鋼材の熔接諸条件と冷却時間(第7報)*

—諸熔接法による場合の総括並に連続冷却変態図との関係—

稲 垣 道 夫**

Welding Conditions of Steels and Cooling Time near the Fusion Line (Report 7)*

By M. Inagaki**

Abstract

The Cooling time in case of C.S. arc welding process is approximately equal to that of submerged arc welding process, and the cooling is slower remarkably than that of manual arc welding process with covered electrodes. The above mentioned fact, coupled with the fact that the welded part by C.S. arc welding shows a low hydrogen content, is extremely advantageous, because the tendencies of embrittlement and cracking in the heat-affected zone are remarkably relieved by these facts.

If a welding process and the welding conditions are known, the cooling time can be obtained by the nomograph or the curve based on the experimental formula. When the cooling curve corresponding to the cooling time obtained above is searched in the C-C-T diagram in case of max. heating temperature $1300^{\circ}\sim 1400^{\circ}\text{C}$ the hardness and the microstructure shown by the same cooling curve is considered to be the same as the max. hardness and microstructure in the heat-affected zone by welding.

I 緒 言

第1報から第6報¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾においては、極めて多数の測定並びに計算によって被覆アーク熔接法、潜弧熔接法および炭関アーク熔接法について、それぞれの熔接条件から冷却時間を推定する方法を提示することができた。またアルゴン・アーク熔接法については、炭関アーク熔接法の場合と近似しているとして、冷却時間を推定することができる。本報においては、これまでの結果を総括する意味で、各熔接法について実験式から計算された冷却時間を図示し比較した。

またこれまでに測定した変質部最高硬度と冷却時間との関係を一括して図示し、変質部最高硬度が何れの熔接法についても、fusion line 附近の 800°C (ほぼ A_3 変態点) から 500°C までの冷却時間のみの函数として決定されることを確認した。そして採用する熔接法および熔接条件による冷却時間を、熔接しようとする母材鋼の連続冷却変態図の 500°C 線上でとって、この場合の冷却曲線を求めそれに該当する硬度および顕微鏡組織から、熔接変質部の最高硬度並びにその部分の顕微鏡組織が推定できることを述べた。

II 各種熔接法による場合の計算値の比較

被覆アーク熔接法、潜弧熔接法、炭関アーク熔接法および

びアルゴンガス被包アーク熔接法の4種の熔接法につき、板厚 9 mm の鋼板上にシングル・ビードを置いた場合の fusion line 附近の冷却曲線および冷却時間の実測値については、既に第5報において述べた。

こゝでは各種熔接法につき、熔接条件と冷却時間との関係を示す実験式から求められる冷却時間を、広範囲の熔接条件に対して比較した。

第6報 Fig. 19 の炭関アーク熔接法の場合のノモグラフから求められる計算値と、第3報³⁾ Fig. 13 の被覆アーク熔接の場合のそれらとを比較して図示すると、Fig. 1 および Fig. 2 になる。Fig. 1 は鋼板上に長さ約 10 cm 以上のシングル・ビードを置いた場合、Fig. 2 は T 型隅肉接手の場合である。両図とも、板厚 4 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm および 20 mm について、fusion line 附近の 800°C から 500°C までの冷却時間を、ビード長 1 cm 当りのアーク・エネルギー消費量すなわち $J=60EI/v$ Joule/cm の函数として示した。これらによると、炭関アーク熔接の場合の冷却時間は、同じ板厚および J Joule/cm の値に対して、被覆アーク熔接の場合のそれよりも著しく大きいことがわかる。このことは、炭関アーク熔接の場合、鋼板の変質最高硬度が被覆アーク熔接の場合よりも低くなり、炭関アーク熔接による熔接部が他の熔接のそれに較べて著しく低水素含量を示す事実と相まって⁷⁾ 変質部の脆化および割れの傾向を著しく緩和するので、極めて有利である。

Fig. 1 においては、例えば J の値が 14000 Joule/cm で、板厚 t が 4 mm については、炭関アーク熔接法の場合

* 原稿受付 昭和33年7月30日 (昭和33度熔接学会秋季学術講演会において発表)

** 正員、名古屋大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Nagoya University.

Fig. 1 Comparison of cooling time in case of bead deposited on a plate by C.S. arc welding process and that by manual arc welding process with covered electrodes

Fig. 2 Comparison of cooling time in case of T-fillet joint by C.S. arc welding process and that by manual arc welding process with covered electrodes

