

川崎製鉄技報
KAWASAKI STEEL GIHO
Vol. 34 (2002) No.2
自動車用鋼材特集号

耐熱性と加工性に優れる Mo 活用型エキゾーストマニフォールド用ステンレス鋼「RMH-1」
High Heat-Resistant Ferritic Stainless Steel with High Formability, "RMH-1", for
Automotive Exhaust Manifolds by Making the Most of Mo

宮崎 淳 (Atsushi Miyazaki) 平澤 淳一郎 (Junichiro Hirasawa) 古君 修 (Osamu Furukimi)

要旨 :

エキゾーストマニフォールドに適した高耐熱高加工性ステンレス鋼の開発を目的として、14%Crステンレス鋼の室温加工性、高温強度および耐酸化性におよぼすMoとSiの影響を研究した。Moの添加は、耐酸化性および高温強度向上に顕著な効果を示すが、Siの添加は、耐酸化性向上には効果的であるものの、高温強度向上にはほとんど効果がないことが明らかになった。これらの結果にもとづき、耐熱性に優れるMo活用型高加工性ステンレス鋼RMH-1(14.5%Cr-0.3%Si-0.5%Nb-1.6%Mo)を開発した。開発鋼は、既存の2鋼(高加工性タイプと高耐熱タイプ)の長所を兼備した特性を示す。すなわち、RMH-1の鋼板および電縫管の加工性は、既存の高加工性ステンレス鋼R429EX(14.5%Cr-0.9%Si-0.45%Nb)の値と同等であるとともに、RMH-1の高温強度、高温疲労特性および熱疲労特性は既存の高耐熱ステンレス鋼R434LN2(SUS444:19%Cr-0.3%Si-0.35%Nb-1.8%Mo)同等の特性を示す。

Synopsis :

To develop a high heat-resistant stainless steel with high formability for automotive exhaust manifolds, the influences of Mo and Si contents on the formability, oxidation resistance, and high temperature strength of 14%Cr ferritic stainless steel were investigated. Mo addition increased oxidation resistance and high temperature strength remarkably. Si addition increased significantly oxidation resistance but had a little effect on high temperature strength. Based on these findings, a high heat-resistant Mo-added ferritic stainless steel with high formability, RMH-1 (14.5%Cr-0.3%Si-0.5%Nb-1.6%Mo), has been developed. The newly developed steel possesses not only the advantage of the existing high heat-resistant type but also that of high formability type stainless steels. Namely, RMH-1 possesses high temperature strength and fatigue properties equal to those of a conventional SUS444 steel, R434LN2 (19%Cr-0.3%Si-0.35%Nb-1.8%Mo), which is considered to be a high heat-resistant steel for automotive exhaust applications, combined with formability equal to that of the

conventional R429EX (14.5%Cr-0.9%Si-0.45%Nb), which is used as a high formability steel in the same applications.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

耐熱性と加工性に優れる Mo 活用型エキゾースト マニフォールド用ステンレス鋼「RMH-1」*

川崎製鉄技報
34 (2002) 2, 81-84

High Heat-Resistant Ferritic Stainless Steel with High Formability, “RMH-1”, for Automotive Exhaust Manifolds by Making the Most of Mo



宮崎 淳
Atsushi Miyazaki
技術研究所
ステンレス鋼研究部門
主任研究員(課長)

平澤 淳一郎
Junichiro Hirasawa
技術研究所
ステンレス鋼研究部門
主任研究員(主席掛長)

古村 修
Osamu Furukimi
技術研究所
ステンレス鋼研究部門
長・工博

要旨

エキゾーストマニフォールドに適した高耐熱高加工性ステンレス鋼の開発を目的として、14%Crステンレス鋼の室温加工性、高温強度および耐酸化性におよぼすMoとSiの影響を研究した。Moの添加は、耐酸化性および高温強度向上に顕著な効果を示すが、Siの添加は、耐酸化性向上には効果的であるものの、高温強度向上にはほとんど効果がないことが明らかになった。これらの結果にもとづき、耐熱性に優れるMo活用型高加工性ステンレス鋼RMH-1(14.5%Cr-0.3%Si-0.5%Nb-1.6%Mo)を開発した。開発鋼は、既存の2鋼(高加工性タイプと高耐熱タイプ)の長所を兼備した特性を示す。すなわち、RMH-1の鋼板および電縫管の加工性は、既存の高加工性ステンレス鋼R429EX(14.5%Cr-0.9%Si-0.45%Nb)の値と同等であるとともに、RMH-1の高温強度、高温疲労特性および熱疲労特性は既存の高耐熱ステンレス鋼R434LN2(SUS444: 19%Cr-0.3%Si-0.35%Nb-1.8%Mo)同等の特性を示す。

