研 究

高い疲れ限度比を有する焼結メカニカルヒューズ部品の開発

鈴木 貴志^{☆1}, 筒井 唯之^{☆1}, 石井 啓^{☆1}, 岸淵 昭^{☆2}, 児玉 邦宏^{☆2}, 山田 耕二^{☆2}^{☆1}日立粉末冶金(株), 〒270-2295 松戸市稔台 520 番地.^{☆2}(株)デンソー, 〒448-8661 刈谷市昭和町 1-1.

Development of Sintered Mechanical Fuse Parts with High Fatigue Limit Ratio

Takashi Suzuki^{☆1}, Tadayuki Tsutsui^{☆1}, Kei Ishii^{☆1}, Akira Kishibuchi^{☆2},
Kunihiro Kodama^{☆2} and Kouji Yamada^{☆2}^{☆1}Hitachi Powdered Metal Co., Ltd., 520 Minoridai, Matsudo 270-2295.^{☆2}DENSO CORPORATION, 1-1 Showa-cho, Kariya 448-8661.

Received July 9, 2004

SYNOPSIS

It is required a function that the compressor of a car air conditioner in case overloaded will be disconnected from the engine power. Presented here is the development of a mechanical fuse part having such function. This part can be realized by satisfying two functions simultaneously; (1) the part has sufficient fatigue strength to transmit power without breaking, and (2) it breaks promptly to disconnect the power if an overload occurs. This can be realized by developing a material having high fatigue limit ratio (fatigue strength/tensile strength). Such material was investigated and was found that a high fatigue limit ratio is achieved by steam treating a Fe-Cu-C material sintered compact with a decreased amount of carbon. This newly developed material has recently been applied to such required mechanical fuse parts.

KEY WORDS

Compressor, mechanical fuse, fatigue limit ratio, steam treatment

1 緒 言

近年のカーエアコン用のコンプレッサは省燃費、省動力、加速性の向上および電磁クラッチの断続時におけるショックの低減を目的として連続可変容量化へのニーズが高まりつつある¹⁾。この用途のコンプレッサは万が一コンプレッサに過大な負荷が加わった際にベルトを保護する機能が必要となる。このため、一定以上の負荷を生じると動力を伝達する部分の一部が破断することでエンジンからの動力伝達を遮断しベルトを保護する、いわゆるメカニカルヒューズ部品の開発を行った。プーリとコンプレッサの軸を連結する部位に用いる本製品は、以下の機能を満足する必要がある。①通常の運転時は破断することなく動力を伝達するための疲れ強さを有する。②コンプレッサに過大な負荷が加わった際は動力を伝達する部分の一部が速やかに破断することで動力を遮断する。このため、材料は高い疲れ限度比(疲れ強さ/引張り強さ)が求められる²⁾。一般の溶製鋼である炭素鋼においては、パーライト組織に比べてフェライト組織が高い疲れ限度比が得られ、C量の低下により疲れ限度比は向上することが知られている^{3,4)}。

そこで、本研究では粉末冶金において広く使用されているFe-Cu-C系の材料を用いて、疲れ限度比に及ぼす黒鉛の添加量の影響を確認した。さらに、気孔の球状化による応力集中の緩和に着目し、疲れ限度比に及ぼすスチーム処理の影響について検討を行った。

2 試料及び実験方法

2.1 試料の作製

原料粉はJFE スチール(株)製の180 μm 以下の還元鉄粉(JIP270MS)、45 μm 以下のアトマイズ銅粉(KCU-EL)、日本黒鉛工業(株)製の平均粒径5 μm の天然黒鉛粉(J-CPB)、および成形潤滑剤として陽光産業(株)製のステアリン酸亜鉛粉(ZNS730)を用いた。Table 1は各原料粉の配合比を示す。各々の混合粉は引張り試験片と回転曲げ疲労試験片用の素材として15×90×15 mm、残留応力測定用の素材として10×60×3 mmの形状を密度 $6.50 \pm 0.05 \text{ Mg/m}^3$ になるように成形した。各成形体はエンドサーミックガス雰囲気中で1393 K、保持時間1.2 ksの条件で焼結した。一部の焼結体は水蒸気中で温度853 K、保持時間

