A6061 厚肉円筒材の T6 熱処理へのスプレークエンチの適用について 第二報:材料強度についての検討

Application of the spray quench to T6 heat treatment of A6061 hollow cylinder
Second report: Effect of cooling rate at quenching on strength of material

副島久義・佐賀大

Hisayoshi SOEJIMA, Saga Univ.

光武雄一・佐賀大

Yuichi MITUTAKE, Saga Univ.

久保田俊紀・佐賀大

Toshinori KUBOTA, Saga Univ.

森田繁樹・佐賀大

Shigeki MORITA, Saga Univ.

古藤愛美・佐賀大

Narumi KOTO, Saga Univ.

門出政則・佐賀大

Masanori MONDE, Saga Univ.

Key Words: Aluminum Alloy A6061, Quenching, Tensile Test, Strength of Material, Hydrogen cylinder

1. はじめに

アルミニウム合金 A6061 は、塑性加工後の T6 熱処理によって材料強化を行い構造材として供される。T6 熱処理は、3 つの工程、すなわち 1) 溶体化処理 535 °C に加熱・保持して、組織中に析出した添加金属成分を Al の固溶相とする、2) 焼き入れ処理: 材料を急冷して室温に戻して準安定な固溶相とする、3) 時効処理: 171 °C に加熱・保持して固溶相から過飽和の添加金属の析出速度を加速して、短時間で Al 中に微細な析出相を形成させる人工時効操作、から構成される。

金属組織中の微小析出物による析出硬化型の材料強化法では、焼き入れ中に十分な冷却速度が得られないと添加金属が析出して、時効処理後の組織が粗粒化し強度が低下するため、焼き入れ時の冷却速度が重要となる。A6061 の T6 処理における冷却速度が材料強度に対する影響については、Bergsma^[1]らや森田ら^[2]の研究報告がある。しかし、焼き入れ処理の温度帯では、高温面が液で濡らされない膜沸騰伝熱域から、急冷開始に対応する部分的なぬれの回復が生じる不安定な遷移沸騰域を経て、定期的に表面が濡らされる核沸騰域へ非定常沸騰過程を生じるため、固体側の冷却速度は、高温面上での沸騰伝熱様式に依存して大きく変化する。その上、熱容量が大きい部材では、非定常熱伝導の影響を受けて内部での不均一な冷却速度がより顕著となる。

本研究では、前報^[3]での Type-III 型高圧水素タンク用 A6061 製ライナー口金部の厚肉中空材料に対する浸漬冷却とスプレー冷却による焼き入れを用いた T6 試験材に対する引張試験を行い、耐力、引張強さ、伸びについて材料強度を測定した。材料強度に対する焼き入れ中の非定常冷却曲線の影響について調査し、ライナー焼き入れを浸漬冷却からスプレー冷却への代替の可能性について検討した結果を報告する。

2. 実験装置および実験方法

熱処理実験装置については、前報^[3]で詳しく述べられているので、ここでは省略する。試験片は、熱間スピニング加工された A6061 製容器ライナー端部の厚肉中空口金部分をカットした円筒試験片(O.D.φ96x100 mm)で、その内部中心に熱媒体流路となる SUS316 部材の有無により試験片 Type-A と Type-B の二種類がある。

T6 熱処理は、試験片を 535°C に設定した電気炉に装入し、試験片内温度指示が 535°C に到達後、20 分間保持して溶体化処理を行った後、ただちに焼き入れ処理を実施した。室温で

の時効硬化の進行を抑制するために試験片を -15 °C の低温恒温槽で保管し、翌日に時効処理を 171 °C、8 時間実施した。

焼き入れ処理は、浸漬冷却とスプレー冷却の 2 つの方式で行い、浸漬冷却は試験片を水温 18 °C の攪拌水槽内に投入して実施した。スプレー冷却は、試験片の周囲に 90° おきに 4 本設置したフルコーンノズルより液温 20 °C、総スプレー流量 18 L/min のスプレーを試験片に撒布した。

T6 熱処理後、試験片 A、B は、それぞれ図 1(a)と(b)に示される断面位置より放電ワイヤー加工で図 2 に示される寸法形状の板状引張試験片を採取した。引張試験は、島津製作所製精密万能試験機 Autograph を用いて実施した。試験片の伸びは、光学式伸び計と併に、弾性域の伸びについては試験片に貼り付けた一軸ひずみゲージを用いて測定した。

3. 実験結果と考察

3-1 焼き入れ中の試験片内部の冷却遅れ時間

前報^[3]で得られた焼き入れ中の温度測定結果から円筒座標系一次元非定常熱伝導解析を用いて、試験片内部の各半径位置での温度変化を評価した。図 3 は、浸漬およびスプレー冷却中の Type-A と Type-B 試験片に対する冷却開始後の経過時間と温度との関係を半径位置毎に整理した結果を片対数

(a) Type-A test piece (b) Type-B test piece
Fig.1 Locations of plate specimens for tensile tests

