

溶射による発熱皮膜を適用した マグネシウム用深絞り金型の開発

佐藤 丈士*

1. はじめに

マグネシウムは密度 1.74g/cm^3 と実用金属中で最も軽く、その他にも比強度、比耐力、振動吸収性、放熱性、リサイクル性等に優れた材料である。資源としては、地殻表層部における存在比質量が 1.93 mass\% で、地殻構成クラーク数は8番目となり豊富に存在する。

そのため、地球環境保全に対する輸送用機械の軽量化、高齢化社会への移行に関する福祉・介護機器の高機能化に使用できる材料の一つとして、最近特に注目されている。

マグネシウム合金の圧延材では、(0001)面が圧延面に対して平行に配向する特徴がある¹⁾。しかも室温から 523K までは(0001)面滑りが活動しやすいため、板厚方向のひずみは期待できず、常温での成形性が悪くなっている。しかし、 523K 以上では他の滑り面が活動するため、成形性は良好となる。よって、本報文中で取り上げる板材の塑性加工法については、温間成形に関する研究が種々行われている^{2~4)}。

温間深絞り成形においては、被成形材の加熱源として、金型の内部に発熱体を配置する方式が一般的である。しかしこの方法には、次のような2つの解決すべき課題が存在する。①金型の内部に発熱体を組込むため、金型の構造が複雑となる。②金型の内部から加熱するため、成形可能温度まで昇温するのに長時間を要する。

これら課題の根本原因は、発熱体の熱がまず金型に伝わり、その昇温を介して間接的に被成形材を加熱することにある。従って、これら課題を解決する一つの方法は、金型表面に発熱体を配置し、被成形材を直接加熱できる方式を開発することである。

ここでは、表面被覆加工法の一つである溶射法により金型表面に皮膜を形成し、通電によるこの皮膜のジュール発熱を利用して、マグネシウム合金板を直接加熱し深絞り成形を行う塑性成形法の開発を念頭に研究を行った。

2. 実験方法

2-1 金型の構造

マグネシウム合金の圧延材では、(0001)面//圧延面の特徴があり、しかも 523K まではこの(0001)面が滑りやすい。このことは図1に示す深絞り成形では、フランジ部での一軸圧縮変形が起りにくいことを意味し、室温で深絞り成形ができない最大の原因となっている。

従って、フランジ部での一軸圧縮変形を起こすことができれば絞り成形を達成できると考え、金型における発熱皮膜の配置はフランジ部分のみとした。この皮膜の配置は、曲面形状で成膜や後加工のしにくいダイス肩部への溶射を回避して金型構造を単純化できる利点も考慮している。

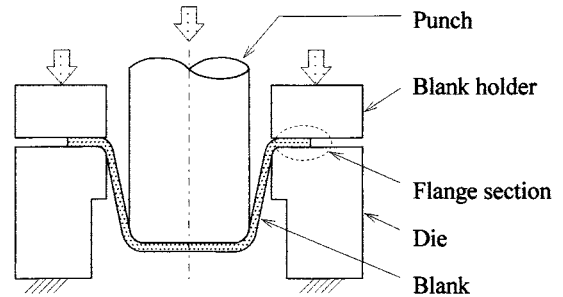


図1 深絞り成形

フランジ部表面に施した皮膜には発熱のため通電するので、この皮膜と金型本体は電氣的に絶縁されていなければならない。この対処方法には発熱皮膜の下に電気絶縁性皮膜を成膜し多層構造とすること、及び皮膜を施す金型本体の周辺部分を分離構造としこの部分を電気絶縁性の材料で作製することの2つを考えた。後者の方法は、溶射におけるハンドリングのしやすさにも考慮している。

金型の構造をダイス側を例に図2に示す。ダイスは溶射リングとベースダイスの2つからなる。前者は溶射を施し発熱体となる部分で、後者はダイス肩部を持つ金型本体である。これら2つは、まず溶射リングをベースダイスのフランジ部にはめ合わせ、そしてこのベースダイスをプレス機に取り付ける構造となっている。しわ押さえの構造も全く同じである。

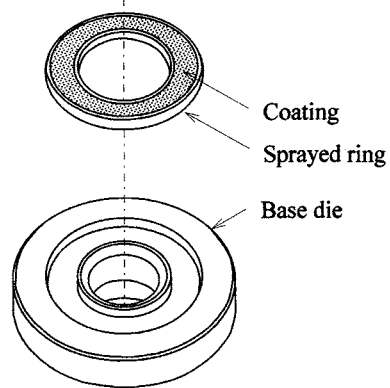


図2 金型の構造(例:ダイス)

