



防蝕工程學會

防蝕工程

期刊網址：<http://www.anticorr.org.tw>

防蝕工程

Journal of Chinese Corrosion Engineering

June 2022 Vol. 36 No. 2 第36卷第2期 第1~11頁

ISSN 10376-7606

10.6376/JCCE.202206_36(2).0001

10.6376/JCCE.202206_36(2).0001

10.6376/JCCE.202206_36(2).0001

10.6376/JCCE.202206_36(2).0001

10.6376/JCCE.202206_36(2).0001

10.6376/JCCE.202206_36(2).0001

10.6376/JCCE.202206_36(2).0001

10.6376/JCCE.202206_36(2).0001

10.6376/JCCE.202206_36(2).0001

抗潛變經濟型高溫壓力容器用鋼開發 Development of Economical Anti-Creep Steel for High Temperature Pressure Vessel

吳宗峯^{*1}、陳昱文²
Tsung-Feng Wu^{*1}, Yu-Wen Chen²

中文摘要

2.25Cr-1Mo 鉻鉬鋼具有良好之抗高溫潛變特性性質，故常被使用於焚化爐外殼、高溫儲槽等高溫壓力容器設備。一般利用軋延後空冷+正常化熱處理+回火製程方式進行生產，然其製程長、且需經歷多次降溫再升溫程序，對生產成本及能耗表現均有不利的影響。該鋼種除需滿足成分、冶金特性及機械性質之要求外，還需達到規範所要求長時間之抗高溫潛變性質。本研究嘗試以控制軋延時之冶金組織，省略正常化製程後、直接施以回火處理之方式進行此產品開發，藉由評估其產品性質與抗高溫潛變能力，以確認此製程之可行性。試驗結果顯示：以此製程方式生產之鋼材，其機性可符合規範要求。以 Larson-Miller 參數法進行模擬長時間使用後之高溫潛變性質評估，其結果亦可滿足規範要求、且優於以正常化製程生產之鋼材，成功開發 2.25Cr-1Mo 抗潛變經濟型高溫壓力容器用鋼。

關鍵詞：2.25Cr-1Mo 鉻鉬鋼、省製程、Larson-Miller 參數法、高溫潛變。

Abstract

2.25Cr-1Mo steel is usually designed as the materials for the high temperature Pressure Vessel Plates, such as incinerator shells and high temperature storage tanks because of its excellent properties of resistance to high temperature creep. The steel plate is normally produced by using a combination process of temperature controlled rolling, normalization, and tempering heat treatments. However, its manufacturing process is long, and it needs to go through several cooling and heating procedures, which adversely affects the production cost

收到日期：110年12月08日

修訂日期：111年03月26日

接受日期：111年05月14日

¹ 中鋼公司 鋼鐵研發處 產品應用技術組

¹ Product Application Technology Section, Iron & Steel R & D Department, China Steel Corporation

² 中鋼公司 鋼鐵研發處 鋼鐵產品發展組

² Steel Product Development Section, Iron & Steel R & D Department, China Steel Corporation

*聯絡作者：152140@mail.csc.com.tw

and energy consumption performance. For this steel, the requirements of the composition, metallurgical and mechanical properties should be met, but also the high temperature creep resistance for the EN specification. In this study, we try to develop the process-saving manufacturing method by controlling the metallurgical structure during the rolling procedure, thus the normalization process can be omitted. The effect of high temperature creep resistance was evaluated to confirm the feasibility of this process. The experimental results show that the metallurgical structure and mechanical properties of the steel produced by this process-saving method can meet specification requirements. The Larson-Miller parameter method is used to evaluate the creep properties of high temperature. The results can also meet the requirements of the specification and are better than the steel produced by the traditional method. The economical anti-creep 2.25Cr-1Mo steel for high-temperature pressure vessel is thus successfully developed.

Keywords: 2.25Cr-1Mo steel; process-saving manufacturing method; Larson-Miller Parameters; High temperature creep.

1. 前言

2.25Cr-1Mo 為高溫壓力容器用之 Cr-Mo 鋼，因具有優異的抗高溫腐蝕特性，常用於焚化爐外殼、高溫儲槽等用途，然國內目前並無生產，悉數均需仰賴進口，遂進行此產品開發以滿足下游客戶需求。而此鋼材常見之規範為 ASTM A387^[1] Gr.22 以及 BS EN 10028-2^[2] 1.7380 (10CrMo9-10)，二者僅於 C、Mn、P、S 等元素組成、以及強度要求上限值存在些微差異。為擴大開發鋼種之市佔率及使用範圍，所開發之鋼材將同時符合上述二規範成分及機性之鋼材。然 EN 10028-2 1.7380 規範除成分、高溫強度需滿足要求外，另在特定溫度區間下，需滿足使用 10,000 ~ 200,000 小時下不發生斷裂及發生 1% 潛變率之最小應力要求。基於此目的，遂需進行此材料之高溫潛變性質評估。

為使產品具競爭力，此鋼材採用控制軋延、省略正常化程序，藉以控制鋼材冶金組織、同時兼具省製程方式進行開發，然而，以此方式生產之鋼材，其高溫潛變特性是否能滿足要求，且與正常化製程之材料間是否有所差異，將利用本研究進一步進行試驗及探討。

