

レアース代替材による鋳鉄製造法の開発

著者	白井 雅人, 清水 一道, 船曳 崇史
雑誌名	室蘭工業大学地域共同研究開発センター研究報告
巻	24
ページ	29-31
発行年	2014-02
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009035

レアアース代替材による鋳鉄製造法の開発

白井 雅人^{*1}, 清水 一道^{*2}, 船曳 崇史^{*3}

1 はじめに

鋳鉄は機械・構造材料として幅広く使用されており、素形材産業の中核をなしている。その中でも、球状黒鉛鋳鉄(FCD)は黒鉛が球状であるため、部材にかかる応力の集中が緩和され、強度部材として必要な引張強さ、疲労強度、衝撃値などの機械的性質に優れている¹⁾。黒鉛の球状化率は80%以上で良好な機械的性質を示すことが知られている²⁾ことから、FCDの製造において球状化率を向上させる必要があり、その際に用いられるのが黒鉛の球状化剤である。球状化剤にはCeやLa等のレアアースが含まれており、高品質なFCDを製造するためにレアアースは欠かせない存在である^{3,4)}。

しかしながら、それに伴ってレアアースの需要も高まる一方、レアアースの埋蔵量、生産量ともに世界トップの中国が生産や輸出を制限している為、世界的にレアアースの需給が逼迫し国際価格が高騰している。

そこで、本研究ではレアアースを使用した球状化剤と、レアアースレスの球状化剤でFCDを製作し、疲労試験によって、構造用部材として重要な疲労強度の評価を行った。この結果を比較することで、レアアースの有無による疲労強度への影響を調査した。

また、鋳肌状態の供試材を平滑材と同じ溶湯にて製作し、平滑材と試験結果を比較することで、表面性状の違いが疲労強度に及ぼす影響を調査した。

2 実験方法

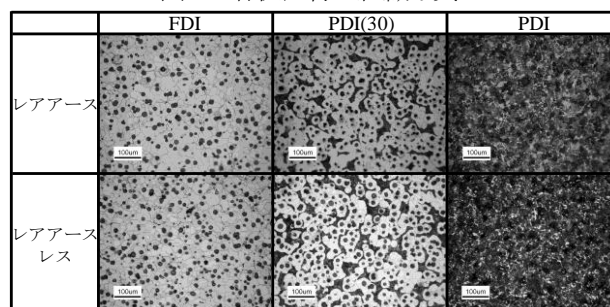
2.1 供試材の製作

供試材はレアアースを使用、未使用の2種類の黒鉛球状化剤を用いてそれぞれ製作した。接種剤はレアアース、レアアースレスで統一とし、接種方法は一次接種を取鍋接種、二次接種を注湯流接種とした。表1に使用した黒鉛の球状化剤と接種剤を示す。供試材の基地組織は熱処理によりフェライト地(FDI)、パーライト地率30%(PDI(30))、パーライト地(PDI)の3種類とした。各供試材の組織写真、化学成分、黒鉛の球状化率及び機械的性質をそれぞれ図1、表2、表3に示す。各供試材において、組織、化学成分にレアアース、レアアースレスによる差はなく、黒鉛球状化率、機械的性質は一般的な球状黒鉛鋳鉄と比較しても良好な値であった。

表1 使用した球状化剤と接種剤の化学成分
mass%

	Si	Mg	Ca	Ba	Al	RE
レアアース OGRC-5.5S-2	46.6	5.9	2.36	—	—	2.03
レアアースレス OGL-5	46.3	5.8	3.02	—	0.81	—
接種剤 カルバロイ	73.7	—	1.75	0.93	2.06	—

図1 各供試材の組織写真



*1: 岩見沢鋳物株式会社

*2: もの創造系領域材料工学ユニット

*3: 物質工学専攻

2.2 実験条件

疲労試験には平面曲げ疲労試験機を用いた。図2に試験片の寸法を示す。図2より試験片の形状は厚さ3mm、最小幅部20mmの平板試験片であり、レアース、レアースレスそれぞれで表面を研削したもの(平滑材)と、未加工のもの(鋳肌材)の2種類を用意した。試験条件は、繰返し速度20Hzの正弦波荷重、応力比を-1とし、試験環境は室温、大気中とした。試験片が破断、または繰返し数が 1×10^7 回に達した場合を試験停止条件とし、未破断であった試験片の負荷応力を疲労強度 σ_w とした。破断した試験片はSEMを用いて破面観察を行った。

3 実験結果と考察

3.1 平滑材の実験結果と考察

図3に平滑材のS-N線図を示す。図3より平滑材は、黒鉛の球状化剤にレアースを使用した場合と比較してレアースレスの疲労強度 σ_w が全て低下した。

表2 各供試材の化学成分

		mass%							
組織		C	Si	Mn	Cu	S	Mg	P	Cr
レアース	FDI	3.8	2.6	0.34	0.16	0.01	0.04	0.02	0.04
	PDI(30)	3.8	2.6	0.57	0.67	0.01	0.04	0.02	0.04
	PDI	3.8	2.6	0.57	0.67	0.01	0.04	0.02	0.04
レアースレス	FDI	3.8	2.5	0.39	0.09	0.006	0.04	0.015	0.04
	PDI(30)	3.8	2.6	0.55	0.68	0.007	0.04	0.016	0.04
	PDI	3.8	2.6	0.55	0.68	0.007	0.04	0.016	0.04

