U.D.C. 624.014.25: 539.319

熔接構造物の応力焼鈍と残留応力

Stress Relieving Heat Treatment and Residual Stress in Welded Structures

大	内	E	久*	岩	崎		勤*
	Hisashi	Ōuchida			Tsutomu	Iwasaki	

内 容 梗 概

熔接構造物の応力焼鈍条件と残留応力の関係についての定量的な資料が少ない現状から、特に複雑な 熔接構造物では焼鈍基準を決めるのに困る場合が多い。本文はかかる点を検討するため、まず軟鋼およ び低合金鋼の単純な試験片について焼鈍前後の残留応力を測定して焼鈍効果を明らかにした。その結果 によれば最適焼鈍条件は軟鋼の場合は焼鈍温度($625^{\circ}C \pm 25^{\circ}C$),保持時間 $1.0 \times \frac{t}{25} h(t t k \mbox{Fmm})$ で 行えば十分な効果が得られるが 500°C 程度の低焼鈍温度ではなおかなりの残留応力が存在してその効果 は少ないため、保持時間を現在推奨されている基準よりさらに増さねばならないことがわかった。また 低合金鋼 ($2^{1/4}$ Cr-1 Mo 鋼)の場合は ($720^{\circ}C \pm 20^{\circ}C$), $1.0 \times \frac{t}{25}$ h で行えば十分である。

次いで軟鋼熔接構造物の例として歯車模型について同様な種々の焼鈍条件と残留応力の関係を調べる 実験を行い焼鈍の効果を調べ,単純試験片の場合と比較検討した。

1. 緒 言

最近熔接技術の進歩に従い,諸機械の構造物や部品に 熔接が広範に用いられるようになった。このような熔接 構造物において, 強度上あるいは機械加工時に生ずる変 形の点から熔接後応力除去焼鈍が行われる。この応力焼 鈍に関して材料,板厚,構造および使用状況などによっ て, 焼鈍条件をどのように選ぶべきかということについ ては現在必ずしも明確な基準がない現状である。すなわ ち,応力焼鈍後の残留応力はどの程度になるものか,定 量的な実験の資料が比較的少ないようで,機械製造者に とって不安な点が少なくない。しばしば実際の製品につ いて強度や摩耗の点からやむおえず 500~550℃ 程度の 焼鈍を行うことがあるが,これらについて残留応力を測 定してみるとかなりの残留応力が残っており現在用いら れている基準では不安である。このような点から最近日 本熔接協会機械部会では各種鋼の熔接材の応力除去の焼 鈍基準の J.I.S.案が審議され、一応決められようとして いる。

5	1	100 m	10.00	MAN .	15		1000	121
-		TE	FFF .	100	0)	613	1.4	
	100	-	14 M			11.0-0	Sealer .	

37 KI		化	学	成	分	(%)		機 (kg/	械性的 mm ²	貢 1,%)
i₽V 1/1	С	Si	Mn	Р	S	Cr.	Mo	σ_S	σ_B	Ŷ
軟 鋼	0.06	0.06	0.40	0.036	0.029			27.3	41.8	35.0
低合金鋼	0.09	0.33	0.48	0.012	0.005	2.19	0.98	26.1	54.2	32.0

本文は熔接材の応力除去焼鈍の条件に関する基礎資料 をうるため、単純な残留応力を生ぜしめることのできる H形熔接試験片⁽¹⁾を軟鋼にて造り、ASME⁽²⁾⁽³⁾B.S.S.⁽⁴⁾、 J.I.S.⁽⁵⁾などの諸規格を参考にして作られた焼鈍条件を 標準として種々の温度と時間で焼鈍した。これらの試験 片における焼鈍前後の残留応力を測定して応力除去の効 果を調べて適当な焼鈍条件を求めた。

