オーステナイト系溶接金属の4.2Kにおける 吸収エネルギー予測式

森 誉延, 黒田 哲郎

日立製作所 日立研究所 茨城県日立市幸町 3-1-1

(1983年4月8日受理)

A Predictive Equation of Absorbed Energy of Austenitic Weld Metals at 4.2 K

Takanobu MORI and Tetsurô KURODA

Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.
1-1 Saiwai-cho, 3-chome, Hitachi-shi, Ibaraki-ken, 317, Japan

(Received April 8, 1983)

Synopsis:

In order to obtain a predictive equation of Charpy impact absorbed energy of austenitic weld metals at 4.2 K, a quantitative relation between absorbed energy at 4.2 K and influencing factors, such as ferrite number, carbon content and oxygen content was studied experimentally. These factors were selected based on the fact that the cryogenic toughness of austenitic weld metal is influenced by δ ferrite, chromium carbide and silicon-manganese type oxide.

The absorbed energy at 4.2 K was obtained by a method of converting the lateral expansion at 4.2 K into the absorbed energy by using the lateral expansion vs. absorbed energy diagram of each weld metal at 77 K. The lateral expansion at 4.2 K was obtained by testing the impact specimen in the glass vessel filled with liquid helium. In weld metals containing δ ferrite, the ferrite number was measured by a ferrite indicator. On the other hand, in weld metals containing no δ ferrite, the ferrite number was obtained with the help of the modified Szumachowski's constitution diagram.

Following experimental equation relating the absorbed energy at 4.2 K (vE) to the ferrite number (FN), the carbon content (%C) and the oxygen content (%O) was developed by regression analysis of the experimental data:

$$vE[J] = 90.6 - 4.56(FN) - 44.2(\%C) - 824(\%O)$$

It is expected that the above equation is applicable to predict the absorbed energy of the austenitic weld metal in the as-welded condition at 4.2 K.

1. 緒言

近年、超電導コイルは大形化する傾向にあり、これに伴い電磁力支持用構造材の4.2Kにおける正確なデータ・ベースが必要になってきている。特に、大形で複雑な形状のコイルでは溶接した構造物を使わざるを得ないので、溶接金属の4.2Kでの靱性に関するデータが重要と考えられる。

極低温におけるオーステナイト系溶接金属の靱性は δ フェライト¹⁾²⁾、クロム炭化物³⁾、シリコンマンガン

系酸化物³⁾などの組織要因によって低下することが知られており、また極低温靱性はフェライト・ナンバー²⁾、炭素量³⁾、酸素量³⁾などのパラメータによって関係づけられることが示唆されている。しかしその定量的関係までは明らかにされていない。

本研究はオーステナイト系溶接金属について4.2Kにおけるシャルピー衝撃吸収エネルギーとフェライト・ナンパー、炭素量および酸素量との定量的関係を示す実験式を得ることならびにこの式を用いて4.2Kでの吸収エネルギーを予測する手法を提案することを目的と

した。

なお本研究は日本原子力研究所が進めてきた Large Coil Task (LCT) コイル製作のための実証試験の一部として仕様に提示された項目にもとづいて実施した。

2. 予測式の作成方法

本研究における予測式作成の手順をFig. 1 に示す。まず8種類のオーステナイト系溶接金属について、化学組成の分析、4.2Kでの吸収エネルギーの測定およびフェライト・ナンバーの決定を行なった。つぎに実験データをもとに重回帰分析を行い、4.2Kでの吸収エネルギーとフェライト・ナンバー、炭素量および酸素量との関係を示す実験式を作成した。最後にこの実験式による計算値と実測値の相関性およびこの実験式を用いて吸収エネルギーを予測する手法について述べた。

3. 溶接金属の作製方法

Fig. 2aに示す開先を有する SUS 304LN の板に対し 308系および316系の溶接材料を溶接した。得られた溶接金属の化学組成をTable 1に、溶接条件をTable 2に示す。

4. 4.2Kでの吸収エネルギーの測定方法および結果

衝撃試験片はFig. 2bに示す位置から採取した。試験片寸法は JIS 4号シャルピー試験片の規格に従って加工した。試験片のVノッチの位置は溶接金属の中央とした。

Fig. 1 Flow chart to obtain a predictive equation of absorbed energy of austenitic weld metals at 4.2 K.

