技術資料

Technical Paper

チタン炭硫化物を分散させたフェライト系 ステンレス鋼の被削性と耐食性

清水哲也^{*1}, 石川浩一^{*1}, 野田俊治^{*1}, 及川勝成^{*2}, 石田清仁^{*3}

Machinability and Corrosion Resistance of a Ferritic Stainless Steel with Dispersed Titanium Carbosulfides

Tetsuya Shimizu, Koichi Ishikawa, Toshiharu Noda, Katsunari Oikawa,
and Kiyohito Ishida

Synopsis

Free-cutting stainless steels have been widely used for high precision equipment. Their good machinability is rendered by Pb and/or MnS dispersed in them. From the viewpoint of health, Pb is an undesirable additive. And MnS deteriorates the corrosion resistance and some fabricabilities. A titanium carbosulfide, $Ti_4C_2S_2$, is stable thermodynamically more than MnS and so it is a candidate to replace MnS.

In order to disperse the sufficient carbosulfides, 0.55%Ti, 0.03%C and 0.2%S were added to a ferritic base steel, Type 430 (16.5%Cr), with low O and N both less than 50ppm. The steel showed the good machinability in turning and drilling comparable to Type 430F (0.6%Mn, 0.2S) and besides the excellent corrosion resistance under salt spray superior to Type 430F. These results demonstrate that $Ti_4C_2S_2$ is a promising dispersoid in free-cutting stainless steels to substitute for Pb and MnS.

1. 緒 言

ステンレス鋼は、その優れた耐食性から、各種機器・部品に広く適用されているものの、一般的にステンレス鋼は難切削材であることから、生産性向上のため切削加工によって成形される部材については、被削性改善元素を添加した、いわゆる快削ステンレス鋼が用いられることが多い。

被削性の改善には、S、Pbなどの元素が広く用いられている。Sは鋼中では通常MnSもしくは(Mn, Cr)Sとして存在し、潤滑効果や切欠効果などにより被削性を向上させる。一方で、ステンレス鋼の特長である耐食性を低下させる他、溶接性、冷間加工性に対しても悪影響を及ぼすことから、その適用は限定される。Pbは、耐食性の低下も小さく、被削性を改善する元素として有効であるものの、

環境意識の高まりから使用を規制する方向にある。

チタン炭硫化物($Ti_4C_2S_2$)は、古くから存在は認められており¹⁾、特に冷延鋼板では機械的性質、成形性などの向上に利用できることから積極的に研究が行われている²⁾。ステンレス鋼に関しても、SUS409Lで耐リジング性、耐粒界腐食性に有効であるという報告³⁾や、高純度17Cr鋼の再結晶挙動に及ぼす影響に関する報告⁴⁾などがある。一方で、本化合物はMnSと同様に安定な硫化物の一種でありながら、被削性に関する知見は得られていない。

そこで、フェライト系ステンレス鋼を対象として、その被削性、ならびに耐食性に対するチタン炭硫化物の影響を把握するため、SUS430をベースとした鋼種にチタン炭硫化物を分散させ、その特性を調査したので報告する。

2002年2月12日受付

*1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.) *2 独立行政法人 産業技術総合研究所 東北センター, 工博 (Dr., Eng., National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tohoku Center) *3 東北大学大学院 工学研究科, 工博 (Dr., Eng., Graduate School of Engineering, Tohoku Univ.)

Table 1. Chemical compositions for experimental steel(mass%).

	C	Si	Mn	S	Cr	Ti	Fe
experimental steel	0.031	0.21	0.05	0.20	16.5	0.55	Bal.
SUS430	0.002	0.21	0.02	<0.01	16.6	<0.01	Bal.
SUS430F	0.002	0.19	0.58	0.18	16.4	<0.01	Bal.

Table 2. Cutting conditions in automatic screw machining test.

	Turning-1	Turning-2	Forming	Drilling
Tool	M20(carbide) -6,-6,6,6 -15,15 0.4R		SKH4(HSS) Rake angle: 6° E.R.L.A: 6° S.R.L.A: 4°	SKH51(HSS) 5mm dia. Point angle :118°
Feed (mm/rev)	0.1	0.05	0.025	0.07
Depth of cut (mm)	1.0	0.2	1.0	10
Length of cut (mm)	22	21	5.8	-
Speed (m/min)	100	80	60	15
Cutting fluid	Water Soluble			

Turning-1 : flank wear measurement, Turning-2 : surface roughness measurement

2. 実験方法

2.1 供試材

Table 1 に、本実験に用いた供試材の化学成分を示す。チタン炭硫化物形成のためには、Ti,S,C を添加する必要があるが、フェライト系ステンレス鋼の場合 C はほとんど固溶せず、過剰の C の添加は Cr の炭化物を形成し、耐食性の低下を引き起こすことが懸念される。そこで、今回の実験鋼は、化学量論組成の $Ti_4C_2S_2$ が生成したと仮定した場合、Ti,S が若干量余り、C は母相には残らない組成に調整し、Cr 炭化物の生成による耐食性の低下を抑制した。