また低合金鋼の例としてボイラ用 2¹/₄ Cr-1 Mo 鋼管 を突き合わせ熔接した管状試験についても焼鈍時間を一 定とし,温度を変えた場合の焼鈍効果を調べて焼鈍条件

* 日立製作所日立研究所

 σ_S : 降伏点, σ_B : 列張强さ, φ : 処ひ率



を検討した。

一方上記のような単純な試験片ではなく,構造物の形 状をしたものとして,模型熔接歯車や,実物に近い大き さの熔接歯車を造り,種々の焼鈍条件で熔接後熱処理を 行った場合について残留応力を測定し焼鈍効果を調べた ので,これらの結果の概要を述べ熔接構造物設計および

998 昭和34年8月

H

立 評 論

第41卷第8号



- T*

12

14-

		5	17 4	£ 1	d i	1女	INE		-	宋	1	t-		
試	料	材	質	予熱	姿勢	熔	接	機	熔	接	棒	積層	電	流
H形書	式験片	軟	鋼	世ず	下向	1	AC		I	3-1	7	表7 裏1	$130 \sim$	140A
管状言	式驗片	低合	金鋼	250°C	全向	DC	300	A	CM	A-	-106	8	80~	100A

始り主 応 按 投



2. 研究方法

2.1 試 験 片

実験に供した軟鋼および低合金鋼の諸性質は第1表の ようなものである。軟鋼の熔接試験片としては第1図 (a)に示すようなH形試験片を採用した。この試験片は 中央部材を熔接すると,その長さ方向にのみ外的拘束を



第3表 焼 鈍 条 件 (a) H形試験片

試 験 片 番 号	3,6,9	1,2	4,5	7,8	10,11	13,14,15	16,17,18	19,20,21	12
焼鈍温度 (°C)	관국	480	510	550	570	600	620	650	820
保持時間 (h)	せず	10.0	5.0	2.5	2.0	1.0	0.5	0.5	1.0

(b) 管状試験片

試験片番号	89	85	86	87	88	90
焼鈍温度(℃)	セず	650	700	720	740	760
保持時間(h)	セず	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

うけて比較的単純な熔接残留応力が生ずるようになって いる。

低合金鋼についてはボイラ用2¹/₄Cr-1Mo鋼管を突き 合わせ熔接した第1図(b)のような管状試験片を造った。

H形および管状試験片の熔接開先形状および熔接条件 は第2図および第2表のとおりである。

2.2 焼鈍方法

焼鈍温度と保持時間の関係は前述のように ASME, B.S.S., J.I.S.などの諸規格では板厚25mmについて第 3図のようになっている。これらの一般に推奨されてい る応力焼鈍標準に従って, H形試験片の焼鈍条件は 第3 表(a)に示すように7種類に温度,時間を変えて行った。 ここに 820°C, 1.0時間は完全焼鈍を意味するもので参考 までに行ったものである。

管状試験片は第3表(b)に示すように保持時間を1.0 時間に一定として標準焼鈍温度 720℃, その上限, 下限 として 700℃, 740℃ および焼鈍効果の傾向を知るため 650℃, 760℃の5種類に変えて焼鈍した。

これらの熱処理はH形試験片については 8 kW 電気 炉,管状試験片については 42 kW 電気炉を用い,熔接 部に2~4 個の熱電対をはさんだ小片を熔接にて取り付 け,1.0 時間につき $200 \times \frac{25}{t}$ °C (t は板厚mm) 以下 とし最大 200 °C の加熱速度で温度を上げ,保持時間中は ± 5 °C の範囲で焼鈍温度を保持したのち,1.0時間につき $200 \times \frac{t}{25}$ °C 以下の冷却速度で炉冷した。

2.3 残留応力測定法

H形試験片の中央部材を熔接すると収縮せんとする傾向をもつがほかの両側部材によって拘束されて,中央部 材には引張残留応力が存在することになり,側部材には 圧縮の応力が残留する。この中央部材につき主としてグ ナート式ひずみ計を用いて測定し,また補足する意味で 抵抗線ひずみ計を用い切断法によって残留応力を測定し て比較検討した。なお各測定点の残留応力は試験片の表 裏面についての測定値の平均値をとり曲げによる影響を 除いた。

