受賞記念講演：平成 28 年度技術進歩賞

ディーゼル燃料噴射インジェクタ用焼結接合アーマチャの開発

檜垣 有治*, 濱松 宏武

(株) デンソー, 〒 448-8661 刈谷市昭和町 1-1

Development of Armature for Diesel Fuel Injector by Sinter Diffusion Bonding Method

Yuji HIGAKI* and Hirotake HAMAMATSU

DENSO CORPORATION, 1-1 Showa-cho, Kariya 448-8661, Japan.

Received February 19, 2018; Revised March 25, 2018; Accepted April 16, 2018

ABSTRACT

The new armature produced in a simplified process have been developed. It has made a great contribution to high-speed and high-precision fuel injection, and have been installed as a solenoid valve part in diesel fuel injector for the 4th Generation Common Rail System. The manufacturing process was designed from the earlier stages of product design, what is called “Design-in”. The development concept is to make maximal use of sintering process feature.

KEY WORDS

armature, Design-in, insert compaction, sinter diffusion bonding, sinter hardening

1 緒 言

ディーゼル分野では、排ガス規制の強化による粒子状物質 (PM), NO_x の抑制, 燃費向上による CO_2 排出量の低減などの課題に対して, より一層の革新製品の開発が必要である。こうした中, デンソーでは, 環境負荷低減に大きく貢献できる第 4 世代コモンレールシステムを開発した。第 4 世代コモンレールシステムのエンジン性能を第 3 世代と比較すると, PM 排出量は約 50% 低減し, 燃料消費量については約 3% の燃費低減が可能となる¹⁾。

本システムの主要コンポーネントであるインジェクタにおいては, ① 10 万分の 1 秒の高精度で噴射を制御, ② 2500 気圧という超高压での燃料噴射, などの世界初の技術を融合している。インジェクタの構造を Fig. 1 に示す。第 4 世代のインジェクタは噴射の高速・高精度化, 超高压噴射を実現するため, インジェクタのボディに電磁弁を内蔵する構成であり, 電磁弁の小型化が必要であった。

本開発の対象とするアーマチャは, 電磁弁の可動子であり, 燃料を高速・高精度に噴射するためのキー部品である。本稿では, 第 4 世代インジェクタに内蔵される小型・高性能アーマチャ用に開発されたシンプルな製造工程とそれによって実現される製品特性を紹介する。

2 開発目標

電磁弁の構造と役割を Fig. 2 に示す。高速・高精度の燃料噴射には, アーマチャの高速応答化が求められ, 吸引力の向上がポイントとなる。これはステータコア/アーマチャで形成される磁気回路の特性により決まる。第 3 世代のアーマ

Fig. 1 Structure of injector.

* Corresponding author, E-mail: yuji_higaki@denso.co.jp

Fig. 2 Structure and function of solenoid valve.

Fig. 3 Significant characteristics of armature.

Table 1 Development target.

Item	Target (Comparison to 3rd Generation)
① Magnetic flux density	+2%
② Bonding strength	+10%
③ Hardness	Equivalent
④ Diameter	-50%

チャでは磁気特性が必要な部位に軟磁性材（焼結材）を，耐摩耗性が必要となる摺動部のシャフトには耐摩耗材（溶製材）を使用し，磁性材の焼結時に接合する複合機能アーマ

チャを適用している²⁾。

アーマチャにおける主要特性（Fig. 3）の開発目標を Table 1 に示す。大幅な小型化（直径：従来比約 50% 減）に伴い，軟磁性材料の磁束密度の向上に加え，焼結部とシャフトの接合強度の向上などが必要であった。

Fig. 4 (a) に第 3 世代アーマチャの製造工程を示す。粉末成形，シャフト組付け後，焼結時にシャフトとの接触面での相互拡散により接合させる。粗加工の後，硬化処理，更に仕上げ加工を実施しアーマチャとなる。アーマチャは 2 部品を一体化した複合機能を持つ製品であるため，一般の焼結工程に対し工程が多くなっている。

そこで，第 4 世代アーマチャでは，第 3 世代のキー技術である焼結拡散接合を活かすと共に，競争力強化のため，第 3 世代に比べ大幅にシンプルにした工程を確立することを目指した。

3 開発技術の要点と製品特性

第 4 世代アーマチャの製造工程は Fig. 4 に示すように第 3 世代に比べ大幅なシンプル化を実現した。その実現のため，本開発では製品設計の初期段階から作り易さを考慮した開発（以降，デザインインと表記）を行った。着眼点は，除去加工工程の削減および焼結接合工程と焼入れ工程の統合である。

3.1 除去加工工程の削減

除去加工工程を削減するため，成形工程でのニアネットシェイプ化を目指した。成形工程で作り込むという視点でアーマチャ形状を最適化し，合わせてそれを実現する工法を開発した。

(1) アーマチャ形状の設計最適化

アーマチャには高い応答速度が求められ，そのためには吸引力の向上と流体抵抗の低減が必要である（Fig. 2）。吸引力

Fig. 4 Manufacturing process of 4th Generation armature.

Fig. 5 Example of "Design-in".

Fig. 6 Armature external view.

Fig. 7 Insert compaction.

