

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4772923号

(P4772923)

(45) 発行日 平成23年9月14日(2011.9.14)

(24) 登録日 平成23年7月1日(2011.7.1)

(51) Int.Cl.

F I

F O 2 M 55/02 (2006.01)

F O 2 M 55/02 3 3 O D

B 2 3 K 20/00 (2006.01)

B 2 3 K 20/00 3 1 O L

B 2 3 K 26/00 (2006.01)

F O 2 M 55/02 3 2 O W

B 2 3 K 26/12 (2006.01)

F O 2 M 55/02 3 2 O P

B 2 3 K 26/00 E

請求項の数 11 (全 33 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2010-525090 (P2010-525090)

(86) (22) 出願日 平成22年3月5日(2010.3.5)

(86) 国際出願番号 PCT/JP2010/001572

(87) 国際公開番号 W02010/103772

(87) 国際公開日 平成22年9月16日(2010.9.16)

審査請求日 平成22年7月23日(2010.7.23)

(31) 優先権主張番号 特願2009-59918 (P2009-59918)

(32) 優先日 平成21年3月12日(2009.3.12)

(33) 優先権主張国 日本国(JP)

早期審査対象出願

(73) 特許権者 000006655

新日本製鐵株式会社

東京都千代田区丸の内二丁目6番1号

(74) 代理人 100064908

弁理士 志賀 正武

(74) 代理人 100108578

弁理士 高橋 詔男

(74) 代理人 100106909

弁理士 棚井 澄雄

(74) 代理人 100129403

弁理士 増井 裕士

(72) 発明者 平野 弘二

東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新

日本製鐵株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 コモンレールの製造方法およびコモンレール

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

レール穴と、前記レール穴を囲む筒壁部に形成される分岐穴とが設けられるコモンレール本体と、前記分岐穴に連通する連通穴が形成されるホルダーとを備えるコモンレールの液相拡散結合による製造方法であって、前記コモンレール本体及び前記ホルダー用の素材は、

C : 0.01 ~ 0.3 質量%、

Si : 0.01 ~ 0.5 質量%、

Mn : 0.01 ~ 3.0 質量%、

B : 0.0003 ~ 0.01 質量%、

N : 0.001 ~ 0.01 質量%、

Al : 0.01 超 ~ 0.5 質量%、

Ti : 0.01 ~ 0.05 質量%、の成分を含有し、

P が 0.03 質量% 以下に制限され、

S が 0.01 質量% 以下に制限され、

O が 0.01 質量% 以下に制限され、

As, Sn, Sb, Pb, Zn の総和含有量が 0.015 質量% 以下に制限され、

残部が Fe 及び不可避免的不純物を含み、前記コモンレール本体及び前記ホルダー用の素材について、

$$TLB値 = (B\%) - [(N\%) / 1.3 - \{(Ti\%) / 3.4 + (Al\%) / 4.1\} \times (Al\%) \times 52] \cdots (1)$$

で示される、接合時に固溶Bを粒界に偏析させるのに有効な値を表すTLB値が0.001%以上であり、前記製造方法は、

前記コモンレール本体と前記ホルダーとの間に、Bを少なくとも1質量%以上含有するNi基またはFe基のインサートメタルを挿入する挿入工程と；

前記コモンレール本体と前記インサートメタルと前記ホルダーとを、接合温度1000～1300℃で30秒以上の間1MPa以上の応力を負荷して保持して接合する液相拡散接合工程と；

前記分岐穴の開口周辺部に位置する前記分岐穴の内面と前記レール穴の内面との境界周辺部の領域に、透明液体を存在させてパルスレーザービームを照射するレーザーピーニング処理工程と；

前記開口周辺部の表層を除去し、前記開口周辺部の疲労強度を高める表層除去工程と；を備え、

前記レーザーピーニング処理を施す領域と前記表層を除去する領域が、それぞれ前記レール穴の内面において、

分岐穴の中心からの距離 $\leq$ 分岐穴の直径 $\times 0.6 \dots (2)$

および

分岐穴の中心方向にレール穴の内面に線分を引いたときの該線分とレール穴の長手方向のなす角 $\leq 10^\circ \dots (2')$

を満足する領域を包含するものであって、

除去する表層の厚みが上記(2)式および上記(2')式を満足する領域において0.01mm～0.3mmであることを特徴とする、コモンレールの製造方法。

【請求項2】

前記開口周辺部の材料の表層の除去により、前記分岐穴の中心軸を含み前記レール穴の長手方向に沿った断面における前記分岐穴の前記開口部周辺部における形状線の曲率半径が、

分岐穴の直径 $\times 0.5 \leq$ 分岐穴の中心からの距離 $\leq$ 分岐穴の直径 $\times 0.6 \dots (3)$

を満足する領域の各点において、15 μ m以上となることを特徴とする請求項1に記載のコモンレールの製造方法。

【請求項3】

前記コモンレール本体と前記ホルダーとの少なくとも一方が、更に、

Ni：0.01～2.0質量%、

Co：0.01～1.0質量%、

Cu：0.01～1.0質量%、

W：0.01～2.0質量%

のうち1種以上を含有することを特徴とする、請求項1または請求項2に記載のコモンレールの製造方法。

【請求項4】

前記コモンレール本体と前記ホルダーとの少なくとも一方が、更に、

Zr：0.001～0.05質量%、

Nb：0.001～0.05質量%、

V：0.001～0.5質量%

のうち1種以上を含有することを特徴とする、請求項1～請求項3の何れか一項に記載のコモンレールの製造方法。

【請求項5】

前記コモンレール本体と前記ホルダーとの少なくとも一方が、更に、

Ca：0.0005～0.005質量%、

Mg：0.0005～0.005質量%、

Ba：0.0005～0.005質量%

のいずれかの硫化物形態制御元素、および

Y：0.001～0.05質量%、

C e : 0 . 0 0 1 ~ 0 . 0 5 質量 %、

L a : 0 . 0 0 1 ~ 0 . 0 5 質量 %

のいずれかの希土類元素のうち、1 種以上を含有することを特徴とする、請求項 1 ~ 請求項 4 の何れか一項に記載のコモンレールの製造方法。

【請求項 6】

前記開口周辺部の材料の表層の除去は、電解研磨もしくは流体研磨によって行うことを特徴とする、請求項 1 から 5 のいずれか 1 項に記載のコモンレールの製造方法。

【請求項 7】

前記パルスレーザービームのパルスエネルギーが 1 m J ~ 1 0 J であることを特徴とする、請求項 1 ~ 請求項 6 の何れか一項に記載のコモンレールの製造方法。

10

【請求項 8】

前記レーザーピーニング処理を施す前に、前記開口周辺部を面取り加工することを特徴とする、請求項 1 から 7 のいずれか 1 項に記載のコモンレールの製造方法。

【請求項 9】

前記面取り加工を施す領域が、前記 (2) 式および (2 ') 式を満足する領域を包含することを特徴とする、請求項 8 に記載のコモンレールの製造方法。

【請求項 1 0】

前記レーザーピーニング処理に用いる前記透明液体がアルコール、又は防錆剤の入った水であることを特徴とする、請求項 1 から 9 のいずれか 1 項に記載のコモンレールの製造方法。

20

【請求項 1 1】

レール穴と、前記レール穴を囲む筒壁部に形成される分岐穴とが設けられるコモンレール本体と、前記分岐穴に連通する連通穴が形成されるホルダーとを備え、請求項 1 に記載の液相拡散結合によるコモンレールの製造方法によって製造されたコモンレールであって、前記コモンレール本体及び前記ホルダー用の素材は、

C : 0 . 0 1 ~ 0 . 3 質量 %、

S i : 0 . 0 1 ~ 0 . 5 質量 %、

M n : 0 . 0 1 ~ 3 . 0 質量 %、

B : 0 . 0 0 0 3 ~ 0 . 0 1 質量 %、

N : 0 . 0 0 1 ~ 0 . 0 1 質量 %、

30

A l : 0 . 0 1 超 ~ 0 . 5 質量 %、

T i : 0 . 0 1 ~ 0 . 0 5 質量 %、の成分を含有し、

P が 0 . 0 3 質量 % 以下に制限され、

S が 0 . 0 1 質量 % 以下に制限され、

O が 0 . 0 1 質量 % 以下に制限され、

A s , S n , S b , P b , Z n の総和が 0 . 0 1 5 質量 % 以下に制限され、

残部が F e 及び不可避免的不純物を含み、前記コモンレール本体及び前記ホルダー用の素材について、

$$TLB\text{値} = (B\%) - [(N\%) / 1.3 - \{(Ti\%) / 3.4 + (Al\%) / 4.1\} \times (Al\%) \times 52] \cdots (1)$$

で示される、接合時に固溶 B を粒界に偏析させるのに有効な値を表す T L B 値が 0 . 0 0 1 % 以上であり、

40

前記開口周辺部における形状が、前記分岐穴の中心軸を含み前記レール穴の長手方向に沿った断面における前記分岐穴の前記開口部周辺部における形状線の曲率半径が、分岐穴の直径 $\times 0 . 5 \leq$ 分岐穴の中心からの距離 $\leq$ 分岐穴の直径 $\times 0 . 6 \cdots (3)$ を満足する領域の各点において、1 5 μ m 以上であり、

且つ、前記断面におけるレール穴の長手方向に垂直な圧縮応力値が - 2 0 0 M P a 以上であることを特徴とするコモンレール。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

50

本発明は、ディーゼルエンジンの蓄圧式燃料噴射システムにおけるコモンレールの製造方法およびその製造方法により部分強化されたコモンレールに関する。

本願は、2009年3月12日に、日本に出願された特願2009-059918号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

【背景技術】

【0002】

流体通路を持つ機械部品において、流体が通過する管の端や、径が極端に変化する部位においては応力集中が発生しやすく、流体の圧力変動の結果として生ずる疲労破壊が問題となることがある。

【0003】

コモンレールは、ディーゼルエンジンの蓄圧式燃料噴射システムにおいて燃料の軽油を圧送するポンプとインジェクターとの間に位置し、軽油を蓄圧するパイプ状の部品である。図1は、コモンレール1の断面の概略を示している。レール穴5がコモンレール1の主なるパイプであり、軽油を蓄圧する役割を有する。レール穴5には垂直に開口する分岐穴6が複数個配設され、分岐穴6を通して各インジェクターに軽油が圧送される。レール穴5の内径 d_1 は10mm程度、分岐穴6の内径 d_2 は1mm程度である。エンジンの作動に伴い、軽油が周期的に圧送され、コモンレール1内の軽油の圧力が周期的に変動する。この際、図1のレール穴5および分岐穴6には、周期的に周方向の引張応力に変動が生じる。図2は、分岐穴6の開口周辺部である分岐穴6の内面とレール穴5の内面との境界周辺部を拡大して示している。分岐穴6開口周辺部の中でも特に、分岐穴6の、レール穴5の長手方向に平行となる直径の両端近傍7では、両穴5、6の引張応力が合成される。このため、他の部分よりも大きな引張応力が発生し、内圧の変動により疲労破壊しやすいという問題がある。内圧の変動に対する疲労強度（内圧疲労強度）を向上させれば、燃料の高圧噴射が可能となり、排気ガスのクリーン化や燃費の向上につながるため、疲労強度向上が望まれている。

【0004】

従来、このような疲労強度の向上に向けたアプローチとしては、一般的に高強度の鋼材を用いることでコモンレールの疲労強度を高める方法が採られている。しかしながら、このような方法においては、素材の高強度化による成形性や加工性の低下、高性能化に伴うコストの増大の問題が発生している。そのため例えば、特許文献1には、従来の鍛造一体成形及び機械加工によるコモンレールの製造方法に代替する製造方法として、液相拡散接合による溶接コモンレールに関する発明が開示されている。さらに特許文献2には、接合時の制御冷却が不要である液相拡散接合に適した鋼材に関する発明が開示されている。しかし、これらの特許文献に開示されている鋼材は、引張強度が600MPa程度の鋼材であり、近年指向されている高燃費性能を実現するための1500気圧やさらには2000気圧を超えるコモンレールに使用するには強度不足である。また、熱処理等により鋼材強度を著しく向上させることは可能であるが、その場合には加工が困難であり、著しい生産コストの増大を招く。しかも、最大主応力部でMnS、 Al_2O_3 、CaO等の介在物や酸化物が加工の結果表面に露呈した場合は、内圧印加時の疲労破壊の起点となり、高強度コモンレールの安定生産を著しく阻害するという課題は解決できない。

【0005】

また、鋼材の強度を上げるというオーソドックスな方法のみならず、例えばコモンレールの強化について、特許文献3や特許文献4に開示されているように、流体研磨やコイニング加工の手法を用いて分岐穴開口端部のエッジを面取りして、応力集中を緩和する方法が知られている。また、圧縮応力付与による疲労強度向上も検討されている。近年開発が進められているレーザピーニングは、金属物体の表面に液体等の透明媒質を置いた状態で、その表面へ高いピークパワー密度を持つパルスレーザビームを照射し、そこから発生するプラズマの膨張反力を利用して、金属物体の表面近傍に非接触処理で残留圧縮応力を付与する技術であり、例えば特許文献5にその方法が開示されている。レーザビームは、コモンレールのレール穴内面、分岐穴内面等の狭隘部へも伝送可能であり、レーザピーニン

10

20

30

40

50

グはコモンレールの分岐穴開口部近傍へ高い圧縮応力を付与するための現状唯一の方法である。そこで、特許文献6に開示されたように、レーザピーニングをコモンレールへ適用するための効果的な方法について検討されている。