Fig. 2a Edge preparation for welding

Table 1 Chemical compositions of weld metals used in the experiment

Test no.	Alloy type	Chemical composition (mass %)											
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	N	O	Fe
1	308Mn	0.06	0.28	9.15	0.014	0.008	19.06	11.11	0.62	...	0.048	0.021	Bal.
2	308Mn	0.09	0.51	8.08	0.012	0.010	18.55	12.35	0.89	...	0.071	0.026	Bal.
3	308N	0.07	0.54	1.82	0.021	0.010	20.95	8.72	...	0.06	0.144	0.022	Bal.
4	308N	0.06	0.54	1.80	0.020	0.008	21.12	8.71	...	0.07	0.146	0.026	Bal.
5	316Mn	0.04	0.41	4.10	0.013	0.004	18.79	16.21	2.82	...	0.017	0.060	Bal.
6	316Mn	0.04	0.43	5.32	0.013	0.004	18.89	16.26	2.78	...	0.018	0.062	Bal.
7	316Mn	0.05	0.36	3.98	0.013	0.004	18.80	16.55	2.86	...	0.018	0.061	Bal.
8	316Mn	0.01	0.22	5.71	0.011	0.011	17.66	16.38	2.19	...	0.051	0.037	Bal.
9	316Mn	0.02	0.19	5.98	0.009	0.010	18.04	15.82	2.47	...	0.027	0.014	Bal.
10	316C	0.18	0.51	1.36	0.024	0.003	18.21	13.92	2.03	...	0.026	0.061	Bal.
Base metal	304LN	0.02	0.56	1.23	0.020	0.008	18.75	10.13	0.01	...	0.131	0.010	Bal.

Table 2 Welding conditions of weld metals used in the experiment

Test no.	Welding* process	Electrode diameter (mm)	Polarity**	Current (A)	Argon flow rate (l/min)	Interpass temperature (°C)
1	GTAW	5.0	DCSP	220	20	<100
2	GMAW	1.0	DCRP	260	25	<100
3	GTAW	4.0	DCSP	220	20	<100
4	GMAW	1.6	DCRP	260	25	<100
5, 6, 7	SMAW	4.0	DCRP	130	...	<100
8	GTAW	2.4	DCSP	200	20	<100
9	GMAW	1.2	DCRP	240	25	<100
10	SMAW	4.0	DCRP	130	...	<100

* GTAW: gas tungsten arc welding
GMAW: gas metal arc welding
SMAW: shielded metal arc (covered electrode) welding
** DCSP: direct current straight polarity
DCRP: direct current reverse polarity

Table 3 The influence of glass vessel on absorbed energy and lateral expansion of weld metal of test no. 5

Test temperature (K)	In case of specimens without glass vessel		In case of specimens with glass vessel	
	Absorbed energy (J)	Lateral expansion (mm)	Absorbed energy (J)	Lateral expansion (mm)
297	90	1.95	113	1.97
77	44	0.78	66	0.79

Fig. 2b Location of the Charpy impact specimen machined from the weldment. The specimen used is JIS-Charpy 4 type.

4. 2K での衝撃試験は試験片を Fig. 3 に示すようにガラス容器に入れた後、容器内に液体ヘリウムを満した状態で行った。なお試験片をガラス容器に入れる方法として、あらかじめガラス容器はFig. 3 の B-B 断面の位置で分割した状態に作製しておき、容器内に試験片を入れてから B-B 断面を接合する方法を用いた。ガラス容器を用いた衝撃試験ではガラス容器の影響が懸念される。そこでガラス容器の影響を調べるための予備実験を行った。Table 3 は試番 5 の溶接金属に

Fig. 3 Glass vessel used for the impact testing at 4.2 K.

ついて室温および77Kで吸収エネルギーと横膨出量* に及ぼすガラス容器を調べた結果である。吸収エネルギーの場合、ガラス容器によって約20 J 増加している。破断した試験片を観察すると試験片のVノッチの両側に多数の引っかき傷が認められる。したがって吸収エネルギーがガラス容器によって増加する理由は、ガラス容器の破片が試験片と試験機との間にはさまれて、試験片

に摩擦抵抗を与えるためと考えられる。Fig. 4は試番5および9の溶接金属と母材について吸収エネルギーに及ぼすガラス容器の影響を77Kで調べた結果である。試験材によってガラス容器の影響にばらつきが認められる。このばらつきはガラス破片による摩擦抵抗のばらつきと考えられる。一方、Table 3に示すように横膨出量*はガラス容器の影響がほとんど認められない。

横膨出量は材料の塑性変形能そのものなので本来ガラス容器の影響を受けないと考えられる。

Fig. 4 Relationship between the absorbed energy of specimen without glass vessel and the absorbed energy of specimen with glass vessel at 77 K.