Fig.2 Dimension of test piece for tensile tests

グラフで示したものである。図中黒塗りの丸と三角のシンボルは、それぞれ引張強さと耐力がそれぞれ95%まで低下するときの各温度での急冷開始時間遅れの許容時間^[1]を示したものである。例えば、350℃に対する黒塗りの丸のシンボルの許容時間9 s以上を超えて、焼き入れ材が350℃で保持された場合、T6 処理の引張強度が95%低下することを示す。

図3より、浸漬冷却とスプレー冷却のいずれも、各半径位置での温度履歴のシンボルは、最も早い冷却が要求される360℃付近においても引張応力と耐力の95%低下の上限時間とほぼ同等かそれ以下で冷却されていることが分かる。

3-2 材料試験結果

図4にスプレー焼き入れのT6 熱処理で得られたType-B 試験片 $r=36$ mmの位置で $\theta=0^\circ$ と 45° の方向から採取した引張試験片の引張応力とひずみとの関係をそれぞれ実線と一点鎖線で示す。また、浸漬冷却試験片(Type-A)の $r=35$ mmより作成した試験片の中で最大と最小の引張強さを記録した試験片に対する関係を細実線と細破線で示す。参考までに、図中に $\theta=0^\circ$ のスプレー冷却試験片の曲線に対して、0.2%永久ひずみを与える引張応力の耐力 $\sigma_{0.2}$ 、引張応力 σ_B 、破断時のひずみを与える破断伸び e をそれぞれ矢印で示している。図4は、試験材のほぼ中央に対応する採取半径位置の試験片の結果であるが、採取半径位置すなわち材料の冷却速度の違いによる材料強度に対する明確な依存性は見られなかった。表1に、浸漬冷却およびスプレー冷却を用いたT6 熱処理材の引張試験片の耐力、引張応力、破断伸びの平均値と標準偏差をそれぞれ示す。

図4より、弾性域は、焼き入れ方法、試験片の作成位置に関わらず、ほぼ同一の特性を示し、ヤング率 $E=580$ MPa程度が得られていることが分かる。次に、試験スプレー冷却試験片の塑性域の特性に注目する。前報^[3]での冷却評価で $\theta=0^\circ$ と 45° での急冷開始遅れは、約9 sでほぼ一致していたが、ノズル直下側 $\theta=0^\circ$ の試験片が僅かに高い σ_B の値を示すが、表1に示される全体の平均値で比較すると σ_B 、 $\sigma_{0.2}$ ともほぼ同程度の強度が得られている。一方、浸漬冷却では、内部のSUS316の付加的熱容量の影響にも関わらず急冷開始遅れが5 sと早かった。しかし、図4に示されるように試験片の採取位置により耐力、引張応力、破断伸びのいずれの値もばらつきが大きかった。なお、浸漬冷却の最小引張強さの試験片の塑性域の特性は、スプレー冷却とほぼ一致していることが分かる。一般に、アルミニウム展伸材の熱処理後の機械強度は、材料の製造過程や形状に大きく依存することが知られている。参考までに、JIS B 8270 压力容器構造で規定されたA6061-T6の25℃での最小保障値は、 $\sigma_{0.2}=275$ MPa、 $\sigma_B=310$ MPa、 $e=12\%$ である。表1の結果と比べるとスプレー冷却材の平均値は、最小保証レベルに到達しているが、スプレー冷却の改善による強度向上の余地があると考えられる。

4. 結論

A6061 スピニング加工円筒材のT6 熱処理を浸漬およびスプレー冷却で実施した場合の機械強度を検討した。内部半径方向の冷却温度履歴が材料強度に及ぼす明らかな影響は見出せなかったが、浸漬冷却とほぼ同一の冷却速度が得られたスプレー冷却材の耐力、引張強さの平均値は、浸漬冷却材よりも若干(約6%)低い値を示し、本研究で採用したスプレー冷却条件の冷却能力は、不十分であることが分かった。

謝 辞 本研究は、NEDO 公募研究「車載等水貯蔵/輸送容器システム技術に関する研究開発」日本重化学工業株式会社からの再委託研究により実施されたものである。また、アルミライナー試験片は、株式会社サムテック 阪口善樹氏より提供を

受けました。関係各位に対して、ここに記して謝意を表す。

参考文献

1. Bergsma, S.C., et al., Proceedings of 3rd International Conference on Processing and Manufacturing Advanced Materials, (2000) in CD-ROM.
2. 森田ら, 軽金属, Vol.51, No.6, (2001), pp.307-312.
3. 古藤ら, 本講演論文集, (2012).

Fig.3 Quenching delay time and local temperature

Fig.4 Typical stress-strain curves for spray and dip quenching specimens

Table.1 Results of tensile test for each quenching method

	Dip quenching Type-A (15 samples)	Spray quenching (4 samples) Type-B	
		$\theta=0^\circ$	$\theta=45^\circ$
$\sigma_{0.2}$, MPa Ave. / Std.	287.1/16.9	271.5/10.0	277.6/4.7
σ_B , MPa Ave. / Std.	340.4/10.5	323.0/12.0	319.5/7.2
e , % Ave. / Std.	11.9 / 3.9	14.4 / 1.9	13.4 / 6.0