1.2ks の条件でスチーム処理を行った。

2.2 評価方法

2.2.1 疲れ限度比に及ぼすスチーム処理の影響

焼結体とスチーム体の疲れ限度比はTable 1に示す試料No.1の引張り強さと疲れ強さを測定し求めた。Fig.1は引張り試験片、Fig.2は疲れ試験片を示す。引張り強さはISO 6892に準拠し測定した。疲れ強さは小野式回転曲げ疲れ試験により繰返し数 1×10^7 で未破断の応力を測定した。

2.2.2 気孔の球状化と残留応力に及ぼすスチーム処理の影響

残留応力は試料No.1の焼結体とスチーム体の表面をX線により格子定数の変化を測定し残留応力を求めた。気孔分布は試料No.1の焼結体とスチーム体を熱硬化性樹脂に埋込み研磨したのち観察した。この気孔分布は解析ソフト Winroof ver.3を用いて画像解析し、気孔の球状化度合いを表す指標として(1)式により気孔の円形度を測定した。

$$D = 4\pi S / L^2 \quad (1)$$

ここで、式中のDは気孔の円形度($0 < D \leq 1$)、Sは気孔の面積、Lは気孔の周囲長であり、Dが1に近いほど気孔がより球状化していることを表す。研磨した試料はSEM観察および元素分析を行った。

2.2.3 疲れ限度比に及ぼす黒鉛の添加量の影響

Table 1に示す試料のスチーム体の疲れ限度比は2.2.1と同様の方法で求めた。

2.2.4 引張り試験と疲れ試験における亀裂伝播の解析

引張り試験と疲れ試験における亀裂伝播を解析するため、2.2.1で評価した焼結体の試料は3% ナイタル液により試料の表面を腐食したのち光学顕微鏡で観察した。なお、疲労試験における亀裂伝播は、繰返し数 5×10^5 前後で破断する予想応力を負荷した時に、繰返し数 1×10^5 で試験を中断して観察した。

3 実験結果および考察

3.1 疲れ限度比に及ぼすスチーム処理の影響

Fig.3は試料No.1の焼結体とスチーム体の引張り強さを示す。スチーム処理による引張り強さの変化はほとんどなく、焼結体とスチーム体は同等の引張り強さを示す。Fig.4は試料No.1の焼結体とスチーム体の疲れ強さを示す。スチーム体は焼結体に比べて疲れ強さが36%上昇する。Fig.5はFig.3,4より求めた試料No.1における焼結体とスチーム体の疲れ限度比を示す。スチーム体の疲れ強さは0.46であり、焼結体の0.36

に比べて28%上昇する。このことから、スチーム処理は疲れ限度比の上昇に有効と考える。

Fig.1 Specimen for tensile strength

Fig.2 Specimen for fatigue strength

Fig.3 Comparison of tensile strength in specimen No.1.

Fig.4 Comparison of fatigue strength in specimen No.1.

Table 1 Chemical compositions.

No.	(wt.%)			
	Fe Powder	Cu Powder	Graphite Powder	Lubricant
1	98.2	1.5	0.3	0.8
2	98.0	1.5	0.5	0.8
3	97.8	1.5	0.7	0.8

Fig.5 Comparison of fatigue limit ratio in specimen No.1.

Fig.6 Pore distribution in specimen No.1.

Table 2 Comparison of pore roundness and residual compressive stress in specimen No.1.

	As-sintered	Steam treated
Pore roundness	0.30	0.47
Residual compressive stress (MPa)	42.0	75.5

3.2 気孔の球状化と残留応力に及ぼすスチーム処理の影響

Fig.6は焼結体とスチーム体の気孔分布を示す。スチーム体は焼結体に比べて気孔が球状化している様子が観察できる。Table 2は気孔の円形度と残留応力を示す。スチーム処理により、気孔の円形度は増加している。また、スチーム処理は圧縮残留応力を付与することができる。Fig.7は焼結体とスチーム体のSEM像と元素分析の結果を示す。スチーム体における気孔の外周は酸化物層が形成されている。以上より、スチーム処理は気孔の外周に酸化物層を形成し、疲労の起点となる鋭角部が減少することや圧縮残留応力が付与されるために、疲れ強さが向上すると考える。しかしながら、引張り強さはスチーム処理によりほとんど変化しないことから、スチーム体は焼結体に比べて疲れ限度比が上昇する。

Fig.7 Distribution of oxide in specimen No.1.

