

鉄系焼結機械部品の特性向上について

大阪大学工学部 庄 司 啓 一 郎

1. ま え が き

鉄系焼結機械部品の製造は粉末冶金の応用分野のうちでは新しいものである。戦前は焼結機械部品といえば、青銅系の多孔質軸受が主であったが、戦後、鉄系焼結材が各種の機械部品として使用されるようになり、その優れた特徴が認識されたため、最近その生産量の増加が著しく、焼結機械部品の主流を占めるに至った。現在の用途は自動車、家庭用機器、事務用機器、紡績機械などの部品が多く、とくに形状が複雑で、普通の切削加工では工数を要するような歯車やカムなどに適している。米国では自動車1車当り100点以上が用いられてきたが、最近の新型車にはエンジン、トランスミッション関係だけでさらに79点が増加したという例がある¹⁾。これまでの鉄系焼結材発展の過程では、量産、コストの低下といった面に重点がおかれ、材質面は軽視される傾向があった。しかし今後、焼結材の用途が拡大し、普及するためには、信頼度の高い、特性の優れたものを製造する必要がある。本稿ではこのような観点から、鉄系焼結機械部品の特性を向上させるために考慮すべきいくつかの問題を取り上げる。

2. 焼 結 材 密 度

焼結材では密度が特性に大きい影響を与える。同一組成の鉄系焼結材については、その特性の変化は密度に対して示すのがもっともよく、密度が増加すると機械的性質は向上する。鉄系焼結機械部品は密度により、 6.2g/cm^3 以下の低密度部品、 $6.3\sim 6.7\text{g/cm}^3$ の中密度部品、 6.8g/cm^3 以上の高密度部品に分けるのがおおよそその規準で、密度 7.0g/cm^3 以上になると強さの増加はもちろんのこと、とくにじん性の増加が著しく、焼結材の欠点であるもろさが改善される。焼結材の密度を増加させるためにまず考えられるのは、再プレス、再焼結方式、すなわちプレス、焼結したものを再びプレスして焼結する方法である。表1²⁾は再プレス、再焼結方式による特性向上の一例である。この方式では工程が多くなり、コストの増加は免れないが、欧州ではこれによって特性の向上をはかっている例が比較的多い。米国では量産に重点がおかれているので、単一プレス方式による中密度品が主になっており、わが国でも大部分が中密度品である。しかし今後、鉄系焼結部品の適用分野が拡大するにつれて高密度品に移行するものと思われる。

焼結材密度を増加させる他の方法としては添加元素による方法、銅溶浸法が有効であり、これらについては項

表1 再プレス再焼結の効果

材 質	特 性	密 度 g/cm ³	引 張 強 さ kg/mm ²	伸 び %	衝 撃 値 kg/mm ²	か た さ HB 5/2.5
単一 プレス 法	Fe	6.65	14	9	1.6	44
	Fe-2%Cu	6.66	24	4	1.4	72
	Fe-2.5%Ni	6.91	23	14	4.4	66
再結 プレス 再焼	Fe	7.25	22	19	6.3	60
	Fe-2%Cu	7.22	33	9	3.9	95
	Fe-2.5%Ni	7.29	29	17	7.3	87

単一プレス法：プレス 6t/cm^2 、焼結 1200°C 2hr 水素中

再プレス再焼結法：プレス 6t/cm^2 、焼結 1050°C 0.5hr 水素中

再プレス 8t/cm^2 、再焼結 1200°C 2hr 水素中

表2 4%ニッケル-1%銅-1%黒鉛焼結鋼の特性

プレスおよび再プレス圧力	処 理	密 度 g/cm ³	引張強さ kg/mm ²	伸 び %	か た さ	寸法変化 %
5.6t/cm ²	プレス, 焼結	6.63	41	1.5	RB 76	+0.13
	プレス, 焼結, 熱処理	6.63	61	0.9	RC 24	+0.13
	プレス, 焼結, 再プレス, 再焼結	7.07	62	2.7	RB 90	+0.28
	プレス, 焼結, 再プレス, 再焼結, 熱処理	7.07	88	1.1	RC 37	+0.28
7.0t/cm ²	プレス, 焼結	6.75	44	2.0	RB 80	+0.16
	プレス, 焼結, 熱処理	6.75	65	0.9	RC 30	+0.16
	プレス, 焼結, 再プレス, 再焼結	7.18	69	3.3	RB 94	+0.43
	プレス, 焼結, 再プレス, 再焼結, 熱処理	7.18	97	1.4	RC 40	+0.43

