高温面に衝突する微小液滴の熱伝達における表面粗さの影響 Effect of surface roughness on heat transfer of small droplet impinging onto a hot surface

○学 深谷 侑輝 (九大院) 学 福田 慎也 (九大院)
正 日高 澄具 (九大) 正 河野 正道 (九大) 正 高田 保之 (九大)

Yuki Fukatani, Shinya Fukuda, Sumitomo Hidaka, Masamichi Kohno, Yasuyuki Takata

Department of Mechanical Engineering Science, Kyushu University,

744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395

This paper presents experimental investigations of effects of the surface roughness, impinging velocity, and diameter of a droplet on the cooling rate in water spray cooling. The sample surface used is SUS304 cylinder with different roughness, Ra 0.04 (Mirror), 0.2, 3, and 10. The droplet diameter and velocity are independently controlled in ranges of 300-700 μm and 1.0-5.0 m/s, respectively. The cooling rate increases with decrease in droplet diameter when the flow rate of water is constant. The cooling rate also increases with impinging velocity and surface roughness. The effect of the velocity difference arises in the film boiling region.

Key Words: Spray cooling, Surface roughness, Impinging velocity, droplet diameter

1. 緒言

液滴と高温面との衝突は、スプリンクラーによる消火、プラズマ溶射、原子炉の冷却等の様々な分野で用いられる。中でも製鉄所における鋼板のスプレー冷却は重要な冷却方法の一つとなっている。鋼板のスプレー冷却では現在のところ、冷却水の水量密度や水温を変化させることによって冷却を制御することが一般的となっている。しかし、水量密度や水温の他にも液滴径、液滴速度、さらに被冷却物の表面性状は冷却に大きく影響を及ぼすと考えられている。

スプレー冷却の液滴径の影響に関する研究として鈴木ら⁽¹⁾の研究がある。この研究では液滴径が小さいほうが短い時間で冷却できることが示されている。しかし、この研究では液滴径の影響は明らかにされているものの、液滴速度の影響や衝突液滴の挙動までは明らかにされていない。また、被冷却物の表面性状に関しても定量的、系統的に整理されたデータは少ない。

本研究では、直径、速度を独立に制御した水液滴を異なる表面粗さの被冷却物に連続で射出することで、擬似的なスプレー冷却を作り、被冷却物の温度と冷却時間の測定を行った。実験で得た冷却曲線から液滴径、液滴速度、さらに表面粗さの冷却に与えるそれぞれの影響について考察した。

2. 実験装置

実験装置の全体図を図1に示す。実験装置はマイクロジェットディスペンサー、高速度カメラ、試料から構成されている。加熱した試料にマイクロジェットディスペンサーノズルから単一液滴を連続で射出することで実験を行った。マイクロジェットディスペンサーの電磁弁開放時間と射出圧力、ノズル先端径を変化させることによって液滴径、液滴速度を制御することが可能である。また、液滴径の大きさと射出頻度を変更することで水量密度の制御も可能となっている。液滴の衝突速度と直径は、高速度カメラからの画像を解析することで得た。

用いた試料はすべて $\phi 30\text{mm}$ 、高さ 5mm の円柱の SUS304 で、表面粗さ Ra0.04(Mirror), Ra0.2, Ra3, Ra10 の 4 種類を用いた。Ra0.04 は試料表面を研磨した鏡面であり、Ra0.2, Ra3, Ra10 の試料はサンドブラストで表面を加工した。

3. 実験方法

試料表面をアセトンで洗浄した後に、電気炉で試料内温度 620°C まで加熱する。試料には表面から 2mm の所に直径 0.5mm の熱電対を試料中心まで挿入し 0.12 秒毎に冷却中の試料内温度を測定した。炉内には酸化を防ぐために、0.2Mpa の N_2 を封入し続け、酸素濃度を 3%前後にした。試料内温度が 620°C に達した後、試料を電気炉から取り出し、実験装置に設置する。試料は 1 つの液滴が高温面に衝突する回数を 1 回にするために約 26°傾けて設置した。その後、試料内温度が 500°C になったところで、8 本のノズルを用いて液滴を連続で射出して試料内温度が 100°C になるまで冷却する。このときの試料内温度の履歴から各条件での試料の冷却曲線を描いた。