合の冷却時間が41秒であるのに対して、被覆アーク溶接法の場合のそれは20秒となり、炭関アーク溶接法の場合のその約1/2である。Jの値が同じく 14000 Joule/cm で、板厚 t が 20 mm については、炭関アーク溶接法の場合の冷却時間が6秒であるのに対して、被覆アーク溶接法の場合のそれは 4.2秒となり、炭関アーク溶接法の場合のその約 1/1.4である。また Jの値が 38000 Joule/cm で、板厚 t が 4 mm については、炭関アーク溶接法の場合の冷却時間が230秒であるのに対して、被覆アーク溶接法の場合のそれは90秒となり、炭関アーク溶接法の場合のその約 1/2.6である。Jの値が同じく 38000 Joule/cm で、板厚 t が 20 mm については、炭関アーク溶接法の場合のそれが32秒であるのに対して、被覆アーク溶接法の場合のそれは17秒となり、炭関アーク溶接法の場合のその約1/2である。つまり炭関アーク溶接法の場合の冷却時間と被覆アーク溶接法の場合のそれとの相違は、板厚が小さい程またビード 1 cm 当りのアーク・エネルギー Jの値が大きい程著しくなる。この傾向は Fig. 2 の T型隅肉接手の場合についても同様である。

炭関アーク溶接法の場合の冷却時間と被覆アーク溶接法の場合のそれとの相違は板厚が大きく Jの値が小さい場合には小さくなる傾向にあるが、かような条件の場合には冷却時間が僅小で、溶接変質部が硬化し易い。そして高張力鋼板をこのあたりの溶接条件で溶接する際には、冷却時間の数秒の差異が、変質部の硬化に著しく敏感に影響するので注意を要

する。鋼材の冷却時間の短縮による硬化の程度は、鋼材の種類によって異なり、これはその鋼の連続冷却変態図によって知ることができる。

炭関アーク溶接の場合、T型隅肉接手の冷却時間 S_T は上述したように鋼板上ビード置きの場合の値 S の 1/1.7 であるのに対し、被覆アーク溶接の場合には1/2となっている。すなわち炭関アーク溶接の場合の S_T と S との比率は被覆アーク溶接の場合のそれよりも大きく、したがってT型

Fig. 3 Comparison of cooling time in case of bead deposited on a plate by C.S. arc welding process and that by submerged arc welding process

隅肉接手で溶接する場合には炭関アーク溶接法の方が、比較的冷却が緩やかであり、鋼板上ビード置きの場合よりさらに有利である。

つぎに炭関アーク溶接法の場合の計算値と、第 4 報 Fig. 13 の潜弧溶接法の場合のそれとを比較して図示すると、Fig. 3 が得られる。これは鋼板上にビードを置いた場合である。これによると板厚が 4 mm および 8 mm で J の値が比較的大きいときには、潜弧溶接の場合の冷却時間は同じ溶接条件に対して炭関アーク溶接の場合より大きいが、板厚 12 mm, 16 mm および 20 mm については、反対に炭関アーク溶接の場合の方が大きくなる。

Ⅲ 冷却時間と変質部最高硬度との関係の総括

板厚 9 mm の高張力鋼(主成分 0.17%C, 0.42%Si, 1.34%

Fig. 4 Summary of relation between maximum hardness in the heat-affected zone, in case of deposition by various welding process and cooling time from 800°C to 500°C for the steel YA, 9mm plate thickness

Mn) 板について、これまでに測定した溶接変質部最高硬度と 800°C から 500°C までの冷却時間との関係をまとめると、Fig. 4 が得られる。試験に供した高張力鋼の詳細な化学分析値は図中に記入して置いた。

溶接変質部の最高硬度は、測定個所の僅小なずれによってかなりバラツク。またビードの断面積がかなり大きい場合には、ビード直下と toe 部附近における冷却時間の相違によって、硬度差を生ずる。したがって溶接変質部最高硬度は同一の溶接条件で行っても、かなりバラツクものである。ここでは多くの場合、fusion line に沿いそれに極めて接近した個所につき硬度を測定し、それらを平均して変質部最高硬度とした。

Fig. 4 によると、溶接変質部最高硬度と冷却時間との関係は、各種溶接法およびそれらの溶接諸

条件とはほぼ無関係に、一本の曲線によって表わされることがわかる。したがって溶接法および溶接条件の如何を問わず、fusion line 附近の 800°C から 500°C までの冷却時間が求まれば、変質部最高硬度が定まる。

