十分重要，禪宗始祖達摩禪師曾在此掛塔，六祖惠能當年曾在這裏作過著名的“風幡論辯”而名聲威震佛門。當年，惠能因為聰明和智慧，從五祖弘忍那裏繼承了衣鉢(袈裟)，卻遭到了以神秀為首的師弟兄們的妒忌，而遭追殺。惠能一路南下，回到新興故鄉後隱姓埋名16年。直到唐高宗上元三年(西元676年)有一天夜晚，印宗法師正在講經，惠能悄悄地進去恭聽。忽然吹來一陣大風，懸掛在大殿的佛幡被吹得左右搖動，弟子們議論紛紛。有的說：「幡是無情物、是風在動。」有的說：「明明是幡動，這哪里是風動？」一時間雙方各執一詞。惠能在旁邊聽著，覺雙方未能識自本心，便說：「不是風動，也非幡動，而是人的心在動。如果仁者的心不動，風也不動，幡也不動了。」在座的人一聽，無不感到震驚。印宗法師見惠能語出不凡，便邀請他入室詳談，惠能這才將珍藏了16年的袈裟和聖鉢出示，印宗這才知道，原來他就是人們追尋了16年的六祖。然後印宗法師在光孝寺給惠能削髮受戒。從此，惠能便成為佛教禪宗的六祖，光孝寺因此而名揚天下。

(二) 玉泉寺玉泉鐵塔(西元1061年) [1.9,1.16,1.17]

玉泉寺坐落于湖北省當陽縣玉泉山的東麓。是中國最早的佛教寺院之一，素來享有“荆楚叢林之冠”的美譽，是湖北省最大的佛寺。玉泉寺為中國佛教天台宗的四大祖庭之一，初名普淨庵，隋開皇十三年(西元593年)，高僧智凱奉詔建寺，改名玉泉寺。北宋嘉祐六年(西元1061年)為重脩唐高宗、武則天所授舍利而鑄建，原名佛牙舍利寶塔，俗稱稜金鐵塔、如來舍利塔及千佛塔等。為仿木構樓閣式，八角十三級，通高約17公尺，連塔基高達22公尺，共用鐵七萬六千六百斤。鐵塔由地宮、塔基、塔身、塔剎四部分組成。地宮為石質六角形豎井，內置漢白玉須彌座，座上置石函三重，函中供奉舍利。塔基為特製的青磚砌成，塔身為生鐵鑄造，塔剎為銅質，形似為寶葫蘆。鐵塔通體不施榫扣也不加焊粘，係逐件疊壓而成。它對研究中國古代