消耗電極式アーク溶解した AISI 316 ステンレス鋼の高温捻回性質*

八 木 芳 郎** 栗 原 正 男**

Yoshiro Yagi and Masao Kurihara: High Temperature Torsion Test of Consumable Electrode Arc-Melted AISI 316 Stainless Steel. The improvement of hot-workability of consumable electrode arc melted metal was examined by high temperature torsion test. The test materials were air-melted AISI 316 stainless steel and its consumable electrode arc-remelted specimens. The oxygen content decreased remarkably from 0.0084 % to 0.0033 % and the Mn content a little from 1.84 % to 1.42 % by arc-remelting, but the other contents showed no change. The forgings were solution-treated at 1150°C for 1 hr and water-quenched. All the specimens showed the micro-structures of austenite, and the results of tensile tests and impact tests at room and high temperatures showed no difference between air-melted and arc-melted specimens, except for the reduction of area of the former was slightly higher than that of the latter. Tensile tests of specimens water-quenched from various temperatures of hot torsion tests, also show the same results as above, and their structures were always of austenite. High temperature torsion tests were carried out at 650°, 800°, 900°, 1000°, 1,100° and 1,200°C at the rotation speed of 30 rpm and 128 rpm. The number to failure were minimum at 800°C and then increased with rise of temperature, while the maximum torque values decreased gradually. In these tests, the arc-melted material, which is almost the same with air-melted one in tensile properties and structures as mentioned above, indicates higher value in the number to failure, the maximum torque values and the area surrounded by the revolution-torque curves. These results show that the consumable-electrode arc-melted material is superior to air-melted one in hot workability as well as resistance to deformation at high temperature.

(Received May 21, 1962)

I. 緒 言

消耗電極式アーク溶解した金属材料には幾多の特長があるが、その一つとして熱間加工性の改善が挙げられる。これは本溶解法により非金属介在物、ガス含有量の少ない高純度の材料が得られ、連続鑄造状の健全なインゴットで偏析のないことなどによると考えられる。

熱間加工性を定量的に表現することは困難な問題であるが、高温捻回試験がそれを示す一方法であることは、例えば Hughes⁽¹⁾, Bloom et al⁽²⁾ など多くの報告にみられ、

わが国においても森島⁽³⁾, 田島⁽⁴⁾をはじめ多くの報告にみられる。そこで著者らは消耗電極式アーク溶解材の熱間加工性の改善をみるため、空气中溶解した AISI 316 ステンレス鋼と、それを電極として真空中で消耗電極式アーク溶解した材料の高温捻回試験を行ない、その両者の比較を行なった。

II. 供 試 材

1. 供試材の溶製

330 KVA 塩基性高周波炉により溶製した AISI 316 L ステンレス鋼を約 200 kg (径約 200 mm) のインゴットに鑄造した。空气中溶解材としてはこれをそのまま所定の丸棒に鍛造して試験片とし、アーク溶解材としては約 80 mm 径の

** 神戸製鋼所中央研究所 (Central Research & Development Laboratory, Kobe Steel Works, Ltd., Kobe)

* 1958 年 4 月本会東京大会に発表

(1) D.E.R. Hughes: JISI, **170** (1952), 214.

(2) F.K. Bloom, W.C. Clarke & P.A. Jennings: Metal Progress, **159** (1951), 250.

(3) 森島: 鉄と鋼, **44** (1958),

(4) 田島, 久貝: 鉄と鋼, **42** (1956), 980.

丸棒に鍛伸後試験用消費電極式アーク炉にて 10^{-3} mmHg の真空中で再溶解し、径約 130 mm のインゴットとした。両者の化学成分を Table 1 に示す。

との間に差は認められない。また非金属介在物はいずれもアーク溶解材の方が少ないのが観察された。

3. 供試材の機械的性質

Table 1. Chemical compositions of testing materials.

Composition (%)	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	O	N
Classification											
Air melted	0.030	1.84	0.76	0.011	0.013	0.02	11.10	18.29	2.76	0.0084	0.017
Arc melted	0.029	1.42	0.75	0.011	0.013	0.05	11.19	18.46	2.75	0.0033	0.017

Fig.1 Microstructures of solution treated AISI 316 stainless steel. $\times 100$ ($\times 2/3$), etchant: aqua regia.