【0006】

特許文献6に開示された方法は、コモンレールの疲労強度を大きく向上させるが、装置、効果の観点から以下のような問題があった。レーザピーニング処理においてサンプル表面にレーザビームを照射すると、照射スポット部表層近傍が溶融・再凝固することにより、そのスポット部の表層近傍の圧縮応力が減少することが多い。この問題を回避するために、レーザビームを吸収する吸収材料層を設置する方法が知られているが、この吸収材料層をコモンレールの分岐穴開口部へ設置するには複雑な装置を必要とするため、同工程の省略がコストや生産性の観点から望まれる。

10

【0007】

特許文献5には、熱影響部を除去するための方法として、レーザ光照射面とその近傍に対向して設置した電極間にレーザで制御した放電を生じさせる方法や、レーザ照射面に接する透明液体として電解液を用い、レーザ照射中に照射面とその近傍に対向して設置した電極間で電解研磨を行う方法が開示されている。しかし、これらの方法は、レーザ照射の影響が大きいために、所望の加工形状を精度良く安定的に得ることが難しく、コモンレールの工業生産には適さない。また、特許文献6に開示されているように、パルスレーザのビームスポットの重畳面積割合を高めることで、上述の圧縮応力の減少の問題は緩和される。しかしながら、コモンレールの疲労強度の向上効果をさらに引き上げるためには、表層近傍の圧縮応力を最大限高める必要があり、別のアプローチが望まれている。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【特許文献1】特開2007-40244号公報

【特許文献2】特開2004-83980号公報

【特許文献3】特開2004-204714号公報

【特許文献4】特開2004-27968号公報

【特許文献5】日本国特許第3373638号公報

【特許文献6】特開2006-322446号公報

30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

本発明は、上記の問題を解決し、応力集中により疲労破壊の起点になりやすいコモンレールの分岐穴の開口部近傍をレーザピーニング処理にて部分的に強化することにより、安価な鋼材を用いて優れた疲労強度を持つコモンレールの製造方法およびコモンレールを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0010】

本発明は、上記の課題を解決するために以下の手段を採用した。

40

(1) 本発明の第1の態様は、レール穴と、前記レール穴を囲む筒壁部に形成される分岐穴とが設けられるコモンレール本体と、前記分岐穴に連通する連通穴が形成されるホルダーとを備えるコモンレールの液相拡散結合による製造方法である。前記コモンレール本体及び前記ホルダー用の素材は、C：0.01～0.3質量%、Si：0.01～0.5質量%、Mn：0.01～3.0質量%、B：0.0003～0.01質量%、N：0.001～0.01質量%、Al：0.01超～0.5質量%、Ti：0.01～0.05質量%を含有し、Pが0.03質量%以下に制限され、Sが0.01質量%以下に制限され、Oが0.01質量%以下に制限され、As、Sn、Sb、Pb、Znの総和含有量が0.015質量%以下に制限され、残部がFe及び不可避免の不純物を含み、前記コモンレール本体及び前記ホルダー用の素材について、

50

$TLB値 = (B\%) - [(N\%) / 1.3 - \{(Ti\%) / 3.4 + (Al\%) / 4.1\} \times (Al\%) \times 52] \cdot \cdot \cdot (1)$

で示される、接合時に固溶Bを粒界に偏析させるのに有効な値を表すTLB値が0.01%以上である。このコモンレールの製造方法は、前記コモンレール本体と前記ホルダーとの間に、Bを少なくとも1質量%以上含有するNi基またはFe基のインサートメタルを挿入する挿入工程と；前記コモンレール本体と前記インサートメタルと前記ホルダーとを、接合温度1000～1300℃で30秒以上の間1MPa以上の応力を負荷して保持して接合する液相拡散接合工程と；前記分岐穴の開口周辺部に位置する前記分岐穴の内面と前記レール穴の内面との境界周辺部の領域に、透明液体を存在させてパルスレーザービームを照射するレーザーピーニング処理工程と；前記開口周辺部の表層を除去し、前記開口周辺部の疲労強度を高める表層除去工程と；を備え、

10

前記レーザーピーニング処理を施す領域と前記表層を除去する領域が、それぞれ前記レール穴の内面において、分岐穴の中心からの距離 $\leq$ 分岐穴の直径 $\times 0.6 \cdot \cdot \cdot (2)$ および分岐穴の中心方向にレール穴の内面に線分を引いたときの該線分とレール穴の長手方向のなす角 $\leq 10^\circ \cdot \cdot \cdot (2')$ を満足する領域を包含するものであって、除去する表層の厚みが上記(2)式および上記(2')式を満足する領域において0.01mm～0.3mmである。

(2) 上記(1)に記載のコモンレールの製造方法では、前記開口周辺部の材料の表層の除去により、前記分岐穴の中心軸を含み前記レール穴の長手方向に沿った断面における前記分岐穴の前記開口部周辺部における形状線の曲率半径が、分岐穴の直径 $\times 0.5 \leq$ 分岐穴の中心からの距離 $\leq$ 分岐穴の直径 $\times 0.6 \cdot \cdot \cdot (3)$ を満足する領域の各点において、15 μ m以上となってもよい。

20

【0011】

(3) 上記(1)または(2)に記載のコモンレールの製造方法では、前記コモンレール本体と前記ホルダーとの少なくとも一方が、更に、Ni：0.01～2.0質量%、Co：0.01～1.0質量%、Cu：0.01～1.0質量%、W：0.01～2.0質量%のうち1種以上を含有してもよい。

【0012】

(4) 上記(1)～(3)の何れか一項に記載のコモンレールの製造方法では、前記コモンレール本体と前記ホルダーとの少なくとも一方が、更に、Zr：0.001～0.05質量%、Nb：0.001～0.05質量%、V：0.001～0.5質量%のうち1種以上を含有してもよい。

30

【0013】

(5) 上記(1)～(4)の何れか一項に記載のコモンレールの製造方法では、前記コモンレール本体と前記ホルダーとの少なくとも一方が、更に、Ca：0.0005～0.005質量%、Mg：0.0005～0.005質量%、Ba：0.0005～0.005質量%のいずれかの硫化物形態制御元素、およびY：0.001～0.05質量%、Ce：0.001～0.05質量%、La：0.001～0.05質量%のいずれかの希土類元素のうち、1種以上を含有してもよい。

【0014】

(6) 上記(1)～(5)のいずれか1項に記載のコモンレールの製造方法では、前記開口周辺部の材料の表層の除去は、電解研磨もしくは流体研磨によって行ってもよい。

40

【0015】

(7) 上記(1)～(6)のいずれか1項に記載のコモンレールの製造方法では、前記パルスレーザービームのパルスエネルギーが1mJ～10Jであってもよい。

【0018】

(8) 上記(1)～(7)のいずれか1項に記載のコモンレールの製造方法では、前記レーザーピーニング処理を施す前に、前記開口周辺部を面取り加工してもよい。

【0019】

(9) 上記(8)に記載のコモンレールの製造方法では、前記面取り加工を施す領域が、前記(2)式および(2')式を満足する領域を包含してもよい。

50

【0020】

(10) 上記(1)～(9)のいずれか1項に記載のコモンレールの製造方法では、前記レーザピーニング処理に用いる透明液体がアルコール又は防錆剤の入った水であってもよい。

【0021】

(11) 本発明の第2の態様は、レール穴と、前記レール穴を囲む筒壁部に形成される分岐穴とが設けられるコモンレール本体と、前記分岐穴に連通する連通穴が形成されるホルダーとを備え、上記(1)に記載の液相拡散結合によるコモンレールの製造方法によって製造されたコモンレールである。前記コモンレール本体及び前記ホルダー用の素材は、C：0.01～0.3質量%、Si：0.01～0.5質量%、Mn：0.01～3.0質量%、B：0.0003～0.01質量%、N：0.001～0.01質量%、Al：0.01超～0.5質量%、Ti：0.01～0.05質量%の成分を含有し、Pが0.03質量%以下に制限され、Sが0.01質量%以下に制限され、Oが0.01質量%以下に制限され、As、Sn、Sb、Pb、Znの総和含有量が0.015質量%以下に制限され、残部がFe及び不可避免的不純物を含み、前記コモンレール本体及び前記ホルダー用の素材について、

$$TLB値 = (B\%) - [(N\%) / 1.3 - \{(Ti\%) / 3.4 + (Al\%) / 4.1\} \times (Al\%) \times 52] \cdots (1)$$

で示される、接合時に固溶Bを粒界に偏析させるのに有効な値を表すTLB値が0.001%以上であり、前記開口周辺部における形状が、前記分岐穴の中心軸を含み前記レール穴の長手方向に沿った断面における前記分岐穴の前記開口部周辺部における形状線の曲率半径が、

$$\text{分岐穴の直径} \times 0.5 \leq \text{分岐穴の中心からの距離} \leq \text{分岐穴の直径} \times 0.6 \cdots (3)$$

を満足する領域の各点において、15μm以上となり、且つ、前記断面におけるレール穴の長手方向に垂直な圧縮応力値が-200MPa以上である。

【発明の効果】

【0022】

上記(1)～(11)に記載のコモンレールの製造方法によれば、拡散接合により母材を加工が容易な形状のブロック単位に分けてコモンレールを製造できるので、製造コストを安価にすることができる。また、コモンレールで疲労強度が問題となる分岐穴のレール穴側開口部周辺において、表面から高い圧縮応力が導入できると同時に、分岐穴開口部形状の改善により応力集中が緩和される。その結果、疲労強度を大きく向上させることができる。更に、上記(12)に記載のコモンレールによれば、安価な鋼材を使用して燃料の高圧噴射を行うことが可能となり、排気ガスのクリーン化や燃費の向上が得られ、産業上有益な効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【0023】

【図1】コモンレールのレール穴長手方向の断面図である。

【図2】コモンレールの分岐穴開口周辺部の平面図である。

【図3】コモンレールの製造過程を示す斜視図である。

【図4】TLB値と、液相拡散接合継手の接合部と母材部（接合部から5mm離れた部位におけるVickers硬さ測定値）の硬度差の絶対値の関係を示す図である。

【図5】TLB値と液相拡散接合継手の引張り強さの関係を示す図である。

【図6】コモンレールの分岐穴開口周辺部を示す断面図である。

【図7】レーザピーニング処理した試験片の残留応力を示すグラフである。

【図8】レーザビーム照射装置を示す平面図である。

【図9】図8の正面図である。

【図10】レーザビーム照射方法を示す平面図である。

【図11】分岐穴開口周辺部を示す斜視図である。

【図12】分岐穴開口周辺部のレーザ照射方法を示す説明図である。

【図13】分岐穴開口周辺部の異なるレーザ照射方法を示す説明図である。

【図 1 4】分岐穴開口周辺部の材料除去前後の状態を示す断面図である。

【図 1 5】分岐穴開口周辺部の断面形状を示す図である。

【図 1 6】分岐穴開口周辺部のレーザ処理領域を示す斜視図である。

【図 1 7】分岐穴開口周辺部の面取り加工を行った場合の材料除去後の状態を示す断面図である。

【図 1 8 A】コモンレールの試験片を示す平面図である。

【図 1 8 B】同コモンレールの試験片を示す正面図である。

【図 1 9】分岐穴開口周辺部に対する面取り加工を示す断面図である。

【図 2 0】レーザ加工装置の照射ヘッド部分を示す断面図である。

【図 2 1】分岐穴開口周辺部に対するレーザ照射方法を示す断面図である。

【図 2 2】分岐穴開口周辺部に対する電解研磨を示す断面図である。

【発明を実施するための形態】

【0024】

本発明者らは上記課題を解決するために検討を行った。その結果、液相拡散接合に適した特定の成分を有する高強度鋼材を、加工が容易な形状のブロック単位に分けて製造後、液相拡散接合し、さらに、疲労強度が問題となる分岐穴のレール穴側開口部周辺に対してレーザピーニング処理による圧縮応力導入後に電解研磨等によりレーザピーニング処理した部分を含む領域の材料を除去すれば、安価な鋼材を用いてコモンレールの疲労強度を大きく向上させられることが判った。ここで、液相拡散接合を用いて分岐穴の先に配管を固定するホルダーを接合することは、高強度鋼材の加工を容易にして工程コストを下げる。また、高強度材で致命的な、最大主応力部（分岐穴開口部位）に介在物または酸化物が露出する際に生じる疲労強度の低下を、コモンレール強化用に調整したレーザピーニングによって補完する。従って、従来にない高圧に耐えるコモンレールの製造を安価に実現できる。

【0025】

以下に、本発明の好ましい実施形態に係るコモンレールの製造方法およびコモンレールについて、図面に基づいて説明する。なお、本明細書および図面において、実質的に同一の機能構成を有する要素においては、同一の符号を付することにより重複説明を省略する。

【0026】

図 1 はコモンレール 1 の断面の概略を示している。筒壁部 2 内に形成されるレール穴 5 がコモンレール 1 の主たるパイプであり、軽油を蓄圧する役割を有する。レール穴 5 には、垂直に開口する分岐穴 6 が複数個配設されている。