2. 實驗方法

2.1 材質成分與製程選用

為同時滿足 ASTM A387 Gr. 22 與 EN 10028-2 1.7380 之合金成分規範，取二規範之成分交集範圍進行開發鋼材之合金設計。圖 1 為 2.25 Cr-1 Mo 鋼材之連續冷卻變態圖(continuous cooling transformation, CCT)^[3]，本研究捨去以軋延後空冷+正常化熱處理+回火製程之製程，改採用控制軋延製程、省略正常化程序，以變韌鐵取代原肥粒鐵+波來鐵組織，同時控制回火條件以滿足顧客於 A387 Gr. 22 CL 1 及 CL 2 之材料強度需求，並與文獻^[4]中以正常化製程生產鋼材(NIMS-#MAF)之數據進行比對。

2.2 金相組織觀察與機性量測

選擇特定溫度、進行不同回火時間之調整，並進行金相組織觀察及機性量測，藉以選定符合 A387 Gr. 22 CL 1 及 CL 2 規範要求之回火參數。另外，針對上述鋼材分別進行高溫拉伸試驗，以做為後續進行高溫潛變試驗時選用外加應力及溫度時之參考依據。

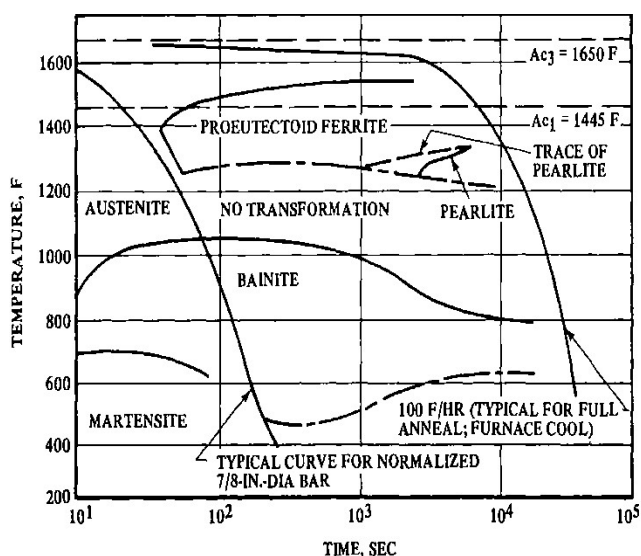


圖 1 2.25 Cr-1Mo 鋼材之連續冷卻變態圖^[3]。
Figure 1 Continuous cooling transformation (CCT) diagram of 2.25 Cr-1Mo steel^[3].

2.3 高溫潛變試驗及臨界應力值之評估

EN 10028 針對 1.7380 (10CrMo9-10)鋼材於不同溫度下使用 10,000 小時、100,000 小時及 200,000 小時產生 1%潛變應變及潛變破壞，有最低強度要求，如表 1 所示。然長時間之高溫潛變試驗曠日廢時且不切實際。目前已發展出多套可

藉由有限之高溫潛變數據來推導於不同溫度、應力條件下之使用壽命方式^[5]。

本研究採用基於 Arrhenius 方程式推導而得之 Larson-Miller 參數法^[6]，如式(1)

$$\text{Log}(\sigma) = (T + 273) (20 + \log t_r) \times 10^{-3} \dots(1)$$

參照拉伸試驗之結果，選定較高溫度 T(°C) 或較高應力(σ)進行潛變破斷試驗，利用各選用參數所得之斷裂時間(t_r)，經迴歸可得 Larson-Miller 參數，並可藉以計算出於特定溫度/應力下之預估破斷所需時間，以此判定是否滿足規範之壽命要求。

高溫潛變試驗使用 ATS Series 2330MM 潛變試驗機，試棒示意圖如圖 2 所示，其中，兩端之凹槽用於與伸長計連接以記錄其潛變率。施以固定荷重進行拉伸。試驗進行前，先升溫至特定溫度並恆溫 10 分鐘後確認試片內外已達預定之溫度，再施加所需之荷重進行應力破斷試驗，並記錄斷裂所需之時間、斷裂發生之應力、潛變率等數據。

表 1 EN 10028 Part 2 1.7380 規範鋼材產生 1%潛變應變及潛變破壞之最小強度。
Table 1 Strength for 1% (plastic) creep strain and creep rupture of steel # 1.7380 in EN10028 Part 2.

溫度	產生1%潛變應變之強度(MPa)		潛變破壞強度(MPa)		
	10,000 h	100,000 h	10,000 h	100,000 h	200,000 h
450	240	166	306	221	201
460	219	155	286	205	186
480	180	130	241	170	152
500	147	103	196	135	120
520	119	78	156	103	91
530	107	68	138	90	79
540	94	58	122	78	68
550	83	49	108	68	58
560	73	41	96	58	50
570	65	35	85	51	43
580	57	30	75	44	37
590	50	26	68	38	32
600	44	22	61	34	28

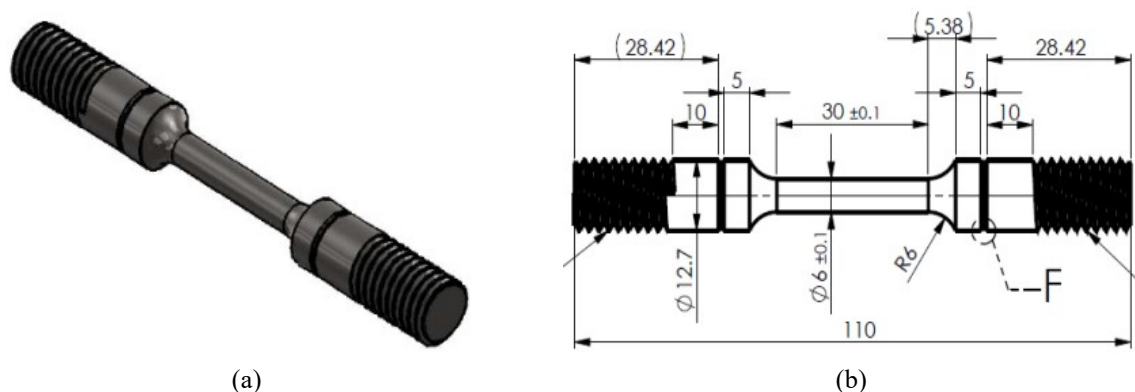


圖 2 高溫潛變試驗試棒示意圖。
Figure 2 Schematic diagram of specimens used in the creep test.