焼 結：900°C 20min

再焼結：1120°C 30min

熱処理：815°C 30min, 油焼入れ, 230°C 30min 焼もどし

を改めて取り上げる。

なお、圧縮性のよい鉄粉の使用、焼結温度の上昇などによっても密度を大きくすることができる。最近、圧縮性のよい電解鉄粉が使用されるようになったのは前者の例である。後者の方法は、現在の工業的焼結炉では1200°Cが一応の限度である。

3. 添 加 元 素

鉄系焼結材に現在もっともよく添加されている元素は炭素と銅である。炭素は、焼結中に鉄粉中に拡散させるのが普通で、黒鉛1%の添加で、焼結材密度 6.8g/cm³以上のものでは引張強さ 30~50kg/mm² 程度のものが得られる。銅添加の場合も、これが焼結中に拡散して焼結材の強さを増加させる。なおこの場合は合金化によって焼結材が膨張するので、この現象を焼結材の寸法変化調節に利用している。銅は炭素と同時に添加することが多い。

炭素、銅はいずれも焼結材の強さを増加させるものであるが、焼結材をもろくする³⁾。じん性を大きくするためにはニッケルの添加が有効で、その効果は表1からもうかがうことができる。ニッケルは本来、鉄のじん性を向上させる元素であるが、焼結材への添加では、その焼結促進効果⁴⁾により焼結材密度が増加するため、一層じん性の改善に役立つ。従来もっともよく用いられていた5%銅-1%黒鉛系焼結材の銅をニッケルでおきかえた4%ニッケル-1%銅-1%黒鉛焼結材の特性値を表2⁵⁾に示す。5%銅-1%黒鉛系焼結材の伸びが0.5~1%であるのに比べると、ニッケルによりじん性が向

表3 2%ニッケル-0.5%モリブデン-0.3%マンガン-0.6%炭素焼結鋼の特性

プレス圧力 t/cm ²	密 度 g/cm ³	引張強さ kg/mm ²	伸 び %	かたさ RB	寸法変化 %
4.2	6.4	77	1	35	-0.4
5.6	6.6	88	↑	↑	-0.3
7.6	6.8	98	↓	↓	-0.2
8.4	6.9	107	3	40	-0.2

焼 結：1100°C 30min

熱処理：870°C 10~15min, 油焼入れ,
260°C 30min 焼もどし

上している。

マンガン、クロームなども普通の鋼では材質を向上させる有用な元素であるが、焼結材へ添加する場合は、いずれも雰囲気ガス中の微量の水分で酸化され、その合金化が阻止されるので、単体粉末として添加することは困難である⁶⁾。このような元素も鉄との合金粉末として添加すれば、その効果を期待することができる。18-8ステンレス焼結材は合金粉末を使用する例で、その特性値については焼結雰囲気⁷⁾の項で示す。表3⁷⁾はニッケル、モリブデン、マンガンを含む合金粉末を使用した焼結材の一例である。

4. 溶 浸 法

多孔度15~25%の鉄系焼結材を保護ガス中で加熱し、

表4 溶浸焼結材の特性

組成 %	C添加量 %	密度 g/cm ³	引張強さ kg/mm ²	伸び %	かたさ RB	溶浸材		
						Cu%	Fe%	Mn%
Fe 75, Cu 25	0	8.02	48	8.0	74	90	5	5
Fe 75, Cu 25	0.25	7.94	61	5.0	78	90	5	5
Fe 75, Cu 25	0.50	7.89	66	4.0	87	90	5	5
Fe 75, Cu 25	0.75	7.90	73	4.0	90	90	5	5
Fe 75, Cu 25	1.00	7.96	74	4.0	93	90	5	5
Fe 85, Cu 15	0	7.90	53	5.0	82	90	5	5
Fe 85, Cu 15	0.25	7.89	68	6.0	86	90	5	5
Fe 85, Cu 15	0.50	7.87	73	4.0	100	90	5	5
Fe 85, Cu 15	0.75	7.91	80	4.0	102	90	5	5
Fe 85, Cu 15	1.00	7.93	86	2.0	110	90	5	5
Fe 75, Cu 25	0	8.10	51	6.0	78	100	—	—
Fe 75, Cu 25	1.00	8.07	61	2.5	100	100	—	—
Fe 85, Cu 15	1.00	7.93	85	1.1	110	100	—	—

