

S45C における加工熱処理が衝撃じん性と破壊形態に及ぼす影響

佐々木大輔*・大塚優馬*・田中亜弥*・東 祐奈*・
畑 彰眞*・大野健臣*・吉利用之*・西口廣志**・
和田健太郎***・津崎兼彰***

The Effect of Thermo-Mechanical Treatment on Impact Toughness and Fracture Morphology in S45C Steel

Daisuke SASAKI, Yuma OTSUKA, Aya TANAKA, Yuna HIGASHI,
Yuma HATA, Kenshin Ono, Mochiyuki YOSHITOSHI, Hiroshi
NISHIGUCHI, Kentaro WADA and Kaneaki TSUZAKI

Key words : Thermo-Mechanical Treatment, Impact Toughness,
Fracture Behavior, Ferrite-Pearlite, Martensite

* 久留米工業高等専門学校 (National Institute of Technology, Kurume College)

** 佐世保工業高等専門学校 (National Institute of Technology, Sasebo College)

*** 物質・材料研究機構 (National Institute for Materials Science)

住 所：〒830-8555 福岡県久留米市小森野
1-1-1 久留米工業高等専門学校 (1-1-1
Komorino, Kurume, Fukuoka 830-
8555)

連絡方法：E-mail d-sasaki@kurume-nct.ac.jp

S45C は一般構造用鋼の中でも焼入れによる高強度化が可能な材料であり、加工熱処理のしやすさも優れている。強度設計においては材料の強度・靱性バランスが重要であり衝撃靱性も材料評価の重要な指標である。実部材はピレットやブルームの状態から複数の加工熱処理を経て使用される。我々は、2023年3月に実施した高専マテリアルコンテストにおいて、このS45Cを用いて加工熱処理による特性変化を競い学習した⁽¹⁾。本稿では、その際に得られた興味深い結果の一部として、圧延とその後の焼なまし、焼入焼戻しの各種熱処理を行った際のマイクロ組織、吸収エネルギー、硬さ、巨視的な破壊形態、破面形態を紹介する。

供試材として JIS 規格の S45C 鋼を用いた。化学組成は 0.44% C-0.20% Si-0.65% Mn-0.021% P-0.011% S-0.02% Cu-0.02% Ni-0.14% Cr (mass%) であり、焼なまし材として受け入れた。試料は受入材、圧延材、圧延焼なまし材、圧延焼入焼戻し材の4種類を用意した。圧延においては、φ16 mm の受入材を長さ 100 mm の丸棒片に切断したのち、室温で平ロール圧延機にて圧延した。圧下量を 0.2 mm とし高さが 14 mm になるまで 10 回圧延した後、試料を 90 度回転させて高さが 14 mm になるまで繰返し圧延し 14 mm 角の断面を有する試験片を得た。その後、熱処理を行った。圧延焼なまし材は圧延後、600℃で 1 h 保持後、3 h かけて 600℃から 200℃まで炉冷した。圧延焼入焼戻し材は圧延後、850℃で 30 min 保持し水冷した後に、650℃で 1 h 保持後に扇風機を使っての急空冷、その後 600℃ 1 h 保持後に扇風機を使っての急空冷の二段焼戻し処理を行った。

マイクロ組織観察にあたっては、試料中心部の圧延面に平行な面を耐水研磨紙を用いた研磨後にバフ研磨で仕上げた。研磨後、5% ナイタル液を使用してエッチングを行った。ピッカース硬さ試験機を用いて、試験力 20 kgf にて 4 種類の試料ごとに 7 回計測を行い、最大値と最小値を除く 5 回の平均を硬さとした。

シャルピー衝撃試験は 10 mm 角の断面を有するフルサ

イズの 2 mmV ノッチ試験片を用いて室温で実施した。ハンマーは持ち上げ角 145.5 度、質量 26.57 kg、回転軸から重心までの距離は 0.75 m である。衝撃試験後、デジタルカメラを用いて巨視的な破壊形態および破面形態を観察した。