空气中溶解材およびアーク溶解材を 20 mm 径丸棒に鍛伸後、溶体化処理 ($1150^{\circ}\text{C} \times 1 \text{ hr}$ 水焼入れ) し、常温および高温の引張性質およびシャルピー衝撃値を求めた。その結果を Table 2 に示す。高温試験はそれぞれの温度に試料を 30 min 保持後その温度で試験を行なった。

つぎに溶体化処理した試料を高温捻回試験を行なった各温度に 20 min 保持後水焼入れし、引張試験を行なった。その結果を Table 3 に示す。

この試験は高温捻回試験と同一条件に加熱した場

Table 2. Tensile properties and charpy impact values of tested materials at room and high temperature.

Temperature of test	Classification	Tensile strength (kg/mm ²)	Yield strength 0.2% offset (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Charpy impact value (kg·m/cm ²)
Room temperature	Air melted	57.7	22.6	72.2	76.7	20.2
	Arc melted	57.7	22.7	70.0	77.9	22.9
650°C	Air melted	35.0	12.2	39.0	67.5	23.2
	Arc melted	36.4	12.3	45.0	76.5	23.7
800°C	Air melted	20.7	10.1	47.0	52.2	—
	Arc melted	20.7	10.2	54.0	56.0	—

アーク溶解材は酸素量が空气中溶解材の半分以下となり、Mn 量がやや減少しているが、その他の成分についてはほとんど差異が認められない。

2. 供試材の組織、非金属介在物

供試材は Table 1 に示したように Cr および Mo のいわゆるフェライト生成元素の多い材料であるが、鍛造後溶体化処理 ($1150^{\circ}\text{C} \times 1 \text{ hr}$ 水焼入れ) したものはいずれもオーステナイト組織を呈している。これを Fig.1 に示す。また鍛造材についてしらべた非金属介在物は、アーク溶解材のそれは空气中溶解材よりも著しく減少していることが認められた。つぎに、高温捻回試験は後述するごとく、 650° 、 800° 、 900° 、 1000° 、 1100° 、 1200°C の各温度に試料を 20 min 保持後、その温度で試験したが、その時の試料の組織をみるために試験片と同一寸法に鍛造後 1150°C より水焼入れした試料を上記各温度に 20 min 保持後水焼入れし、組織および非金属介在物をしらべた。組織は保持温度が高くなるにつれて大きな結晶粒となるが、いずれもオーステナイト組織で空气中溶解材とアーク溶解材

Table 3. Tensile properties of AISI 316 stainless steel water quenched from various temperatures.

Temperature (°C)		650	800	900	1000	1100	1200
Classification	Tensile properties						
Tensile strength (kg/mm ²)	Air melted	55.0	55.4	55.1	55.4	54.7	53.0
	Arc melted	55.9	56.2	55.9	56.1	56.0	54.2
Elongation (%)	Air melted	61.0	66.0	61.0	66.0	64.0	61.0
	Arc melted	63.0	64.0	64.0	63.0	66.0	64.0
Reduction of area (%)	Air melted	73.0	73.0	71.5	74.0	73.9	73.0
	Arc melted	75.9	75.2	76.0	76.0	75.7	76.8

合、各温度において材質上に影響があるか否かをしらべたものであるが、この試験の結果からは加熱温度による差異は認められなかった。

以上の引張試験の結果、引張強さ、耐力および伸びには、空气中溶解材、アーク溶解材にほとんど差が認められないが、絞り僅かではあるが常にアーク溶解材の方が大きい。また、シャルピー衝撃値はアーク溶解材が僅かに大きいようである。

III. 高 温 捻 回 試 験

1. 装置および試験方法

インゴットを径 12 mm の丸棒に鍛伸後, 1150°C×1 hr 後水焼入れの溶体化処理を施した後, 中央部を切削して Fig. 2 に示す試験片を製作した。