【0027】

本発明では、コモンレール 1 を安価に製造するために、液相拡散接合による溶接を行う。具体的には、まず、図 3 に示すように、長手方向に貫通する管路 13 を有するコモンレール本体 11 と円筒形のホルダー 12 とで形成されるリング状の接合面間に、液相拡散接合用の非晶質合金箔（インサートメタル）15 を介在させて、支管 14 に円筒形のホルダー 12 を連通させる。そして、抵抗溶接等により、合金箔 15 とコモンレール本体 11 とホルダー 12 とを熔融圧接して、液相拡散接合を行い、継ぎ手部を形成する。なお、図 3 は、便宜上、1 つの支管 14 のみを示しているが、通常は、エンジン燃焼室の複数の噴射ノズルに対応する複数の支管 14 を備えている。そして、ホルダー 12 は、これらの支管 14 と、エンジン燃焼室の噴射ノズルまで燃料を圧送するための配管とを接続するために、コモンレール本体 11 の支管 14 に対応して複数設けられている。このように形成されたコモンレール 1 において、図 3 の管路 13 が図 1 のレール穴 5 に対応し、図 3 の支管 14 の内部が図 1 の分岐穴 6 に対応する。液相拡散接合用の合金箔 15 には、B を少なくとも 1 % 以上含有する Ni 基または Fe 基のインサートメタルを用いる。また、コモンレール本体 11 とホルダー 12 との液相拡散接合は、接合温度 1000 ~ 1300 °C で 30 秒以上の間 1 MPa 以上の応力を負荷して保持することによって行われる。

【0028】

本実施形態では、液相拡散接合後の制御冷却を要さずとも十分な低温変態組織、すなわち材料の必要な部位あるいは全体にわたってベイナイトもしくはマルテンサイト変態を誘起させ得る焼き入れ性の高い材料を、予め継手設計の段階から選択する。即ち、液相拡散接合で形成される等温凝固継手部位においても十分に均質な組織を得られる合金組成の鋼材がコモンレール 1 の素材として用いられる。具体的には、上記した例で言えば、コモンレール本体 1 1 とホルダー 1 2 の素材として、以下に説明する液相拡散接合用鋼を用いる。以下に、液相拡散接合用鋼の化学成分について、好ましい含有量の範囲について説明する。なお、以下に述べる化学成分の含有量はいずれも質量％で示される。

【0029】

C は、鋼の焼き入れ性と強度を制御する最も基本的な元素である。含有量が 0.01% 未満の場合では強度が確保できず、0.3% を超える場合では鋼材の強度が向上するものの、継手の靱性が確保できない。従って、C の含有量は 0.01~0.3% の範囲に規定される。この範囲の含有量であれば、鋼材の組織制御は接合まま材でも可能である。ただし、炭素の効果を工業的に安定して得るためには、含有量が 0.05~0.3% であることが好ましい。

10

【0030】

Si は、鋼材の脱酸元素であり、通常 Mn とともに鋼の酸素濃度を低減する目的で添加される。同時に、Si は粒内強化に必要な元素であるため、その不足は鋼材の強度を低下させる。従って、本発明においても脱酸と粒内強化を主目的として所定量の Si を含有させる。Si の含有量が 0.01% 以上であれば上述の効果を発揮し、0.5% を超える場合には鋼材そのものの脆化を招く場合がある。従って、Si の含有量は 0.01~0.5% の範囲に規定される。また、液相拡散接合継手において SiO_2 を含む複合酸化物、例えば SiO_2-MnO 、 SiO_2-FeO 等が生成する虞があることから、Si の含有量は 0.01~0.3% であることが好ましい。

20

【0031】

Mn は、Si とともに脱酸にも効用があるが、鋼中に添加することで鋼材の焼き入れ性を高め、強度向上に寄与する。Mn の含有量が 0.01% 以上の場合、上述の効果を発現するが、3.0% を超えると粗大な MnO 系酸化物を晶出し、かえって液相拡散接合継手の靱性を低下させる場合がある。従って、Mn の含有量は 0.01~3.0% の範囲に規定される。Mn の含有量についても前記 Si と同様に SiO_2-MnO 生成の抑制の観点からは 0.01~2.0% であることが好ましい。

30

【0032】

B は、微量で鋼の焼き入れ性を高めるのに極めて効果があるが、その含有量が 0.0003% 未満では焼き入れ性向上効果は小さい。一方、B の含有量が 0.01% を超える場合、炭硼化物を形成して、かえって液相拡散接合継手の焼き入れ性を低下させて継手強度が低下する。従って、B の含有量は 0.0003~0.01% の範囲に規定される。一方で B は粒界偏析が著しく、接合後の冷却条件によっては粒界のみに限って脆化を招く場合があるため、その含有量が 0.0003~0.005% であると好ましい。

【0033】

Ti は、B よりも N と結合する力が強く、B より優先的に N と結合する。したがって、Ti は焼き入れ性に有効な固溶 B を確保するに重要な元素であるが、含有量が 0.01% 未満の場合にはその効果は小さい。一方、Ti の含有量が 0.05% を超える場合には、その効果は飽和するのみならず、粗大な Ti 系炭窒化物が多数析出して靱性を低下させることになる。したがって、Ti の含有量は、0.01~0.05% の範囲に規定される。Ti も硼化物を形成する元素であるため、含有量の上限値は可能であれば低く抑制すべきであり、好ましくは 0.01~0.03% である。

40

【0034】

N は、本実施形態において、上述の B の効果を高めるためには低く抑制することが望ましい元素であるが、Al や Ti を添加している場合はこれらと結合して AlN、TiN などの窒化物を析出し、結晶粒を微細化し鋼の靱性を高めるのに有効である。N の含有量が

50

0.001%未満の場合、その効果は小さい。また、Nの含有量が0.01%を超える場合、Bと結合してBNを生成する傾向が強くなり、AlまたはTiを大量に添加しないと固溶Bを獲得できない。すなわち、後で説明するTLB値を安定して0.001以上とすることが困難となるので、Nの含有量は0.001~0.01%の範囲に規定される。なお、通常の製鋼工程でNを安定的に0.008%以上含有させることは工程上のコストが上昇するため、Nの含有量が0.001~0.008%であることが好ましい。

【0035】

Alは、Nと結合して微細なAlNを析出して結晶粒を微細化するとともに、Bを焼き入れ性に有効な固溶Bとして鋼中に確保するに重要な元素である。しかしながら、このような効果を発揮させるためにはAlの含有量が0.01%超であることが好ましい。しかし、Alの含有量が0.5%を超える場合、AlNが粗大化して鋼の靱性を低下させる。したがって、Alの含有量は0.01超~0.5%の範囲に規定される。ただし、AlはOとの親和力も高く、大量添加時には製鋼工程によっては粗大酸化物クラスターを生成し、継手の靱性を低下させる場合がある。従って、Alの含有量は0.01%超~0.3%であることが好ましい。

【0036】

なお、本鋼のような高強度鋼で靱性を高めるには、粒界への不純物濃化は極力回避する必要がある。PおよびSは、この目的のためにそれぞれ0.03%以下および0.01%以下の含有量に制限される。また、鋼を清浄なものとして高い靱性を確保するために、Oの含有量は0.01%以下に制限される。尚、P、S、Oの含有量は可能な限り少ないことが好ましいが、コスト面を考慮して、下限値を0.0001%に設定してもよい。さらに、靱性の向上を確実に達成するために、粒界偏析元素であるAs、Sn、Sb、Pb、Znの含有量の総和は0.015%以下に制限される。

【0037】

以上の化学成分を含有する液相拡散接合用鋼は、Feを主成分とする残部が本発明の特性を阻害しない範囲で、製造過程等で不可避免的に混入する不純物を含有してもよい。本実施形態に係る液相拡散接合用鋼は、少なくとも、Tiを0.01~0.05%、Nを0.001~0.01%、Alを0.01超~0.5%含有するため、鋼中において、NがAlとTiの両元素によって固定される。

【0038】

以上の基本的な化学成分の制限に加えて、コモンレール用の鋼材として要求される、高圧下での繰返し疲労強度を得るため、液相拡散接合後の冷却時の条件で低温変態を生じ、結果として強度が600MPa以上で、継手部位の強度分布が均一で、Vickers硬さにて、接合部中心と接合線から5mm離れた位置における硬さの差の絶対値が100以下である事が、非常に有効である。即ち、上記した例で言えば、液相拡散接合によって接合されたコモンレール本体11とホルダー12の接合部における硬さと、この接合部から5mm離れた接合部両側位置における硬さとの差が、Vickers硬さで±100以内となるように、接合部の硬さ均一性に優れた液相拡散接合用鋼材を用いることが有効である。その理由は、レーザピーニング処理したコモンレールの最大主応力部は同処理によって圧縮応力を印加されるが、その応力を鋼材自体の内部において、応力分布の総和に変化が無いように誘起される引っ張り応力の作用する部位も同時に導入され、引っ張り応力が生じる部位に接合部が遭遇した場合、接合部継手の強度差が大きい場合に、継手からの破壊が発生することがあることを、本発明者らは研究の結果、見いだしたからである。すなわち、接合部の硬さ均一性に優れた液相拡散接合用鋼材を用いることが本発明において必須である。そのためには、上述の範囲にAl、Ti、N、Bが含有されているだけでなく、AlとTiが鋼中Nを完全に固定し、その結果BがNに固定されず、原子状態でγ結晶粒界に偏析して粒界からのフェライト変態を抑制することが必要である。すなわち、下記の式(1)で示されるTLB値が0.001%以上となる化学成分範囲にさらに限定されなければならないことが、発明者らの研究で明らかになった。TLB値が0.001%未満では上記した硬さの差が100以下となる接合部を形成することができない。

$$TLB=(B\%)-[(N\%)/1.3-\{(Ti\%)/3.4+(Al\%)/4.1\}\times(Al\%)\times 52]\cdots(1)$$

【0039】

上記の式(1)は、コモンレールを液相拡散接合で組み立てる場合に、接合部を含む継手における材質が均一、特に硬度の変化が少ないことが必要であるという、本発明者らの研究の結果判明した新たな知見に基づいて決定されている。継手近傍組織の均一性が獲得できなければ、内圧疲労を負荷された場合のコモンレールの液相拡散接合継手に応力集中が生起し、継手部位から破壊が生じる。すると、本発明の中核となる、コモンレールの最大集応力部である分岐穴周辺をレーザピーニングで強化する効果が無意味になることとなり、本発明の効果そのものが実現できない。そこで、特にBを1%以上含有する液相拡散接合用合金箔を用いる場合は、Bによる溶接継手の冷却時の組織形成過程に着目し、固溶Bを粒界に偏析させて粒界からの核発生を抑制して、継手部位における焼き入れ性の差、ひいては強度の分布が均一となるような技術を導入する必要がある。従って、本実施形態においては、Bと結合しやすいNを、TiおよびAlで固定し、固溶B量を十分に獲得するための化学成分を規制する。添加B量に対して固溶N量が十分に多い場合は溶解度積に依りてBNが生成してしまう。そこで、Tiが固定できるN量として原子数比の逆数3.4を、さらにAlが固定できるN量として、AlとNの親和力を別途実験的に求め、本発明鋼に特有の1/4.1を設定し、さらにAlとTiの相互作用を考慮してAlの濃度と化学ポテンシャルを実験的に決定した係数52を共に乗じて、これをBと結合する相当N量から減じた上で、全固定N量として $[(N\%)/1.3-\{(Ti\%)/3.4+(Al\%)/4.1\}\times(Al\%)\times 52]$ を決定した。最後に固定されたNはBと結合しないとの仮定の下、(1)式を本発明鋼にのみ有効な継手の有効B量の観点からTLB値として決定した。この値は、いわば仮想的なBの効果の評価式となっている。このようにして決定したTLB値は理論的な想定と実験的な係数を混在させてあるため、その係数と継手の組織均一性が確保できるTLB値を以下の実験で決定した。

【0040】

実験室規模真空溶解、あるいは実機鋼板製造設備において、100kg、300kg、2ton、10ton、100ton、300tonの真空溶解、あるいは通常の高炉一転炉一炉外精錬一脱ガス/微量元素添加一連続铸造一熱間圧延によって製造した、上記の化学成分範囲鋼材を、圧延方向と平行な方向から10mmφあるいは20mm角で長さ50mmの簡易小型試験片に加工した。試験片の端面を $R_{max}<100\mu m$ に研削加工して脱脂洗浄し、その端面を2つ対向させて接合試験片対となし、150kWの出力を有する高周波誘導加熱装置を備えた引っ張り/圧縮試験機を用いて液相拡散接合を行った。すなわち、接合面間には液相拡散接合を1000~1300℃において実現可能なNi基-B系、Fe基-B系の、実質的に体積分率で50%以上が非晶質である厚み20~50μmのアモルファス箔を介在させ、必要な接合温度まで試験片全体を加熱し、30秒から60分の間、1~20MPaの応力下で液相拡散接合し、接合後放冷した。

【0041】

この時得られた丸棒接合試験からは平行部直径6mmφの丸棒引っ張り試験片を採取し、全て室温で引っ張り試験を実施して600MPa以上の強度があることを確認した試験片に、角棒接合試験片からは接合面に垂直な断面の試験材中央位置における断面を切断加工で露出し、その断面において接合部中心を組織から特定して基準位置となし、0.1mm間隔で10mm離れた母材まで100gの荷重で連続して硬さを測定した。上記実験条件内では全て接合部中心が最高硬さに近い値を示した。ここから母材へと次第に硬さは減少する傾向を示した。ただし、接合時間が最も長い60分の場合でも接合部から5mm離れた位置における硬さは、その後10mm離れた位置まで測定しても殆ど変化しなかったため、5mm離れた位置を母材の代表硬さと考え、実質的には接合部の最高硬さと5mm離れた位置の硬さの差の絶対値をもって液相拡散接合継手の硬さ分布すなわち強度の均一性として評価した。工業的にはこの値が100以上変化する場合に継手特性が不均一となり、レーザピーニング処理したコモンレールの疲労強度に、部品として影響が出る。

