نکاتی در عملیات حرارتی[1]

قسمت اول: اتمسفر کوره

ترجمه: محمدحسین نشاطی
شرکت توسعه فولاد آلیاژی ایرانیان

یک نکته کلیدی در مورد عملیات حرارتی، ایجاد اتمسفری در کوره است که نسبت به قطعات در حال فرآوری بی‌اثر باشد. این کار را می‌توان به روش‌های مختلفی انجام داد و به دمای فرآیند و میزان کربن قطعات بستگی دارد.

یک نکته مهم در عملیات حرارتی، نوع، سازگاری و کنترل اتمسفر کوره است. هدف اتمسفر کوره با توجه به نتیجه نهایی مطلوب فرآیند عملیات حرارتی متفاوت است. اتمسفر مورد استفاده در صنعت عملیات حرارتی یکی از دو هدف معمول زیر را دارد:

- محافظت از قطعات در حال فرآوری در برابر واکنش‌های شیمیایی مضری که ممکن است در سطح آنها رخ دهد (مانند اکسیداسیون یا کربوره شدن) – یعنی غیرفعال بودن (بی‌اثری شیمیایی) نسبت به سطح فلز.
- برای امکان دادن به تغییر سطح قطعات (با افزودن کربن، نیتروژن یا هر دو) – یعنی واکنش‌پذیر بودن (از نظر شیمیایی فعال) به سطح فلز.

انواع اتمسفرکوره

انواع زیادی اتمسفر کوره برای استفاده در عملیات حرارتی در دسترس هستند (**جدول 1**). در بیشتر موارد، در عملیات سخت‌کاری و سخت‌کاری سطحی از سیستم‌های گاز گرماگیر (اندوترمیک) یا نیتروژن/متانول استفاده می‌شود. بیشتر عملیات تمپر کردن در اتمسفر هوا انجام می‌شوند به شرطی که وجود یک سطح اکسید کاملاً چسبنده ("پوسته") بر عملکرد قطعه تأثیر نگذارد. در غیر این صورت، یک گاز بی‌اثر (خلا) انتخاب می‌شود.

جدول 1. انواع معمول اتمسفر کوره.

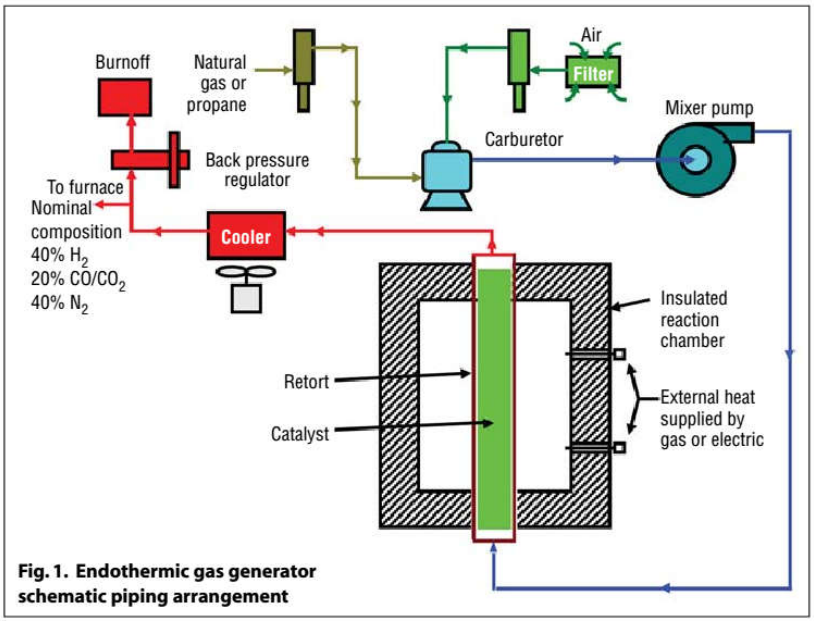
نوع	نماد	ملاحظات
هوا		به طور معمول در عملیات تمپر کردن استفاده می‌شود
آرگون	Ar	یک گاز بی‌اثر
دی‌اکسید کربن	CO_2	یک ترکیب معمول در اتمسفرهای تولید شده
منوکسید کربن	CO	یک ترکیب معمول در اتمسفرهای تولید شده
مخلوط‌های سفارشی		مثال‌ها شامل الکل‌ها و ترکیبی از نیتروژن و گازهای هیدروکربنی
اتمسفرهای تولید شده		گرماگیر، گرمازا، آمونیاک تجزیه شده
هلیم	He	یک گاز بی اثر
گازهای هیدروکربنی		به طور معمول به عنوان گازهای افزودنی یا غنی‌کننده برای اتمسفر کوره استفاده می‌شوند. انواع معمول آن شامل متان (CH_4)، پروپان (C_3H_8) و بوتان (C_4H_{10}) است.
هیدروژن	H_2	ماده تشکیل‌دهنده بسیاری از اتمسفرهای کوره است که برای کمک به انتقال گرما و واکنش با اکسیژن موجود استفاده می‌شود.
نیتروژن	N_2	گاز پتویی [محافظ] که واقعاً بی‌اثر نیست
اکسیژن	O_2	اکسیدکننده سطح فولاد گرم
محصولات احتراق		تولید شده از مخلوط سوخت گاز هیدروکربنی و هوا،اتمسفر معمولاً شامل مقادیر زیادی دی‌اکسید کربن و بخار آب.
بخار آب	H_2O	بخار آب اغلب برای بهره‌مندی از یک لایه اکسید محافظاستفاده می‌شود.
دی‌اکسید گوگرد	SO_2	در عملیات حرارتی آلیاژهای منیزیم استفاده می‌شود.
اتمسفرهای مصنوعی		نیتروژن و متانول (متیل الکل)
خلا		نبود اتمسفر