本研究では①液滴径、②液滴速度、さらに③表面粗さのそれぞれの影響を調べるため、表1に示す条件で実験を行った。①の液滴径の影響を調べる実験では、液滴径の大きさに応じて射出頻度を変更し水量密度を一定にした。③の実験では、比較のため空冷時の冷却実験も行った。

Fig.1 Experimental apparatus

Table1 Droplet and surface conditions

Condition	Diameter (μm)	Velocity (m/s)	Frequency (1/s)	Roughness (Ra)
①	300, 500, 700	5.0	400, 88, 32	0.04
②	700	1.0, 3.0, 5.0	400	0.04
③	700	4.0	32	0.04, 0.2, 3, 10

4. 結果と考察

4.1 液滴径の影響

Fig.2 に液滴径の冷却への影響を示す。縦軸を試料内温度、横軸を試料内温度が 500°C の時点からの経過時間としている。液滴径のみの影響を検討するために、液滴径に応じて液滴の射出頻度を変更し、水量密度を 5.70 μ l/s で一定にした。水量密度が一定の場合、液滴径が小さいほど冷却速度が大きくなることがわかった。液滴径による違いは、試料内温度が約 250°C 以上の膜沸騰域ではほとんど現れず、それ以下の温度の遷移沸騰・核沸騰域で生じた。しかし、液滴径が 500 μ m と 700 μ m の場合はほとんど違いがないことから、液滴の冷却速度は液滴の射出頻度に大きく依存すると考える。さらに 300 μ m では、急冷開始温度が他の 2 つと比較して 10°C 以上高くなっていることから、射出頻度は急冷開始温度にも影響を与えると考える。

4.2 衝突速度の影響

Fig.3 に液滴の衝突速度の冷却への影響を示す。衝突速度が 5.0m/s の時は、冷却速度が大きい。衝突速度による違いは主に試料内温度が約 300°C 以上の膜沸騰域で見られ、この傾向は Choi ら⁽²⁾の報告と一致する。200°C 以下の領域では速度による違いはほとんど見られず、衝突速度によって生じる最終的な冷却時間の違いは大部分が 200°C 以上の領域で生じた。このことから、液滴の衝突速度が大きくなると、試料の冷却速度は膜沸騰域で大きくなるが、核沸騰域では変わらないと言える。今回の実験では、3.0m/s の場合のみ急冷開始温度が 25°C ほど低いという結果となった。これが 1.0m/s と 3.0m/s との冷却時間の違いになっている。この原因はまだよくわかっておらず、さらなる検討が必要である。

4.3 表面粗さの影響

Fig.4 に試料の表面粗さの冷却への影響を示す。実線は水冷時の冷却曲線、破線は空冷時の冷却曲線である。水冷、空冷時のどちらも表面の粗い試料において冷却時間が短いという結果が出た。水冷時では表面粗さが大きいと固液接触時間が長い⁽³⁾ことが、冷却時間が短くなった原因だと考える。空冷の場合、表面が粗くなることによって表面積が増加したことがこの原因だと考える。また、どの粗さにおいても 250°C あたりが急冷開始温度となっていることから、粗さによって急冷開始温度は変化しないと考える。

Fig.2 Cooling curve (Effect of diameter)

Fig.3 Cooling curve (Effect of velocity)

Fig.4 Cooling curve (Effect of roughness)

Diameter: 700 μ m, Velocity: 4.0m/s
Shooting frequency: 32 1/s

5. まとめ

水スプレー冷却において試料の表面粗さ、液滴直径、衝突速度、射出頻度をパラメータとして、高温試料の冷却曲線を描き、各パラメータが冷却に与える影響について考察した。

- 水量密度一定の場合、液滴径が小さいほうが冷却速度は大きくなる。また、液滴径 300 μ m の場合、急冷開始温度が高くなる。冷却速度、急冷開始温度には液滴の射出頻度が大きく影響すると予想できる。
- 液滴の衝突速度が大きいと、膜沸騰域での冷却速度が大きくなる。この傾向は核沸騰域では現れなかった。
- 表面が粗いほど空冷時、水冷時ともに冷却速度が大きくなることを確認した。今回の測定範囲においては、粗さを変化させても急冷開始温度は変わらなかった。

6. 参考文献

- (1) 鈴木・他 2 名, 日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文 集, 817.
- (2) K.J.Choi and S.C.Yao, Int. J. Heat mass Transfer Vol. 30, No. 2, pp. 311-318, 1987
- (3) 石原・他 5 名, 高温面に衝突する微小液滴の挙動