【0042】

この硬度差を ΔH_v (100g)と表記し、図4に上記の粒界偏析BパラメータTLB値との関係を示した。TLB値が0.001以上であれば ΔH_v は100以下となり、継手の均質性が保たれていることが明らかである。図4の相関性が顕著になるように種々溶解した材料の化学成分から、TLBパラメータ式の各係数を実験的に決定した。すなわち、パラメータTLB値を管理することで、上記の化学成分範囲を満足する鋼材に、液相拡散接合後の非調質継手において、継手部位の強度均一性、具体的には硬度差 ΔH_v 値が100以下である継手を得られることが可能となった。また、このようにして得られた液相拡散接合継手は強度の均一性と同時に、継手が脆性破壊しないように、0℃で47J以上の靱性を獲得する必要があるが、得られた角棒試験片から2mmUノッチシャルピー衝撃片を採取し、JISZ2202に記載の方法に従って、継手部位にノッチを加工して吸収エネルギーを測定したところ、TLB値が0.001以上であれば47Jを超えることが判った。

10

【0043】

さらに、図5はTLB値と引張り強さの関係を示す図である。TLB値が0.001%以上であれば、本発明に規定した化学成分を有する鋼は、引張り強さが600MPa以上となることが判る。引張り試験はJISZ2241に準拠して実施した。

【0044】

本発明の実施形態に係るコモンレールの製造方法では、以上で説明してきた成分を有する鋼材で作製したコモンレール本体11(図3)と円筒形のホルダー12とを液相拡散接合により溶接した後、疲労強度が問題となるコモンレール本体に形成される分岐穴6(図1)のレール穴5側開口部周辺に対し、レーザピーニング処理を施し圧縮応力を導入した後、さらにその開口部周辺の材料を電解研磨等により除去する。

20

【0045】

図6は、コモンレール1において強化すべき分岐穴6の開口周辺部の断面の拡大図である。本発明における部分強化方法の第一の方策においては、分岐穴6の貫通加工後、図6中の角egfがほぼ垂直に残っている状態で、線分g1~gで示した領域(開口周辺部23に位置するレール穴5の内面)にレーザピーニング処理を施す。その後、開口周辺部23付近にある材料を除去し、曲線g1g2g3の加工形状を形成する。これにより、疲労強度が高められる。なお、本願において分岐穴6の開口周辺部23とは、レール穴内面22において各分岐穴6の中心からの距離が分岐穴6の直径d2(図1参照)の5倍以内となる領域と、分岐穴内面21においてレール穴内面22の開口部からの距離がレール穴5の直径d1(図1参照)の0.3倍以内となる領域と、それらに挟まれた分岐穴6とレール穴5の接続面の事を言う。

30

【0046】

まず、レーザピーニング処理方法について説明する。レーザピーニング処理には、(i)高いピークパワー密度を持つレーザビームを用いること、(ii)照射表面近傍に水等の透明媒体を設置すること、が必要となる。本実施形態においては、(i)の条件を満たすために、照射表面におけるピークパワー密度を1~100TW/m²に設定する。このピークパワー密度を得るためには、レーザ装置は、パルス時間幅が10ps~100ns程度、パルスエネルギーが0.1mJ~100J程度で間欠的に発振するパルスレーザを用いることが好ましい。このようなレーザ装置としては例えばNd:YAGレーザが挙げられるが、上記条件(i)を満たすレーザ装置であればよい。上記(i)および(ii)の条件が満たされると、高いピークパワー密度をもつパルスレーザビームの照射により発生したプラズマが、照射表面の近傍に存在する水等の透明媒体により膨張が抑えられ、プラズマの圧力が高められる。高圧となったプラズマの反力によって、照射点近傍に塑性変形を与え、残留圧縮応力を付与することができる。

40

【0047】

ここで、本発明の製造方法により疲労強度が向上する理由について説明するために、レーザピーニング処理による応力導入特性について以下に述べる。図7は、引張強度が1000MPaの鋼材を用いて作製した平板形状の試験片に対してレーザピーニング処理を行

50

い、X線残留応力測定装置を用いて残留応力の深さ方向分布を測定した結果を示す。深さ方向の応力分布の測定は、電解研磨により逐次鋼材を除去しながら行った。レーザピーニング処理には、図8（平面図）及び図9（正面図）に示した装置を用い、水槽35中に浸漬した試験片37に、レーザビーム発振装置31からレーザビーム32を照射した。レーザビームは、水中透過性のよいNd:YAGレーザの第二高調波（波長：532nm）を用いた。レーザビーム32は焦点距離100mmの凸レンズからなる集光レンズ33で集光し、光学窓34を介して試験片37に照射される。試験片37上でのビームスポットの形状は直径0.8mmの円形に設定した。レーザのパルスエネルギーは200mJ、ピークパワー密度は40TW/m²に設定した。パルス時間幅は10ns、パルス繰り返し周波数は30Hzであった。試験片37の後方は、支持部38、39を介して、図9に示すように上下方向（b方向）にスライド可能なガイド40に取り付けられている。また、ガイド40は、図8に示すように水平方向（a方向）にスライド可能なガイド42に取り付けられた支持部41に連結されている。試験片37は、走査装置43の制御により、ガイド40、42に沿って、ab両方向に移動可能に設置される。パルスレーザのビームスポットの重畳方法を図10に示す。処理域は5mm×10mmの矩形に設定した（図10中でj₁j₂=5mm、j₂j₃=10mm）。同一点に対するパルスレーザビームの照射回数の平均値は25回に設定し、同一走査領域Li内の隣接するビームスポットの間隔と、隣接する走査領域（例えば図10中のL1とL2）の中心線間の距離が等しくなるように処理した。また走査領域の形成は、図10において「L1→L2→L3→…」のように連続的に行った。図7の測定結果を見ると、圧縮応力が深さ約0.6mmまで導入されている。また、図10に示した重畳方法のために、図10中Y方向の圧縮応力が選択的に強化されている。

【0048】

図7に示すように、Y方向の残留応力は、深さ30μmにおいて-783MPaであり、残留圧縮応力が最大であった。しかし、被加工材表面（深さ0mm）の残留応力は-656MPaであり、表面の残留応力を十分に強化できているとは言えない。これは、サンプル表面にレーザビームを照射すると、照射スポット部表層近傍が溶融・再凝固するためである。

【0049】

本発明の製造方法では、以上説明してきたレーザピーニング処理を施した後、その処理面を含む領域の材料の表層を除去する。機械研磨等による材料の除去は、除去後の表面に引張応力を残留させ疲労特性に悪影響を与えることがあるため、除去する方法としては、電解研磨法や流体研磨法が望ましい。電解研磨法では、開口周辺部23（図6）にエッチング液を設置し、多くの場合は球状の突起を押し付けながら通電することで、研磨が進む。また流体研磨では、研磨剤を含む液体をレー穴5および分岐穴6に通すことで研磨が行われる。これらの方法では、いずれも分岐穴6の軸を中心として同心円状に研磨が進む。この除去工程によって、レーザピーニング処理で溶融・再凝固し応力が引張側にシフトし、残留応力値が少し材料の内部に入った部分よりも小さくなっている表層近傍部の除去が可能になる。更に、開口周辺部23の形状の変化により応力集中係数が緩和され、実際の使用時の最大負荷応力は低減される。本発明者らは、これらの複合的な効果が疲労強度を大きく向上させることを見出した。

【0050】

本発明の好ましい実施形態においては、レーザビームのパルスエネルギーを1mJ～10Jの範囲に設定するが、これは以下の理由による。本発明の方法では、レーザピーニング処理した後、材料を表面から除去するため、レーザピーニング処理で圧縮応力が導入される深さが小さすぎると、除去後の新しい表面における残留圧縮応力が小さくなってしまう。圧縮応力が導入される深さはパルスエネルギーが小さくなるほど浅くなる。これは、被加工材表面から投入されたレーザパルスエネルギーの三次元的な拡散が、パルスエネルギーが小さくなるほど大きくなってしまいうためである。この制約のため、本発明の方法では1mJ以上のパルスエネルギーで処理することが好ましい。また、パルスエネルギーの

上限については、コモンレールのレール管に通すことが可能なレーザビームのビーム断面積と光学素子の耐光強度を勘案し、10 J以下とすることが好ましい。

【0051】

必要となるレーザピーニング処理領域および材料の除去領域は、(i) 内圧変動負荷時の分岐穴開口周辺部の引張応力分布、(ii) 応力集中をどの程度緩和するかといった部品の設計思想等に依存する。引張応力分布は、鋼材の強度、使用圧力、レール穴5の直径 d_1 、分岐穴6の直径 d_2 、等に依存する。この分布は有限要素法計算等に基づいて見積もることが可能であるが、以下では処理領域の一般的な指針を説明する。

【0052】

レーザ処理後に除去工程を経た後、実際の使用時の内圧変動負荷に伴う分岐穴開口周辺部23の引張応力の最大値は、分岐穴6の軸を含みレール穴5の長手方向に沿った断面上において、分岐穴内面21と除去加工が施された面の接続部付近で生じる。その主応力方向はレール穴5の周方向である。疲労強度向上のためには、以下の(2)式および(2')式で表わされる、この最大値を取る点を含む領域に対して高い圧縮応力が導入されていることが望ましい。

分岐穴の中心からの距離 $\leq$ 分岐穴の直径 $\times 0.6 \cdots (2)$

分岐穴の中心方向にレール穴の内面に線分を引いたときの該線分とレール穴の長手方向のなす角 $\leq 10^\circ \cdots (2')$

【0053】

従って、レール穴5の内面22のレーザ処理領域は、図11に示す、(2)式および(2')式で表される領域を含むように設定することが望ましい。

【0054】

また、疲労強度を最大化するためには、使用時の繰り返し負荷応力が最大となる部分の主応力方向であるレール穴5の周方向の圧縮応力を最大化することが求められる。このために効果的なビームスポットの重畳照射方法を図12に示す。このように、分岐穴6の中心軸を含む平面内でビームスポットを走査し、該ビームスポットの走査を分岐穴6の周方向に位置を移動させながら複数回行う。この処理は、図10に示した方法で処理することで図7に示すように、図10中のY方向の応力が選択的に強化されるという事実に基づき考案された。なお、走査方向は、分岐穴6の中心軸を含む平面内に限らない。例えば、図13に示すように、レール穴5の長手方向と分岐穴6の長手方向を含む平面内でビームスポットを走査し、ビームスポットの走査をレール穴5の周方向に位置をずらしながら複数回行う方法でも、同じ効果を得られる。

【0055】

また、レーザ照射によって溶融・再凝固し応力が引張側にシフトしている材料の表面部分を取り除き、材料表面により大きな圧縮応力を与えることを目的に行なわれる材料の除去についても、上記式(2)式および(2')式で表わされる領域を含むよう除去することが望ましい。

【0056】

次に、材料の除去工程において、除去する厚みについて述べる。本願では以下のように、除去後の面上各点に対し除去厚みを定義する。除去後の面上のある点における除去厚みは、考えている除去後の面上の点からの距離が最小となる点を除去前の面上から選び出し、その最小値として定義する。図14の分岐穴断面図を例として説明する。図中、点線で示す曲線 $e-j-f$ が除去前の線、 e から k_1 、 k_2 を経て f に至る曲線が除去後の線である。上述の定義によると、除去後の線 k_1 点における除去厚みは t_1 で表され、 k_2 点における除去厚みは t_2 で表される。ここでは2次元的な断面図を例に採って説明したが、実際の除去厚みは、図14で考えた除去前後の線を、それぞれ面として三次元的に捉えることで定義される。

【0057】

レーザピーニング処理領域内の除去厚みは以下の範囲にするのが効果的である。まず、レーザ照射によって溶融・再凝固し応力が引張側にシフトしている表面近傍を除去するた

10

20

30

40

50

めに、除去後表面の各点における除去厚みは0.01mm以上とする。一方で、図7に示したように、レーザピーニングで導入される圧縮応力は表面からの深さが大きくなるに従って減少する傾向にある。例えば図7のY方向応力の深さ分布からは、表面から深さ0.1mm程度以上まで材料を除去すると、除去後の表面応力が除去前と比較してむしろ小さくなってしまふことが予想される。パルスエネルギー（図7の条件では200mJ）を大きくすることで深さ方向への圧縮応力の減衰は緩和できる。すなわち、パルスエネルギーを大きくすることでより大きな除去厚みを得ることも可能であるが、それでも、除去厚みは0.3mm程度以下としておくのが効果的である。

【0058】

材料の除去により、レーザ照射によって溶融・再凝固し応力が引張側にシフトしている表面近傍を除去する効果のみならず、開口部周辺の形状の変化による応力集中係数が緩和される効果も得られる。疲労強度を向上させるには、使用時の内圧変動負荷に伴う分岐穴開口周辺部の引張応力が最大となる部分において応力集中が生じないように、滑らかな除去面となる事が必要である。この観点から、分岐穴の中心軸を含みレール穴の長手方向に沿った断面における分岐穴の開口部周辺部における形状線の曲率半径が、分岐穴の中心軸からの距離で定義される領域が（3）式を満足する領域の各点において、15μm以上となることが望ましい。なお、図15にこの曲率半径Rの定義を示す。

分岐穴の直径×0.5 ≤ 分岐穴の中心からの距離 ≤ 分岐穴の直径×0.6・・・（3）

【0059】

以上においては、図6中レール穴5の内面22からのみレーザ照射を行う方法について説明してきたが、疲労強度を高めるためには、分岐穴6（直径： d_2 ）の内面21とレール穴5の内面22の双方から行う方法も効果的である。以下、この理由について説明する。レーザピーニング処理では、図7に示したように、深さ方向に進むに従って、付与される圧縮応力の絶対値は小さくなっていく。したがって、レール穴5の内面22からのみ処理する場合、レール穴5の内面22から遠ざかる内部、例えば図6中の g_2 点では、圧縮応力の絶対値は表層よりも小さくなることもある。一方で、開口周辺部23の材料を除去後、実際の使用時の繰り返し負荷応力は、この g_2 点付近で最大になることが多い。分岐穴6の内面21とレール穴5の内面22の双方からレーザピーニング処理を行っておけば、それぞれの面の処理によって導入される圧縮応力が加算され、 g_2 点の圧縮応力の絶対値を引き上げることが可能となり、より高い疲労強度が実現される。