溶融した銅合金に接触させると、溶浸材の銅合金が毛細管現象で焼結材の内部に浸透し、溶浸焼結材が得られる。表4⁹⁾は銅90%、鉄5%、マンガン5%溶浸材を用いた溶浸焼結材の特性である。溶浸材に5%の鉄が添加されているのは、焼結材が溶浸材に溶解し、表面が腐食されるのを防ぐため、溶浸材に飽和量の鉄を加えたもので、マンガンの添加は溶浸処理後、表面に付着した残渣の除去を容易にし、また材質の強化にも役立っている。表4の溶浸焼結材は7.8g/cm³以上の高密度で、強じん性に富む。この種の材料の強さと伸びには溶浸時間の影響が大きく、溶浸時間が長くなれば、銅合金が多孔部を充填するだけでなく、鉄中へ拡散するので、強さは増加するが、伸びは減少する⁹⁾。溶浸焼結材は多孔度がほとんどないため、メッキなどの後処理も容易に行なうことが出来る。溶浸法は通常の焼結法に比べ、やや手数を要するが、特性の優れたものが得られるので、今後普及するものと思われる。

5. 焼結雰囲気

上記の諸例に見られるように、鉄系焼結材には炭素を添加したものが多く、炭素は通常、黒鉛として添加されている。焼結中には黒鉛の一部は鉄粉中に含まれる酸化鉄と反応して失われるので、所定の炭素量の焼結材を得るためには、余分に黒鉛を添加しておく必要がある。たとえば、炭素量0.6%の焼結材を得るためには、黒鉛1%を添加しておく¹⁰⁾。そして焼結雰囲気としては、焼結温度において、所定の炭素量と平衡する雰囲気ガスを使用しなければならない。雰囲気が適正でないと、脱炭などにより品質の低下、変動が起こる。雰囲気ガスとして

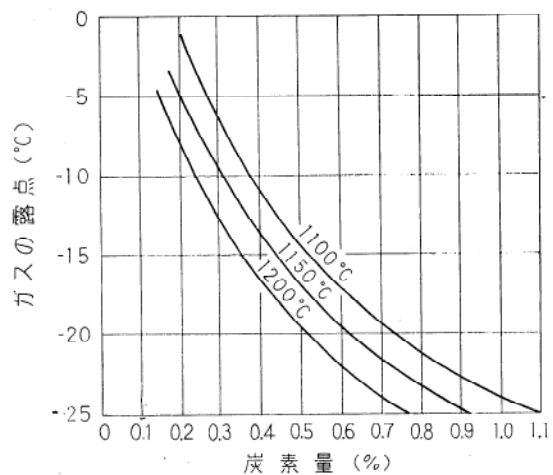


図1 プロパン変成ガスの露点と平衡炭素量

は露点を調節した吸熱型変成ガスの使用が望ましい。鉄系焼結材の焼結温度は普通の鋼材の熱処理温度より高く、また焼結材は多孔質で、雰囲気の影響を受け易いので、雰囲気の調整が重要である。

図1はプロパンを変成した吸熱型変成ガスについて、鉄系焼結材の焼結温度附近における、露点と平衡炭素量との関係を計算により求めた結果で¹¹⁾、実測値とよく一致している。このような関係を利用して、雰囲気を厳密に調整することにより、機械的性質の優れた焼結部品を得ることができる。

炭素を含み鉄系焼結材の焼結雰囲気としては分解アンモニアガスを用いてもよい。表5に示すように、ステンレス焼結材では真空焼結がよい結果を与えている。鉄系焼結材の真空焼結は今後検討すべき問題である。

表5 ステンレス焼結材の特性

焼結雰囲気	分解アンモニア	真 空			
	1260	1150	1200	1260	
焼結温度 °C					
密度 g/cm ³	6.54	6.35	6.85	6.94	
引張強さ kg/mm ²	39	25	34	44	
伸び %	7.3	5.9	6.9	11.5	
かたさ RB	68	39	60	64	