表3 黒鉛の球状化率及び機械的性質

組織	球状化率 [%]	耐力 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	伸び [%]	硬度 [HB]	
レアース	FDI	88	289	431	24	140
	PDI(30)	87	323	504	19	170
	PDI	91	626	965	8	302
レアースレス	FDI	78	290	440	22	140
	PDI(30)	80	322	518	17	179
	PDI	85	595	935	9	293

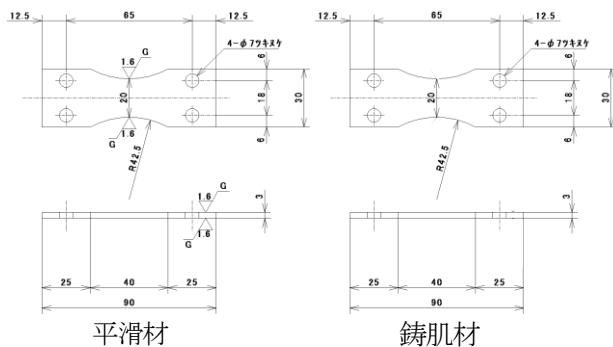


図2 試験片の寸法

σ_w の低下率はFDIで12%、PDI(30)で13%、PDIで

23%となり、PDIの低下率は他の供試材より顕著であった。黒鉛の球状化率や機械的性質に差が無かったにも関わらずレアースレスにおいて σ_w が低下した要因を考察するため、破断した試験片の破面観察を行った。破面観察の結果、レアースレスの供試材では内部に図4に示す鑄造欠陥が多数観察された。鑄造欠陥は、き裂の発生起点や進展速度に影響し、破断に至る原因の一つとして考えられている。しかしながら、これらの欠陥全てが破断の原因であるとは断言できない。そこで、欠陥の大きさを定量的に評価するために用いたのが $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルである⁵⁾。 $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルは鑄造欠陥が内接する矩形範囲面積の平方根のことであり、欠陥の面積をき裂長さに代替することができる。これを用いることで形状の異なる鑄造欠陥でも比較が可能になる。求めた $\sqrt{\text{area}}$ の値を用いて、き裂先端における応力場の強さを表す応力拡大係数範囲 ΔK を以下の式⁵⁾にて算出した。

α は定数であり、内部欠陥は0.5、表面欠陥は0.65
また、下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} を以下の式⁵⁾から求めた。 Hv は各供試材のビッカース硬さである。

$$\Delta K_{th} = 3.3 \times 10^{-3} (Hv + 120) (\sqrt{\text{area}})^{1/3}$$

ΔK_{th} は、き裂が伝播する最小の ΔK のことであり、 ΔK が ΔK_{th} を上回っている場合、その欠陥が破断する際の起点となりやすくなる。表4に各レアースレス供試材の $\sqrt{\text{area}}$ 、 ΔK 、 ΔK_{th} の一例と $\Delta K > \Delta K_{th}$ となった鑄造欠陥の個数を示す。表4より $\Delta K > \Delta K_{th}$ となった欠陥の個数がPDIで最多であり、 ΔK の値も大きくなった。以上より、球状化剤をレアースレスにしたことで鑄造欠陥が増え、 σ_w が低下した要因となり、PDIはその数が他の供試材よりも多かったため、 σ_w の低下率が大きくなったと推察される。