3. 結果與討論

3.1 材質成分分析結果

開發材的 C 含量為 0.08%、Cr 為 2.18%、Mo 為 0.90%，滿足 A387 Gr. 22 成分要求(表 2)；若以 EN 10028-2 1.7380 規範而言，開發材之 Mn 含量為 0.54%略高於規範值，但差異不大。整體而言，本研究中之開發材之合金成分均滿足 ASTM 及 EN 規範要求。

3.2 金相觀察與機性量測結果

圖 3 為開發材經完軋後、以及經不同回火時間熱處理後之光學(optical microscopy, OM)金相觀察結果。完軋後呈現變韌鐵+麻田散鐵/殘留沃斯田鐵(M/A)，以及少量白色肥粒鐵組織(圖 3(a))。經回火處理後，於短時間下即可生成緻密的碳化物析出(圖 3(b) ~ (d))，與 2.25Cr-1Mo 正常化製程之肥粒鐵+波來鐵組織明顯不同。另

外，開發材經回火時間 t_2 及 t_3 之強度分別可滿足 A387 Gr. 22 CL 2 及 CL 1 規範要求，故以下以此回火條件做為後續高溫潛變之評估參數，試片編號列如表 3 所示。

進一步針對上述 CSC-CL1、CSC-CL2 開發材進行掃描式電子顯微鏡(scanning electron microscopy, SEM)金相觀察。由圖中顯示金相組織差異不大(圖 4)，基材為變韌鐵組織，另有緻密的碳化物於晶界及基材中析出。進一步以穿透式顯微鏡(transmission electron microscope, TEM)進行解析，由明視野照片(圖 5(a))得知析出物大小為奈米(nm)等級。經 EDS 分析及擇區繞射解析(圖 5(b))結果得知，其析出物包括 M_2C 之 Mo_2C 以及屬於 M_3C 之 $(Fe,Cr)_3C$ 等碳化物。而此富 Cr、Mo 之碳化物於受應力的高溫環境下可有效的阻礙差排的移動^[7]。

表 2 2.25Cr-1Mo 鋼材之化學組成規範要求。

Table 2 Chemical composition of 2.25Cr-1Mo steels of specifications.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	N	Cu	Al	Ni
ASTM A387 Gr. 22	0.05 ~ 0.15	≤ 0.50	0.30 ~ 0.60	≤ 0.035	≤ 0.035	2.00 ~ 2.50	0.90 ~ 1.10	--	--	--	--
EN 10028-2 1.7380	0.08 ~ 0.14	≤ 0.50	0.40 ~ 0.50	≤ 0.020	≤ 0.010	2.00 ~ 2.50	0.90 ~ 1.10	≤ 0.012	≤ 0.030	--	--