Synopsis:

To develop a high heat-resistant stainless steel with high formability for automotive exhaust manifolds, the influences of Mo and Si contents on the formability, oxidation resistance, and high temperature strength of 14%Cr ferritic stainless steel were investigated. Mo addition increased oxidation resistance and high temperature strength remarkably. Si addition increased significantly oxidation resistance but had a little effect on high temperature strength. Based on these findings, a high heat-resistant Mo-added ferritic stainless steel with high formability, RMH-1 (14.5%Cr-0.3%Si-0.5%Nb-1.6%Mo), has been developed. The newly developed steel possesses not only the advantage of the existing high heat-resistant type but also that of high formability type stainless steels. Namely, RMH-1 possesses high temperature strength and fatigue properties equal to those of a conventional SUS444 steel, R434LN2 (19%Cr-0.3%Si-0.35%Nb-1.8%Mo), which is considered to be a high heat-resistant steel for automotive exhaust applications, combined with formability equal to that of the conventional R429EX (14.5%Cr-0.9%Si-0.45%Nb), which is used as a high formability steel in the same applications.

1 緒 言

近年、地球環境問題が注目され、自動車の排出ガス浄化率の向上が各國において法規制とともに強く求められている。たとえば、ガソリン乗用車のテールハイブ排出ガス規制値に関して、日本では平成12年規制、米国ではTier 1、Tier 2規制、欧州ではEuro 3、Euro 4規制などが施行あるいは提案されている¹⁾。このような趨勢に対応するには、エンジン始動直後(コールドスタート)の排出ガ

ス浄化特性向上が極めて重要な課題となる。これは、エンジン始動直後には排出ガスの熱の一部がエキゾーストマニフォールドに奪われ、排出ガス温度が低下するとともに、触媒コンバータ内の温度も低いため排出ガス中のNO_x、HC、COの浄化反応が生じにくいためである。浄化反応を促進させるために、エキゾーストマニフォールドを薄肉化しその熱容量を低下させることで、排出ガスを高温に保ったまま触媒コンバータに導く技術が実用化されている²⁾。エキゾーストマニフォールドの薄肉化はまた軽量化にも寄与する。上記方法を用いるための素材には優れた耐熱性が要求されるので、鍛物に代わってフェライト系ステンレス鋼の適用が拡大しつつある³⁾一方、エキゾーストマニフォールドは多くの場合、限られた車体空

* 平成14年4月9日原稿受付

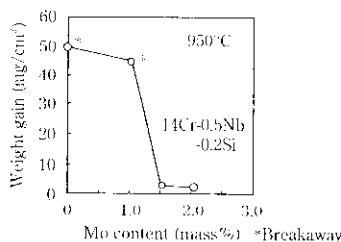


Fig. 2 Effect of Mo content on weight gain of 14%Cr-0.5%Nb-0.2%Si stainless steels by continuous heating at 950°C for 200 h in air

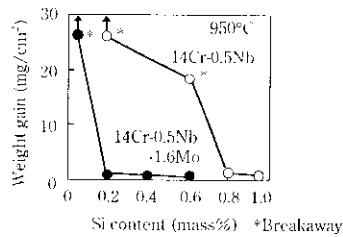


Fig. 3 Effect of Si content on weight gain of 14%Cr-0.5%Nb and 14%Cr-0.5%Nb-1.6%Mo stainless steels by continuous heating at 950°C for 200 h in air