粉末の組成：0.3C, 1.08Si, 0.23Mn, 0.014S, 0.013P, 16.78Cr, 13.42Ni, 2.30Mo

プレス：5.6t/cm²

焼結：分解アンモニアガス（露点-35°C）中で30min

真空（10⁻⁴mmHg）中で1hr, ただし1000°Cで30min 予熱, 窒素中で冷却

6. 熱 処 理

鉄系焼結材においても、通常の鋼の場合と同じく、熱処理によって機械的性質が改善されることは当然で、前掲の表2, 3にもその効果が示されている。焼結材の熱処理では、焼入れ冷却剤として水溶液を用いると、冷却剤が多孔部に浸入して、品質を低下させるおそれがあるので、油焼入れが望ましい。また加熱時の雰囲気は鋼材の熱処理の場合より厳密に調整する必要がある。鉄系焼結材には銅を含むものが多く、この種のもは析出硬化性があるので、炭素と銅を含む材質の熱処理では、炭素による焼入れ、焼もどし効果と銅による析出硬化の両者によって機械的性質が改善される。銅を含む材質に対する熱処理の一例として、表4の溶浸焼結材熱処理の結果を表6⁹⁾に示す。

焼結部品に浸炭を施して、焼入れ、耐磨耗性を向上させたものは用途が広い。浸炭方法としてはガス浸炭が標準的な方法となりつつある。焼結材の浸炭で問題となるのは、通常の鋼に比べて浸炭速度が大きいことである。

表6 熱処理した溶浸焼結材の特性

組 成 %	C添加量 %	密 度 g/cm ³	引張強さ kg/mm ²	伸 び %	か た さ RB	熱 処 理
Fe 75, Cu 25	0	7.95	42	18	71	# 1
Fe 75, Cu 25	0	7.97	88	5.0	106	# 2
Fe 75, Cu 25	0	8.01	41	25	70	# 3
Fe 75, Cu 25	1.0	7.98	112	3.2	108	# 4
Fe 75, Cu 25	1.0	7.96	114	3.0	110	# 5
Fe 75, Cu 25	1.0	7.94	108	3.1	109	# 6
Fe 75, Cu 25	1.0	7.97	98	4.0	106	# 7
Fe 75, Cu 25	1.0	7.95	52	10	80	# 8
Fe 85, Cu 15	1.0	7.90	132	1.5	116	# 9
Fe 85, Cu 15	1.0	7.93	132	2.2	115	# 10
Fe 85, Cu 15	1.0	7.96	128	3.0	112	# 11
Fe 85, Cu 15	1.0	7.89	117	4.0	109	# 12
Fe 85, Cu 15	1.0	7.89	62	11	90	# 8

熱処理 # 1：980°C焼ならし—500°C(4hr)
 # 2：980°C焼ならし—900°C水焼入れ
 # 3：980°C焼ならし—500°C(2hr), 700°C(2hr)
 # 4：980°C焼ならし—850°C水焼入れ
 # 5：980°C焼ならし—850°C水焼入れ, 200°C焼もどし
 # 6：980°C焼ならし—850°C水焼入れ, 320°C焼もどし
 # 7：980°C焼ならし—850°C水焼入れ, 500°C焼もどし
 # 8：980°C焼ならし—650°C(18hr)
 # 9：980°C焼ならし—790°C水焼入れ
 #10：980°C焼ならし—790°C水焼入れ, 200°C焼もどし
 #11：980°C焼ならし—790°C水焼入れ, 320°C焼もどし
 #12：980°C焼ならし—790°C水焼入れ, 600°C焼もどし