4.2Kでの吸収エネルギーを求める方法としてガラス容器の影響分を差し引く方法が提案されているが⁹⁾、ガラス容器の影響分はバラツキが大きいと考えられるので、本研究では4.2Kでの横膨出量から求める方法を検討した。吸収エネルギーを横膨出量から求める場合、両者の関係が知られている必要があるが、従来の報告⁷⁾によれば同一温度、同一鋼種の場合、両者の関係はほぼ比例関係すなわち原点付近を通る直線関係が認められている。このことを確認する目的で、316Mn系溶接金属 (Table 1の試番5, 6および7) について77Kでの試験をガラス容器無しで行った。この結果、Fig. 6に示すように横膨出量と吸収エネルギーとの関係は77Kでほぼ比例関係であることが確認された。この結果から4.2Kにおいても横膨出量と吸収エネルギーと

* 横膨出量は衝撃試験片にハンマーが当たる面側での試験前後における厚さの変化量として定義される量である。Fig. 5に横膨出量を測定する方法を示す。

Fig. 5 The method to measure the lateral expansion.

Fig. 6 Relationship between lateral expansion and absorbed energy of 316Mn type weld metals at 77K.

の関係は比例関係であると推定される。次に横膨出量と吸収エネルギーの関係に対する温度の影響、すなわち試験温度が77Kから4.2Kに低下した場合両者の関係がどのような影響を受けるか調べる目的でTable 1の試番5の溶接金属について横膨出量(ϕ)の変化に対する吸収エネルギー(vE)の変化、すなわち $dvE/d\phi$ 対

Fig. 7 Effect of temperature on $dvE/d\phi$ of weld metal of test no. 5.

する温度の影響を77K~167Kの温度域で調べた。この結果、Fig. 7に示すように $dvE/d\phi$ の値は試験温度が167Kから122Kに低下した場合、増加が認められる

Fig. 8 Schematic illustration showing a method to obtain absorbed energy at 4.2K by using relationship between lateral expansion and absorbed energy at 77K.

Fig. 9 Relationship between lateral expansion and absorbed energy of the weld metals at 77K.

ものの、試験温度が122Kから77Kに低下した場合には増加が非常に小さく無視し得る程度である。この結果から、4.2Kにおける $dvE/d\phi$ の値は77Kにおける $dvE/d\phi$ の値にほぼ等しいと推定さる。以上の検討結果から、4.2Kでの吸収エネルギーを横膨出量から求める場合、Fig. 8に示すように、77Kでの横膨出量と吸収エネルギーの関係を示す線図の延長上において4.2Kでの横膨出量に対応する吸収エネルギーの値を採用できると考えられる。

Fig. 9はTable 1の溶接金属について求めた77Kでの横膨出量と吸収エネルギーの関係を示す線図である。Table 4にFig. 9を用いて求めた4.2Kでの吸収エネルギーの値を示す。

5. フェライト・ナンバーの決定方法および結果

Table 1の溶接金属についてフェライト・ナンバーをフェライト・インジケータにより測定した。この結果をTable 5に示す。Table 5でフェライト・ナンバーを記入してない試番（試番2，8および10）は完全オーステナイト組織であることを意味する。完全オーステナイト組織であっても化学組成が異なればオーステナイト組織の安定度に差があると考えられる。Szumachowskiはこの観点から完全オーステナイト組織のための組織線図²⁾⁵⁾を作成し、負のフェライト・ナンバーによってオーステナイト組織の安定度を表示している。Table 5にSzumachowskiの組織線図を用いて求めたTable 1の溶接金属のフェライト・ナンバー(FN-1)を示す。Table 5に示す試番のうち δ フェライトを含む試番1，3，4，5および9のFN-1の値はフェライト・インジケータによる実測値より低目であり、こ

Table 4 Lateral expansion and absorbed energy of weld metals tested at 77 K and 4.2 K