2-2 溶射リング

溶射リングの材質は、セラミックとS45Cの2種類を試した。前者は機械加工の可能な種類で、その利点は電気絶縁性をリング自体で確保できることである。この場合、発熱皮膜の構造を簡単にすることができる。しかし、溶射中は、成膜部の

局所昇温が避けられず、割れ等の発生が心配される。S45Cでは溶射は問題なく行うことができるが、絶縁用の皮膜が必要になり、発熱皮膜の構造が複雑となる。

溶射リングの外観を図3に示す。図中に示した幅1mmの溝は、リングの一方所で皮膜を半径方向に削り取り、皮膜を電氣的に分断したものである。この溝の両側に電極を配置することにより、皮膜への電流の流れが一方となるようにした。なお、以下に示す発熱皮膜の電気特性は、常にこの電極間で測定したものである。

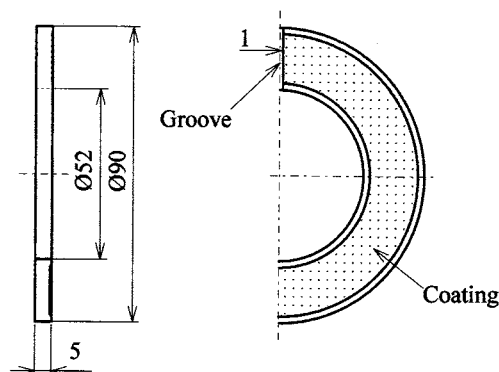


図3 溶射リング

2・3 皮膜の構造

図4に溶射リングに作製した発熱皮膜の断面構造を示す。これは溶射リングの材質にS45Cを使用した場合の断面である。溶射を順次行うことにより、3種類の材料を積み重ねた構造になっている。図中には各層の厚さも表示した。

母材から表面へ向かって、一層目が結合層、2層目が絶縁層、3層目すなわち表面層が発熱層となっている。結合層にはNi-Al複合体を、また絶縁層にはセラミックの Al_2O_3 を使用した。結合層は、母材の金属と2層目のセラミック層の間に介在して、両者の結合を強固にする目的を持つ。また、絶縁層は発熱層を電氣的に絶縁するためのものである。なお、溶射リングの材質にはセラミックを用いることも検討した。この場合には、少なくとも絶縁層は省略することができる。

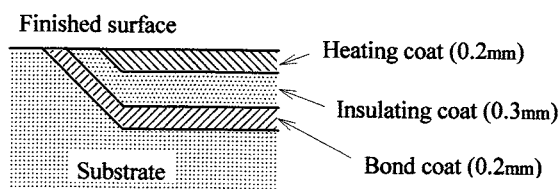


図4 発熱皮膜の断面構造

2・4 発熱用溶射材料

溶射皮膜は気孔を含む多孔質材で、発熱特性は溶射皮膜にした後でなければ判明しない。ここでは、発熱層に用いる溶射材料として、一般的に発熱材料といわれる金属材料

の組成を参考にした。そして、市販の溶射材料の中からこれに近い組成を有する粉末を4種類選択した。使用した4種類の溶射材料の主要な組成と粒径を表1に示す。

溶射方法はここで行った全ての成膜に対し、プラズマ溶射法を採用した。溶射条件にはメーカ推奨の標準条件を用いた。溶射後発熱層の表面は、研削とラッピングにより仕上げ加工を行った。その表面粗さはNi-Cr鋼皮膜の場合、Raの平均値で $0.325\mu m$ であった。

表1 溶射材料の特性

溶射材料	主要組成 [weight%]	粒径[μm]
Ni-Cr alloy	Ni80,Cr20	45 - 106
Mo	Mo99,etc	30 - 75
WC	W83,C4,Co12,etc	5 - 45
Ni-Cr steel	Cr17,Ni12,Fe67,etc	140 - 325

3. 結果と考察

3・1 溶射加工

溶射リングの材質にセラミックを用いる場合は、絶縁層を省略できるので発熱層を直接溶射できる。ここではまず初めに、セラミック製溶射リングへNi-Cr合金粉末の溶射を試みた。溶射の通常手順に従って、溶射リングにプラスト処理を行い、その次に溶射を行った。しかしこの場合、溶射中に皮膜の剥離が発生した。皮膜剥離の様子を図5に示す。また、まれに溶射の余熱時にリング自体が割れることがあった。表面余熱温度が $490K$ になった時に割れたリングの様子を図6に示す。

