
加工性に優れる高 r 値 HISTORY 鋼管の開発

Development of High Lankford Value HISTORY Steel Tube with Excellent Formability

西森 正徳 (Nishimori, M.) 荒谷 昌利 (Aratani, M.) 小高 幹雄 (Kodaka, M.)

要旨：

川崎製鉄は、次世代電縫鋼管製造技術としての HISTORY プロセスを開発した。このプロセスでは、世界で初めて電縫鋼管の温間縮径圧延を採用したことにより、多くの新機能を有する鋼管を製造できる。高 r 値化は、その新機能の一つである。温間縮径圧延で発達する圧延集合組織により r 値を改善することができる。このような圧延集合組織の発達には、固溶 C 量や第二相の影響が小さい。そのため、従来の再結晶集合組織を利用した方法では r 値 1.0 を超えることが困難であった低炭素鋼、高炭素鋼、二相組織鋼でも 1.5 を超える高 r 値が得られる。温間縮径圧延した高 r 値鋼管では、曲げなどの加工性を著しく向上させることが可能である。

Synopsis：

Kawasaki Steel has developed HISTORY process as one of the next generation technologies of manufacturing electric resistance welded steel tubes. Steel tubes with excellent properties can be produced by warm-reducing process which is put into practice in the HISTORY process for the first time in the world. High Lankford value is one of the excellent properties which can be obtained by the warm-reducing process owing to the thereby agglomerated rolling texture. The development of rolling texture is independent of solute carbon or secondary phases. Therefore higher Lankford value over 1.5 can be achieved in low carbon steel tubes, high carbon steel tubes and dual phase steel tubes by the HISTORY process, while, of those the Lankford value of 1.0 can be attained at the best by conventional methods utilizing recrystallized texture. The workability such as bending of those steel tubes can be improved by warm-reducing which achieves a high Lankford value.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Development of High Lankford Value HISTORY Steel Tube with Excellent Formability



西森 正徳
Masanori Nishimori
技術研究所
鋼管・鋳物研究部門
主任研究員(主席掛長)



荒谷 昌利
Masatoshi Aratani
技術研究所
鋼管・鋳物研究部門
主任研究員(主席掛長)



小高 幹雄
Mikio Kodaka
知多製造所
商品技術部
主査(部長補)

要旨

川崎製鉄は、次世代電縫鋼管製造技術としての HISTORY プロセスを開発した。このプロセスでは、世界で初めて電縫鋼管の温間縮径圧延を採用したことにより、多くの新機能を有する鋼管を製造できる。高 r 値化は、その新機能の一つである。温間縮径圧延で発達する圧延集合組織により r 値を改善することができる。このような圧延集合組織の発達には、固溶 C 量や第二相の影響が小さい。そのため、従来の再結晶集合組織を利用した方法では r 値 1.0 を超えることが困難であった低炭素鋼、高炭素鋼、二相組織鋼でも 1.5 を超える高 r 値が得られる。温間縮径圧延した高 r 値鋼管では、曲げなどの加工性を著しく向上させることが可能である。

Synopsis:

Kawasaki Steel has developed HISTORY process as one of the next generation technologies of manufacturing electric resistance welded steel tubes. Steel tubes with excellent properties can be produced by warm-reducing process which is put into practice in the HISTORY process for the first time in the world. High Lankford value is one of the excellent properties which can be obtained by the warm-reducing process owing to the thereby agglomerated rolling texture. The development of rolling texture is independent of solute carbon or secondary phases. Therefore higher Lankford value over 1.5 can be achieved in low carbon steel tubes, high carbon steel tubes and dual phase steel tubes by the HISTORY process, while, of those the Lankford value of 1.0 can be attained at the best by conventional methods utilizing recrystallized texture. The workability such as bending of those steel tubes can be improved by warm-reducing which achieves a high Lankford value.

1 緒 言

従来、鋼板をプレス成形、溶接して製造されていた自動車の足回り部品においても、高剛性と軽量化を両立させるために電縫鋼管を用いて製造することが検討されている。たとえば、ULSAS¹⁾での検討結果によれば、ツイストビームなどの自動車の足回り部品に電縫鋼管を適用することで、数十%の軽量化が可能となる²⁾。

このような用途に用いられる電縫鋼管では、高強度に加えて、優れた加工性を有することが必要である。加工性を向上させて一体成形を可能とすることで、溶接工程などを省略して製造コストを低減することや信頼性を向上させることができるためである。しかしながら、一般に強度と加工性の両立は困難である。特に、従来の電縫鋼管では、強度が高くなると、冷間での造管による加工硬化や、電縫溶接部の焼き入れ硬化が著しくなり、良好な加工性を得にくい。