Test no.	Lateral expansion at 77 K (mm)	Absorbed energy at 77 K (J)	Lateral expansion at 4.2 K (mm)	Absorbed energy at 4.2 K (J)
1	0.68	53	0.25	24
	0.47	44	0.31	29
			0.38	35
		...		...
Ave.	0.58	49	0.31	29
2	1.07	125	0.57	74
	0.77	118	0.48	62
		...		...
	0.92	122	0.53	68
Ave.	0.92	122	0.53	68
3	0.37	31	0.11	10
	0.29	30	0.09	8
		...		...
	0.33	31	0.10	9
Ave.	0.33	31	0.10	9
4	0.25	25	0.09	11
	0.22	32	0.04	5
			0.05	6
		...		...
Ave.	0.24	29	0.06	7
5	0.74	43	0.67	40
	0.77	47	0.64	38
	0.83	43	0.51	30
		...		...
Ave.	0.78	44	0.61	36
8	1.23	91	1.08	80
	1.25	94	1.08	80
		...		...
	1.24	93	1.08	80
Ave.	1.24	93	1.08	80
9	1.48	103	1.02	72
	1.08	75	1.22	85
		...		...
	1.28	89	1.12	78
Ave.	1.28	89	1.12	78
10	1.07	74	0.85	59
	1.07	73	0.82	57
			0.94	65
		...		...
Ave.	1.07	74	0.87	60

Table 5 Measured ferrite number and calculated ferrite number of weld metals

Test no.	Constitution of weld metal	Measured ferrite no. by ₂ ferrite indicator	Calculated ferrite no. from Szumachowski's constitution diagram FN-1	Calculated ferrite no. from Fig. 8 FN-2
1	Austenite plus ferrite	8.5	-6.5	4.5
2	Austenite	...	-10.8	-1.2
3	Austenite plus ferrite	13.5	4.7	12.3
4	Austenite plus ferrite	13.5	6.2	14.1
5	Austenite plus ferrite	0.1	-1.4	2.2
8	Austenite	...	-10.7	-3.7
9	Austenite plus ferrite	0.1	-6.6	0.0
10	Austenite	...	-7.7	-5.7

の傾向は Mn 量あるいはN量の多い試番（試番1, 3 および4）で著しい。この原因として, Szumachowski の組織線図で用いられている Ni 当量式, すなわち

$$\text{Ni 当量} = (\% \text{Ni}) + 30 \times (\% \text{C}) + 30 \times (\% \text{N}) + 0.5 \times (\% \text{Mn}) \quad (1)$$

の Mn および N の係数の値が不適切であることが考えられる。従来, 組織線図の Ni 当量式における Mn と N の係数値に関して多くの異説^{4) 9) 10)}があるが, 筆者等は Mn および N の係数の値を変化させて検討した結果, Mn の係数を 0 とし, N の係数を 20 とした場合に Mn 量あるいは N 量の広い範囲にわたって Szumachowski の組織線図を適用できると考えた。Fig. 10 は Ni 当量式として

$$\text{Ni 当量} = (\% \text{Ni}) + 30 \times (\% \text{C}) + 20 \times (\% \text{N}) \quad (2)$$

を用いた組織線図を示す。Table 5 に Fig. 10 を用いて求めたフェライト・ナンバ (FN-2) を示す。δ フェライトを含む試番について見ると FN-2 は FN-1 よりも実測値と良い一致を示している。

Fig. 10 Constitution diagram for calculating the ferrite number of fully austenitic weld metal. In the figure the weld metals tested are shown with the closed circles and the numbers near the closed circles designate the test numbers

以上の検討から完全オーステナイト組織を有する溶接金属にフェライト・ナンバを与える方法として, Szumachowski の組織線図よりも Fig. 10 の組織線図を用いる方法の方がより適切と考えられる。δ フェライトを含む溶接金属にフェライト・ナンバを与える方法としては精度の点からフェライト・インジケータ, マグネ・ゲージ等の計器を用いて実測する方法が適切である。

6. 吸収エネルギー実験式の作成方法および結果

オーステナイト系溶接金属の 4.2K での吸収エネルギーに及ぼすフェライト・ナンバ, 炭素量および酸素量の影響はそれぞれが加算的であると考えられる。この場合, 吸収エネルギーの関係式は次の形となる。

$$vE = A_0 + A_1 \times (\text{FN}) + A_2 \times (\% \text{C}) + A_3 \times (\% \text{O}) \quad (3)$$

ここで, vE : 4.2K での吸収エネルギー(J), FN: フェライト・ナンバ, %C: 炭素量(mass%), %O: 酸素量(mass%), $A_0, \dots, A_3$: 定数である。