Fig. 3 に捻回試験機の概観を示す。これはふつうの捻回試験機で試料の固定掴み(回転駆動部の反対側)と同軸に取りつけた Counter weight の変位によりトルクを測定することができる。また試料の回転と同時に回転するドラム上に捻回数-トルク曲線を書かせ得る。試料の固定掴み側は左右に移動し得るようになっており, 試験中の試料の伸縮によつて固定端が移動し純粋の剪断力を出し得るようになってい。しかしこのため高温における捻回試験では後述するように試料の捻回部が収縮し直径の大きくなる現象が生ずるので, この点問題があるが空气中溶解材とアーク溶解材との比較は十分可能と考えられる。

この試験機に Fig. 3 に示すごとくエレマ加熱炉を取りつけ, 各種温度に保持した炉内に試料を挿入し両端を捻回試験の掴みに締めつけた。回転速度は 30 rpm および 128 rpm の 2 種類について行ない, 破断に至るまでの回転数およびトルクと回転数の関係をそれぞれの試験について求めた。試験は 650°, 800°, 900°, 1000°, 1100°, 1200°C の各温度で行ない, 各々の温度に 20 min 保持後その温度で試験を行なった。

Fig. 2 Test piece of high temperature torsion test.

Fig. 3 Apparatus for high temperature torsion test.

2. 高 温 捻 回 試 験 結 果

Fig. 4, 5 はそれぞれ捻回速度 30 rpm, 128 rpm の場合の捻回数と試験温度の関係である。捻回数は試験部の径およ

び長さの差異による値の変動をのぞくため, 各試験片について径と試験部の長さを測定し, 試験部の長さが径の 10

Fig. 4 Effect of testing temperature on the revolutions to failure; 30 rpm.

Fig. 5 Effect of testing temperature on the revolutions failure; 128 rpm.

倍とした場合の値に換算したものである。

いずれも 800°C 付近で捻回数が最低値となり, 以後温度

が上昇するにつれて捻回数は上昇する。800°C 付近においては高温引張試験においても靱性が低下しており, 本試料は Cr, Mo のフェライト生成元素が多いため, この温度付近で組織的に異常のあらわれるためと予想されるが, その温度から水焼入れした試料の引張性質は Table 3 に示したごとく異常はなく, また顕微鏡組織上も異常は認められなかつた。いずれにしても, 各温度において回転数の如何にかかわらず常にアーク溶解材の捻回数は空气中溶解材のそれよりも高い値を示している。また回転速度による捻回数の差異は明瞭でない。

Fig. 6 は試験温度とトルクの最大値との関係である。試験温度が上昇するにつ

れてトルクは次第に低下する。捻回速度 30 rpm の場合は試験温度 650°C より 1200°C に至るまでほとんど直線的に低下しているが, 128 rpm の場合は試験温度 800°C までは

ほとんど低下せず、それ以上の温度になると直線的に低下する。捻回数において現われた異常性はトルクにおいては

Fig. 6 Effect of testing temperature on the maximum torque value.

捻回速度の早い時にのみあらわれる。この場合もアーク溶解材が大きい値を示す。また回転速度の早い方が遅い場合よりかなり高い値を示す。

Fig. 7 は回転速度 30 rpm の場合の各温度における捻回

Fig. 7 Revolution-torque curves at various testing temperatures (rotating speed: 30 rpm).

数とトルクとの関係である。これらの図から試験温度の低い場合と高い場合とで曲線の形が異なっているのがわかる。すなわち、試験温度の低い場合は回転の開始から回転が進むにしたがつてトルクが増え、最大値に達してから試料が破断し急激にトルクは 0 となるが、高温では回転が開始されると直ちにトルクが最高値に対し、ついで捻回数の進むにつれて比較的緩やかにトルクが減少するか、あるいはトルクのあまり変わらない時期を経て試料が破断しトルクが 0 となる。このことは定性的にはつぎのごとく解釈され