このような問題を解決するために、当社は、次世代電縫鋼管製造技術として HISTORY プロセスを開発した。このプロセスでは、世界で初めて電縫鋼管の温間縮径圧延を採用したことにより、多くの

新機能を有する鋼管の製造が可能となった。温間縮径圧延により、前述の冷間での造管による加工硬化や、電縫溶接部の焼き入れ硬化を解消できることはもちろん、さらに、鋼板では達成されていない高強度鋼管の高 r 値化も達成できる。この高 r 値化により、曲げなどの加工性を著しく向上させることが可能である³⁾。本報では、温間縮径圧延による高 r 値化の原理と開発鋼管の特性について報告する。

2 温間縮径圧延による高 r 値化の原理

従来の電縫鋼管の製造方法、鋼板を鋼管形状に冷間で成形する方法では、高 r 値鋼管を製造することは困難である。これは、鋼管の素材である鋼板で、特に高強度鋼板や電縫鋼管に広く用いられている熱間圧延鋼板で高 r 値が得られていないためである。

鋼板では、高 r 値を得るために、再結晶集合組織が利用されている。そのため、望ましい集合組織の発達を阻害しないような固溶炭素量が極めて少ない極低炭素 interstitial free (IF) 鋼を、80% 程度の圧下率で冷間圧延した後、焼鈍して、再結晶集合組織を発達させる必要がある³⁾。したがって、電縫鋼管に広く用いられている熱間圧延鋼板では高 r 値を得ることができない。また、極低炭素 IF 鋼で

* 平成13年9月17日原稿受付

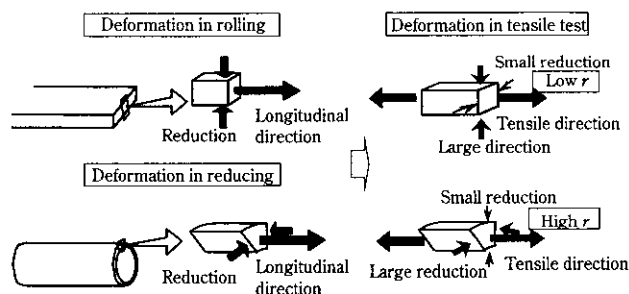


Fig. 1 Comparison of deformation in reducing and rolling

は組織強化や析出強化の適用が困難なために、高強度化が難しい。

電縫鋼管の集合組織を制御するための方法としては、前述の再結晶集合組織以外に、圧延集合組織と変態集合組織が考えられる^{4,5)}。特に、圧延集合組織は、鋼の成分や第二相の影響を受けにくく、圧下率を大きくすることで発達することが知られており⁶⁾、高強度鋼の集合組織制御方法として有望である。

圧延集合組織は、以下のように発達すると考えられている⁷⁾。圧延により個々の結晶にも圧延と同じ歪みが導入される。この歪みが生じるような複数の結晶のすべり系の組み合わせから、すべり量の和が最も小さい組み合わせが選択される。そして、その組み合わせで生じる結晶回転により、結晶方位が揃って圧延集合組織が形成される。このように考えると、圧延の最終安定方位の結晶は圧延と同じ変形でのすべり量が小さい、すなわち、その変形が容易であると考えることもよいと推定される。

Fig. 1 に、縮径圧延と板圧延の変形を比較して示す。板圧延では、板厚方向に圧下し、長手方向に伸びるという変形のため、 r 値の低い圧延集合組織となると推定される。実際、温間で圧延された鋼板では r 値が低下することが報告されている⁸⁾。これに対し、鋼管の縮径圧延では、円周方向に圧下し、長手方向に伸びる変形が生じる。この結果、長手方向に引張った場合に圧下方向の円周方向に縮みやすい r 値の高い圧延集合組織が得られると考えられる。

HISTORY プロセスでは、フェライトを加工硬化が比較的小さい高温で縮径圧延して、以上のような圧延集合組織による高 r 値化を達成した。この効果は、板圧延では得られない縮径圧延を用いた HISTORY プロセスに特有のものである。

3 温間縮径圧延した鋼管の引張り特性

Table 1 に示す化学成分の熱間圧延鋼板を電縫鋼管に成形後、温間で縮径圧延を行い、引張り試験、ミクロ組織および集合組織の観察を行った。

引張り試験は、鋼管の長手方向から JIS12 号 A の引張り試験片を採取し、長手方向と幅方向に歪ゲージを添付して、長手方向の歪みが 6~7% の範囲での幅方向歪みと長手方向歪みの傾きから r 値を計算した。結果を Fig. 2 に示す。素材の熱間圧延鋼板の r 値は約 0.6 である。この熱間圧延鋼板から製造した電縫鋼管を温間縮径圧延することにより、 r 値が向上し、圧下率が 60% では約 2.0 の極めて高い r 値となる。