Table 6 に示す実験データを用い, (3)式の定数 $A_0, \dots, A_3$ を重回帰分析によって決定した結果, 4.2K での吸収エネルギーに関する次の実験式が得られた。すなわち

$$vE[\text{J}] = 90.6 - 4.56(\text{FN}) - 44.2(\% \text{C}) - 824(\% \text{O}) \quad (4)$$

(4)式は吸収エネルギーに及ぼす酸素量の影響が大きいこと示している。

Table 6 Experimental data used for regression analysis

Test no.	Absorbed energy (J)	Ferrite number	Carbon content (mass %)	Oxygen content (mass %)
1	29	8.5	0.06	0.021
2	68	-1.2	0.09	0.026
3	9	13.5	0.07	0.022
4	7	13.5	0.06	0.026
5	36	0.1	0.04	0.060
8	80	-3.7	0.01	0.037
9	78	0.1	0.02	0.014
10	60	-5.7	0.18	0.061

7. 吸収エネルギー予測式としての検討

(4)式の多重決定係数(重相関係数の2乗)は0.986である。したがって極めて高い近似精度で実験式が検定された。Fig. 11はTable 1の溶接金属について(4)式による計算値 vEc と実測値 vEm との関係を示す。Fig. 11において実線は $vEc = vEm$, 破線は $vEc = vEm \pm 5[\text{J}]$ を意味する。実験点はすべて破線の内部にある。計算値と実測値の相関性は非常に良い。

以上の結果から, (4)式は多層盛溶接された 308 系あるいは 316 系の溶接金属の中心部分について 4.2K での吸収エネルギーを予測しようとする場合に利用できる

Fig. 12 Flow chart to predict the absorbed energy at 4.2K of the austenitic weld metal.

Fig. 11 Relationship between the calculated absorbed energy from the equation (4) and the measured absorbed energy at 4.2K.

と考えられる。この場合の予測の手順をFig. 12に示す。
なお、(4)式を適用する場合に注意を要するのは、

(4)式は溶接入熱が過大の場合の影響および溶接後熱処理による組織変化の影響についての考慮がなされていない点である。溶接入熱が過大の場合には結晶粒が粗大化することによる靱性の低下³⁾、また溶接後熱処理によってクロム炭化物、 σ 相などを生成した場合にはこれらの組織変化による靱性の低下³⁾が指摘されている。今後は結晶粒度および組織変化を考慮した予測式の検討が課題と考えられる。

8. 結言

308系および316系溶接金属を対象に4.2Kでの吸収エネルギー(vE)をフェライト・ナンパー(FN)、炭素量(%C)および酸素量(%O)と関係づける実験式として次式を得た。

$$vE[J] = 90.6 - 4.56(FN) - 44.2(\%C) - 824(\%O)$$

そしてこの式を用いて溶接のままのオーステナイト系溶接金属の4.2Kでの吸収エネルギーを予測するための手法を示した。

終わりに臨み、数あるLCT作業の中で本報告の発

表を許可され、かつ原稿について御討論をいただいた日本原子力研究所超電導磁石研究室の島本進室長に謝意を表します。また実験に協力された日立工場の菅原孝志氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) D.T. Read, H.I. McHenry, P.A. Steinmeyer and R.D. Thomas, JR.: Welding Journal, Vol. **59** (1980) 104-s
- 2) E.R. Szumachowski and H.F. Reid: Cryogenics, Vol. **20** (1980) 253.
- 3) 小川忠雄, 中村治方, 常富栄一: 溶接学会誌, Vol.**50** (1981) 1203
- 4) F.C. Hull: Welding Journal, Vol. **52** (1973) 193-s.
- 5) E.R. Szumachowski and H.F. Reid: Welding Journal, Vol. **57** (1978) 325-s.
- 6) T.A. Whipple, H.I. McHenry and D.T. Read: Welding Journal, Vol. **60** (1981) 72-s.
- 7) 社団法人: 日本電気協会, 原子力専門委員会, 第2分科会, PF 部会, 横膨出量ワーキンググループ, “横膨出量基準に関する研究報告書” (1978)
- 8) 吉田清, 多田栄介, 高橋良和, 島本 進, 三浦立, 大西敬三: 低温工学, Vol. **17** (1982) 158
- 9) A.L. Schaeffler: Metal Progress, Vol. **56** (1949) 680.
- 10) W.T. DeLong: Welding Journal, Vol. **53** (1974) 273-s.