化性向上には Mo の添加は著しく効果的であることが分かる。Mo 無添加鋼と 1.6%Mo 添加鋼の酸化増量に及ぼす Si の影響¹¹を Fig. 3 に示す。Mo 無添加鋼の場合、950°C の酸化試験で異常酸化を抑制するには、0.8% 以上の Si 添加が必要であるのに対して、1.6%Mo 添加鋼の場合は、0.2% 以上の Si 添加でよいことが明らかとなった。フェライト系ステンレス鋼の連続酸化試験における Cr および Si の影響は、これらの元素が一定量以上添加されると、 Cr_2O_3 および SiO_2 などの保護性に優れた酸化皮膜が連続的に生成し、耐酸化性を向上させると考えられている¹²。しかし、11%Cr 鋼に 4%Si を添加した場合¹³、あるいは 14%Cr 鋼に 1%Si を添加した場合¹⁴のいずれの実験結果においても、明確な SiO_2 皮膜の形成は認められていないにもかかわらず、異常酸化の抑制に Si が有効であるとの報告がされている。このように Si による耐酸化性向上機構は必ずしも明らかではない。一方、金属組織学的観点から、富士川ら¹⁵は酸化試験中に組織の一一部が γ 変態した場合、その部分から異常酸化が発生しやすく、耐酸化性への Si の影響は、保護皮膜説からではなく、フェライト組織の安定性から説明できると報告している。今回実験に供した成分系においても、連続的な Cr 酸化物は観察されたものの、連続的な Si 酸化物および Mo 酸化物は観察されなかった点、および Mo と Si はいずれも強力なフェライト生成元素である点を考慮すると、14%Cr ステンレス鋼へのこれら元素の添加は、高温での γ 相の生成を抑制しフェライト組織を安定化することで耐酸化性を向上させていると考えることもできる。すなわち、950°C の酸化試験で異常酸化を抑制するには、Mo 無添加鋼では 0.8% 以上の Si 添加が必要であるが、1.6%Mo 添加鋼では、0.2%Si のようなわずかな添加でよいという実験結果は、Si 保護皮膜説からの解釈ではなく、Mo 添加鋼では、より少ない Si 量でフェライト相が安定化するためという解釈である。しかし、Ti 添加の 18%Cr フェライト系ステンレス鋼において、Mo は常温で生成する不動態皮膜組成に影響し、その不動態皮膜がその後の耐酸化性に影響を与えるとの小林ら¹⁶の報告も考慮すると、富士川らのフェライト組織安定化説に加え、不動態皮膜の緻密さなどの観点も含めた詳細な検討が必要であろう。

4 開発鋼の成分設計の考え方

以上の結果から、R429EX (0.9%Si) の Si は、耐酸化性向上に寄与しているものの、900°C の 0.2%PS にはほとんど寄与していないことが明らかになった。したがって、開発鋼の成分設計として、耐酸化性向上とともに、高温の 0.2%PS をも向上させる Mo を積極的に活用し、Si 量の低減を図り、14.5%Cr-0.3%Si-1.6%Mo-0.5%Nb を基本成分とした高耐熱・高加工性フェライト系ステンレス鋼 RMH-1 の開発にいたった。次章で、開発鋼の諸特性を既存鋼と比較して紹介する。

5 開発鋼 (RMH-1) の特性

5.1 化学成分と室温の機械的性質

開発鋼 (RMH-1) やび既存鋼 (R429EX, R434LN2) の化学成分を Table 2 に示す。板厚 2 mm の冷間圧延鋼板の室温での機械的性質を Table 3 に示す。RMH-1 の YS, TS, EI やび r 値は R429EX と同等の値を示し、R434LN2 と比較すると強度は低く、伸びおよび r 値は高い。

直径 48.6 mm、板厚 2.0 mm の電縫管の機械的性質を Table 4 に示す。RMH-1 の電縫管の YS, TS, やび EI は、R429EX と同等の値を示した。

5.2 高温特性

800 やび 900°C の 0.2%PS やび TS を Fig. 4 に示す。RMH-

Table 2 Chemical compositions of RMH-1, R429EX, and R434LN2

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	(mass%)
RMH-1	0.004	0.34	0.18	14.5	1.6	0.46	
R429EX	0.008	0.86	0.37	14.6	-	0.44	
R434LN2	0.005	0.28	0.16	18.7	1.8	0.34	

Table 3 Mechanical properties of RMH-1, R429EX, and R434LN2

	Direction	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	r
RMH-1	L	307	474	37	1.6
	D	330	500	31	1.1
	C	320	478	36	2.1
	Average	322	488	34	1.5
R429EX	L	308	483	36	1.5
	D	337	511	32	1.1
	C	330	495	34	2.0
	Average	328	500	33	1.4
R434LN2	L	366	518	33	1.2
	D	400	543	29	0.9
	C	390	528	32	1.6
	Average	389	533	31	1.2

Sheet thickness: 2.0 mm

Table 4 Mechanical properties of ERW pipes according to JIS 11

	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)
RMH-1	487	512	51
R429EX	491	531	49

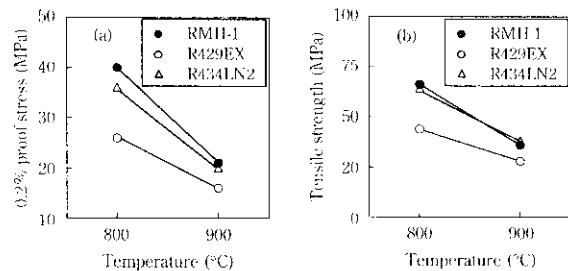


Fig. 4 High-temperature strength: (a) 0.2%proof stress (b) tensile strength

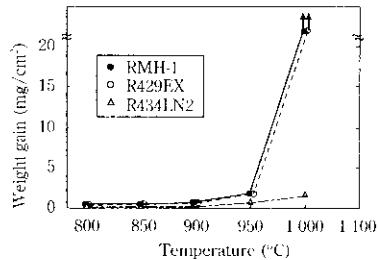


Fig. 5 Oxidation test results of RMH-1, R429EX, and R434LN2 between 800°C and 1 000°C for 400 h in air