図 1 に光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡で撮影したマイクロ組織写真を示す。受入材および圧延材においては、フェライト・パーライト組織であることが確認される。圧延材においてはわずかに組織が圧延方向に伸長していることが確認できる。圧延焼なまし材ではフェライト・パーライトの伸長組織が確認できる。圧延焼入焼戻し材では典型的な中炭素鋼のラスマルテンサイト組織が確認できる。

4 種類の試料の硬さと吸収エネルギーは、受入材が 186 HV; 48 J, 圧延材が 261 HV; 29 J, 圧延焼なまし材が 229 HV; 37 J, 圧延焼入焼戻し材が 236 HV; 174 J であった。室温における 0.43% C のフェライト・パーライト鋼の吸収エネルギーがおおよそ 40 J であることが報告されており⁽²⁾、受入材の値はこれに近い。本研究結果と先行研究の

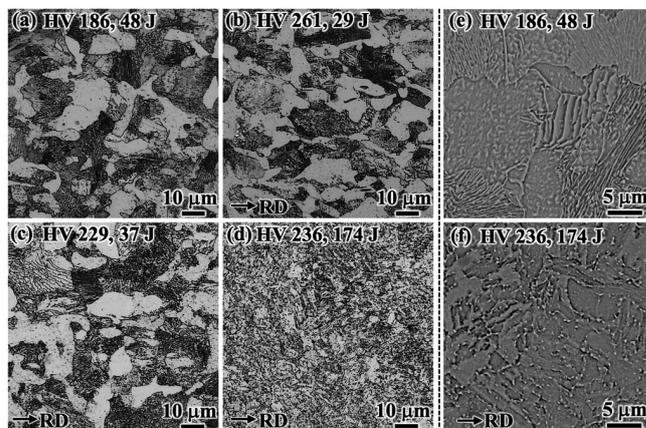


図 1 ミクロ組織の観察結果 (a), (b), (c), (d) 光学顕微鏡観察結果 (e), (f) 走査型電子顕微鏡観察結果 (a) 受入材 (b) 圧延材 (c) 圧延焼なまし材 (d) 圧延焼入焼戻し材 (e) 受入材 (f) 圧延焼入焼戻し材

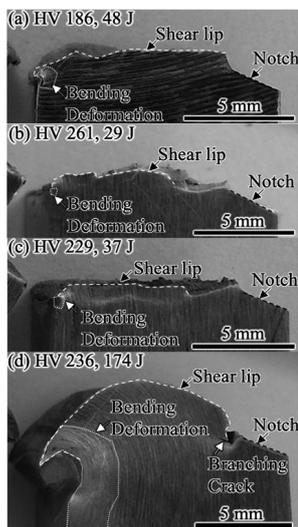


図2 破壊形態の観察結果 (a) 受入材 (b) 圧延材 (c) 圧延焼なまし材 (d) 圧延焼入焼戻し材

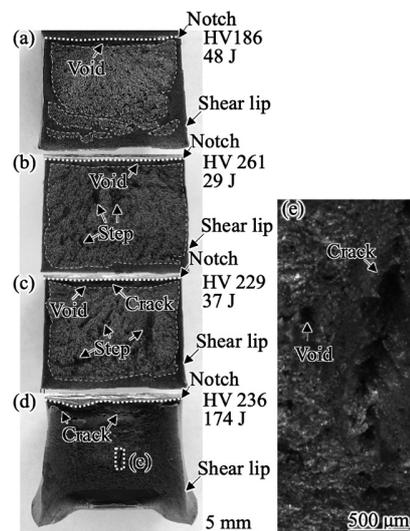


図3 破面形態の観察結果 (a) 受入材 (b) 圧延材 (c) 圧延焼なまし材 (d) 圧延焼入焼戻し材 (e) 破面 (d) の拡大写真

結果⁽²⁾を比較すると圧延が、吸収エネルギーを19 J低下させることが確認される。圧延材に着目すると圧延による加工硬化により硬さの上昇が確認され、降伏強度が上昇したことで靱性が低くなる。焼なましを経ると、硬さの減少に伴い靱性が高くなる。圧延後の焼入焼戻マルテンサイト組織は174 Jを呈した。SCM440相当鋼(0.41% C-0.26% Si-0.70% Mn-1.10% Cr-0.26% Mo-0.0003% S-0.010% P-0.55% Ni-0.19% V-0.007% Ce-0.004% La (wt%))の880℃焼入れ660℃焼戻しマルテンサイトで報告される吸収エネルギー119 J⁽³⁾よりも、高い吸収エネルギーを示した。