單位：wt %

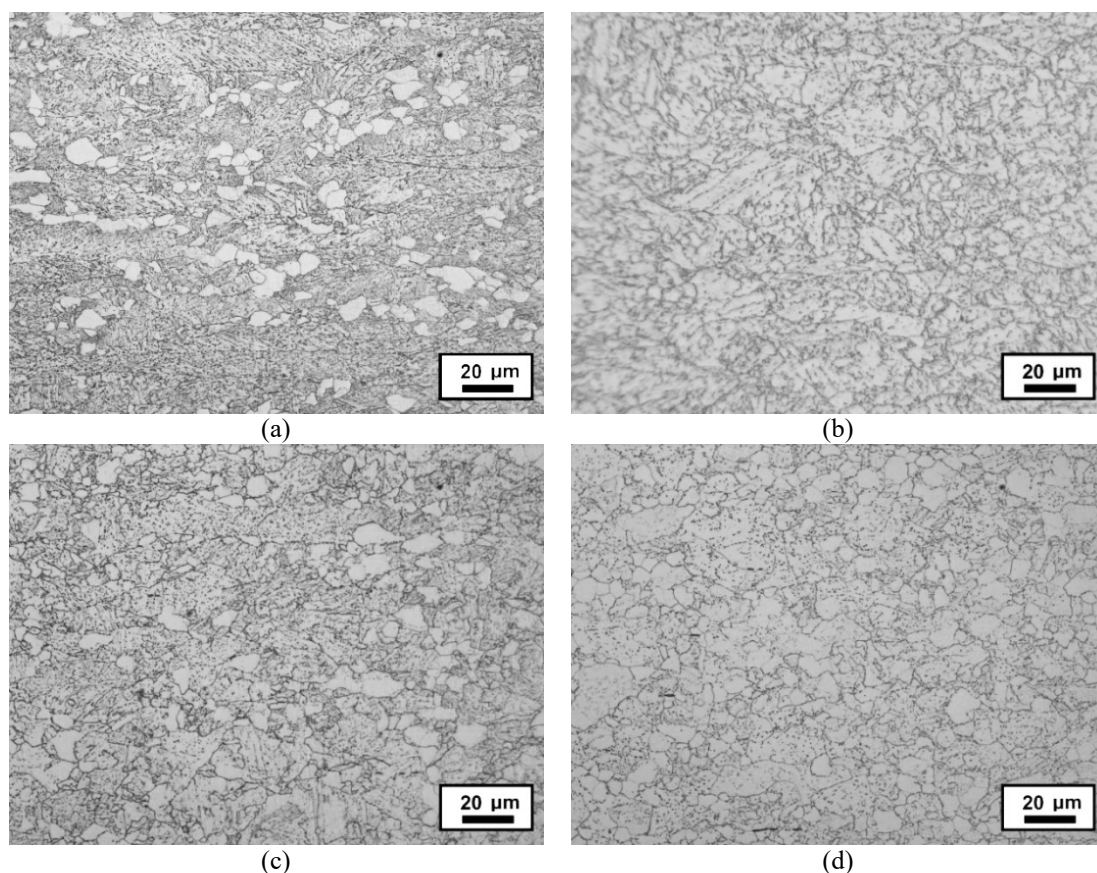


圖 3 開發材經控制軋製程及後續回火不同時間後之 OM 金相觀察 (a)完軋後，經回火熱處理(b)時間 t_1 (c)時間 t_2 (d)時間 t_3 。

Figure 3 OM micrographs of 2.25Cr-1Mo steels with modified process, (a) as-rolled, and following tempering treatment for the different time as (b) t_1 , (c) t_2 , and (d) t_3 .

表 3 開發料之編號、製程參數及對應之規範要求。

Table 3 The criterion, parameters, and designations of the specimens used in this study.

鋼材	編號	製程參數	規範要求
開發材	CSC-CL1	軋延控制 + 回火熱處理、時間 t_3	ASTM A387 Class 1
	CSC-CL2	軋延控制 + 回火熱處理、時間 t_2	ASTM A387 Class 2

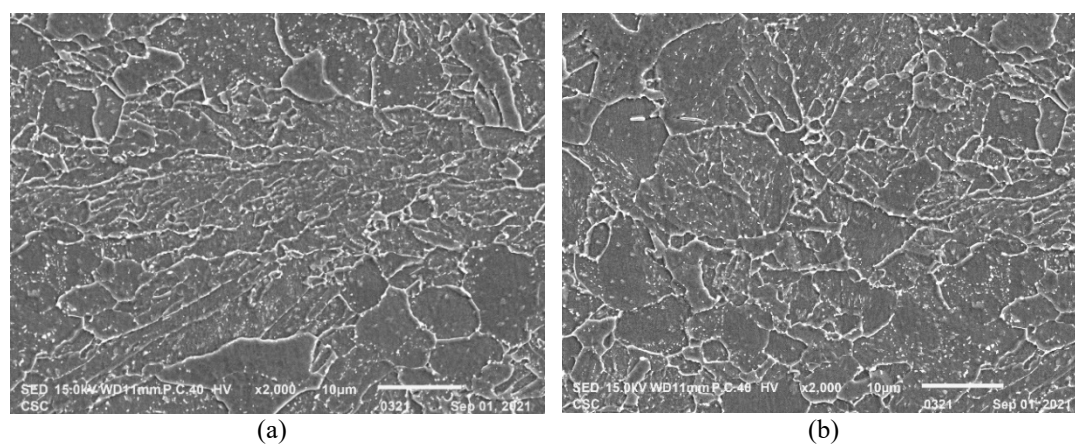


圖 4 開發材之 SEM 金相觀察 (a) CSC-CL1 (b) CSC-CL2。

Figure 4 SEM metallographs of 2.25Cr-Mo steels, (a) CSC-CL1, (b) CSC-CL2.

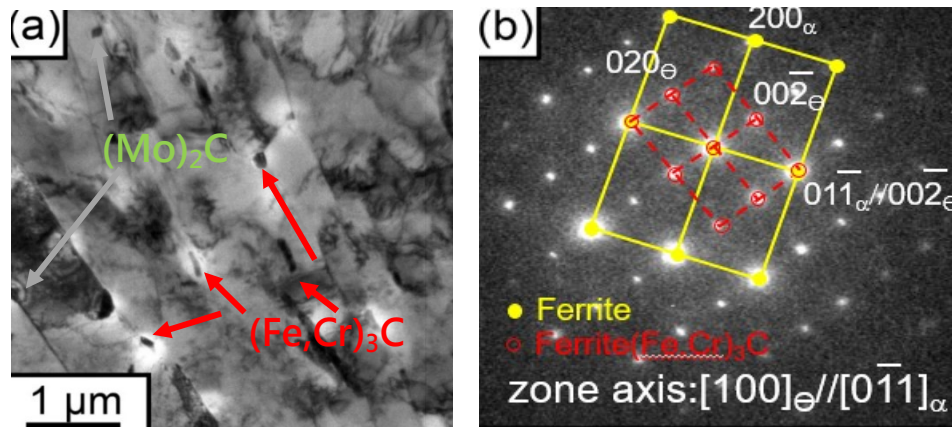


圖 5 CSC-CL2 開發材之 TEM 分析結果 (a)明視野照片 (b)擇區繞射圖。
Figure 5 TEM photos (a) bright field micrograph (b) Selected area diffraction pattern (SADP).