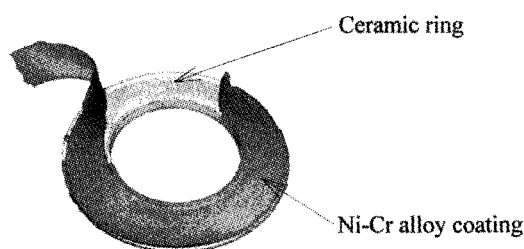


図5 発熱体作製時の溶射における剥離

剥離防止策として、リングと皮膜の間にセラミックの Al_2O_3 粉末を溶射することも試した。この場合、 Al_2O_3 の成膜は正常に完了する。しかし、この上にNi-Cr合金を溶射する時に、溶射リングと Al_2O_3 皮膜の間で剥離が発生した。この原因はセラミック表面への溶射皮膜の密着性が弱いことと、Ni-Cr合金皮膜の圧縮残留応力が高いことによると考えられる。他の溶射材料を用いることにより、このような剥離は回避できる可能性がある。しかしセラミック製リングは、溶射前の予熱の時に割れやすく、溶射リングとして完成するまでの歩留まりはかなり悪いと考えられる。従って、溶射リングの材質にセラミックを採用することは不適切と判断し、S45Cを採用した。

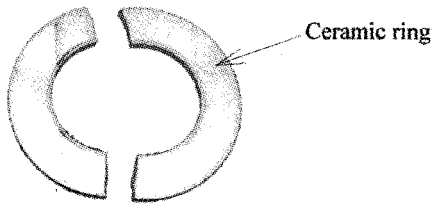


図6 溶射余熱時のセラミックリングの割れ

3・2 皮膜の電気特性

マグネシウム合金の塑性加工には経験的に少なくとも473Kの温間成形が必要である。今回作製した皮膜からの発熱により、皮膜表面でこの温度を達成できるかどうか第一の課題である。ここではまず、溶射リングをベースダイスにはめ合わせない状態で、その電気的特性を調査した。図7はNi-Cr合金、Mo、WC、Ni-Cr鋼の4種類の皮膜の電圧-電流線図である。

4種類の皮膜はいずれも、印加電圧3Vの範囲内では電圧と電流が比例関係にある。直線のY軸に対する傾きから、電気抵抗はNi-Cr鋼が最も大きく、Ni-Cr合金、WC、Moの順に小さくなるのがわかる。Ni-Cr合金、WC、Moの3種類の皮膜は、図から明らかなように低電圧で大電流が流れる特性を持っている。これらの皮膜は、ここで印加した電圧の範囲でも皮膜の表面温度は数十度にはなるので、さらに電圧を加え数十アンペアの電流を流すことができれば473Kを達成することは不可能ではないと考えられる。しかし、このような大電流は、スライダックではもちろん通常は供給不可能である。従ってこれら3種類の皮膜は、表面の温度が327K以下の用途には使用できるが、マグネシウム合金の成形に必要な温度を得るのは困難であることがわかる。

これらと比較してNi-Cr鋼は電気抵抗が大きく、図7のスケールではその特性はほとんどX軸と重なってしまう。従ってこの皮膜について、より広範囲の電圧に対する特性を別図として作製し図8に示す。

電圧と電流は90Vまではほぼ直線関係を示すが、それ以

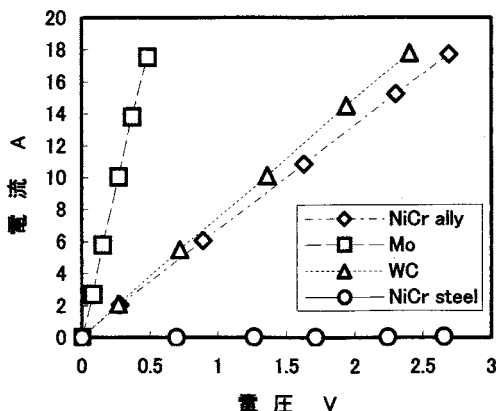


図7 4種類の発熱用皮膜の電圧-電流特性

降電圧が増加するにつれて、電流は急激に増加する。この原因は、これら電気特性の測定を、溶射リングをベースダイスにはめ合わせないリング単体の状態で行っていることにあると考えられる。このような状態では、特に印加電圧が大きい領域で発熱量が多くなって皮膜の温度が急上昇し、電気的特性に大きな変化を与えていると考えられる。この点に関しては、後で詳細に述べる。