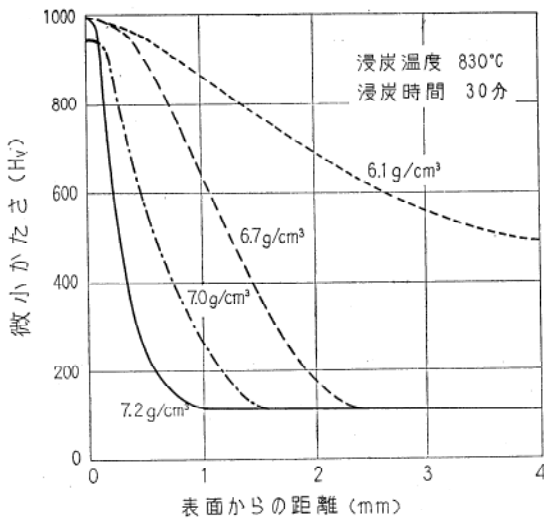


図2 密度の異なる鉄焼結材へのガス浸炭

図2¹³⁾は密度の異なる鉄焼結材に対する浸炭速度を比較した結果で、低密度のものは短時間で内部まで浸炭している。中密度部品に浸炭、焼入れをしたものは、かなり内部まで浸炭し、じん性は乏しいが、耐摩耗性が優れているので、軽荷重の各種機械部品として広く利用されている。この種のもの多孔隙部に浸油すれば耐摩耗性がさらによくなる。高密度部品では、内部への浸炭が抑制され、じん性を有し、また浸炭による寸法変化も少ないので、最近ではこの種のもの要求される傾向にある¹⁴⁾。

鉄に3%程度のニッケルを添加した焼結材は浸炭、焼入れに適している。すでに述べたように、ニッケルの添加は焼結材密度とじん性を増加させ、また油焼入れで表面に十分な硬化層が得られるからである。ただし、鉄中へのニッケルの拡散速度が小さいので、微細なニッケル粉を使用し、焼結温度を高く、焼結時間を長くするなどの方法によってニッケルの拡散を促進しないと、ニッケルの効果を期待することはできない¹⁵⁾。

7. 後処理

焼結部品に適切な後処理を施すと耐食性、耐摩耗性がよくなる。焼結材の電気メッキでは、メッキ液が焼結材の内部に浸入し、腐食の原因となる。この障害は、密度7.1~7.2g/cm³以上の高密度材あるいは溶浸焼結材のように、外部とつながっている孔がほとんどないものでは起こらない。メッキ液浸入のおそれのあるものでは、メッキの前にシリコン樹脂などの含浸による封孔処理を行っている¹⁶⁾。

後処理のうちでは、水蒸気処理が有用な方法である¹⁷⁾。焼結部品を500~600°Cの水蒸気で処理すると、表面部および外部とつながっている多孔隙組織の内面に、主としてFe₃O₄からなる密着性の皮膜が形成され、耐食性

表7 焼結鉄歯車の水蒸気処理によるかたさと強さの増加

部 分	処 理 前	処 理 後	増加率 %
	かたさ RB		
歯	53	76	43
ハブ	40	89.5	112
	圧縮破断荷重 kg		
歯	2620	3295	26

がよくなる。この酸化皮膜は油を保持する性質があるので、浸油して使用すれば、耐食性は一層よくなる。表7¹⁸⁾は焼結鉄歯車の水蒸気処理によるかたさと圧縮強さ増加の一例である。表面部の酸化皮膜は耐摩耗性を与え、しかも酸化皮膜は焼結材の内部で網状につながっているので、表面部が磨耗しても耐摩耗性が失われない。水蒸気処理は封孔処理としても有効な方法で、メッキの前処理として行なうと、ニッケル、クロムなどのメッキを支障なく行なうことができる¹⁹⁾。水蒸気処理は上記のような利点をもっているが、この処理によってじん性が減少することが報告²⁰⁾されているので、この点を考慮する必要がある。

その他、シェラダイジング、カロライジングなど、鋼材に対して行なわれている各種の防食処理を焼結部品に適用する試みがなされているが、まだ一般に実用されていない。

8. むすび

以上述べた事項はいずれも材質に関係したもので、現在行なわれている製造法について重要な問題点を選び、最近の傾向、今後の研究課題などに触れた。

まえがきにも述べたように、鉄系焼結機械部品は歴史が新しく、なお大きい発展過程にあるため、材質面に限っても、基礎的研究と工夫により急速な進歩が予想される。これまでの鉄系焼結機械部品は鋳鍛造部品に代わるようなものを粉末冶金的手法でつくことに重点がおかれてきたのであるが、これからは粉末冶金以外の方法ではつくれないような新しい材質の開発が望ましい。また成形法についても、粉末冶金の他の分野ではすでにhydrostatic pressing, powder rolling, slip castingなどの新しい成形法が成果をあげているが、これらは鉄系焼結機械部品の成形には適していないので、とくに、精度の良い高密度部品を能率よく成形し得るような方法の出現が期待される。

(以下17頁へ)