表 4 為開發材進行常溫及高溫下之拉伸試驗所得之結果。由表中得知不論常溫或是高溫下，CSC-CL2 之強度均高於 CSC-CL，其中前者滿足 ASTM A387 Gr. 22 CL2、後者則滿足 CL1 之機械性要求，且均滿足 EN 10028-2 1.7380 之規範值。另外，隨著試驗溫度之升高，二者之拉伸強度及降伏強度值亦隨之下降。

3.3 高溫潛變試驗及臨界應力值之評估結果

參照上述拉伸試驗之結果，選定開發材於 450 ~ 600 °C、外加應力為不同%YS 之參數進行高溫潛變試驗，產生 1%潛變應變之時間及斷裂時間如表 5 所示。擷取表 5 中潛變試驗結果中溫度、外加應力值以及斷裂時間，經過換算及取其

對數，並以 $(T + 273) (20 + \log t_r) \times 10^{-3}$ 為 X 軸、 $\text{Log}(\sigma)$ 為 Y 軸，繪如圖 6，並與文獻結果^[4]進行比對，將圖形套入式(1)方程式進行線性迴歸。另外，亦一併擷取表 1 中 EN 10028-2 規範中針對不同溫度、外加應力下之最小強度要求值繪成如上述之線性迴歸圖進行比對。依式(1)所得個別之迴歸方程式係數值如下式(2)~(4)所示：

- CSC-CL1
 $y = 5.612 - 0.179x \quad (R^2 \cong 0.95) \dots (2)$
- CSC-CL2
 $y = 5.409 - 0.167x \quad (R^2 \cong 0.99) \dots (3)$
- EN 10028-2 1.7380
 $y = 6.412 - 0.223x \quad (R^2 \cong 0.99) \dots (4)$

表 4 二種回火處理之 2.25Cr-1Mo 開發材拉伸試驗結果。
Table 4 The results of tensile tests of 2.25Cr-1Mo steels used in this study.

材質	溫度 (°C)	Tensile stress (MPa)	Yield stress (MPa)	Elongation (%)
CSC-CL1	常溫	518	429	29.8
	300	517	383	--
	400	500	360	
	500	426	325	
CSC-CL2	常溫	637	535	26
	300	591	489	--
	400	564	458	
	500	544	450	
ASTM A387 Gr. 22 CL 1	常溫	415 ~ 585	≥ 255	≥ 18
ASTM A387 Gr. 22 CL 2	常溫	515 ~ 690	≥ 310	≥ 18
EN 10028-2 1.7380	常溫	480 ~ 630	≥ 300	≥ 18

上述鋼材之高溫潛變斷裂時間經直線迴歸後，所得之迴歸方程式 R^2 值均在 0.95 以上，當其值越接近 1，亦即相關性越高。而圖 6 中之文獻結果^[4]經迴歸後之結果如式(5)，其結果亦呈現高度相關性。

$$y = 5.866 - 0.197x \quad (R^2 \cong 0.96) \dots (5)$$

上述式(2) ~式(3)進一步帶入式(1)可推導出特定溫度/壽命下之臨界應力值計算方程式，分別列如式(6) ~式(7)所示：

$$\sigma = 10^{\{5.612 - 0.179 [(T+273)(20 + \log t_r) \times 10^{-3}]\}} \dots (6)$$

$$\sigma = 10^{\{5.409 - 0.167 [(T+273)(20 + \log t_r) \times 10^{-3}]\}} \dots (7)$$

將表 1 中 450 ~ 600 °C之特定溫度，以及斷裂時間 10,000 小時、100,000 小時以及 200,000 小時分別帶入式(6) ~ (7)，即可計算出於特定溫度下、不同編號鋼材不同潛變破斷時間要求下之臨界應力值，如表 6 所示，並與表 1 規範中之最小臨界應力值進行對照。

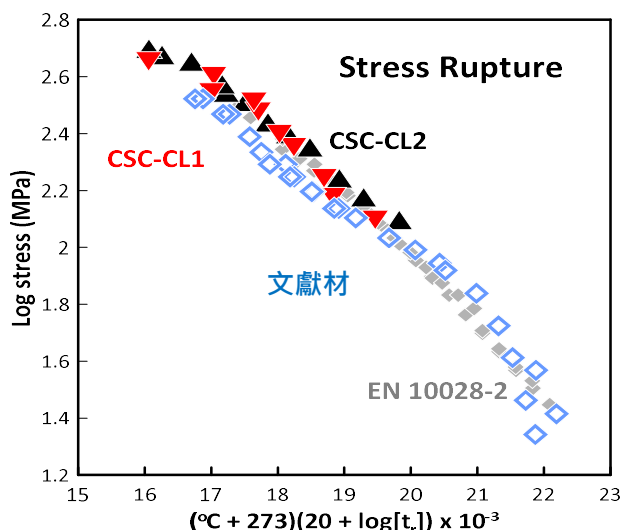


圖 6 2.25Cr-1Mo 鋼材於 450 ~ 600 °C範圍內、利用 Larson Miller 參數法迴歸後所得之應力值 vs.破斷時間對數關係圖。

Figure 6 Logarithm relationships between rupture time and calculated strength from the obtained Larson Miller parameters of 2.25Cr-1Mo steels during the temperature range of 450 to 600 °C.

表 5 2.25Cr-1Mo 鋼材之高溫潛變試驗結果。

Table 5 The results of high temperature creep tests of 2.25Cr-1Mo steels used in this study.