Table 1 Chemical composition

(mass%)			
C	Si	Mn	Cr
0.05	1.0	1.4	0.9

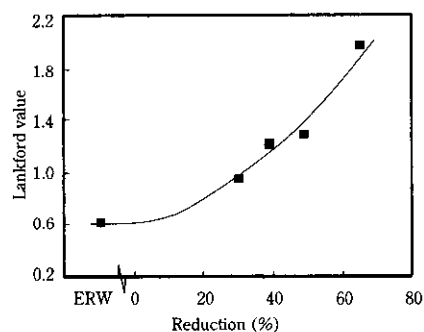
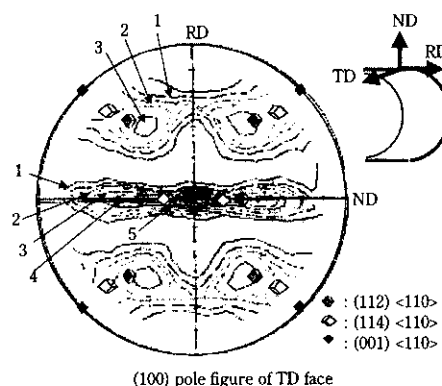
Fig. 2 Effect of reduction on r -value after warm-reducing

Fig. 3 Texture of warm-reduced steel tube

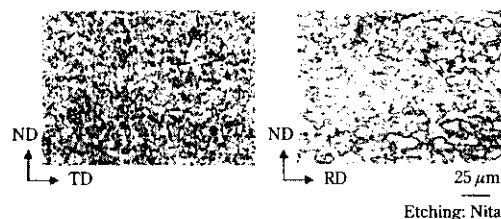


Photo 1 Optical micrographs of warm-reduced steel tube

Table 2 Chemical composition

	(mass%)		
	C	Si	Mn
SAE1006	0.06	<0.1	0.3
SAE1015	0.15	0.2	0.3
SAE1541	0.41	0.2	1.4

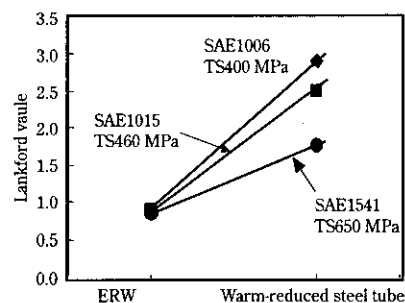
Fig. 4 Effect of reducing on r -value

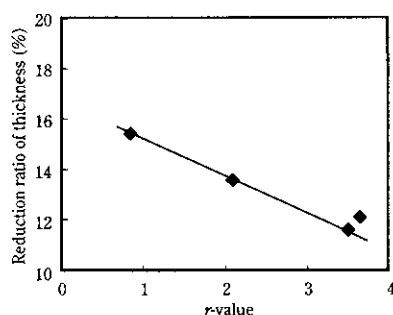
Fig. 3 に, HISTORY 鋼管の集合組織を示す。集合組織は, 図中に示す TD 面を X 線回折することで測定した。温間縮径圧延により, 圧延方向に $\langle 110 \rangle$ 軸が平行で, 円周方向に $\langle 112 \rangle \sim \langle 114 \rangle \sim \langle 001 \rangle$ 軸が平行な集合組織が発達している。この集合組織は, 後述するように, 前述の仮定にしたがって計算した縮径圧延による圧延集合組織とよい一致を示し, 推定した原理の妥当性を示すと考えられる。

Photo 1 に, HISTORY 鋼管の円周方向垂直断面のマイクロ組織を示す。フェライト粒が鋼管の長手方向に進展したマイクロ組織であり, 前述の集合組織が圧延集合組織であることを示唆している。

圧延集合組織は, 前述したように固溶炭素, 固溶窒素, 析出物, 第二相の影響を受けにくく, 再結晶集合組織を利用する鋼板では困難な極低炭素 IF 鋼以外の高強度鋼でも, 高 r 値化が可能と考えられる。そこで, Table 2 に示す供試材について, 熱間圧延ままの r 値と温間縮径圧延後の r 値を測定した。結果を Fig. 4 に示す。従来, 高 r 値が困難であったこれらの鋼でも, 1.5 を超える r 値が得られている。