Fig. 5 は板厚 20 mm の高張力鋼(主成分 0.13%C, 0.48%Si, 1.4%Mn) 板について、これまでに測定した結果をまとめたものである。試験に供した高張力鋼の化学成分の詳細については、図中に記入して置いた。このときの最高硬度としては多くの場合、ビード中央板厚方向と板の表面に近くこれにほぼ平行な方向とに別けて硬度分布を測定し、各方向における最高硬度値を平均して求めた。

Fig. 5 の場合も Fig. 4 の場合と同様に、溶接変質部最高硬度と冷却時間との関係は、ほぼ一本の曲線によって表わすことができ、変質部最高硬度が冷却時間によって一義的に定まってしまう。

なお Fig. 4 および Fig. 5 には比較のために、これら鋼材の連続冷却変態図を得た試片の冷却時間と平均硬度との関係をも併せ示した。これらの連続冷却変態図は、試片の急速加熱最高温度が 1300°C または 1400°C である場合のものである。この結果と溶接変質部についての結果とはよく一致している。そして Fig. 5 においては、溶接変質部の測定値が、大体はにおいて、急速加熱最高温度 1300°C の場合の連続冷却変態図を得た試片の結果と 1400°C の場合のそれとの範囲内で分散した。

以上のことから、溶接法と溶接条件を選べば、ノモグラフまたは図表によって冷却時間を求めることができ、この冷却時間を供試鋼の最高加熱温度 1300~1400°C の場合の連続冷却変態図で読めば、溶接変質部の最高硬度並びにその部分の顕微鏡組織を推定し得ることがわかる。

Fig. 5 Summary of relation between maximum hardness in the heat-affected zone, in case of deposition by various welding process and cooling time from 800°C to 500°C for the steel YB, 20mm plate thickness

IV 熔接条件と連続冷却変態図との関係

選定された熔接法および熔接条件から、熔接しようとする鋼材の連続冷却変態図を用いて、熔接変質部の fusion line に近接した部分の顕微鏡組織および性質を推定する例を述べる。

Fig. 6 は、Fig. 4 に示した高張力鋼の最高加熱温度 1300°C の場合の連続冷却部変態図である⁸⁾⁹⁾。この変態図中には、また 500°C の温度を表わす水平線上に、次のような目盛を記入した。すなわち板厚 16 mm の鋼板上に、炭関アーク熔接法または被覆アーク熔接法によりシングル・ビードを置いた場合の 800°C から 500°C までの冷却時間

Fig. 6 Relation between welding conditions and the continuous cooling transformation diagram in case of maximum heating temperature 1300°C for the steel YA

Fig. 7 Prediction of maximum hardness in the heat-affected zone by welding and its area percentage of constituent from welding conditions for the steel YA

に対応する、ビード 1 cm 当りのアーク・エネルギー $J=60EI/v$ Joule/cm の目盛を記入した。

別報によれば⁹⁾、この鋼の C_f 点を通過する f 臨界冷却曲線より右方の冷却曲線で冷却すれば、衝撃エネルギーおよび曲げ角が概して大きい、この臨界冷却曲線より左方の冷却曲線すなわち C_f 臨界冷却時間よりも短い時間で冷却すれば、これらの値が急激に減少する傾向にある。したがってこの鋼の C_f 臨界冷却時間よりも大なる時間で冷却されるよう熔接することが安全である。

著者の作成した連続冷却変態図においては、その鋼の A_3 変態点を基準の 0 秒として冷却曲線が記入しており、臨界冷却時間もその鋼の A_3 変態点から 500°C までの冷却時間ととてある。そしてこの鋼の C_f 臨界冷却時間は約 9 秒である。

したがってこの板厚 16 mm の鋼板上に、炭関アーク熔接法によりシングル・ビードを置く場合には、ビード 1 cm 当りのアーク・エネルギー J の値が約 16500 Joule/cm 以上になるような熔接条件で、ビードを置くことが安全であると考えられる。また同様にして被覆アーク熔接法で行う場合には、 J の値が約 19000 Joule/cm 以上で、ビードを置くことが安全である。すなわち炭関アーク熔接法による場合が、被覆アーク熔接法による場合よりも熔接条件の許容範囲が広いので有利である。

この鋼の連続冷却変態図より、 A_3 変態点 796°C から 500°C までの冷却時間と硬度および組織成分の面積割合との関係を求め、図示すると Fig. 7 が得られる。そしてまたこの図の横軸に、板厚