試験片の側面を観察した結果を図2に試験片の破面全体を図3に示す。両図中の白色点線は切欠きを示す。図2と図3に示すように、いずれの材料においても衝撃試験中の塑性変形の存在を示すシャーリップが観察される。最も吸収エネルギーが低い圧延材はシャーリップが一部生じていることが確認できる。受入材、圧延焼なまし材は、図2(a)、(c)に示すようにシャーリップが連続的に生じていることが確認できる。一方で最も高い吸収エネルギーを示した圧延焼入焼戻し材は、図2(d)に白色破線で示すようにシャーリップが大きくなっていることが確認できる。ノッチ底には破面とは別に分岐き裂の存在も確認できる。いずれの試験片においてもハンマー衝突部には図2中の白色点線で示す曲げ変形が観察されるが、特に圧延焼入焼戻し材では衝突部を中心として試験片全体に大きな曲げ変形が確認される。巨視的にいずれの試験片も塑性変形を伴って破壊していることが確認された。

図3に示すように、いずれの試験片においても切欠き底では延性破面が観察され、衝撃試験の極初期には延性的に破壊が生じていることが確認できる。受入材、圧延材、圧延焼なまし材は、切欠き底から0.4 mmまでは延性破面、破面中央部に脆性破面が形成されている。塑性変形能が応力三軸度に依存すること⁽⁴⁾から、切欠き底での延性き裂発生後、延性き裂先端の高い応力三軸度に起因して、材料内

部に脆性破面が形成されたと考える。また、き裂進展に伴い応力三軸度が低下し塑性変形が容易になる試験片外周部にはシャーリップが確認できる。

受入材、圧延材、圧延焼なまし材は図3中の白色破線で示すように破面中央部に平坦な脆性破面が観察される。圧延材、圧延焼なまし材においてはStepが観察される。脆性破面の面積は、吸収エネルギーの上昇ともない減少していくことが確認される。受入材では、脆性破面中に延性破面が混在している様子が観察される。一方で、脆性破面中のファセットの大きさや数と吸収エネルギーの間に相関は確認されない。最も高い吸収エネルギーを示した圧延焼入焼戻し材は、破面全域で延性破面が観察され、明瞭なシャーリップと横膨出、き裂が観察される。図3(e)に示すようにき裂は複数のボイドによって形成されており、き裂以外にもボイドが確認される。174 Jという高い吸収エネルギーの原因およびマイクロ組織との相関については今後さらに検討が必要である。

(2024年8月5日受理)

参考文献

- (1) 独立行政法人国立高等専門学校機構：“15歳からの高専生が強い鉄づくりの技術を競うマテリアルコンテストを新たに開催～強靱な鉄づくりの原点を体感する～”. Value press. 2023-10-26. <https://www.value-press.com/pressrelease/327076>, (参照2024-06-13).
- (2) G. Krauss: *Steels: Processing, Structure, and Performance, Second Edition*, (ASM International, Novolty, OH, USA, 2015) pp.287-289.
- (3) C. Sun, P.-X. Fu, X.-P. Ma, H.-H. Liu, N.-Y. Du, Y.-F. Cao, H.-W. Liu and D.-Z. Li: *J. Mater. Res. Technol.*, **9** Issue 4 (2020) 7701-7710.
- (4) N. Bonora, D. Gentile, A. Pirondi and G. Newaz: *Int. J. Plast.*, **21** Issue 5 (2005) 981-1007.