比較鋼には SUS430 と SUS430F を用いた。SUS430F の S 量は実験鋼と同レベルとし、通常本鋼種に含まれる MnS を形成するのに十分な量の Mn を添加した。なお、3 鋼種とも、O, N は 50ppm 以下に成分量をコントロールし、酸化物、窒化物生成の抑制を図った。

これらの鋼種を、真空誘導炉にて溶製し 150kg 鋼塊に鋳込んだ。その後、熱間鍛造および熱間圧延により直径13mmの線材とし、丸棒に矯正加工した後、780℃で4時間保持後空冷する焼鈍処理を行い試験に供した。

2.2 特性評価

(1) 介在物形態

実験鋼について、チタン炭硫化物の形態を確認するため、直径 13mm の焼なまし材のミクロ組織観察および X 線回折による介在物の同定を実施した。ミクロ組織は、縦断面から切りだしたサンプルを、エメリー紙で順次研磨し

た後に、アルミナのパフ研磨により鏡面に加工し、1/2 半径部について介在物の観察を実施した。また、焼なまし材を直径 10mm、長さ 25mm の円柱状の試片に加工し、電解抽出後 X 線回折による介在物の同定を実施した。電解抽出は、10% AA (10% アセチルアセトン - 1% テトラメチルアンモニウムクロリド - メタノール) 溶液中で 25mA/cm² の電流密度の条件にて 4 時間行い、残渣の回収には 0.1 μm のメンブレンフィルターを用いた。

(2) 切削性

快削ステンレス鋼は、精密加工部品など比較的小さな部材が対象となり、無人運転で加工される工作機械が用いられることが多い。今回は、その代表的な工作機械である自動盤を用い、超硬による長手旋削加工、ハイス総形工具によるブランジ加工、ハイスドリルによる穴加工を組合わせ、Fig.1 に示すような切削試験用加工試片を 1000 個加工した。Table 2 に自動盤加工の切削条件を示す。旋削に関しては、工具摩耗量と仕上げ面粗さを測定するための 2 水

Fig.1. Schematic diagram of machining piece.

準の条件で実施した。工具摩耗量は、加工試片を 20, 50, 100, 200, 500, 1000 個加工した段階で、実体顕微鏡により横逃げ面平均摩耗量を測定し、仕上げ面粗さは、工具摩耗量と同じ加工段階で、前後 20 個の加工試片の中心線平均粗さ (Ra) を測定し、その平均値を採った。プランジ加工、穴加工にはハイス鋼 (HSS) を用い、上記の加工段階の時に、工具のコーナー摩耗量を実体顕微鏡で測定した。なお、試験材は、直径 13mm の丸棒をピーリング加工により直径 11mm としたものをを用いた。

(3) 耐食性

長さ 50mm の形状で表面を #400 仕上げした試験片、JIS Z 2371 に準拠し、96 時間の塩水噴霧試験を実施した。

3. 結果および考察

3.1 介在物形態

Fig.2 に、縦断面で観察した介在物の代表例を示す。SUS430F の介在物が伸長した紐状であるのに対し、実験鋼は微細粒状の介在物が比較的均一に分散している。また、Ti 窒化物と考えられる四角い塊状の介在物も認められたが、窒素量を抑制していることもあり、その量は極めて

で僅かであった。

次に、実験鋼の抽出残渣の X 線回折チャートを Fig.3 に示す。Ti₄C₂S₂ が主相として同定されたほか、TiS、TiS₃ と一致するピークも認められた。実験鋼は、主相として同定された Ti₄C₂S₂ が優先的に生成した場合でも、Ti と S が残る組成となっており、これらが TiS などの Ti 硫化物を形成したものと考えられる。また、X 線回折のチャート上では、窒化物、酸化物と同定される明瞭なピークは認められず、これらの総量が少ないことを裏付ける。

以上のように、実験鋼は、Ti 窒化物、酸化物の生成を抑制しつつ、主相として微細粒状の Ti₄C₂S₂ が分散する形態を呈しており、チタン炭硫化物の特性評価という目的に合致した組織が得られている。

3.2 切削性

超硬による長手旋削加工、ハイス総形工具によるプランジ加工、ハイスドリルによる穴加工での工具摩耗量の測定結果について Fig.4 から Fig.6 に示す。ここで、SUS430 は 200 個までのデータしかないが、これは工具の摩耗量が大きく、200 個の時点で加工を中断したためである。いずれの工具摩耗量も、実験鋼と SUS430F は同等であり、快削元

Fig.2. Morphology of inclusions (a) the experimental steel and, (b) SUS430F.