8 mm または 16 mm の鋼板上に炭関アーク熔接法または被覆アーク熔接法により、シングル・ビードを置いた場合の、fusion line 附近の 800°C から 500°C までの冷却時間に対応する J の値の目盛を記入した。これによって横軸の冷却時間を読む変りに、板厚 t mm に対する J の値を読めば、各熔接条件の場合の変質部最高硬度およびその部分の顕微鏡組織成分の割合を推定することができる。上述と同様にして、Fig. 5 に示した高張力鋼については、Fig. 8 および Fig. 9 が得られる。Fig. 8 は、別報で解説した新装置¹¹⁾を用いて作成した、この鋼の最高加熱温度 1400°C の場合の連続冷却変態図である¹²⁾。

そしてこれには板厚 20 mm の鋼板上にビードを置いた場合の J の値の目盛を記入した。

この高張力鋼の小丸棒試片の切欠無し曲げ

Fig. 8 Relation between welding conditions and the continuous cooling transformation diagram in case of maximum heating temperature 1400°C for the steel YB

Fig. 9 Prediction of maximum hardness in the heat-affected zone by welding and its area percentage of constituent from welding conditions for the steel YB

試験の結果は極めて優秀であつて、0°Cの衝撃曲げによる吸収エネルギーは、試片の冷却時間が C_f 臨界冷却時間よりも短くなるも低下せずむしろ上昇したが、曲げ角は大体において C_f 臨界冷却時間を境にして冷却時間が短くなると低下した¹²⁾。したがってこの鋼についても一応、 C_f 臨界冷却時間が溶接条件を定める目安となり、この C_f 臨界冷却時間よりも大きい時間で冷却されるよう溶接することが安全であると考えられる。

この鋼の C_f 臨界冷却時間 (A_3 変態点 817°C から 500°C まで) は 3.8 秒であるので¹³⁾、板厚 $t=20$ mm については、炭関アーク溶接法の場合には J の値が約 11000 Joule/cm 以上であることが要求され、被覆アーク溶接法の場合

には約 13500 Joule/cm 以上であることが要求される。

Fig. 9 はこの鋼の A_3 変態点 817°C から 500°C までの冷却時間と硬度および組織成分の面積割合との関係であつて、この図の横軸には例として、板厚 12 mm または 20 mm の鋼板上にビードを置いた場合の J の値の目盛を記入した。これによって上述と同様に、溶接条件から直ちにこの鋼の変質部最高硬度およびその部分の組織成分の面積割合を推定することができる。

V 結 論

本報においては、被覆アーク溶接法、潜弧溶接法および炭関アーク溶接法について、実験式から計算された冷却時間を図示し比較した。また溶接変質部の最高硬度は、溶接法の如何にかかわらず、fusion line 附近の A_3 変態点または 800°C から 500°C までの冷却時間のみによって定まることが確認した。そして溶接条件から母材鋼の連続冷却変態図を用いて、溶接変質部の性質及び組織成分の面積割合を推定した。さらにまた各溶接法と鋼板の種類によって、安全に溶接し得る溶接条件が決定されることを述べた。

炭関アーク溶接の場合の冷却時間は、潜弧溶接の場合のそれと大体において同程度であり、被覆アーク溶接の場合に較べて冷却が極めて緩やかである。このことは、炭関アーク溶接部が極めて低水素含量を示す事実と相まって、変質部の脆化および割れの傾向を著しく緩和するので、極めて有利なことと思われる。

溶接法と溶接条件とを選べば、ノモグラフまたは図表によって溶接部の fusion line に近接した部分の 800°C から 500°C までの冷却時間を求めることができる。この冷却時間を母材鋼の最高加熱温度 1300~1400°C の場合の連続冷却変態図の 500°C 線上で求め、その点を通する冷却曲線に相応する硬度および顕微鏡組織から溶接変質部の最高硬度ならびにその部分の顕微鏡組織を推定できる。

終りに臨み本研究は、昭和30年度科学研究交付金による名古屋大学機関研究(関口教授担当、文部省課題番号9607)「高張力鋼の溶接感受性の軽減ならびに溶接亀裂の防止に関する基礎的研究」の一環として、行なわれたものであることを附記する。