【0060】

分岐穴6の内面21にもレーザ処理する場合、図16に示す処理範囲の深さhは、レール穴内面22と分岐穴内面21とが交わることで形成される円の位置を高さの基準として、レール穴直径 d_1 の20%程度とすれば十分である。ただし、分岐穴内面21の深い部分まで処理するためには、分岐穴内面21に対するレーザビームの入射角度を大きくする必要がある。同じピークパワーを持つレーザビームであっても、入射角度が大きくなるにつれて照射点におけるピークパワー密度は減少する。このため、直径 d_2 が小さい場合は、深さhが適切なピークパワー密度にて照射できる限界に支配されることが多い。

【0061】

一方、レール穴5の内面22からのみ行う照射方法は、分岐穴6の内面21を処理するために必要なミラーのあおり機構等が不要となるため、装置を簡略化できるという利点を持つ。

【0062】

本発明における部分強化方法の第2の方策においては、分岐穴6の貫通加工後、分岐穴6の開口周辺部23を研磨または機械加工により所定量だけ面取り加工した後、開口周辺部23にレーザピーニング処理を施す。そして、さらに開口周辺部23に存在する材料を除去する。これにより、開口周辺部23の疲労強度が高められたコモンレールが得られる。これは、主に応力集中係数を大きく緩和する目的で、分岐穴6の貫通加工時点から最終加工形状に至るまでの除去厚みを大きくする部品設計を採る場合に特に有効である。図17は第2の方策の一例を示す模式図である。図中に点線で示す角egfが貫通加工時点の

10

20

30

40

50

断面、一点鎖線が面取り加工後の断面、そしてeから k_3 、 k_4 を経てfに至る曲線がレーザーピーニング処理後、さらに材料の除去を施した後に得られる最終加工形状である。同図中、 t_1 や t_2 で示される貫通加工時点から最終加工形状に至るまでの除去厚みが0.3mmを越えるような場合に対して、上述した第一の方策を適用すると、図中に点線で示す角egfの表面からレーザーピーニング処理を施し、その後、材料の除去によって最終加工形状（図17中曲線 ek_3k_4f ）を得ることになる。この場合、材料の除去厚みが0.3mmを越えるため、上述したように、材料を除去した後に得られる最終加工形状の表面における残留圧縮応力が小さくなってしまふ。一方、ここで説明した第2の方策によると、図17中一点鎖線で示される断面まで面取り加工した後にレーザーピーニング処理を施すため、レーザーピーニング処理後の材料の除去厚みを小さく抑えることができる。したがって、最終加工形状（図17中曲線 ek_3k_4f ）の表面においても大きな圧縮応力を得られるという利点がある。

10

【0063】

レーザーピーニング処理前に実施する面取り加工は、実際の使用時の内圧変動負荷に伴う分岐穴開口周辺部にかかる引張応力の応力集中係数を緩和する目的で行われる。従って、その応力が最大値となる付近の領域、すなわち上述の式（2）式および（2'）式で表わされる領域を含むように行われることが効果的である。面取り加工後、分岐穴6開口周辺部の応力集中は緩和されるが、応力分布の最大値は依然として、分岐穴6の軸を含みレール穴5の長手方向に沿った断面上において、分岐穴内面と除去加工が施された面の接線部付近で生じる。よって、その後行われる分岐穴開口部周辺のレーザー処理領域、およびレーザー照射によって溶融・再凝固し応力が引張側にシフトしている表面を無くすことを目的に行われる材料の除去についても、上述の式（2）式および（2'）式で表わされる領域を含むようにすることが望ましい。また、除去する厚みは、レーザー処理領域において0.01mm以上0.3mm以下とすることが好ましい。材料の除去による除去後表面の圧縮応力の低下を抑えるという観点からは、レーザーピーニング処理前に行う面取り加工で最終加工形状の近くまで加工しておくことにより、レーザーピーニング処理後の除去厚みを0.1mm以下に小さく抑えるのが特に好ましい範囲である。

20

【0064】

コモンレールは、多くの場合、高強度の鋼で作られる。そこで、レーザービーム照射表面に設置する透明液体は、アルコール（メチルアルコールまたはエチルアルコール）等、鋼を錆びさせる性質を持たない液体を用いることが好ましい。もしくは、水にメチルアルコール及びエチルアルコールを任意の配分で混合した液体、純水、水道水もしくはミネラルウォーターのいずれかに、防錆剤が入っている液体を用いることで、コモンレールが錆びないようにしてもよい。防錆剤については、市販の防錆剤で問題ないが、色付きのものをを用いる場合は、防錆剤の濃度を、レーザー光が液体内を透過できる範囲に設定することが好ましい。この様にして、元々強度が600MPa超級の鋼材を、工程コストの低い液相拡散接合で組立て、高強度材で不可避の介在物起点疲労破壊を根絶するには、内圧負荷時に最大主応力の印加される分岐穴周りにレーザーピーニングを施すことで、初めて2000気圧以上の超高压に余裕をもって耐久可能な安価なコモンレールの提供が可能となる。

30

【0065】

なお、本発明では、上記の化学成分に加えて、更に、Ni：0.01～2.0%、Co：0.01～1.0%、Cu：0.01～1.0%、W：0.01～2.0%のうち少なくとも1種以上、または、更に、Zr：0.001～0.05%、Nb：0.001～0.05%、V：0.001～0.5%のうち少なくとも1種以上、あるいは、更に、Ca：0.0005～0.005%、Mg：0.0005～0.005%、Ba：0.0005～0.005%のいずれかの硫化物形態制御用元素、および、Y：0.001～0.05%、Ce：0.001～0.05%、La：0.001～0.05%のいずれかの希土類元素のうち少なくとも1種以上を含有してもよい。

40

【0066】

これらの合金成分を鋼材に含有させる場合、以下の理由から含有量の範囲が制限される

50

。Ni、Co、Cuはいずれも γ 安定化元素であって、鋼材の変態点を下げて低温変態を促すことで焼き入れ性を向上させる元素である。Ni、Co、Cuはそれぞれ0.01%以上の含有量で上述の効果が得られる。一方、Niは2.0%、CoとCuはそれぞれ1.0%を超えて含有させると残留 γ が増加して鋼材の靱性に影響を及ぼす。このため、Niの含有量は0.01~2.0%の範囲、CoとCuの含有量についてはそれぞれ0.01~1.0%の範囲で含有させることが好ましい。ただし、何れも高価な元素であって、工業生産の観点からはNiは0.05~1.0%の範囲、CoとCuは0.05~0.5%の範囲で鋼材に含有させることが好ましい。

【0067】

Wは α 安定化元素であって著しい固溶硬化を発揮する。Wを0.01%以上含有させるとこの効果を得られる。しかし、2%を超えて含有させると、液相拡散接合の拡散原子であるBおよびPと硼化物あるいは燐化物を生成し、継手の靱性を劣化させる場合がある。従って、Wの含有量の上限値は2.0%に制限される。ただし、粒界偏析を考慮する場合には、含有量の上限値は1.0%であることが好ましい。

【0068】

Zr、Nb、Vは微細な炭化物を析出して、材料の強度を高める。何れも0.001%以上の含有量で効果がある。一方、Zr、Nbは0.05%を越える含有量で、Vは0.5%を越える含有量で炭化物が粗大化して靱性を低下させる虞がある。従って、Zr、Nbの上限値は0.05%、Vの上限値は0.5%に設定される。これらの元素の含有量の上限値は、粒界における硼化物または燐化物生成を特に回避する場合には、NbとZrについては0.035%が、Vについては0.3%が好ましい。

【0069】

加えて、Ca、Mg、Baの硫化物形態制御元素およびY、Ce、Laの希土類元素は、全て鋼中の不純物であるSとの親和力が高く、鋼材の靱性に影響するMnSの生成を抑制する効果がある。この効果を得るためには、Ca、Mg、Baは0.0005%、原子量が大きいY、Ce、Laは0.001%の含有量が必要である。また、Ca、Mg、Baは0.005%以上の含有量で粗大酸化物を生成して靱性を低下させ、Y、Ce、Laは0.05%の含有量で同様に粗大酸化物を生成して靱性を低下させるため、これらの含有量が上限に設定される。

【0070】

上述の成分は、適宜組み合わせる複合添加しても、また各元素を単独で添加しても良く、本発明の効果を妨げることなく、鋼材に各種特性を付与する。

【0071】

なお、本発明の鋼材の製造工程は、通常の高炉—転炉による銑鋼一貫プロセスを適用するだけでなく、冷鉄源を使用した電炉製法、転炉製法も適用できる。さらに、連続鑄造工程を経ない場合でも、通常の鑄造、鍛造工程を経て製造することも可能であり、本発明に規定する化学成分範囲と式の制限を満足していれば良く、本発明技術に対する製造方法の拡大適用が可能である。また、製造する鋼材の形状は任意であって、適用する部材の形状に必要な成型技術において実施可能である。すなわち、鋼板、鋼管、棒鋼、線材、形鋼など、本発明技術の効果を広範囲に適用することが可能である。また、本鋼は溶接性にも優れており、液相拡散接合に適していることから、液相拡散接合継手を含む構造体であれば、一部に溶接を適用して、あるいは併用した構造体の製造は可能であり、本発明の効果を何ら妨げるものではない。

【0072】

以上説明した本発明の一実施形態に係るコモンレールの製造方法は、以下のように言い換えられ得る。即ち、本発明の一実施形態に係る、中心部にレール穴が形成され、前記レール穴を取り囲む筒壁部に前記レール穴に開口する複数の分岐穴が形成されたコモンレールの製造方法は、前記コモンレールの素材として、少なくとも、質量%で、C:0.01~0.3%、Si:0.01~0.5%、Mn:0.01~3.0%、B:0.0003~0.01%、N:0.001~0.01%、Al:0.01超~0.5%、Ti:0.

0.1～0.05%を含有し、P：0.03%以下、S：0.01%以下、O：0.01%以下に制限され、さらに、粒界偏析脆化元素であるAs、Sn、Sb、Pb、Znの総和を0.015%以下に制限し、残部が不可避的不純物及びFeよりなり、(1)式で示されるTLB値が0.001%以上となる液相拡散接合用鋼材を用い、Bを少なくとも1%以上含有するNi基またはFe基のインサートメタルを用いて、接合温度1000～1300℃で30秒以上の間1MPa以上の応力を負荷して保持する液相拡散接合を行い、前記分岐穴の開口周辺部に位置する前記分岐穴の内面と前記レール穴の内面とに、透明液体を存在させてパルスレーザビームを照射するレーザピーニング処理を施した後に、前記開口周辺部の材料の表層を除去することにより、前記開口周辺部の疲労強度を高めることを特徴とする、コモンレールの製造方法である。

10

【0073】

また、上述した本発明の一実施形態に係るコモンレールは、以下のように言い換えられ得る。即ち、本発明の一実施形態に係る、中心部にレール穴が形成され、前記レール穴を取り囲む筒壁部に前記レール穴に開口する複数の分岐穴が形成されたコモンレールは、前記コモンレールの素材が、少なくとも、質量%で、C：0.01～0.3%、Si：0.01～0.5%、Mn：0.01～3.0%、B：0.0003～0.01%、N：0.001～0.01%、Al：0.01超～0.5%、Ti：0.01～0.05%を含有し、P：0.03%以下、S：0.01%以下、O：0.01%以下に制限され、さらに、粒界偏析脆化元素であるAs、Sn、Sb、Pb、Znの総和を0.015%以下に制限し、残部が不可避的不純物及びFeよりなり、(1)式で示されるTLB値が0.001%以上となる液相拡散接合用鋼材であり、前記分岐穴の開口周辺部における形状が、分岐穴の中心軸を含みレール穴の長手方向に沿った断面における分岐穴の開口部周辺部における形状線の曲率半径が、(3)式を満足する領域の各点において、15μm以上となり、且つ、前記断面におけるレール穴の長手方向に垂直な圧縮応力値が-200MPa以上であることを特徴とするコモンレールである。

20

【実施例1】

【0074】

以下では、本発明の効果を検証するためにコモンレールを試作し、内圧疲労試験を行った結果について説明する。

【0075】

30

図18A、図18Bに例示したコモンレールを、次のように試作した。まず、230mm長、40mm幅、30mm厚みのレール本体51と、高さ25mm、24mm外径、厚み4mmのホルダー52を作成した。レール本体51及びホルダー52は、本発明の化学成分範囲の鋼材を、実験室規模真空溶解、あるいは実機鋼板製造設備において、100kg～300tonの真空溶解、あるいは通常の高炉－転炉－炉外精錬－脱ガス／微量元素添加－連続鑄造－熱間圧延によって製造し、図18A、図18Bに示す形状に加工、成型した。次に、レール本体51には、長手方向中心に内径10mmφのレール管を加工した後、深さ4mm、幅7mmのホルダー接合位置決定用のガイド溝を加工し、その後ホルダー52が接合される予定位置のホルダー中心軸上にレール管に向けて直径1mmの分岐穴6を開けた。また、ホルダー52には内径側へ最大ネジ山高さ2mmの燃料分配のための分岐配管を取り付けるための加工を施した。次に、レール本体51とホルダー52の接合部の端面を $R_{max} < 100 \mu m$ に研削加工して脱脂洗浄し、その端面を2つ対向させて接合試験片対となし、150kWの出力を有する高周波誘導加熱装置を備えた引っ張り／圧縮試験機を用いて液相拡散接合を行った。すなわち、接合面間には液相拡散接合を1000～1300℃において実現可能なNi基－B系、Fe基－B系の、実質的に体積分率で50%以上が非晶質である厚み20～50μmのアモルファス箔を介在させ、必要な接合温度まで試験片全体を加熱し、30秒から60分の間、1～20MPaの応力下で液相拡散接合し、接合後放冷した。条件の一部では、以下で説明するレーザピーニング処理の前に、レール本体51の分岐穴6のレール管側の開口端部のエッジを取る面取り加工を施した。この面取り加工においては、球状の突起を押し付けながら通電しながら、分岐穴6