4 開発鋼管の加工性

高 r 値化によって, 曲げ加工時の外面側の減肉抑制が期待できる。Fig. 5 に, 温間縮径圧延した鋼管を引き曲げ加工した時の減肉率を調査した結果を示す。r 値が約 1 から 3 に大きくなることで, 減肉率が約 1/3 小さくなる。このように, 減肉率が小さくなることによって, Fig. 6 に示すように高強度材の曲げ限界が向上するのはもちろん, 偏肉が小さいために, 引き続きハイドロフォームを行う場合にも有利に働くと考えられる。



Size: 48.6 mmφ × 3.3 mm, Steel: 0.05% C-0.3% Mn, Bending radius: 97.2 mm, Bending angle: 110°, Lubricant: use, Offset of mandrel: 9 mm, Steel 0.05% C-0.3% Mn

Fig. 5 Effect of r-value on reduction of wall thickness in stretch bending

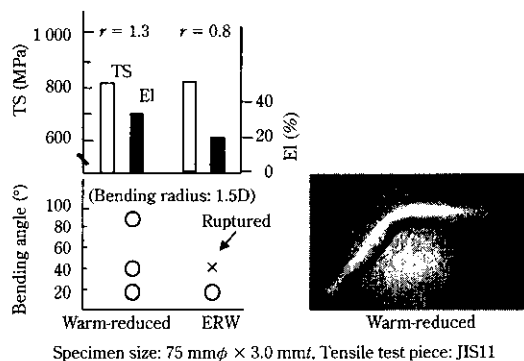


Fig. 6 Bending workability of TS780 MPa grade steel tube

5 考 察

2 章で述べた圧延集合の発達については, Taylor 法およびペンシルすべりを仮定して, 計算することが可能である。Taylor 法は圧延によって材料に導入されると同じ歪みが個々の結晶にも導入されとするとする仮定であり, 圧延の長手, 幅, 板厚方向を基準とした歪みと個々の結晶の結晶軸を基準とした歪みとの関係が Fig. 7 に示すように表される。ペンシルすべりは結晶のすべりが各 $\langle 111 \rangle$ を含む任意の面で生じるという仮定であり, Fig. 8 の結晶格子の図に示すように, たとえば, $[111]$ 軸を含む任意の面のすべりを $\{110\}$ 面と $\{112\}$ 面のすべりに分解して考えると, 分解したそれぞれの面のすべり量と結晶の歪み, 回転が図中の行列式で計算できる。この時, 各 $\langle 111 \rangle$ 軸に平行なすべり量は同じ図中の total shear displacement の各項で表される。そして, 結晶のひずみは, Fig. 7 に示したように圧延の歪みから計算できるので, 任意の圧延歪みに対して, この total shear displacement が最小になるようすることで, 各すべり量と結晶の回転を決定することができる。縮径圧延後の集合組織を計算した結果を Fig. 9 の TD 面の (100) 正極点図上に示す。縮径圧延により, 圧延方向に $\langle 110 \rangle$ 軸が平行で, 円周方向に $\langle 112 \rangle \sim \langle 114 \rangle \sim \langle 001 \rangle$ 軸が平行な集合組織が発達する。この集合組織は, 実験で測定された集合組織とほぼ同じのものであり, 2 章で述べた仮定の妥当性が確認できたと考えられる。また, 各方位の結晶の r 値についても, 引張り試験における材料の主歪みを引張り方向: ϵ_{11} , 板厚方向: ϵ_{33} , および, それらと垂直な円周方向: ϵ_{22} と仮定し, $\epsilon_{22} = q$, $\epsilon_{33} = -\epsilon_{11} - q$ とおいて, Fig. 7 および 8 の仮定で, total

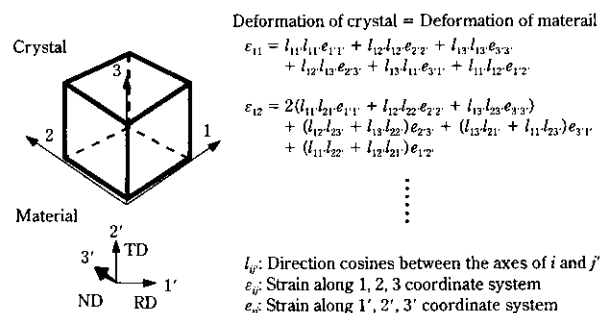


Fig. 7 Relationship of strain along the material coordinate system and the crystal coordinate system in the Taylor theory