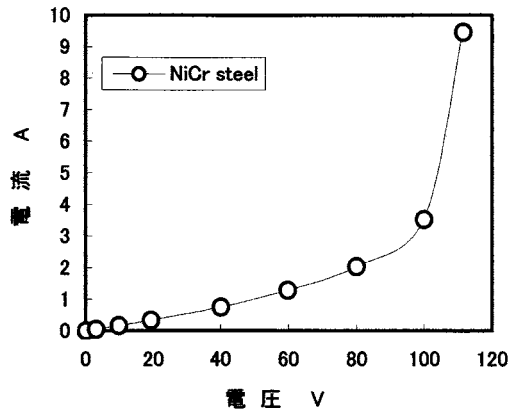


図8 Ni-Cr鋼皮膜の電圧-電流特性(非装着時)

Ni-Cr鋼皮膜の電圧-抵抗線図を図9に示す。端子間の抵抗は、電圧が零の状態では60Ωであるが、電圧の上昇に伴って抵抗は2次曲線に沿って減少していくことがわかる。一般に金属材料の電気抵抗は、電圧の増加と共に増える傾向がある。この皮膜は金属とはいえ、その組織は溶射皮膜の特徴である多孔質となっており、また大気中で溶射を行っているため溶射材料の酸化等の組成変化も起こっている。これらのことが皮膜の電気抵抗特性に何らかの影響を及ぼしていると考えられる。

ここで述べた4種類の皮膜の中では、マグネシウム合金の成形に必要な473K以上の温度を発生できる発熱皮膜は、Ni-Cr鋼皮膜しかないことがわかった。従ってこれ以降は、この皮膜の特性をさらに調査することにし、その温度特性等について述べる。

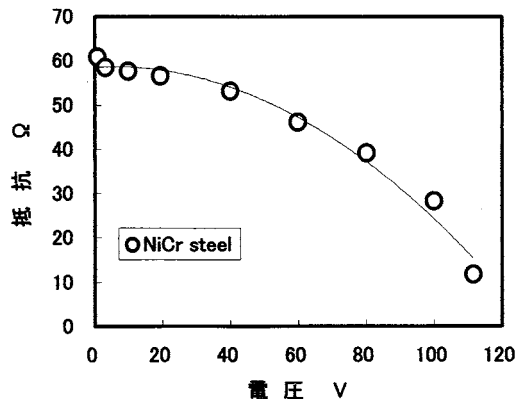


図9 Ni-Cr鋼皮膜の電圧-抵抗特性

3・3 皮膜の温度特性

Ni-Cr 鋼を溶射したリングをベースダイスに装着し、電圧を印加して経過時間と皮膜表面温度の関係を調査した。結果を印加電圧が 100V と 120V の場合について図10に示す。

電圧と電流が一定の場合、原理的には皮膜の表面温度は時間に比例して増加していく。しかし、実際の溶射リングでは、リング自体はもちろんのこと、ベースダイスも熱容量を持っているので、発生した熱はリングそしてダイスへとどんどん拡散していく。この結果、皮膜表面の温度上昇は、時間の経過と共に緩慢となってくる。印加電圧 100V の場合、通電開始後 40 秒で皮膜表面は 380K となるが、これより以前の段階から時間に対する温度上昇は低く、最終的に成形に必要な温度に達することは困難と考えられる。一方、印加電圧を 120V に上げると、皮膜表面温度は通電開始後 40 秒で 473K に達することがわかる。これは通電後 1 分以内にマグネシウム合金の成形が可能となる温度が得られることを示しており、溶射皮膜を発熱体としたマグネシウム合金用の深絞り金型が、少なくとも到達温度の観点では可能であることを実証することができた。

図10中に示した2本の曲線は、印加電圧 100V で 4.1A、また 120V で 5.5A が流れることを示しているが、この印加電圧と流れる電流の関係は、図8に示した皮膜の電気特性とは合っていない。この原因は、溶射リングをベースダイスにはめ合わせるか否かの違いによる熱容量の差で、皮膜の温度が異なり、電気特性に影響を及ぼしているためと考えられる。すなわち、図8のような溶射リング単体では、皮膜は過度に加熱され、皮膜の電気抵抗は小さくなり、電流が流れやすくなると考えられる。

図11に溶射リングをベースダイスに装着した状態における Ni-Cr 鋼皮膜の電気特性を示す。このデータは、実際に発熱金型を使用する状態における発熱皮膜の電気特性を表す重要性の高いものである。図8と図11を比較すると、100V 以下の電圧対電流の関係はほぼ同じである。しかし図11では、図8にあった 100V から 120V 間の急激な増加は無く、全体として 70V 付近に接点を持つ2直線に近い特