管状試験片については各部の応力分布を調べのち熔接 部の円周方向に沿うて,熔接後2~4箇所をグナート式 ひずみ計で測定し,焼鈍後は測定位置を45度ずらせて行った。

3. 焼鈍条件と残留応力

3.1 H形試験片の残留応力

H形試験片の熔接後の中央部材の残留応力の分布をグ ナート式ひずみ計および抵抗線ひずみ計で測定した結果 は第4図のように求まった。この結果から熔接によって 中央部材の長手方向に沿うてほぼ一様な引張残留応力が 生じ,大体材料の弾性限近くの応力となっていることが わかった。また側部材の残留応力を測定して力の均合か ら算出して求めた残留応力の値(図中×印)もこれと大体

熔接構造物の応力焼鈍と残留応力









第6図 低焼鈍温度における保持時間の影響

第4表 板厚を変えた場合の焼鈍条件

板 厚(mm)	15	25	38	50
焼鈍温度(℃)	620	620	620	620
保持時間(h)	0.5	0.5	0.75	1.0



第5図 H形試験片における焼鈍条件と残留応力

一致している。したがって中央部材の熔接部と付根についてそれぞれグナート式ひずみ計と抵抗線ひずみ計とで 熔接後および種々の焼鈍条件で熱処理を行ったものを測定することにした。測定結果の一例を示すと焼鈍後は第4図のように残留応力はかなり減少しその応力分布は熔接後と同様に長手方向に沿うて一様である。

3.2 軟 鋼

第3表の種々の焼鈍条件のもとでH形試験片を焼鈍し たのち測定して得た残留応力と焼鈍温度の関係を図示す ると第5図のようになる。ここに第3表(a)の焼鈍条件 を便宜上温度のみにて表わした。これから510°C,5時間 程度の低焼鈍では焼鈍後もかなり残留応力が存在してい る。すなわち熔接のままでは約20kg/mm²の残留応力 があったものが焼鈍後は4~7kg/mm²程度に減少し た。しかし600~650°C,1.0~0.5時間の焼鈍では約2kg/ mm²となって焼鈍前の応力の約10%程度に緩和されて 十分な焼鈍効果が得られた。このように標準とされてい る焼鈍条件からいえば同一効果を期待されるはずである が,実験結果では焼鈍温度によってかなりの差があるこ とがわかった。したがって軟鋼熔接部の最も適当な焼鈍 条件は(625°C±25°C), 1.0× $\frac{t}{25}$ h (t は板厚 mm) で



第7図 板厚と焼鈍効果

あるといえる。これより低温で焼鈍を行う場合は次に述 べるように標準とされているものより保持時間を長くす る必要があることがわかった。

510℃の低温焼鈍における保持時間の影響を調べてみ ると第6図のようになって,標準とされている保持時間 5時間の約2倍にすれば残留応力は約2kg/mm²に減 少し,(625℃±25℃)の条件で行った場合とほぼ同程度 の焼鈍効果が得られ十分であることがわかった。

各焼鈍温度における保持時間は板厚25mmを標準とし て規定され,任意の板厚の場合はこれに比例するものと して0.5時間単位で決められる。この点を確かめるため第 4表に示したように種々板厚を変えたH形試験片をそれ ぞれ2個ずつ造り,熔接後および(620° C), $0.5 \times \frac{t}{25}$ h 焼 鈍したものについて残留応力を測定した結果は第7図の ように求まった。熔接後の残留応力は板厚によってあま り差は認められず約22kg/mm²程度で,これの焼鈍後に ついても板厚の影響は少なく,残留応力は約3kg/mm² に低下した。したがって25mm以上の板厚の場合の保持 時間は上述のように板厚に比例した時間で行えば十分な 焼鈍効果が得られることがわかった。

