

エキゾーストマニフォールド用 フェライト系ステンレス鋼の成形性

Formability of the Ferritic Stainless Steel for Exhaust Manifold

尾崎 芳宏 OZAKI Yoshihiro JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼研究 R 珉力 兪 (課長)
維賽 雨 (雨)IGUCHI Takaaki JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼研究 R 珉力 兪 (副 R 珉 岨)
烏 商 UJIRO Takumi JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼研究 R 珉 二 巳

要旨

自動車の排気温度の高温化により、排気系部品の素材であるフェライト系ステンレス鋼は高耐熱化が進む一方で、高強度となり成形加工には従来とは異なる技術が必要になってきている。また、エキゾーストマニフォールドやその周辺 R 翠 榮状は複雑化してきている。これら素材および R 榮状の要因のため R 蛭 翠困難性は高まり、重要な問題として意識されるようになってきた。エキゾーストマニフォールド用フェライト系ステンレス鋼の使用には、その加工性を理解することが重要である。本報告では、エキゾーストマニフォールド部品に関するプレス成形、二次加工脆化、パイプ曲げの事例についてフェライト系ステンレス鋼の加工性の特徴をまとめ、適正な素材選定、部品設計、部 肖加工のための指針を示す。

Abstract:

Ferritic stainless steel is used widely for automotive exhaust systems. The higher the temperature of exhaust gas becomes, the more strongly the heat resistance properties are required for the ferritic stainless steel for exhaust manifold. The improved material in heat resistance, leads to have less formability, requires additional forming techniques in return. On the other hand, the parts are designed more and more

1. はじめに

環境問題意識の高まりとともに自動車の燃費向上と排ガスの浄化が求められるようになり、対策として排気ガス温度の高温化が積極的に進められている。その結果、エキゾーストマニフォールド(以下、エキマニ)をはじめとする排気系部品に使用されるフェライト系ステンレス鋼にはより高い耐熱性が要求されるようになってきた。JFE スチールではこのような要求に適合するため耐高温酸化特性、耐高温疲労特性、耐熱疲労特性に代表される耐熱性を重視して開発されたエキマニ用途向け鋼種を揃えている。一方でエキマニは限られたスペースに配置する必要性ばかりでなく、拘束率を介して熱疲労耐久性にも形状が影響を及ぼすため、複雑に設計され成形難度の高い部品になる傾向があ

る。このため最近では耐熱性に加えて加工性にも配慮して材料開発されている¹⁻⁶⁾。このような背景のもとで、エキマニ用ステンレス鋼の使用に際してはその成形性を把握し、加工方法を最適化することが重要になってきている。表 1

には代表的なエキマニ用ステンレス鋼についてその機械的特性の例を示す。

2. プレス成形性

2.1 プレス成形での延性割れ

2.1.1 成形限界曲線

排気系部品には板材からプレス成形する部品も少なくない。表 1 に示した、いわゆる引張り試験から得られる機械的特性は材料の加工性を表す最も基本的な指標であり、これらは部品の設計、素材選定、成形加工の場面で常に考慮される。しかしながらプレス成形時の板材の変形は複雑であり、成形過程で特定の部位に材料の破断を生じることがある。このような不具合の発生を一軸の引張り試験の結果である機械的特性から予測するのは困難である。

板材のプレス成形での割れ発生予測には成形限界線図が役立つ⁷⁾。成形限界線図とはさまざまなひずみ比の変形に
)々 鉢俵帽

2.2 プレス成形での脆性割れ

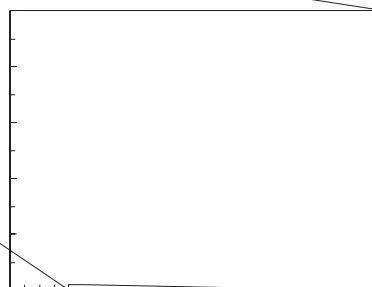
2.2.1 二次加工脆化割れ

フェライト系ステンレス鋼では深絞り加工（一次加工）した後、さらに加工（二次加工）しようとした場合や、もしくは衝撃力が加えられた場合には二次加工脆化割れと呼ばれる脆性割れが起こることがある。その典型として円筒絞り品の胴部や角筒絞り品のコーナー部など著しい縮み変形を受けた部分が脆化し成形方向に沿って割れることから一般に縦割れともよばれる^{7,8)}。これに類似の脆化割れ現象としてSUS304などのオーステナイト系ステンレス鋼での時期割れがあるが、準安定オーステナイト相の加工誘起によるオーステナイト() マルテンサイト(') 変態に関係すると考えられており、本質的な発生機構は異なる。写真1には円筒絞り品での脆化割れの事例を示す。二次加工脆化割れはIF鋼、低炭素鋼や高張力鋼などの普通鋼板では、深絞り成形の絞り比に依存すると報告されているが、その起こりやすさは加工前の母材の靱性を必ずしも反映しないとされ^{9,10)}、このことが部品の設計および素材選定の判断を困難にする一因といえる。フェライト系ステンレス鋼での報告は少ないが、低C、N化およびTi、Nb添加によるIF化に加えて、プレス技術の進歩により深絞り加工が可能になったことで顕在化してきた不具合現象である。発生には温度依存性があり、特に気温が低下する冬季に発生することが多い。また、絞り成形部のため顕著な板厚減少もなく危険箇所を認識しにくいので注意が必要である。前出の図2に示した部位(b)は多工程に及ぶ成形の途中で衝撃の影響を受けた二次加工脆化割れの例である。シミュレーションの結果から、この部分は著しい絞り成形状態であることが分かる。しかしながら、二次加工脆化割れの発生は先に述べた成形限界線図では予測できない。この部品の製造においては、成形の前半でブランクや途中形状を修正することで加工ひずみを低く抑え、後半では低温、高速での加工を避けるなどの対策により二次加工脆化割れが回避された。