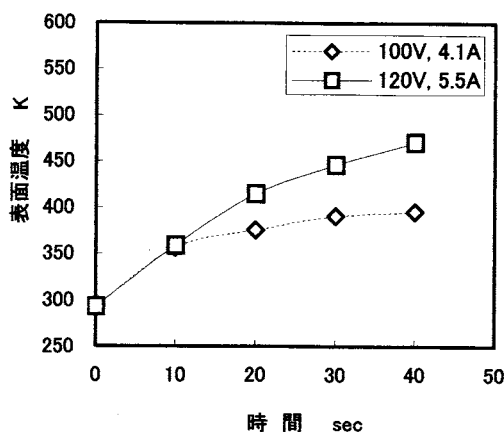


図10 Ni-Cr 鋼皮膜の時間-温度特性

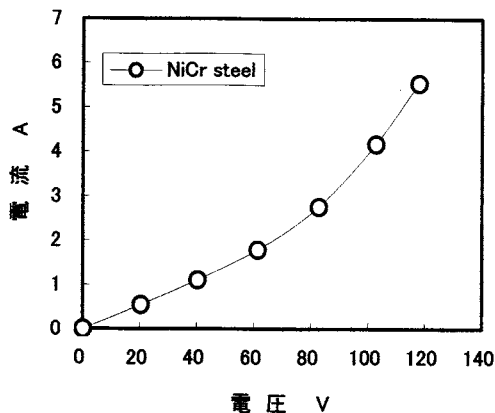


図11 Ni-Cr 鋼皮膜の電圧-電流特性(装着時)

性となっていることがわかる。

3・4 発熱皮膜適用深絞り金型

実際に作製した溶射リング発熱体を図12に示す。各リングの下方に見える2本の線は、直径 1mm の銅線を利用した電極である。電極に配線をつなげ、リングをベースダイスを介してプレス機に設置した状態を図13に示す。この状態で、図10に示した特性と同様に成形に必要な温度まで達することを確認できた。

4. まとめ

マグネシウム合金板の深絞りを使用できる発熱皮膜金型を開発できた。しかし、常用法とするには次の2点について改良が必要である。

1. 厚さ 0.2mm の発熱皮膜に電力を供給する電極の構造を工夫する必要がある。電極がリングとベースダイスの電気絶縁性の確保を妨げない構造であること、熱サイクルに耐える構造であることが課題となる。
2. 発熱皮膜に接触するプランクから、パンチやダイス肩部を通じてプレス本体へ流れる漏洩電流の防止策を工夫する必要がある。これはパンチとベースダイスをセラミック製にすることにより、あるいは金型表面をテフロン等で被覆することにより防止できると考えられる。しかし、前者ではコスト低減が、後者ではこれに併せて耐久性の確保が課題となる。

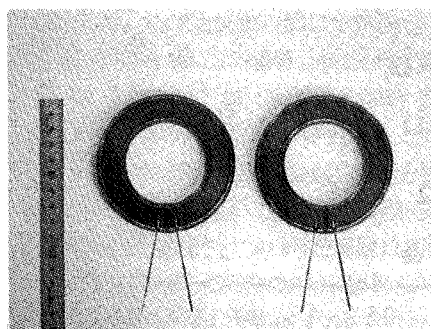


図12 溶射リング発熱体

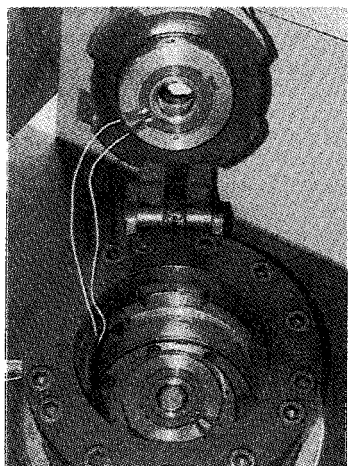


図13 プレス機に取り付けた金型

5. 謝辞

本研究に助成をして頂きました天田金属加工機械技術振興財団に対し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)村上雄:軽金属, 52-11 (2002), 536.
- 2)馬淵守・中村守・朝比奈正:塑性と加工, 41-471 (2000), 3.
- 3)大上哲郎・関口昭一・菊池正夫・伊藤叡:塑性と加工, 42-482 (2001), 246.
- 4)宅田祐彦・井上大輔:塑性と加工, 43-503 (2002), 55.
- 5)松本良・小坂井宏造:塑性加工春期講演会論文集, (2003), 69.