材質	溫度(°C)	應力σ (MPa)	產生 1%潛變應變之時間 (h)	發生斷裂時間 (h)
CSC-CL1	450	400 (0.93 YS)	851.98	3676.64
		450 (> YS)	6.76	163.59
		500 (> YS)	0	0
	500	300 (0.70 YS)	456.01	807.57
		325 (0.75 YS)	345.73	663.44
		350 (0.82 YS)	8.02	101.17
	550	225 (0.52 YS)	65.37	146.01
		250 (0.58 YS)	38.79	79.77
	600	125 (0.29 YS)	18.77	197.72
		150 (0.35 YS)	5.79	37.06
		175 (0.40 YS)	7.51	26.08
	CSC-CL2	450	450 (0.84 YS)	53.92
475 (0.88 YS)			12.31	307.08
500 (0.93 YS)			5.39	164.90
500		325 (0.60 YS)	145.97	444.44
		350 (0.65 YS)	6.92	191.28
		375 (0.70 YS)	22.92	161.40
550		225 (0.42 YS)	48.12	288.76
		250 (0.47 YS)	30.53	116.27
		275 (0.51 YS)	15.97	48.97
600		125 (0.23 YS)	56.69	513.80
		150 (0.28 YS)	13.00	124.78
		175 (0.33 YS)	5.09	47.75

由表 6 中得知除 CSC-CL1 於較低溫($\leq 500\text{ }^{\circ}\text{C}$)、短時間(10,000 小時)下少數某些條件所得之臨界應力值略低於規範要求外，與長時間下(100,000 小時、200,000 小時)之規範要求值相比，二種開發材均能高於所需之臨界應力值。對於評估鋼材高溫潛變特性而言，由於真實使用環境多為設備本身自重造成之較小應力，無論對於鋼材的使用壽命評估，亦或是臨界應力值之預估而言，較長時間之結果應與真實使用環境較為貼近，由此研判上述二種使用省製程方式生產開發材，其高溫潛變特性均滿足規範要求。

對照二種開發鋼之拉伸試驗結果，得知常溫拉伸強度最高之 CSC-CL2 具最高之臨界應力值，其次為強度次之的 CSC-CL1，顯示高溫潛變於高溫環境下之臨界應力值與鋼材之強度具有明顯的正相關。

擷取表 5 中不同編號鋼材於高溫潛變試驗中、產生 1%潛變量時間所得之數值，依式(1)轉換公式繪如圖 7，並進行線性迴歸，同時亦將文獻結果^[4]納入比對。由圖中發現當橫軸之時間對數軸之值小於 16.5 時，其數據明顯與較大數值

之結果呈現非線性關係。若對全數域軸進行線性迴歸，所得之迴歸方程式 R^2 值均在 0.8 以下，相關性不高。

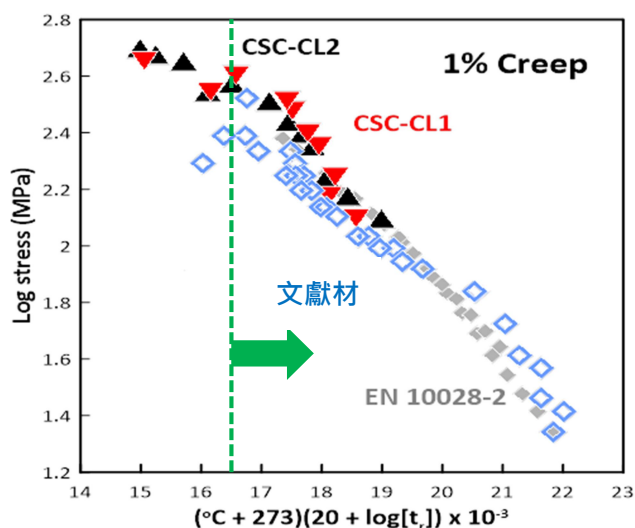


圖 7 2.25Cr-1Mo 鋼材於 450 ~ 600 $^{\circ}\text{C}$ 範圍內、利用 Larson Miller 參數法迴歸後所得之應力值 vs. 1%潛變率時間對數關係圖。
Figure 7 Logarithm relationships between 1% (plastic) creep strain time and calculated strength from the obtained Larson Miller parameters of 2.25Cr-1Mo steels during the temperature range of 450 to 600 $^{\circ}\text{C}$.

表 6 不同編號鋼材利用 Larson Miller 參數法迴歸之結果，計算特定溫度下、不同潛變破斷時間要求下之臨界應力值。

Table 6 Calculated strength for creep rupture of the different 2.25Cr-1Mo steels from the regression equations obtained from Larson Miller parameters.

時間	潛變破壞要求時間之臨界應力值(MPa)								
	10,000 h			100,000 h			200,000 h		
溫度($^{\circ}\text{C}$)	規範值	CSC-CL1	CSC-CL2	規範值	CSC-CL1	CSC-CL2	規範值	CSC-CL1	CSC-CL2
450	306	313	325	221	232	246	201	212	226
460	286	283	296	205	210	223	186	191	205
480	241	233	246	170	170	184	152	155	169
500	196	191	205	135	139	152	120	126	139
520	156	156	170	103	113	125	91	102	114
530	138	142	155	90	102	114	79	92	104
540	122	128	141	78	92	103	68	83	94
550	108	116	129	68	83	94	58	75	85
560	96	105	118	58	75	85	50	67	78
570	85	95	107	51	67	78	43	61	70
580	75	86	98	44	61	70	37	55	64
590	68	78	89	38	55	64	32	49	58
600	61	71	81	34	49	58	28	44	53