応力焼鈍の材質に及ぼす影響を見る手段として, 熔接



部の硬さの変化を調べることがしばしばある。第8図は 熱影響部の最高硬さを示したもので、熔接後約175 HV あったものが 620°C にて焼鈍すると約 140 HV 程度とな って母材の硬さ約 130 HV に近くなって軟化しじん性が 向上されている。一方510°C程度では約150HVとなる。 したがって硬さの低下を問題にする場合,低温で焼鈍す ることもある。 管状試験片の熔接後の残留応力分布は第9図(a)(b) のように求まった。(a)図からわかるように熔接部に は最も大きな残留応力が生じ、軸方向応力は約-24kg/ mm², 接線方向応力は約-12kg/mm² で, この熔接部に ついて第3表の種々の条件で焼鈍した。その結果は第10 図のようになって、(720°C±20°C)、1.0時間で焼鈍すると 軸,接線方向応力ともに約-3kg/mm²に減少した。し たがって焼鈍温度720°C,保持時間は板厚25mmにつき 1.0時間で熱処理を行い、その際 ±20℃ 程度の温度差が あっても焼鈍後の残留応力には大差なく, 十分な焼鈍効 果が得られることがわかった。



熔接部の焼鈍による硬さの変化は第6図に示したよう に,熔接部の最高硬さは熔接のままのとき約300HVでベ イーナイト組織であったものが720℃で焼鈍するとベイ ーナイトは分解し約200HV程度になってじん性が向上 することがわかった。

3.4 S.J. Watson 氏の実験⁽⁵⁾

応力焼鈍の効果について、S.J. Watson 氏が熔接試験 片ではないが直径 4.8mmの試験片にあらかじめ軸方向 に引張荷重を加えて一定のひずみ 0.15%を与えて 21 kg/mm²の残留応力を生じさせた。この試験片を 500℃ より 650℃まで 25℃おきの温度で,保持時間 60~0.5時間 の広範囲にわたり焼鈍を行って,焼鈍条件と残留応力の 関係を調べた実験がある。残留応力が焼鈍する際クリー プ変形によって緩和されるとすればこの場合も熔接の場 第10図 管状試験片における焼鈍温度と残留応力

合と同様に解釈できるゆえ,焼鈍後の残留応力と温度の 関係を示すと第5図のようになって,この結果からも焼 鈍温度が低いときはかなり残留応力がなお存在すること がわかる。

本実験は単純な残留応力の存在する試験片を用いて標 準とされている焼鈍条件を検討したものであるが,実際 の構造物における残留応力は多軸応力が生じたり拘束条 件も複雑な場合が多いので,応力焼鈍による効果も簡単 なクリープ変形理論によってのみ説明し得ないことは十 分考えられる。

4. 熔接構造物における焼鈍効果

4.1 模型歯車

熔接構造の歯車の模型として第11図に示すように, リムとハブをヨーク枚で熔接して組み立てた模型歯車を 8個用意した。

この熔接に際し,予熱は200°Cとし後熱は300°C,1.0時 間保持したのち炉冷した。熔接開先は6層隅肉熔接で, その作業条件は次のとおりである。

熔接機 直流アーク熔接機 (300A)



構 造 物 熔 接 の応 力 焼 鈍 と 残 留 応 力



第11図 模型歯車の寸法

			弗 3衣	侠	空困	車の	防却	宋件			
车鈰条	.件	模	型歯車No.	1	2	3	4	5	6	7	8
焼保	鈍 持	温 時	度(°C) 間(h)	650 0.5	620 0.5	600 1.0	570 2.0	550 2.5	510 5.0	480 10.0	なしなし

増刑 告 古 の 歯 始 タ 伊 始 后 主





リム外面の軸方向応力分布 第 13 図



1001



第12図 ひずみ測定後の模型歯車 (グナードひずみ計による)