本研究遂行に当り、終始御懇篤なる御指導御鞭達を賜

た関口春次郎教授に深甚なる感謝の意を表する。また熊谷組および同社名古屋工場長牧田莊次郎氏には並々な御支援をいただいた。こゝに厚く御礼申し上げる。

文 献

- 1) 稲垣道夫, “鋼材の熔接諸条件と冷却時間(第1報), A. 冷却曲線, 冷却速度, 冷却時間について, B. 被覆棒および電流の種類が冷却時間におよぼす影響”, 本誌, 27 (1958), No. 12, 716-722
- 2) 稲垣, “同上(第2報), 被覆アーク熔接の場合の測定結果の総括”, 本誌, 28 (1959), No. 1, 25-31
- 3) 稲垣, “同上(第3報), 被覆アーク熔接の場合の冷却時間の推定”, 本誌, 28 (1959), No. 1, 32-38
- 4) 稲垣, “同上(第4報), 潜弧熔接法の場合”, 本誌, 28 (1959), No. 2, 97-102
- 5) 稲垣, “同上(第5報), 各種熔接法の場合の測定結果の比較”, 本誌, 28 (1959), No. 2, 103-107
- 6) 稲垣, “同上(第6報), 炭関アーク熔接法の場合”, 本誌, 28 (1959), No. 4
- 7) 関口春次郎, 益本功, “炭酸ガス関口線材アーク熔接法について(第7報), 熔着金属の低水素含量と銀点の発生頻度”, 本誌, 27 (1958), No. 6, 331-339
- 8) 関口, 稲垣, 轟木透, “高張力鋼 Wel-ten 55 の連続冷却変態図と熔接変質部の組織および性質(第1報), 急速加熱最高温度 900°C および 1300°C の場合の連続冷却変態図”, 本誌, 26 (1957), No. 8, 504-511
- 9) 関口, 稲垣, “同上(第2報), 急速加熱最高温度 1100°C の場合の連続冷却変態図および3変態図の総括”, 26 (1957), No. 9, 579-585
- 10) 関口, 稲垣, 佐藤誠, “同上(第3報), 連続冷却変態図と熔接変質部の組織および性質との関係”, 本誌, 26 (1957), No. 11, 706-714
- 11) 関口, 稲垣, “同上(第4報), 新たに試作せる熱膨脹記録装置および急速冷却熱分析装置の解説”, 本誌, 27 (1958), No. 4, 194-200
- 12) 関口, 稲垣, “同上(第5報), 新装置による連続冷却変態と旧装置によるそれとの比較”, 本誌, 27 (1958), No. 4, 201-206
- 13) 関口, 稲垣, “同上(第6報), 鋼材の化学成分の影響”, 本誌, 27 (1958), No. 4, 207-212

Svarotchnoe proizvodstvo (熔接生産) No. 6 (1958) 目 次

編 集 局 か ら	1
N. Ya. Kotchanovsky — 1959~1965年の熔接機器生産上昇の展望	1
L.V. Glebov — 1959~1965年の“エレクトリック”工場における熔接機器生産の現状と展望	7
A.I. Gulyaev — 熔接機器需要の展望と質的向上対策	11
K.V. Vasiliev — ガス・アーク切断用機器	12
V.M. Kondratovitch — 1959~1965年の全ソ連邦における電気熔接機器発展の展望と方向に関する全ソ会議	13
科 学 技 術	
M. Kh. Shorov & V.N. Matkhanov — 耐熱パーライト鋼ローターの熔接性並びに技術的研究	18
B.S. Kasatkin — 鋼の脆性破壊機構	24
A.A. Alov & V.M. Nikitin — AL-4 および AL-5 合金のアーク熔接における冶金学的二三の問題	28
N.O. Okerblom, V.P. Prianishnikov & I.P. Baikova — 石英ガラスの熔接	30
生 産	
S.K. Sliozberg & A. Zhuravliova — 黄銅の突合熔融熔接	33
V.I. Belov — 振動アーク肉盛法による部品寸法の回復	35
D.I. Wineboim — スタッドアーク熔接法の改善	36
V.I. Korovkin & V.V. Vikentyev — 生産の流れにおけるアーク熔接棒被覆の偏心度測定装置	41
経 験 の 交 流	
N.A. Gorpenyuk — 三相炭素アークによる金属の酸素アーク切断	43
T.V. Berg & P.A. Glukhov — 部品生産における鋳鉄の冷間熔接の応用	44
I.G. Karebin — ユニバーサル熔接開閉器	45
文 献	
V.A. Nevsky — 熔接に関するソ連邦の文献	46
熔接に関する外国の文献	48

(益 本)