よう。これらの試験温度においては、低温側では試料に加工が加わると回復と再結晶とにより応力は弛緩されるが、あまり速やかでなく加工硬化する速度の方が早いめ、材料は硬化しトルクは増し遂に破断する。一方高温側では試料に加工が加わると、その硬化は回復、再結晶により速やかに弛緩される。そのため最初の硬化は直ちに軟化する。このように加工硬化の速度と軟化の速度との関係により曲線の形状が異なるものと考えられる。

これらの曲線の形状の温度による変化はいずれの溶解法によるも同様であるが、アーク溶解材の方がトルク、捻回数いずれも大きいめ、その曲線によつて囲まれた面積はアーク溶解材の方が大きい。

棒状試料を捻り加工する時のトルクに回転角すなわち捻回数を乗じたものは、変形仕事量に比例した量になる。したがってトルクと捻回数軸によつてかこまれた面積は、その材料が破断するまでに加えられる仕事量に比例する。

・捻回数の大きいことはその材料が破断に至るまでの変形量が大きいこと、換言すれば加工性の優れていることを示し、一方変形仕事量の大きいことは、高温における変形のされ難いことを示すものでこの意味では加工に要する力は大いだが、実際の使用時にはより高荷重に耐え得ることを示すもので、材質の優れていることを示すものといえよう。

3. 試験後の試料の形状と顕微鏡組織

Fig. 8 に試験後の試料の破断部の状態を示す。試験

Fig. 8 Outlook of failed parts in the torsion test at various temperatures.

温度が低いちは、きれいな破断面を示しているが、高温になるとギザギザのきたない面となる。また高温になると

(4) 試験温度と捻回数との関係は、捻回速度 30 rpm, 128 rpm いずれの場合も 650°~1200°C の温度範囲では、

Fig.9 Microstructure of failed parts in the high temperature torsion test. ($\times 100$) etchant: aqua regia.

つれて捻回部の径が太くなり、また捻回部の収縮するのが観察される。

捻回による破壊は外周からおこるが、内部でも小さい亀裂が発生している。その状態を Fig.9 に示した。この亀裂はアーク溶解材の方が空气中溶解材より少ないようである。また低温では結晶粒が捻回方向に対してやや斜めに長くのびているが、温度が高くなると再結晶しており、その再結晶粒が試験温度が高いほど大きくなってゆくのが見られる。

IV. 結 言

AISI 316 ステンレス鋼の空气中溶解材、および消耗電極式アーク溶解材の両者について高温捻回試験を行なった。得られた結果を総括すれば次の如くである。

(1) 試験に使用した空气中溶解材とアーク溶解材の化学成分はほとんど等しく、ただアーク溶解材の Mn 量がやや少なく、酸素量が空气中溶解材の約半分であった。

(2) 1150°C で溶体化処理した両者の組織はいずれもオーステナイトである。また供試材を各捻回試験温度から焼入れた組織もオーステナイトである。

(3) 両者の常温および高温の抗張試験結果もほとんど等しい。ただアーク溶解材の方が僅かに絞りが大きい。

Sampling part:

Surface of microstructure observation

800°C 付近で最小となり以後試験温度の上昇と共に捻回数も増加する。アーク溶解材の捻回数は 650°~1200°C の温度範囲では常に空气中溶解材のそれよりも大きい。

(5) トルクの最大値は試験温度の上昇と共に低下する。128 rpm の捻回速度の場合は、800°C における値は 650°C における値と等しいか、やや大きい値を示している。捻回値が前述のように 800°C 付近で最小値となることと同様の原因によるものと考えられ、これらは組織上の何らかの異常性に基づくものと考えられるが、これらの温度から水焼入れした試料の顕微鏡組織上には異常は見出されていない。アーク溶解材のトルクの最大値は 650°~1200°C の範囲では常に空气中溶解材のそれよりも大きい。

(6) 熱間加工の温度は普通 1200°C 以下で、この温度範囲ではアーク溶解材の捻回数、トルクともに空气中溶解材のそれよりも大きい。捻回数の大きいことは加工性の良好なることを示し、トルク、捻回数いずれも大きいことは変形仕事量の大きいことを示し、材質の優れていることを示すものと考えられる。