進一步探究出現短時間對數值之試驗條件均出現於較低溫、高應力之測試條件。由於 Larson Miller 參數法乃是利用設定較高溫度或較高應力之加速狀況下進行潛變破斷試驗，再利用測試之結果進行數據迴歸，以外插或內插至規範要求之設定參數求得該材質之應力破斷壽命或最小應力要求值。一般而言，典型的高溫潛變隨時間增加，主要可分為三個演進階段(圖 8)^[8]，包括：
 Stage I 暫態潛變(Primary creep)：應變斜率減小，差排的大量增加導致之應變硬化，減少了流變的速率。
 Stage II 穩態潛變(Secondary creep)：應變斜率幾乎不變，應變硬化量減少之潛變速率，與應力增高所增加之潛變速率間達成平衡。
 Stage III 加速潛變(Tertiary creep)：應變斜率增加，試片發生頸縮，應力的增加明顯大過應變硬化的作用，流變速率快速增加，最終發生斷裂。

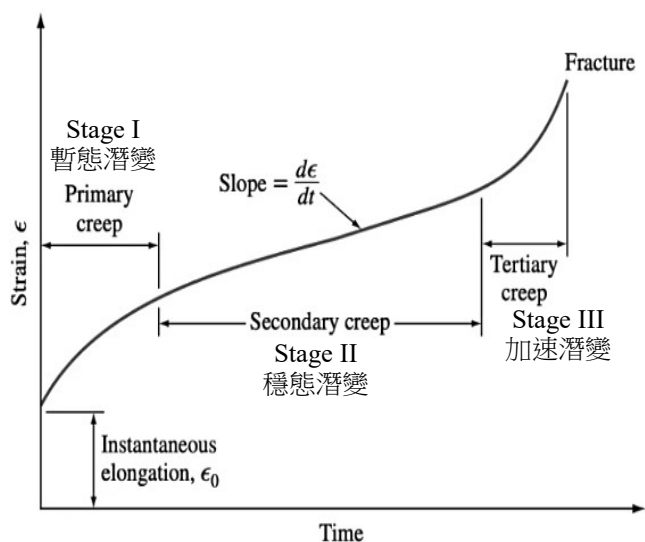


圖 8 金屬高溫潛變不同階段反應之示意圖^[8]。
 Figure 8 Schematic diagram of the typical creep curve for the metal^[8].

前述以應力破斷的方式進行高溫潛變評估，由於試驗已經歷完整之潛變三個演進階段，包含了主導潛變特性之 Stage II 穩態潛變階段，故因溫度/應力差異造成各階段的差異可被大幅消除，此觀點由前述以應力破斷時間進行迴歸時之

高 R² 值獲得印證。而對於 1% 潛變量之發生點，多出現於 Stage I 之暫態潛變階段中，若有高應力之設定條件嘗試模擬真實使用環境中之小應力自重所造成之高溫潛變現象，則會造成較明顯之偏差現象。故針對圖 7 結果，僅針對高時間對數軸部分(≥ 16.5)進行線性迴歸。所得之迴歸方程式如下式(8)~(9)所示。

- CSC-CL1
 $y = 7.128 - 0.268x \quad (R^2 \cong 0.88) \dots (8)$
- CSC-CL2
 $y = 6.113 - 0.212x \quad (R^2 \cong 0.96) \dots (9)$

亦擷取表 1 中 EN 10028-2 規範中特定溫度下發生 1% 潛變量時間之最小強度要求值繪圖進行比對，其方程式如式(10)。

- EN 10028-2 1.7380
 $y = 6.400 - 0.229x \quad (R^2 \cong 0.98) \dots (10)$

而文獻結果^[4]經迴歸後之方程式如式(11)。

- $y = 5.426 - 0.180x \quad (R^2 \cong 0.96) \dots (11)$

經修正取樣範圍所得之直線迴歸，所得之迴歸方程式 R² 值均可大幅提昇至 0.88 以上，甚至可達 0.98。上述式(8)~式(9)進一步帶入式(1)可推導出特定溫度/1% 潛變量下之臨界應力值計算方程式，並以所要求達到之 10,000 小時及 100,000 小時帶入計算，所得不同編號鋼材發生 1% 潛變量時間之臨界應力值如表 7 所示。

對照規範值得知，CSC-CL1 所得之臨界應力值大部分低於規範要求。對前者而言，由於可供進行迴歸的有效數據減少，加上數據結果還是未能完全涵蓋 Stage II 穩態潛變階段，以及外差結果遠離有效迴歸線等因素，導致於高溫/長使用時間之應力值差現較明顯的偏差；而對於後者而言，試驗所採用之應力值幾乎在規範所要求的範圍內，且數據點相較前者而言較多，研判與數

據取樣點無關，乃為材料本身性質所致。金相組織呈現肥粒鐵+波來鐵之正常化製程鋼材，基地中並無生成如同開發材之微小碳化物析出，析出

強化效果差，而在高溫潛變過程中，因於回火製程所生成之含 Cr、Mo 碳化物極少，故無法有效阻礙差排移動，為造成高溫潛變性質不佳主因。

表 7 不同編號鋼材利用 Larson Miller 參數法迴歸之結果，計算特定溫度下、發生 1%潛變量要求時間之臨界應力值。

Table 7 Calculated strength for 1% (plastic) creep strain of the different 2.25Cr-1Mo steels from the regression equations obtained from Larson Miller parameters.