Fig.8 Microstructures of steam treated specimens of table 1.

3.3 疲れ限度比に及ぼす黒鉛の添加量の影響

Fig.8は試料No.1～3におけるスチーム体の金属組織を示す。添加する黒鉛量の増加に伴いパーライトが増加する。Fig.9は試料No.1～3におけるスチーム体の引張り強さと疲れ強さの関係を示す。添加する黒鉛量の増加に伴い引張り強さは上昇するのに対し、疲れ強さはほとんど変化しない。Fig.10は試料No.1～3のスチーム体における添加する黒鉛量と疲れ

Fig.9 Relationship between tensile strength and fatigue strength of steam treated specimen.

Fig.10 Relationship between amount of added graphite and fatigue limit ratio of steam treated specimen.

限度比の関係を示す。添加する黒鉛量の増加に伴い疲れ限度比は低下する。

3.4 引張り試験と疲労試験における亀裂伝播の解析

Fig.11は3.1で評価した引張り試験と疲労試験における亀裂伝播を観察した結果を示す。静的(引張り)破壊の場合、亀裂はいずれの組織をも伝播している。一方、疲労破壊の場合、亀裂はパーライトを迂回しフェライト組織中を伝播している。すなわち、静的破壊における亀裂はフェライトとパーライトの両方を進展するためパーライトの面積率の増加に伴い引張り強さは上昇するが、疲労破壊における亀裂はフェライトを選択的に進展するためパーライトの面積の増加に伴う疲れ強さの上昇する割合が少ないことが推察される。以上のことから、添加する黒鉛量の増加に伴いパーライトの面積率が増加し疲れ限度比が低下すると考える。

4 ま と め

粉末冶金において広く使用されているFe-Cu-C系の材料を用いて、高い疲れ限度比が得られる材料を検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) スチーム処理により、気孔の外周に酸化物層を形成し引張り強さはほとんど変化せずに、気孔の球状化、圧縮残留応

Fig.11 Appearance of crack propagation in static (tensile) destruction and fatigue failure.

Material composition : Fe-1.5Cu-0.4C
Density : 6.60 Mg/m³
Fatigue limit ratio : 0.57

Fig.12 Sintered mechanical fuse for compressors of car air conditioners.

力の付与により疲れ強さが向上する。このため、スチーム体は焼結体に比べて疲れ限度比が上昇する。

- (2) 添加する黒鉛量の増加に伴い引張り強さは上昇するが、疲れ強さの上昇はわずかである。このことから、添加する黒鉛量の増加に伴い疲れ限度比は低下する。
- (3) 静的強さはフェライトとパーライトの比率により決定されるため、パーライトの面積率の増加に伴い引張り強さは上昇する。一方、疲れ強さは疲労亀裂の伝播がフェライトを選択的に進展するため、パーライトの面積率に伴う疲れ強さの上昇する割合が少ない。
- (4) 添加する黒鉛量を低減し、さらにスチーム処理を施したFe-Cu-C系の焼結材料は高い疲れ限度比が得られる。

5 適 用 例

Fig.12は本研究で得られた知見をもとに開発したカーエアコン・コンプレッサ用のメカニカルヒューズ部品である。本製品に適用している材料は、気孔の球状化を目的としてスチーム処理の条件を最適化することにより、疲れ限度比は0.57を達成している。

文 献

- 1) Y.Aoki, J.Ohguchi, K.Yamada, Y.Tanimura, H.Oka and N.Hakamada: "Development of DL pulley for variable displacement compressor –development of metal breakage type torque limiter–", Proceedings of 2002 Spring Conference of Society of Automotive Engineers of Japan, No.64-02(2002)13-16.
- 2) T.Suzuki, T.Tsutsui, K.Ishii, J.Ohguchi, K.Yamada and K.Kodama: "The Development of a Sintered Mechanical Fuse for Compressors of Car Air Conditioners", Proceedings of 2003 Autumn Conference of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, (2003)112.
- 3) The Japan Institute of Metals: "Strength and Destruction of Metallic Materials", Maruzen, (1964)396.
- 4) M.Ikeda and G.Anan: "High Strength Microalloyed Steels", KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS, 52(2002)47-51.