熔接棒 神戸製鋼 L B-26, 3.20, 40, 50

電 流 120A, 170A, 230A

势 资 下向

焼鈍条件はやはり一般に標準とされている基準に従っ て第5表のように7種類に選んだ。熱処理には30kW電 気炉を用い,模型歯車のリム外面に熱電対を取り付け,温 度分布を調べながら 1.0時間につき200× - 10- ℃ 以下の 割合で加熱し,保持時間中は各温度について±15°Cの範 囲にはいるよう電気炉を調節しながら行い、前述の割合 で冷却した。

まず熔接する前に模型歯車のリムについて残留応力を 求めておき, 熔接後リム外面において軸方向ならびにリ ム円周方向についてグナート式ひずみ計を用いて残留応 力分布を求めた。第12図はグナート式ひずみ計で測定 した模型歯車の外観を示す。これらの結果は第13,14図 のとおりである。

リムは鍛造, 焼入したのち焼戻しして調質されている が第13図からわかるように4~6kg/mm²程度の圧縮 残留応力が熔接前になお存在している。熔接後リム外面 の軸方向応力分布はリム中央部すなわちリムとヨークの 熔接部の裏側に相当する部分が最も大きく, 接線方向応 力約-10.5 kg/mm², 軸方向応力約-13 kg/mm²を生じ, リムの両端部にいくに従って熔接の熱影響が少ないため 小さくなって熔接前の残留応力に近くなる。またリム外 面で幅の中央部の円周方向応力分布は第14図のように, 接線および軸方向応力は大体全周にわたり一様に生じて いることがわかる。したがってリム外面の中央部につい て熔接後およびさらに焼鈍したのち測定点を約30度ず らせて残留応力を測定して焼鈍効果を比較することにし to

各模型歯車について種々の焼鈍条件と残留応力の関係 を求めた結果を示すと第15図のようになる。ここに焼 鈍条件はもちろん時間も種々温度によって変っているが 簡単のため温度のみ横軸にとって表わした。熔接によっ て生ずる残留応力は各模型歯車によって多少異なってい るが,その値は接線方向応力は-10.0~-15.8kg/mm², 軸 方向応力は-13.0~-18.0kg/mm² である。これらを焼鈍 する場合,500°C程度では接線方向応力が約-8.5kg/mm², 軸方向応力が約-10kg/mm²となってなおかなり残留応 力が残ることがわかる。しかし 600°C~650°C では接線



第15図 模型歯車における焼鈍条件と 残留応力

方向応力は約-5kg/mm²,軸方向応力は約-7 kg/mm³ となって,焼鈍温度が低いときはその効果は少なくなることがわかる。3. で述べたH形試験片による結果を第15 図の実線で示すとこの場合と同様な傾を示すが,応力値はいくぶん大きくなっている。これは模型歯車はH形試験片と異なり構造物であるため,拘束力が大きく多軸応力状態になっているためと考えられる。

このような構造物において焼鈍後もなお存在する残留応力について検討して応力焼鈍によって果してどの程度

存在するが、 $(625^{\circ}C \pm 25^{\circ}C)$ 、 $1.0 \times \frac{t}{2S}$ h(tは板厚mm) の焼鈍を行えば4~6kg/mm³程度となってその値はH 形のような単純試験片の場合よりもいくぶん大きいが、 一応構造物においては推奨できる焼鈍条件であることを 確認した。

5. 結 言

熔接構造物の応力焼鈍条件を検討するため,H形およ び管状試験片,模型および試験歯車について種々の焼鈍 条件で残留応力を測定して焼鈍効果を調べた結果次のこ とがわかった。

(1) 軟鋼製H形試験片によれば,熔接によって約 20 kg/mm²程度の残留応力を生じているものを(625° C) $\pm 25^{\circ}$ C), $1.0 \times \frac{t}{25}$ h (tは板厚, mm)で焼鈍すれば約 2 kg/mm² と減少して十分な焼鈍効果が現われ最適な 焼鈍条件である。