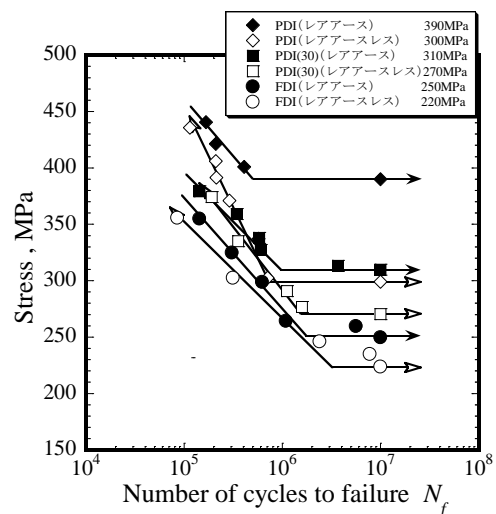


図3 平滑材のS-N線図

3.2 鋳肌材の実験結果と考察

図5に鋳肌材のS-N線図を示す。図5よりレアアースとレアアースレスで σ_w の差は小さかった。しかし、平滑材と比較すると σ_w は全体的に低下した。その要因が鋳造欠陥の位置や大きさおよび表面の粗さによるものと想定し、平滑材と同様に破面観察を行った。破面観察の結果、表面近傍で図6に示すピンホールや砂かみが観察された。これらの \sqrt{area} 、 ΔK 、 ΔK_{th} を表5に示す。表5より表面欠陥の ΔK が最も大きくなった。また、鋳肌材表面の算術平均粗さを測定したところ、鋳肌材は平滑材より20倍ほど粗くなっていたことから、鋳肌材は表面の応力集中が強くなったと推察される。以上より、鋳肌材ではレアアースレスで生じる内部欠陥よりも、表面近傍の欠陥と表面粗さによる応力集中が破断に大きく影響したため、平滑材と比較して σ_w が全体的に低下したが、レアアースの有無による影響は小さくなったと推察される。

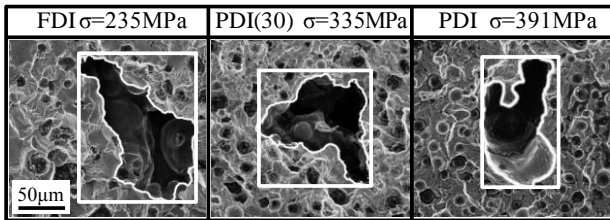


図4 平滑材におけるレアアースレス供試材の鋳造欠陥

表4 平滑材における鋳造欠陥のパラメータ

	FDI	PDI(30)	PDI
\sqrt{area} [μm]	127	170	154
ΔK [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]	4.7	7.7	8.6
ΔK_{th} [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]	4.4	5.6	7.6
$\Delta K > \Delta K_{th}$	3	5	6

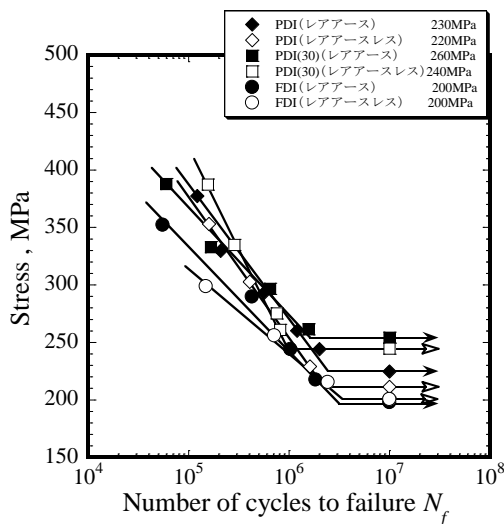


図5 鋳肌材のS-N線図

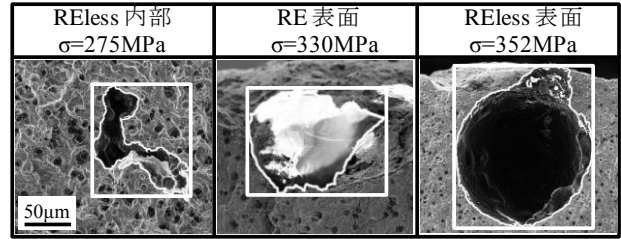


図6 鋳肌材における鋳造欠陥

表5 鋳肌材における鋳造欠陥のパラメータ

	レアアースレス 内部	レアアース 表面	レアアースレス 表面
\sqrt{area} [μm]	191	219	540
ΔK [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]	6.7	11.2	18.9
ΔK_{th} [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]	5.9	8.7	11.5

4 おわりに

本研究において黒鉛の球状化剤にレアアースを使用したものとレアアースレスの供試材を製作し、疲労試験を行った。その結果、平滑材では球状化剤をレアアースレスにすることで内部に鋳造欠陥が増え、 σ_w はレアアース使用時と比べて10~20%低下した。

鋳肌材ではレアアースとレアアースレスによる σ_w の差は小さかった。しかしながら、表面近傍に存在する欠陥と表面粗さの影響を受けるため、 σ_w は平滑材よりも低下する。

本研究成果より、今後はレアアースレスの球状化剤を使用した場合に鋳造欠陥が生じる原因の求明が必要である。

表面性状の違いによる疲労強度への影響に関しては、今後は供試材表面にショットピーニングを行うことで鋳肌を除去した場合に σ_w がどの程度上昇するのかを調査する。そして、平滑材の σ_w と比較することで、研削加工を行わずにショットピーニングによって製品としての使用が期待できるかを検討する。

文献

- 1) 清水一道, 関根崇博, 鳥居昭秀, 高松吉金: 鋳造工学, 84(2012), 682
- 2) 中江秀雄: 新版 鋳造工学, (2008), 産業図書
- 3) 鈴木勇佑, 鈴木孝夫: 鋳造工学, 84(2012), 671
- 4) 小綿利憲, 平塚貞人, 千葉雅則, 鹿毛秀彦, 藤島晋平: 鋳造工学, 84(2012), 675
- 5) 村上敬宜: 金属疲労微小欠陥と介在物の影響, (1993), 養賢堂