發生 1%潛變量要求時間之臨界應力值(MPa)						
時間	10,000 h			100,000 h		
溫度 (°C)	規範值	CSC-CL1	CSC-CL2	規範值	CSC-CL1	CSC-CL2
450	240	295	273	166	188	192
460	219	254	243	155	161	170
480	180	189	192	130	119	133
500	147	140	152	103	87	104
520	119	104	120	78	64	82
530	107	90	107	68	55	72
540	94	78	95	58	47	64
550	83	67	85	49	40	57
560	73	58	75	41	34	50
570	65	50	67	35	30	44
580	57	43	60	30	25	39
590	50	37	53	26	22	35
600	44	32	47	22	19	31

此外，以一般製程生產之 2.25Cr-1Mo 鋼材，於熱軋後必須再施以高溫之正常化熱處理，藉由生成較大晶粒尺寸提升其抗高溫潛變性，其金相為肥粒鐵+波來鐵組織，且碳化物析出量少，乃因經正常化相變態成沃斯田鐵後，後續需要較長之回火時間方能使碳化物成核、成長，加上其機性僅滿足 ASTM 規範，然此規範並未有高溫潛變特性要求，故對於碳化物之析出要求不高。

而本研究中利用控制較高之完軋溫度使鋼材生成較大之晶粒尺寸，即可免去正常化熱處理製程。高溫完軋後再藉由控制鋼材冷速使其組織呈現具高差排特性之變韌鐵+麻田散鐵/殘留沃斯田鐵(M/A) (圖 3(a))，經回火處理後，M/A 相發生分解，此時變韌鐵中大量差排即可提供分解後之 C、Cr、Mo 等溶質原子快速擴散路徑，於短

時間回火熱處理即可生成緻密碳化物析出(圖 3(b) ~ (d))，不僅於常溫下具析出強化的效果，提升其降伏強度，亦可於具應力之高溫環境下阻礙差排的移動，而具有優異之抗高溫潛變特性。

綜合上述開發材之高溫潛變性質評估結果(如表 6 及表 7 所示)，以控制軋延之省製程方式生產、回火時間為 t_2 之 CSC-CL2，具有最佳的抗高溫潛變性質，且能同時滿足 ASTM A387 Gr.22 CL2/EN 10028-2 1.7380 鋼種之規範要求。回火時間為 t_3 之 CSC-CL1 機性滿足 ASTM A387 Gr.22 CL1 要求，而其高溫潛變特性較 CSC-CL2 稍差，但大致亦能滿足規範要求。本研究運用對金相顯微組織之瞭解與影響高溫潛變機理的掌握，成功開發兼具省製程與高性能之高性價比 2.25Cr-1Mo 抗潛變經濟型高溫壓力容器用鋼材。

4. 結論

1. 本研究採用 Larson-Miller 參數法，設定較高溫度或較高應力之加速狀況下進行潛變破斷試驗，利用測試之結果進行數據迴歸，以外插法求得該材質之於特定溫度/使用時間下之臨界應力值，解決無法以長時間進行高溫潛變進行性質評估之問題。
2. 以省製程方式生產、回火後強度滿足 A387 Gr. 22 CL 2 之 CSC-CL2 中鋼料，具有最佳的抗高溫潛變性質，且均能滿足 EN 10028-2 1.7380 鋼種規範之長時間高溫潛變性質要求。回火後強度滿足 A387 Gr. 22 CL 1 之 CSC- CL1 具有相近之高溫潛變特性，於應力破斷之臨界應力值中，均能滿足規範要求。
3. 本研究結果可確認以控制軋延製程生產之 2.25Cr-1Mo 鋼材能滿足高溫潛變要求，並可優於以正常化製程生產之鋼材，除可滿足客戶需求外，更可成為產品應用特性之重要利基項目，提高產品之附加價值，同時有效降低鋼材生產之碳排放。
4. 此鋼材已獲客戶採購，並實際運用於煙囪排放口內側底板，創造約 200 萬營業額，預估取代國外料後可創造 1,000 萬之單一客戶年營業值。未來更結合製管業者，積極搶佔高溫壓力容器市場，預期將可創造極大之外溢價值。

參考文獻

- [1] ASTM A387/A387M: Standards Specification for Pressure Vessel Plates, Alloy Steel, Chromium-Molybdenum, 2017.
- [2] EN 10028-2: Flat products made of steels for pressure purposes-Part 2: Non-alloy and alloy steels with specified elevated temperature properties, 2017.
- [3] T. Kunitake, "Continuous Cooling Transformation Structures in a Low Carbon 2-1/4Cr-1Mo Steel", Reactor Steel Studies, Cr-Mo Steels Research in Japan, ed. Kanji Ono, UCLA-34P177-9/USLA-ENG-7177, 1971.
- [4] "Data sheets on the elevated-temperature properties of 2.25Cr-1Mo steel for boiler and heat exchanger seamless tubes (STBA24)", NRIM Creep Data Sheet No. 3B, (National Research Institute For Metals, Tokyo, Japan, 1986).
- [5] "火力發電廠蒸汽管道壽命評估技術導則"，中國電力企業聯合會 DL/T 940-2005，2005。
- [6] "A time-temperature relationship for ruptures and creep stresses", F. R. Larson and J. Miller, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 74 (1952) p. 174.
- [7] "The tempering of 2.25Cr-1Mo steel after quenching and normalizing", R. G. Baker, J. Iron Steel Inst., 192 (1959), p. 257.
- [8] W. T. Becker and R. J. Shipley, in Failure Analysis and prevention, ASM Handbook Vol. 11 (ASM international, OH, USA, 2022).