40

50

の軸を中心として同心円状に研磨した。突起の径と電解研磨の時間を変えることで、図 19 に示すように、面取りされる領域の幅 p_1 と、深さ p_2 を変えた。なお、 p_1 は、分岐穴の径 d_2 に対する倍率として表現している。

【0076】

レーザピーニング処理は、分岐穴 6 のレール管側の開口周辺部に対して行なった。図 20 に、処理に用いたレーザ加工装置の照射ヘッド 61 がレール穴 5 に挿入された状態を図示する。レール穴 5 の長手方向に移動可能であるとともに中心軸周りに回転可能な支持棒 67 に支持された照射ヘッド 61 は、パイプ 62 に集光レンズ 63 とミラー 64 が取り付けられている。71 は突起を示す。図 20 において、ミラー 64 は円柱を斜めに切断した形状である所謂ロッド型のミラーとなっており、ミラー台座 65 に接着されている。コモンレール 1 のレール穴 5 を導光されてきたレーザビーム 57 は、集光レンズ 63 で屈曲された後、ミラー 64 によって反射され、集光点 66 に至る。集光レンズ 63 の両側には水が存在するので、十分な屈曲を得るために、レンズは屈折率が高い材質を用いることが好ましい。同時に、高いピークパワー密度を持つレーザビームに耐久性を持った材質が好ましい。従って、本実施例ではサファイアをレンズとして用いた。また、レーザビーム照射点から発生する金属微粒子やプラズマによるミラー 64 の汚染を防ぐために、パイプ 62 に一對の切欠き部 68、69 と、パイプ 62 の周囲にリング状のシール部材 70 を設けた。このシール部材 70 により、パイプ 62 内に、一方の切欠き部 68 から他方の切欠き部 69 へと流れる水流が生成され、ミラー 64 面が汚染から保護される。レーザビームとしては、水中透過性の優れた Nd:YAG レーザの第二高調波（波長 532 nm）もしくは Nd:YVO4 レーザの第二高調波（波長 532 nm）を用いた。パルスレーザビームの時間幅はそれぞれ、10 ns、1 ns であった。レーザ処理は、パルスエネルギーとスポット直径を変えながら行った。Nd:YAG レーザはパルスエネルギー 10 mJ 以上の処理に対して、Nd:YVO4 レーザはパルスエネルギー 10 mJ 未満の処理に対して、それぞれ使用した。照射点でのスポットの形はほぼ円形に設定し、ピークパワー密度は 50 TW/m² に設定した。

【0077】

レール穴周方向の圧縮応力を高めるため、図 12 に示すように、分岐穴 6 の中心軸を含む平面内でビームスポットを走査し、該ビームスポットの走査を分岐穴 6 の周方向に位置を移動させながら複数回行う方法でレーザ処理を行った。レーザ処理は、(4) 式および (4') 式で示される領域で行い、 p_3 と p_4 を変えながら処理した。図 21 に、 p_3 と p_4 の定義と処理域（斜線部）を示す。

分岐穴の中心からの距離 $\leq$ 分岐穴の直径 $\times p_3 \cdots (4)$

分岐穴の中心方向にレール穴の内面に線分を引いたときの該線分とレール穴の長手方向のなす角 $\leq p_4^\circ \cdots (4')$

【0078】

同一点に対するパルスレーザビームの照射回数の平均値は 6.9 回に設定した。なお図 21 には a 側のレーザ処理領域のみを示すが、実際の処理では、分岐穴を挟んで a 側と反対側にある b 側についても、a 側と同様にレーザ処理を行った。

【0079】

レーザピーニング処理後、電解研磨により材料の除去を行った。球状の突起を押し付けながら通電しながら、分岐穴 6 の軸を中心として同心円状に研磨した。突起の径と電解研磨の時間を変えることで、図 22 に示すように、電解研磨する領域の幅（分岐穴の径 d_2 に対する倍率） p_5 と除去厚み p_6 を変えた。除去厚みの定義は図 14 で説明した前述の通りである。さらに、分岐穴の中心軸を含みレール穴の長手方向に沿った断面上の前述 (2) 式および (2') 式を満足する領域における分岐穴の形状線の曲率の最大値 R_m を評価した。以上述べてきた本実施例における電解研磨後の開口部形状に関わるパラメータ (p_1 、 p_2 、 p_5 、 p_6 、 R_m) は、各水準の疲労試験にかけないコモンレールを、分岐穴の中心軸を含みレール穴の長手方向に沿った断面を切断・研磨加工により得た後、光学顕微鏡を用いて形状を観察する事により求めた。

【0080】

以上の方法で製作したコモンレールを、別途加工して取り付けした固定用治具を介して内圧疲労試験装置にセットし、最大噴射圧力300MPaにて15Hzで1000万回の内圧疲労試験を実施した。試験にあたっては、ホルダー上部の開口端を塞ぐネジをホルダー内径側に加工したネジ形状に合うよう選択して3tonの最大トルクで締結し、実際のエンジンにおける使用環境を再現した。

【0081】

表1に疲労試験結果を示す。また、表2に本実施例で用いた本発明の化学成分範囲による鋼材を、表3に表2の各鋼材の機械的特性を示す。表1の鋼材成分を示す番号は、表2に示す番号に対応している。表1には、図21の m_1 点におけるレール穴周方向の残留応力 σ_A を測定した結果も示す。尚、残留応力 σ_A は、各水準の疲労試験にかけないコモンレールから、図18A、図18Bに示すように、1つの分岐穴を含む一部分24を切り出し、X線残留応力測定装置を用いて測定した。この切り出し加工においては、レーザピーニングにより導入された残留応力が変化しないように、分岐穴6のレール穴側の開口部から離れた位置で切断した。切り出した大きさはレール穴長手方向の長さが40mmであり、また分岐穴の軸に垂直でレール穴の軸を含む平面で切断した。X線応力測定のビーム径は0.1mmとした。尚、表中、TSは25℃における液相拡散接合継手の引張り強さ(kN/mm^2)を示し、CHは0℃における液相拡散接合継手のシャルピー試験における吸収エネルギー(J)を示し、 ΔHv は接合部の最高硬さと5mm離れた位置の硬さの差の絶対値(荷重100gのVickers硬さ試験の値)を示す。

【0082】

10

20

【表 1】

条件番号	鋼材成分	面取り条件		レーザー処理条件		電解研磨条件				Rm(μm)	σA (MPa)	疲労限度 (MPa)
		p ₁	p ₂ (mm)	ハールスエネルギー(mJ)	ヒール径(mm)	p ₃	p ₄ (°)	p ₅	p ₆ (mm)			
101		9面取りなし			1	0.05	0.7	30	0.05	23	-385	232
102		12面取りなし			9	0.16	0.75	30	0.06	26	-557	240
103		14面取りなし			30	0.3	1	30	0.05	31	-604	243
104		13面取りなし			100	0.6	1.5	30	0.06	42	-836	251
105		23面取りなし			500	1.3	2	30	0.07	40	-849	252
106		20面取りなし			0.2	0.03	0.65	30	0.05	21	-178	211
107		12面取りなし			0.8	0.03	0.8	20	0.05	20	-182	210
108		12面取りなし			1	0.05	0.6	30	0.05	22	-403	229
109		9面取りなし			1	0.05	0.55	30	0.05	18	-169	213
110		12面取りなし			30	0.3	0.55	30	0.05	18	-427	215
111		21面取りなし			1	0.05	0.7	20	0.05	26	-370	230
112		13面取りなし			1	0.05	0.7	10	0.05	23	-352	228
113		16面取りなし			1	0.05	0.7	5	0.05	20	-192	215
114		13面取りなし			1	0.05	0.7	7.5	0.05	20	-190	217
115		13面取りなし			30	0.3	1	30	0.05	23	-577	239
116		12面取りなし			30	0.3	1	30	0.05	17	-617	228
117		20面取りなし			30	0.3	1	30	0.56	12	-628	224
118		14面取りなし			1	0.05	1	20	0.55	12	-361	218
119		14面取りなし			30	0.3	1	30	1.0	68	-304	227
120		23面取りなし			30	0.3	1	30	1.0	125	-176	220
121		9面取りなし			30	0.3	1	30	1.0	90	-195	220
122		12面取りなし			100	0.6	1.5	30	1.5	30	-876	250
123		9面取りなし			100	0.6	1.5	30	1.5	20	-639	245
124		13面取りなし			100	0.6	1.5	30	1.5	12	-443	223
125		21面取りなし			100	0.6	1.5	30	1.5	12	-420	220
126		20面取りなし			1000	0.6	1.5	30	1.3	123	-487	234
127		21面取りなし			100	0.6	1.5	30	0.7	25	-843	247
128		13面取りなし	0.300		100	0.6	1.5	30	1.2	112	-846	268
129		16面取りなし	0.200		100	0.6	1.5	30	0.9	88	-850	262
130		12面取りなし	0.150		100	0.6	1.5	30	0.8	70	-838	256
131		23面取りなし	0.050		100	0.6	1.5	30	0.7	25	-824	248
132		13面取りなし			100	0.6	1.5	30	電解研磨なし	8	-414	222
133		21面取りなし			50	0.3	1	10	電解研磨なし	8	-362	212

【表 2】

本発明鋼(mass%)																								
	C	Si	Mn	P	S	Ti	Al	N	B	O	Ni	Co	Cu	W	V	Zr	Nb	Ca	Mg	Ba	Y	Ce	La	As+Sr+Sb+Pb+Zn
1	0.199	0.358	1.12	0.0269	0.0028	0.029	0.032	0.0057	0.0018	0.0010														0.0125
2	0.245	0.027	0.76	0.0112	0.0045	0.040	0.031	0.0023	0.0014	0.0034														0.0141
3	0.243	0.401	0.27	0.0180	0.0047	0.028	0.033	0.0022	0.0050	0.0034														0.0116
4	0.116	0.052	1.85	0.0076	0.0052	0.032	0.032	0.0058	0.0015	0.0061														0.0071
5	0.123	0.213	1.07	0.0149	0.0004	0.034	0.028	0.0029	0.0044	0.0021														0.0088
6	0.223	0.260	2.10	0.0044	0.0012	0.016	0.031	0.0041	0.0006	0.0029														0.0066
7	0.084	0.405	1.16	0.0175	0.0048	0.022	0.029	0.0042	0.0031	0.0030														0.0079
8	0.124	0.225	2.04	0.0159	0.0040	0.034	0.026	0.0075	0.0040	0.0060														0.0081
9	0.228	0.175	2.15	0.0218	0.0039	0.024	0.016	0.0075	0.0020	0.0062														0.0044
10	0.012	0.165	0.06	0.0218	0.0051	0.037	0.017	0.0027	0.0037	0.0008														0.0099
11	0.213	0.023	0.12	0.0226	0.0022	0.039	0.011	0.0024	0.0023	0.0068														0.0036
12	0.037	0.102	0.48	0.0202	0.0013	0.023	0.017	0.0038	0.0026	0.0051	1.22	0.45												0.0121
13	0.011	0.182	1.31	0.0214	0.0022	0.010	0.016	0.0030	0.0014	0.0048		1.20												0.0116
14	0.118	0.105	1.02	0.0251	0.0005	0.017	0.026	0.0030	0.0048	0.0047			0.42			0.022								0.0113
15	0.040	0.123	2.23	0.0156	0.0051	0.022	0.045	0.0017	0.0031	0.0035				0.56										0.0098
16	0.215	0.393	2.00	0.0054	0.0043	0.026	0.018	0.0019	0.0020	0.0037	0.45	1.19	0.39	0.81	0.245									0.0094
17	0.196	0.282	0.89	0.0064	0.0011	0.023	0.019	0.0041	0.0048	0.0062					0.112	0.006								0.0071
18	0.019	0.197	1.29	0.0064	0.0038	0.027	0.016	0.0036	0.0005	0.0068							0.012							0.0075
19	0.085	0.393	1.41	0.0060	0.0053	0.039	0.013	0.0053	0.0026	0.0008	0.36			0.99	0.165	0.019		0.0028						0.0069
20	0.105	0.013	2.50	0.0047	0.0047	0.021	0.018	0.0052	0.0007	0.0055			0.36		0.185				0.0033					0.0049
21	0.011	0.346	0.30	0.0214	0.0046	0.017	0.019	0.0068	0.0005	0.0043							0.015	0.0033		0.0026				0.0081
22	0.064	0.321	0.34	0.0218	0.0006	0.022	0.026	0.0053	0.0003	0.0040	1.81			0.44	0.148					0.0029	0.0070			0.0099
23	0.156	0.191	0.19	0.0223	0.0024	0.028	0.024	0.0034	0.0048	0.0055			0.36				0.003	0.0016		0.0018		0.0263		0.0098
24	0.068	0.131	1.67	0.0107	0.0040	0.019	0.022	0.0070	0.0020	0.0035					0.562						0.0166		0.0223	0.0096
25	0.197	0.044	0.55	0.0109	0.0029	0.035	0.013	0.0034	0.0030	0.0069	0.26			1.65		0.038	0.041	0.0019		0.0016		0.0185		0.0091
26	0.021	0.047	0.57	0.0147	0.0018	0.025	0.012	0.0030	0.0018	0.0054				1.89			0.033			0.0035			0.2630	0.0055
27	0.231	0.357	2.30	0.0090	0.0026	0.014	0.018	0.0078	0.0006	0.0057		0.07			0.452				0.0045		0.0421	0.0062		0.0144