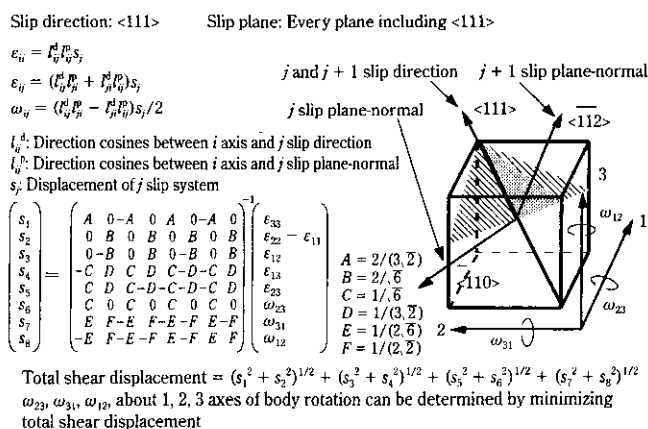


Fig. 8 Relationship of shear displacement and strain/rotation along crystal coordinate system in Pencil slip

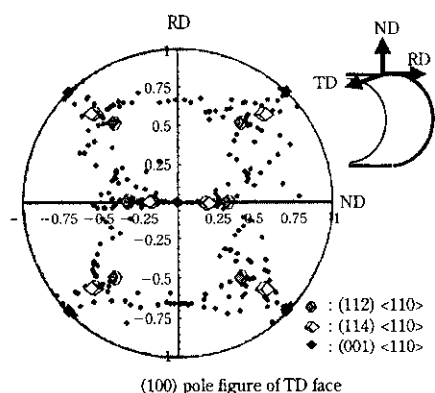
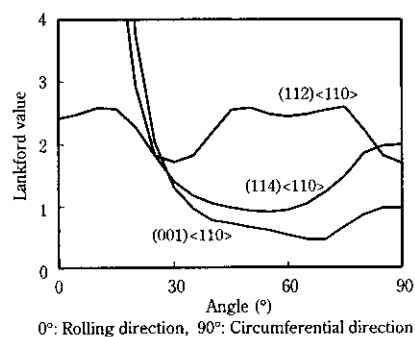


Fig. 9 Calculated rolling texture after reducing

shear displacement が最小となる q を求めることで計算できる。この方法によれば、縮径圧延で発達する圧延方向に $\langle 110 \rangle$ 軸が平行で、円周方向に $\langle 112 \rangle \sim \langle 114 \rangle \sim \langle 001 \rangle$ 軸が平行な結晶方位は、Fig. 10 に示すように、長手方向に極めて高い r 値を有していることが分かる。

6 結 言

当社は、次世代電縫鋼管製造技術としての HISTORY プロセスを開発した。このプロセスでは、世界で初めて電縫鋼管の温間縮径圧

Fig. 10 Calculated r -value of rolling texture after reducing

延を採用したことにより、以下のような新しい冶金学的な原理を見出した。開発された鋼管は、高強度と高加工性が要求される自動車部品用として優れた特性を有していると考えられる。

- (1) 温間縮径圧延によって発達する圧延方向に $\langle 110 \rangle$ 軸が平行で、円周方向に $\langle 112 \rangle \sim \langle 114 \rangle \sim \langle 001 \rangle$ 軸が平行な圧延集合組織により高 r 値が可能である。
- (2) この効果により、再結晶集合組織を利用した鋼板では不可能であった極低炭素 IF 鋼以外の鋼種でも 1.5 以上の高い r 値が得られる。
- (3) 高 r 値化によって、曲げ加工性が向上する。
- (4) 縮径圧延による圧延集合組織の発達、ペンシルすべりを仮定した Taylor 法でシミュレートすることが可能である。

参 考 文 献

- 1) ULSAS: "Ultra Light Steel Auto Suspension Electronic Report", (2000), [Lotus Engineering]
- 2) 日本塑性加工学会編:「チューブフォーミング」, (1998), 30, [コロナ社]
- 3) 日本鉄鋼協会 材料の組織と特性部会 再結晶・集合組織研究会編:「再結晶・集合組織とその組織制御への応用」, (1999), 228, [日本鉄鋼協会]
- 4) 長島晋一:「集合組織」, (1984), 117, [丸善]
- 5) 長島晋一:「集合組織」, (1984), 197, [丸善]
- 6) 幸田成康監訳:「レスリー鉄鋼材料学」, (1985), 15, [丸善]
- 7) 長島晋一:「集合組織」, (1984), 101-114, [丸善]
- 8) 日本鉄鋼協会 材料の組織と特性部会 再結晶・集合組織研究会編:「再結晶・集合組織とその組織制御への応用」, (1999), 232, [日本鉄鋼協会]