の向上には磁極面（アーマチャの上端面）の面積を大きくすることが有効である。一方、流体抵抗の減少には磁極面の面積を小さくすることが有効であり、形状面ではトレードオフの関係にある。そこで磁極面の形状設計には、流れ解析、磁場解析³⁾などを用いて設計を行った。Fig. 5にデザインインの一例を示す。孔の径については、必要性能である応答速度が最大値となる径を選定するのではなく、設計許容値を満足すると共にニアネットシェイプ成形が可能となる範囲で選定している。他の寸法に対しても同様な考え方を踏襲し、その結果、性能と成形性を両立した最適形状にすることができた。その外観写真をFig. 6に示す。

(2) ニアネットシェイプ化のための工法開発

ニアネットシェイプ化のため開発した技術がFig. 7に示すシャフト一体成形である。

従来工法はリング状に成形した後シャフトを組付けている²⁾が、シャフト一体成形では、シャフトを予め金型内に入れた後、粉末成形をすることでシャフト組付けと粉末成形を同時に行っている。その結果、シャフト組付け工程の省略が可能

Fig. 8 Relationship between perpendicularity and amount of processing.

となった。

また、シャフト一体成形により粗加工も廃止した。Fig. 8に直角度と加工量の関係を模式図で示す。直角度の精度向上により、完成品にするための加工量が低減できる。シャフト一体成形における成形体/シャフトの直角度は金型精度等で決めることのできるため、従来の組付け方法に比べ約65%の精度向上を実現した。その結果、粗加工が廃止でき、仕上げ加工のみで完成品にすることを可能とした。

なお、シャフト一体成形の適用により、必要特性である接合強度の向上も実現した。第3世代アーマチャでは成形体とシャフトを所定のクリアランスで組付ける²⁾が、第4世代アーマチャではシャフト一体成形を適用することで成形体/シャフト間のクリアランスをゼロとし、焼結拡散接合時の接触面積が増加することで、接合強度の目標値（第3世代比+10%）を十分に満足できるレベルとなった。

3.2 焼結接合工程と焼入れ工程の統合

焼結接合と焼入れを統合する焼結接合同时焼入れを実現するため、接合時の元素拡散の方向を制御した。Fig. 9にアーマチャの接合面付近の断面組織を示す。拡散方向の制御有無で比較しており、拡散層は破線で示している。アーマチャのシャフト上面はステータに接触するため耐摩耗性が必要である。第4世代アーマチャはニアネットシェイプ化のためシャフト上面の加工量を大幅に減らすことから、シャフト上面に低硬度の拡散層が伸展しないよう制御する必要があった。

拡散層はシャフト表層を優先的に伸展しており、その拡散層においてはC量の減少およびSi量の増加が見られた。また、脱脂ガスにはCO₂、H₂Oなどの脱炭性ガスが確認された。

上記結果を基に、表層に沿った拡散層の伸展メカニズムを考察する。Fig. 10にシャフト材であるSKH51と成分系が同じであるFe-W-Cr-Mo-C系状態図²⁾を示す。まず、脱脂ガスに含まれる脱炭性ガスによりシャフト表層が脱炭し、C量が減少した可能性を考えた。状態図を見ると、SKH51は焼結温度である1200℃付近ではγ相であるが、C量の減少によりα相となる。α相の拡散速度はγ相に対し大きくなるため²⁾、シャフト表層は局所的に拡散速度が増加する。拡散速度が上がった表層部には、焼結体に添加しているSiが流入する。Siの増加もC量の減少と同様に結晶構造をγ相からα相に変えるため、α相化が促進する。つまり、C量減少とSi量増加の相乗効果によりシャフト表層の拡散速度が局所的に増大し、拡散層が表面を優先的に伸展したと考えた。

検証のため、脱脂ガスを積極的に排気し、脱炭を抑制する

Fig. 9 Sectional microstructure around bonding area.

Fig. 10 Phase diagram of Fe-W-Cr-Mo-C.

雰囲気管理した結果が Fig. 9 (a) であり、表面拡散が大きく低減した。

更に、ロバスト性向上のため、接合面と接触面の距離を必要機能を満足できる範囲で最大にしている。上記の雰囲気管理、形状設計により拡散層伸展を制御し、接触面の硬さを確保した。

4 結 言

製品設計の初期段階から焼結の特長を活かせる成形および焼結拡散接合を検討した結果、シンプルにした工程で小型・高性能アーマチャを実現した。

- (1) アーマチャ形状の設計最適化およびそれを作り込めるシャフト一体成形の開発により、シャフト組付け工程を省略すると共に粗加工を削減した。なお、シャフト一体成形の適用により、成形体/シャフト間のクリアランスがゼロとなり、接合強度の向上も達成した。
- (2) 焼結接合時の元素拡散の方向を制御することで、焼結接合同時焼入れを可能とし、シャフト硬さを確保すると共に加熱工程の統合を実現した。
- (3) 本製品は燃料を高速・高精度に噴射するためのキー部品として第4世代コモンレールシステムに搭載され、2013年より量産中である。

文 献

- 1) K. Suzuki, S. Matsumoto, Y. Utsumi, S. Miyagawa: Proceedings of 2013 JSAE Annual Congress (Spring), (2013) 1-4.
- 2) H. Hamamatsu, T. Akao, M. Ueki, J. Shima, A. Hamano, C. Ishihara: Proceedings of 2010 JSAE Annual Congress (Spring), (2010) 17-20.
- 3) Y. Higaki, K. Morita, K. Suzuki, K. Yamada: Abstracts of Autumn Meeting JSPM, (2014) 22.
- 4) Y. Higaki, H. Hamamatsu: Abstracts of Autumn Meeting JSPM, (2017) 29.