【 0 0 8 4 】

10

20

30

40

【表 3】

番号	機械的特性			
	TLB	TS	CH	$\Delta H_v(100g)$
1	0.0248	723	169	21
2	0.0307	781	172	11
3	0.0311	806	182	38
4	0.0256	788	155	10
5	0.0266	806	143	41
6	0.0173	790	165	18
7	0.0203	666	165	41
8	0.0205	634	133	17
9	0.0053	854	125	13
10	0.0150	826	182	38
11	0.0087	831	163	43
12	0.0094	1055	154	15
13	0.0048	1061	126	19
14	0.0179	1093	135	37
15	0.0429	981	77	51
16	0.0119	999	81	14
17	0.0129	983	89	53
18	0.0077	826	315	46
19	0.0085	841	125	51
20	0.0068	855	152	22
21	0.0048	846	163	46
22	0.0134	671	144	36
23	0.0197	992	134	26
24	0.0093	681	182	23
25	0.0095	693	162	47
26	0.0059	661	144	10
27	0.0024	712	99	21

【0085】

表1の条件番号126は、レーザピーニング処理は施したが、その後研磨を施さない従来例である。条件番号106、108、111、114、116、119は、レーザピーニング処理後研磨したが、条件が、以下に説明するように本発明の範囲外であるために、

10

20

30

40

50

従来例に対して有意な効果が見られない比較例であり、それ以外の条件が本発明例である。本発明の条件では、いずれも従来例に対し疲労強度向上が得られている。

【0086】

条件106はパルスエネルギーが不足しているために、レーザピーニング処理で圧縮応力が導入される深さが小さく、電解研磨後の σ_A が小さくなってしまったために疲労強度向上効果が小さかった例である。一方、パルスエネルギーが1mJ以上となる条件101～105ではいずれも疲労強度向上効果が得られている。

【0087】

条件108と111はレーザ処理の領域が小さすぎたため、内圧疲労試験時の負荷が大きくなる領域における引張応力の低減効果が十分でなく、疲労強度向上効果が小さかった例である。一方で、条件108、111と同じレーザパルスエネルギー条件であって、 $p_3 \geq 0.6$ 、 $p_4 \geq 10^\circ$ となる条件107、109、110ではいずれも疲労強度向上効果が得られている。すなわち、レーザ処理領域は上述の式(2)および(2')式で表される領域を含むように取ることが望ましい。

10

【0088】

条件114は電解研磨の領域が小さすぎたため、内圧疲労試験時の負荷が大きくなる領域における応力集中係数の低減効果が十分でなく、疲労強度向上効果が小さかった例である。電解研磨はしたものの R_m は条件126の従来例と大きな差がなかったことが判る。一方で、条件114と同じレーザパルスエネルギー条件であって、 $p_5 \geq 0.6$ となる条件103、112、113ではいずれも疲労強度向上効果が得られている。

20

【0089】

条件116は電解研磨の厚みが0.4mmと大きすぎたため、レーザピーニング処理で圧縮応力が導入された深さを除去した結果、電解研磨後の σ_A が小さくなり、疲労強度向上効果が小さかった例である。

【0090】

条件119は電解研磨の厚みが0.005mmと小さすぎたため、レーザ照射によって溶融・再凝固し応力が引張側にシフトしている表面を無くす効果が十分でなく、また、電解研磨による応力集中の緩和も十分でないために、疲労強度向上効果が小さかった例である。 R_m 、 σ_A ともに、条件126の従来例と大きな差がなかったことが判る。

【0091】

本発明によると、表面の圧縮応力が大きくなる効果とともに、形状変化による応力集中係数の緩和効果が複合的に作用し、従来技術に対して大きな疲労強度の向上が得られる。本試験の結果より、このためには、 σ_A の絶対値200MPa以上、 $R_m \geq 15 \mu m$ 、という条件が効果的である事が判る。

30

【0092】

表4に、本発明の化学成分範囲から逸脱した鋼材の各成分を、表5に、表4の各鋼材の機械的特性を示す。これらは、鋼材の液相拡散接合継手特性および継手の硬度均一性が達成できず、レーザピーニング処理を実施しても、鋼材自体もしくは液相拡散接合継手が内圧疲労に対する抵抗性を失ってしまう例であり、各鋼材の成分と液相拡散接合継手の特性、および継手近傍の硬度の均一性を示す指標、 ΔH_v (100g)を示している。レーザピーニング処理はいずれも表1に示す条件番号122の条件で行った。

40

【0093】

【表 4】

比較値(mass%)															
C	Si	Mn	P	S	Ti	Al	N	B	O	Ni	Co	Cu	W	V	Zr
51	0.363	0.060	1.37	0.0256	0.0045	0.025	0.059	0.0057	0.0029	0.0060					
52	0.175	0.660	1.05	0.0075	0.0023	0.032	0.012	0.0078	0.0039	0.0060					
53	0.043	0.243	3.45	0.0181	0.0011	0.032	0.025	0.0017	0.0007	0.0031					
54	0.243	0.353	1.63	0.0055	0.0019	0.115	0.022	0.0057	0.0042	0.0021					
55	0.106	0.110	2.19	0.0192	0.0010	0.013	0.521	0.0065	0.0015	0.0011					
56	0.093	0.168	1.98	0.0158	0.0015	0.025	0.019	0.0160	0.0008	0.0031					
57	0.151	0.093	0.07	0.0121	0.0003	0.016	0.015	0.0080	0.0002	0.0026					
58	0.133	0.316	2.01	0.0086	0.0013	0.013	0.059	0.0076	0.0160	0.0031					
59	0.093	0.204	1.17	0.0259	0.0038	0.035	0.029	0.0034	0.0047	0.0029	2.52				
60	0.232	0.254	0.52	0.0268	0.0011	0.036	0.039	0.0039	0.0011	0.0065	1.35				
61	0.255	0.398	0.59	0.0030	0.0008	0.017	0.044	0.0031	0.0051	0.0051	0.20	1.18			
62	0.205	0.294	0.43	0.0246	0.0047	0.025	0.021	0.0043	0.0015	0.0033		2.88			
63	0.218	0.227	1.89	0.0196	0.0004	0.023	0.029	0.0021	0.0022	0.0009			0.08		
64	0.074	0.323	2.02	0.0049	0.0044	0.039	0.029	0.0077	0.0026	0.0013				0.070	
65	0.169	0.187	1.76	0.0083	0.0020	0.019	0.036	0.0080	0.0022	0.0045	0.03	0.52	0.25		0.059
66	0.089	0.336	0.44	0.0037	0.0026	0.011	0.044	0.0017	0.0023	0.0043				0.003	0.0067
67	0.244	0.269	0.64	0.0157	0.0042	0.039	0.055	0.0058	0.0031	0.0058					0.016
68	0.136	0.350	1.64	0.0178	0.0039	0.031	0.057	0.0050	0.0044	0.0049	0.56				0.0055
69	0.031	0.175	1.26	0.0227	0.0003	0.034	0.019	0.0042	0.0011	0.0024					0.0680
70	0.149	0.053	2.21	0.0150	0.0036	0.015	0.037	0.0073	0.0006	0.0054	0.71				0.0710
71	0.141	0.246	0.53	0.0142	0.0033	0.024	0.060	0.0063	0.0039	0.0064	0.44				0.0028
72	0.145	0.244	0.02	0.0279	0.0030	0.033	0.019	0.0039	0.0031	0.0030		0.04			0.0039
73	0.225	0.239	1.76	0.0092	0.0051	0.016	0.012	0.0057	0.0014	0.0006	0.32				0.0022
74	0.100	0.287	2.38	0.0197	0.0011	0.018	0.013	0.0088	0.0032	0.0011	0.15				
75	0.170	0.033	1.73	0.0064	0.0047	0.013	0.026	0.0021	0.0018	0.0006					0.040
76	0.240	0.300	0.94	0.0263	0.0046	0.015	0.012	0.0065	0.0008	0.0069					
77	0.247	0.363	0.76	0.0097	0.0038	0.014	0.014	0.0074	0.0007	0.0064					0.0016
As+Sr+Sb+Pb+Zn															
51															0.0125
52															0.0141
53															0.0116
54															0.0071
55															0.0088
56															0.0066
57															0.0079
58															0.0044
59															0.0099
60															0.0036
61															0.0121
62															0.0116
63															0.0113
64															0.0098
65															0.0094
66															0.0071
67															0.0075
68															0.0069
69															0.0049
70															0.0081
71															0.0099
72															0.1921
73															0.0163
74															0.0172
75															0.0244
76															0.0067
77															0.0091

【表 5】

番号	機械的特性			
	TLB	TS	CH	$\Delta H_v(100g)$
51	0.0645	622	23	65
52	0.0053	711	16	13
53	0.0192	775	11	14
54	0.0454	618	18	33
55	3.5452	913	26	3
56	0.0003	626	188	235
57	0.0006	489	263	189
58	0.0658	521	244	15
59	0.0283	732	23	18
60	0.0394	1040	16	43
61	0.0384	988	17	12
62	0.0120	1020	24	52
63	0.0217	964	16	92
64	0.0249	763	12	32
65	0.0228	804	8	71
66	0.0334	853	16	63
67	0.0686	842	21	44
68	0.0683	924	22	57
69	0.0124	866	25	80
70	0.0210	943	44	16
71	0.0666	1050	43	15
72	0.0145	821	16	71
73	0.0018	715	13	19
74	0.0022	683	18	21
75	0.0137	744	11	35
76	0.0004	729	155	152
77	0.0005	641	135	188

【0095】

51 番鋼はCが過多となって液相拡散接合継手の靱性を獲得できなかった（継手の疲労特性がレーザピーニング処理した分岐穴開口部よりも低下した）例である。

52 番鋼はSiが、53 番鋼はMnが過多となって液相拡散接合継手においてMnO-SiO₂の複合酸化物を多量に生成し、継手の靱性が低下した結果、継手の疲労特性がレ

10

20

30

40

50

ーザピーニング処理した分岐穴開口部よりも低下した例である。

５４番鋼はＴｉ添加量が過剰となり、Ｔｉを含む炭窒化物が継手で多量に生成し、継手靱性が低下して継手の疲労特性がレーザピーニング処理した分岐穴開口部よりも低下した例である。

５５番鋼はＡｌの添加量が過剰となり、粗大酸化物が鋼材および液相拡散接合継手に生成し、特に接合部の靱性が低下して継手の疲労特性がレーザピーニング処理した分岐穴開口部よりも低下した例である。

５６番鋼はＮ含有量が過剰となった結果、ＴＬＢ値が０．００１未満となり、接合部の硬度均一性が保たれず、継手近傍で応力集中が生じて継手の疲労特性がレーザピーニング処理した分岐穴開口部よりも低下した例である。

10

５７番鋼はＢ添加量が不十分で、ＴＬＢ値が０．００１未満となり、接合部の硬度均一性が保たれず、継手近傍で応力集中が生じて継手の疲労特性がレーザピーニング処理した分岐穴開口部よりも低下した例である。

５８番鋼はＢ添加量が過多となって、Ｂを含む炭化物と硼化物が継手に生成し、靱性が低下した結果、継手の疲労特性がレーザピーニング処理した分岐穴開口部よりも低下した例である。

５９番鋼、６０番鋼、６１番鋼はそれぞれＮｉ、Ｃｏ、Ｃｕ添加量が過多となって残留γが多量に生成し、接合継手の靱性が低下し、継手の疲労特性がレーザピーニング処理した分岐穴開口部よりも低下した例である。

６２番鋼はＷ添加量が過多となって硼化物が継手に多量に生成し、靱性が低下して継手の疲労特性がレーザピーニング処理した分岐穴開口部よりも低下した例である。

20

６３番鋼はＶが過多となり、接合継手で粗大Ｖ炭化物が生成して靱性が低下し、継手の疲労特性がレーザピーニング処理した分岐穴開口部よりも低下した例である。

６４番鋼と６５番鋼は、Ｚｒ、Ｎｂがそれぞれ過多となり、何れもそれぞれの炭化物を接合継手に多く生成して靱性が低下し、継手の疲労特性がレーザピーニング処理した分岐穴開口部よりも低下した例である。

６６～６８番鋼はＣａ、Ｍｇ、Ｂａの添加量が過剰となり、それぞれの酸化物が生成し、接合継手の靱性が低下した結果、継手の疲労特性がレーザピーニング処理した分岐穴開口部よりも低下した例である。

６９～７１番鋼ではＹ、Ｃｅ、Ｌａの添加量が過剰となり、それぞれの酸化物が生成し、接合継手の靱性が低下した結果、継手の疲労特性がレーザピーニング処理した分岐穴開口部よりも低下した例である。

30

７２、７３、７４、７５番鋼はＡｓ＋Ｓｎ＋Ｓｂ＋Ｐｂ＋Ｚｎの添加量総和が０．０１５％を超え、粒界脆化を来したために、継手の靱性が低下し、継手の疲労特性がレーザピーニング処理した分岐穴開口部よりも低下した例である。