1はR429EXよりも高い高温強度を有し、R434LN2と同等の値を示した。

800、850、900、950および1 000°Cで400 h 大気中で加熱処理後の酸化增量を Fig. 5 に示す。RMH-1は、R429EXと同等の良好な耐酸化性を示した。

800および900°CのS-N曲線を Fig. 6 に示す。RMH-1の10⁷疲労限はR429EXより高く、R434LN2と同等の値を示した。

熱疲労試験結果を Fig. 7 に示す。RMH-1はR429EX、R434LN2よりも優れた寿命を示した。

6 結 言

近年の自動車排出ガス規制強化にともなって、ステンレス鋼の使

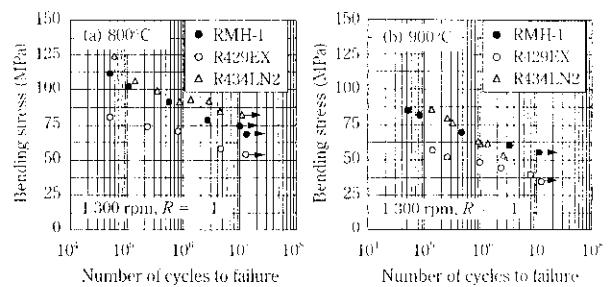


Fig. 6 S-N curves of RMH-1, R429EX, and R434LN2; (a) 800°C, (b) 900°C

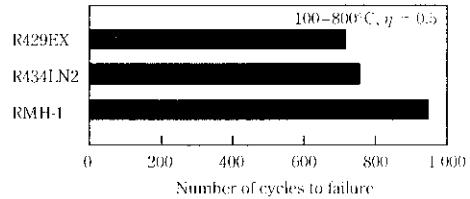


Fig. 7 Comparison of thermal fatigue life between RMH-1 and conventional stainless steels

用環境はますます苛酷なものになりつつある。そのため、特にエキゾーストマニホールド、フロントパイプ、触媒外筒材などに代表されるような高温環境用途として、優れた耐熱性と優れた加工性を有するステンレス鋼の開発が強く求められていた。このような要求にこたえるため、耐熱性と加工性に及ぼすMoとSiの影響を詳細に研究し、Moの有効性を最大限に活用する成分設計によって、従来の高耐熱エキゾーストマニホールド材であるR434LN2(SUS444)同等の優れた耐熱性(高温強度、高温疲労および熱疲労特性)と高加工性エキゾーストマニホールド材であるR429EXと同等の優れた加工性を兼備する新しいフェライト系ステンレス鋼(RMH-1)の開発に成功した。今後も世界各国において、排出ガス規制が強化されていく趨勢にある。これらの規制強化に適合できる高耐熱・高加工性ステンレス鋼RMH-1の採用が一層拡大し、環境浄化に貢献していくものと期待される。

参 考 文 献

- 成澤和幸:自動車技術, 55(2001)9, 4
- 本間正幸:自動車技術, 43(1989)9, 55
- 久松定典:ステンレス, (1995)9, 10
- 宮崎淳、平澤淳一郎、吉君修:自動車技術, 55(2001)10, 25
- 川崎製鉄(株):「川鉄の自動車用ステンレス鋼板」、製品カタログ, (2001)
- 平川賢嗣、時政勝行:鉄と鋼, 4(1977), S255
- 奥学、中村定幸、平松直人、植松美博:日新製鋼技報, 66(1992), 37
- 藤田辰弘:新日鉄技報, (1999)371, 30
- 宮崎淳、平澤淳一郎、吉君修:材料とプロセス, 15(2002)3, 551
- 富士川尚男:鉄と鋼, 70(1984)11, 41
- 川崎龍夫、佐藤信二、小野寛、大橋延夫:川崎製鉄技報, 8(1976), 437
- 奥学、中村定幸、平松直人、植松美博:日新製鋼技報, 74(1996), 26
- 富士川尚男、村山順一朗、藤野充克:鉄と鋼, 69(1983)6, 172
- 小林裕、藤原景仁:材料と環境, 43(1994)11, 640