2.2.2 二次加工脆化割れ性の試験

2.0 mmのエキマニ用ステンレス鋼板を供試材とし二次加工脆化割れの起きやすさの比較試験を実施した。図4に試験方法の概略を示す。供試材を67 mmのブランクに打ち抜き3回の絞り加工により、円筒カップ形状に成形した。このときの絞り加工サイズは1次絞りは外径38 mm（平底パンチ径33 mm）、2次絞りは外径32 mm（球頭パンチ27 mm）、および3次絞りは外径24.2 mm（球頭パンチ19.4 mm）とした。カップ胴部の異なる位置よりひずみ量の異なるサンプルを採取しテストピースとした。カップ胴部のひずみ分布は成形前のブランクに記したケガキ位置を、成形後の位置と対応づけることであらかじめ求めた。このテストピースに重さ5 kgの平底形状の錘を高さ800 mmから落下させ、テストピースが塑性変形して潰れるか、脆性割れを起こすかを種々の温度で判定した。塑性変形から脆性割れに転じる温度を延性脆性遷移温度として求めた。図5には試験により得られた塑性ひずみ量と延性脆性遷移温度の関係を示す。テストピースに付与された塑性ひずみ量が大きいほど延性脆性遷移温度は高くなることが分かる。すなわち一次加工で厳しい絞り加工をされるほど、二次加工脆化割れを起こしやすくなり、場合により室温であっても衝撃を受けて割れを生じる可能性がある。鋼種で比較すると、より高合金で強度レベルの高いJFE-WX1ではJFE-MH1に比べて同じひずみ量でも延性脆性遷移温度は20~30程度も上昇する。

以上より深絞りなど材料が縮み変形する加工では二次加



工脆化割れに注意が必要なが分かる。加工における対策として中間焼鈍が極めて有効であるが、それができない場合には二次加工工程の低温化を避け、加工速度を小さくするなどの対策がとられる。素材の観点では低合金で軟質な材料を選定することが好ましく、また高 r 値化(r 値：ランクフォード値)や、微量のB添加も二次加工脆化割れの抑制対策として効果がある。

3. パイプの曲げ加工性

3.1 パイプエキマニの曲げ加工方法

エキマニはエンジン各気筒からの排ガスを集合させフロントパイプに導く。排気系部品の中でも最上流に位置し最も高耐熱性が要求される部品でもある。加工法としては、最近では板材からプレス成形し溶接で組み上げるプレスエキマニも使われるようになってきたが、主流としては曲げ加工したパイプをエンジンの各気筒に配置して集合させる、いわゆるパイプエキマニといえる。エキマニ用のパイプ曲げ加工の特徴としてはエンジン周りの限られたスペースに収め、かつ拘束率や排気効率をも考慮して複雑に曲げ加工されることがあげられ、場合によっては部品の最小板厚の保証を要する。パイプの曲げ加工法の種類は多く¹¹⁾、最近では加工性、生産性とも優れた新しい曲げ加工方法が報告されている¹²⁾。中でも現在エキマニ用のパイプ曲げ加工法として普及しているのは図6に模式的に示す回転引き曲げ法であり、比較的小半径の曲げと、複雑な多段曲げが可能で、さらにはブラスターやワイパーにより板厚減少とシワの抑制が可能との観点から多く採用されている¹²⁻¹⁴⁾。

90°曲げ加工をした場合の曲げ外周の板厚分布の測定結果を示す。シミュレーションにより得られた途中の30°、60°曲げ時点の板厚分布も合わせて示している。曲げ加工の進行にともない板厚減少が進むが、最小板厚の箇所の移動は小さく、曲げ開始点の付近にあることが分かる。またこの結果から180°曲げを行う場合には90°ずつ2回曲げて180°とするよりも60°ずつ3回曲げる方が板厚減少が少ないことが予想された。

シミュレーションでの予想に基づき60°ずつ3回曲げ加工したパイプの外観と板厚分布の測定結果を図8に示す。

3.2 曲げパイプの板厚分布

回転引き曲げによるパイプの曲げ加工では一般的に外周側の板厚が減少し、その板厚減少が著しい場合には割れを生じる。割れを生じない場合でも板厚が保証値を下回らないように留意が必要になる。ここでは回転引き曲げによるパイプの180°曲げ加工の例を示す。素管にはJFE409L、50.1 mm × 2.0 mm t を用いた。図7には事前検討として

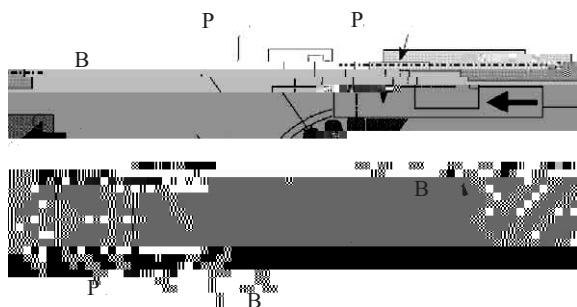


図6 回転引き曲げ加工方法の概略

Fig.6 Schematic diagram of rotary draw bending