７６および７７番鋼は化学成分こそ本発明鋼の範囲であるが、ＴＬＢ値が０．００１を下回ったため、継手の強度均一性が保てず、ΔＨｖ（１００ｇ）の値が１００を超えたことにより、継手に応力集中が生じて、継手の疲労特性がレーザピーニング処理した分岐穴開口部よりも低下した例である。

【産業上の利用可能性】

40

【００９６】

本発明は、コモンレール等の鋼材において、流体が通過する機械部品において径が極端に変化する部位や、管の端など、応力集中が発生しやすい部分の疲労強度を向上させるための製造方法として適用できる。

【符号の説明】

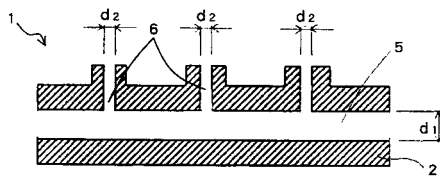
【００９７】

- １ コモンレール
- ２ 筒壁部
- ５ レール穴
- ６ 分岐穴

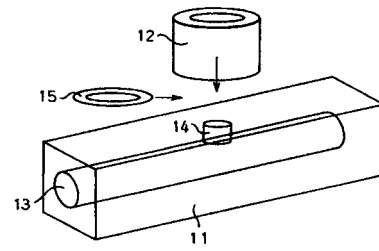
50

7	レール穴の長手方向に平行となる直径の両端近傍	
1 1	コモンレール本体	
1 2	ホルダー	
1 3	管路	
1 4	支管	
1 5	合金箔	
2 1	内面（分岐穴）	
2 2	内面（レール穴）	
2 3	開口周辺部	
3 1	レーザビーム発振装置	10
3 2	レーザビーム	
3 3	集光レンズ	
3 4	光学窓	
3 5	水槽	
3 7	試験片	
3 8、3 9、4 1	支持部	
4 0、4 2	ガイド	
4 3	走査装置	
5 1	レール本体	
5 2	ホルダー	20
5 7	レーザビーム	
6 1	照射ヘッド	
6 2	パイプ	
6 3	集光レンズ	
6 4	ミラー	
6 5	ミラー台座	
6 6	集光点	
6 7	支持棒	
6 8、6 9	切欠き部	
7 0	シール部材	30
7 1	突起	

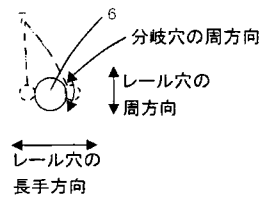
【図 1】



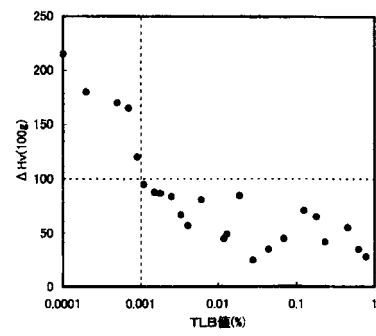
【図 3】



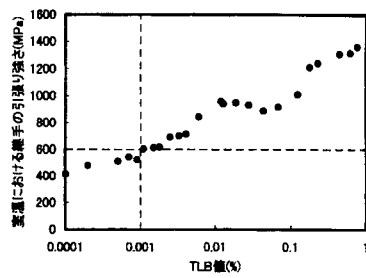
【図 2】



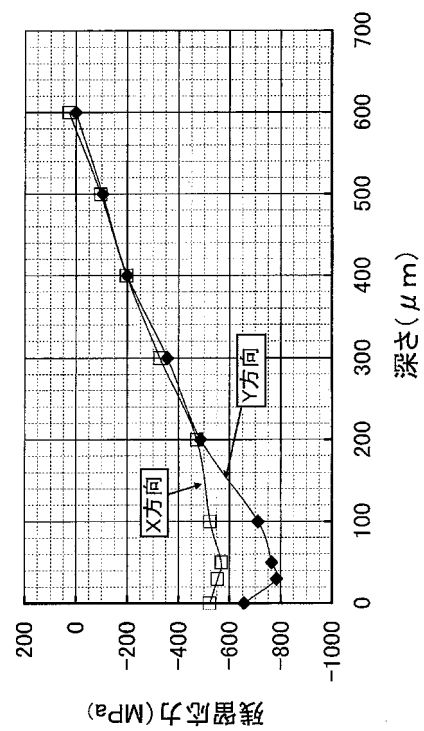
【図 4】



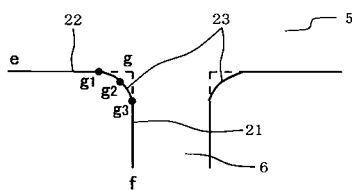
【図 5】



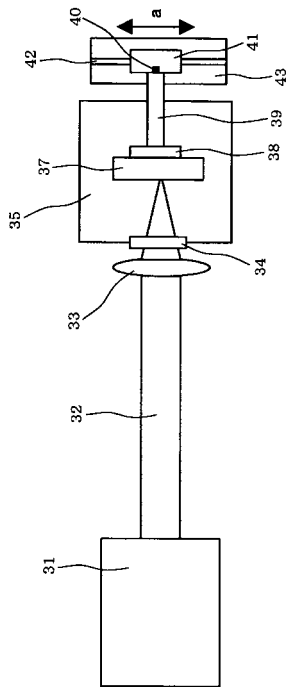
【図 7】



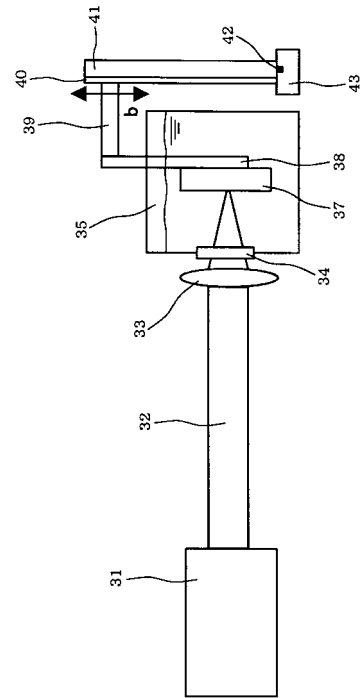
【図 6】



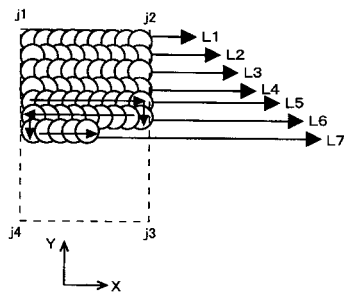
【図 8】



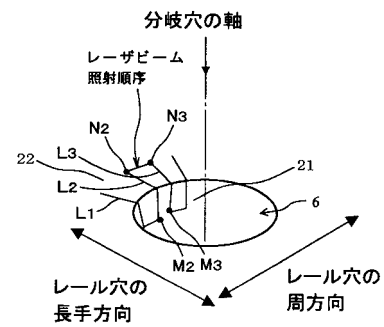
【図 9】



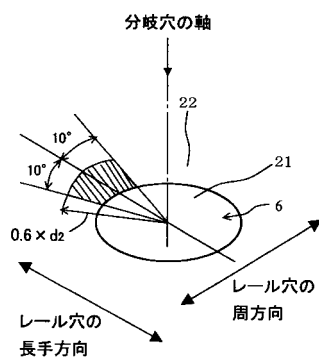
【図 10】



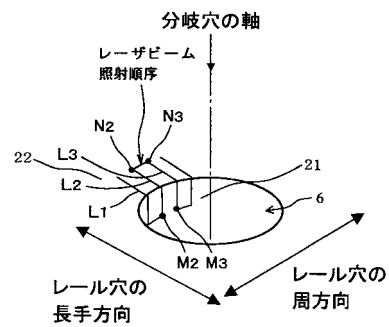
【図 12】



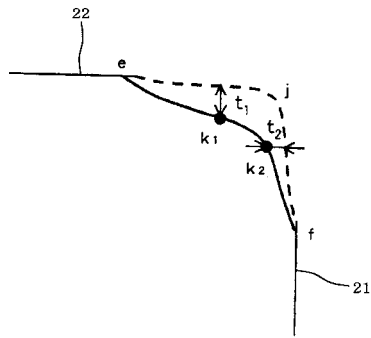
【図 11】



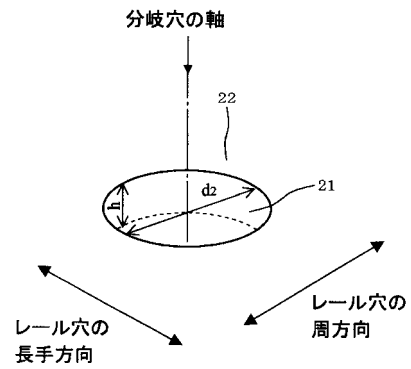
【図 13】



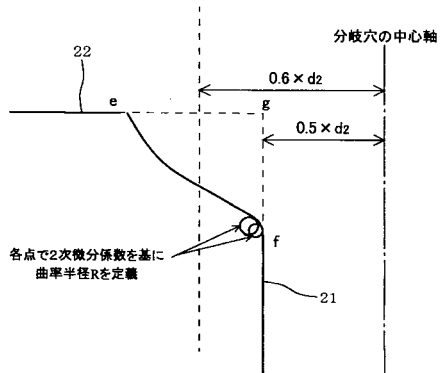
【図 14】



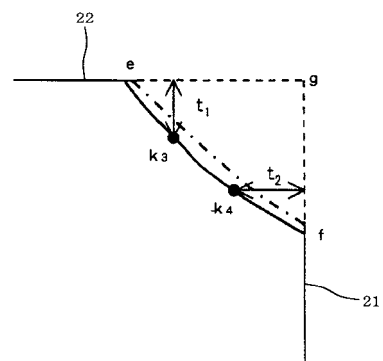
【図 16】



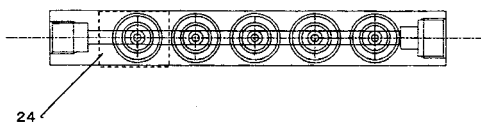
【図 15】



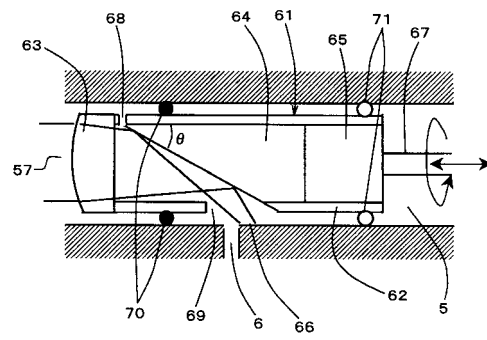
【図 17】



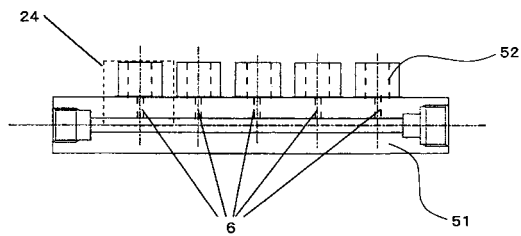
【図 18 A】



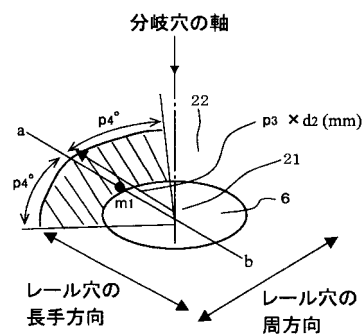
【図 20】



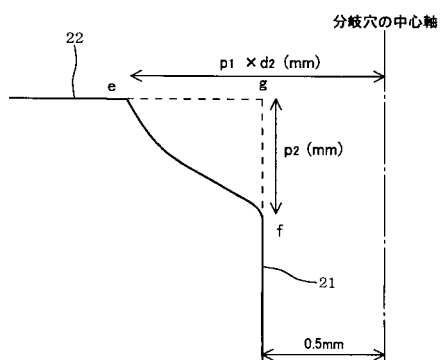
【図 18 B】



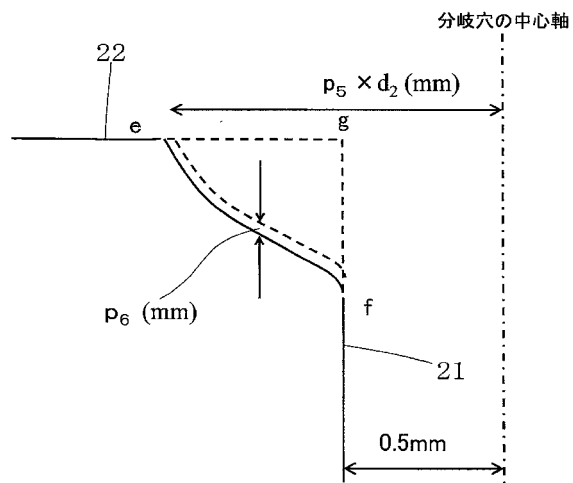
【図 21】



【図 19】



【図 2 2】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
B 2 3 K 26/12

(72)発明者 杉橋 敦史
東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日本製鐵株式会社内
(72)発明者 今井 浩文
東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日本製鐵株式会社内
(72)発明者 長谷川 泰士
東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日本製鐵株式会社内

審査官 赤間 充

(56)参考文献 特開2007-040244 (JP, A)
特開2004-083980 (JP, A)
特開2006-322446 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
F02M 55/02
B23K 20/00
B23K 26/00
B23K 26/12
C22K 38/00~38/60
C22K 45/00~45/10