しかし500°C程度の低温の焼鈍条件では約6kg/mm² のかなりの残留応力が存在する。したがって十分な焼 鈍効果をうるためには、さらに保持時間を標準の約2 倍に増さねばならないことがわかり、低温の場合につ いては現行の標準を再検討する必要がある。

(2) 板厚の影響については,標準焼鈍条件で規定されているように板厚に比例して保持時間を増せばよいことを確認した。

まで残留応力が減少するかを調べる目的で、模型歯車 No.7 につき 480°C, 10 時間の焼鈍したものをさらに 820°C, 1.0 時間の焼ならし程度の熱処理を行った結果は 第15 図のように接線および軸方向応力ともに約 -3 kg/mm² 程度になる。一方硬さは 163 HV から 123 HV か ら 123 HV に著しく低下した。またさきに 650°C, 0.5 時 間行った模型歯車 No.1 をさらに 1.0 時間追加して再焼 鈍した結果は接線および軸方向応力はそれぞれ -5.5 kg/mm² および $-7.3 \text{ kg}/\text{mm}^2$ あったものが $-4.2 \text{ kg}/\text{mm}^2$ お よび $-0.6 \text{ kg}/\text{mm}^2$ と減少したが減少の割合は小さい。し たがってこのような構造物で材料の硬さもかなり保持し て応力を除去しようとすればこの程度が応力焼鈍によっ て軽減しうる限界のように思われる。

4.2 試験歯車

次にさらに構造物の大きさの影響を知るため,外径 2,370mm,リム幅 296 mm,リムの最大肉厚 85 mm の実 物大の試験歯車について,温度550°C,620°Cで焼鈍した。 その応力除去の効果を調べた結果,模型歯車の場合と同 様に 550°C の焼鈍では残留応力が,標準の時間ではかな り残り,約2 倍にすればほぼ 620°C の焼鈍条件に近い応 力まで減少し,H形試験片の場合と同様の傾向にあるこ とがわかった。

以上の模型,試験歯車などの熔接構造物の実験結果から500°C程度の低温焼鈍では保持時間を標準とされている時間の2倍以上にしなければなおかなりの残留応力が

(3) 低合金鋼 $(2^{1/4} \operatorname{Cr} - 1 \operatorname{Mo}$ 鋼)の管状試験片では $(720^{\circ} \operatorname{C} \pm 20^{\circ} \operatorname{C}), 1.0 \times \frac{t}{25}$ h で焼鈍すれば残留応力 は約 $3 \operatorname{kg/mm}^{2}$ となって十分な焼鈍効果がある。

(4) 模型歯車について求めた種々の焼鈍条件と残留 応力の関係は,H形試験片による場合と同様な傾向を 示すが,応力値はいくぶん高く,620°Cの焼鈍では5 ~7kg/mm²となる。このように焼鈍後の応力値が単 純なH形試験片の場合に比べ大きいのは構造物となっ たための応力状態や拘束条件の相異によるものと考え られ,この点については実物大の試験歯車の場合も同 様であることを確認した。

終りに本研究に対し御激励を賜わった日立製作所,日 立工場芳川部長,黒川副部長,ならびに実験に対し御協 力と御助言を下さった片谷哲夫,妹島五彦の各位に深く 感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 仲威雄: 熔接の収縮とき裂(昭 25, 小峰出版)
- (2) ASME 火ナシ圧力容器規格(1955)
- (3) C. E. Jackson & E. A. Rominski: Weld. J. (July 1937)
- (4) British Standard Code 1500: 1949
- (5) J.I.S. B.8201 陸用鋼製蒸気ボイラ構造(昭 29)
- (6) S.J. Watson: Brit. Weld. J. 9, 422(Sep. 1957)