Fig.3. X-ray diffraction chart of the experimental steel.

Fig.4. Flank wear of carbide tool in turning.

Fig.5. Flank wear of HSS formed tool.

Fig.6. Corner wear of HSS drill.

素が添加されていないSUS430対比で大幅な摩耗量の減少が認められる。旋削加工で、送り量や切込量を下げ、仕上加工を模擬した条件で加工した後の表面粗さ測定結果を

Fig.7. Surface roughness (Ra) of machined piece in turning.

Fig.7に示す。実験鋼の表面粗さは、SUS430Fに比べると非常に小さく、また1000個までの加工で粗さの増加は認められない。

チタン炭硫化物は、超硬、ハイスいずれの工具においても、今回の切削条件ではMnSと同等の被削性改善効果を有していた。ただし、必ずしもチタン炭硫化物とMnSが同じ作用で被削性を向上させることを意味するのではない。ミクロ組織で確認したように $Ti_4C_2S_2$ はMnSに比べ伸長しておらず、少なくともMnS対比では硬質な介在物であることが予測でき、一般的には被削性の改善に対しては不利であると考えられる。また、複合快削鋼の超硬工具摩耗に関する従来の知見で、介在物は大きいほうが工具摩耗量の低減効果は高い⁵⁾など、一般的には介在物が大きいほうが被削性は向上するといわれており、この点からもチタン炭硫化物のほうがMnSより効果は小さいと判断される。一方で、それほど硬さの無いハイスを使用したブランチ加工でもチタン炭硫化物はMnSと同等の被削性改善効果を有しているなど、今回の結果を見る限り、上記のような従来の知見は当てはまらない。

これらは、今後詳細に調査を行う必要があるものの、チタン炭硫化物が微細に均一に分散していることが少なからず影響しているものと推察される。また、微細分散していることは、チタン炭硫化物を含む実験鋼で良好な表面性状が得られた大きな要因一つになっているものと考えられる。

今回は、考える平均的な切削条件にて加工を行ったが、上記のように従来の知見とは異なる結果が得られているということは、チタン炭硫化物により適した切削条件が有りえること、また逆に適さない条件が有りえることが予測できる。今後切削条件の影響についても十分検討する必要がある。

3.3 耐食性

Fig. 8 に 96 時間の塩水噴霧試験の結果を示す。SUS430F は、比較的多くの発錆が認められるのに対し、実験鋼は SUS430 と同様に発錆は認められない。これは、チタン炭硫化物がより化学的にも安定であることが主因と考えられる。

チタン炭硫化物を分散した実験鋼は、MnS を含有する SUS430F と工具摩耗量は同等であり、高い被削性を有することを確認しただけでなく、表面仕上げ精度が確保しやすく、また、快削元素を含まないベース鋼種と同等の耐食性を維持していた。このように、チタン炭硫化物は、特に精密切削部品用ステンレス鋼の快削元素として高いポテンシャルを有することを確認した。

Fig.8. Salt spray test result.

4. 結 論

本報では、チタン炭硫化物を分散した SUS430 ベースのフェライト系ステンレス鋼について、被削性ならびに耐食性を調査し、以下の結論を得た。

- (1) 自動盤による一定切削条件下での、超硬工具による長手旋削加工、ハイス総形工具によるブランジ加工、ハイスドリルによる穴加工時のチタン炭硫化物を含む鋼種の工具摩耗量は、MnS を含む SUS430F といずれの加工においても同等であり、チタン炭硫化物は高い被削性向上効果を有する。
- (2) チタン炭硫化物を含む鋼種の長手旋削加工時の表面粗さは、SUS430F より良好であり、チタン炭硫化物は良好な仕上げ精度が得られやすい。
- (3) SUS430F が 96 時間の塩水噴霧試験で発錆が認められたのに対し、チタン炭硫化物を含む鋼種には発錆は認められず、ステンレス鋼の特長である高い耐食性を維持する。
- (4) 以上のように、チタン炭硫化物は特に精密切削部品用ステンレス鋼の快削元素として高いポテンシャルを有する。

(文 献)

- 1) H. Kudielka et al.: Z. Kristallogr. ,114(1960) ,447.
- 2) 例えば ,W. J. Liu et al.: Metall. Trans A ,20A(1989) ,1907.
- 3) 柘植信治 ,藤村浩志 ,山岸昭仁:住友金属, 49(1997) ,4,65.
- 4) K. Kimura et al.: Proc. of Stainless Steel 99 Science and Market, 2(1990) ,77.
- 5) 木村篤良 ,中村貞行 ,柴田範嘉 :電気製鋼 ,60(1989), 258.