[1]- Considerations in Heat Treatment Part One: Furnace Atmospheres, IndustrialHeating.com - October 2009.

اتمسفرهای گاز گرماگیر

مولدهای گاز گرماگیر از تجهیزات رایج در کارگاه‌های عملیات حرارتی هستند. اجزای اصلی مولد گاز گرماگیر (**شکل 1**) شامل:

- محفظه واکنش (ریتورت) گرم شده با کاتالیزور
- اجزای کنترل تناسب هوا–گاز
- پمپ برای عبور مخلوط هوا–گاز از طریق محفظه واکنش
- خنک‌کننده برای "غیرفعال کردن" واکنش و جلوگیری از تشکیل دوده



شکل 1. چیدمان شماتیک لوله‌کشی مولد گاز گرماگیر.

گاز گرماگیر – که اندو (endo) یا Rx™gas نیز نامیده می‌شود – هنگامی تولید می‌گردد که مخلوطی از هوا و سوخت با نسبت هوا به گاز کمتری از بیرون به داخل محفظه واکنش گرم شده وارد می‌شود که به طور معمول نمی‌سوزد. محفظه واکنش شامل یک کاتالیزور فعال برای شکستن (کراکینگ) مخلوط مورد نیاز است. با خروج از محفظه واکنش، گاز برای جلوگیری از تشکیل مجدد کربن (به صورت دوده) قبل از ارسال به کوره، به سرعت خنک می‌شود. ترکیب گاز گرماگیر (**جداول 2و3**)، از نظر حجم، بسته به نوع خوراک گاز هیدروکربنی تغییر می‌کند.

جدول 2. محدوده ترکیب برای گاز گرماگیر

تشکیل‌دهنده گاز	درصد (بر اساس گاز طبیعی)	درصد (بر اساس پروپان)
N_2	40.9%	40.9%
CO	19.6%	23.3%
CO_2	٪0.4	0.1%
H_2	٪38.9	35.5%
CH_4	٪0.2	0.2%
نقطه شبنم	+20/+50ºF	-10/-15ºF
نسبت (هوا/گاز)	2.6:1	7.8:1

از گاز گرماگیر برای سخت‌کاری بی‌اثر [اتمسفر] و به عنوان گاز حامل برای کربوره کردن و کربونیتریده کردن گازی استفاده می‌شود. به طور کلی به صورتی تولید می‌شود تا ترکیب آن از نظر شیمیایی نسبت به سطح فولاد بی‌اثر باشد و با افزودن گاز غنی‌سازی (هیدروکربن) که معمولاً در کوره انجام می‌شود، می‌تواند از نظر شیمیایی فعال شود.

جدول 3. داده‌های میدانی اتمسفر نیتروژن/متانول [1]

نقطه شبنم، °F (°C)	$\%CH_4$	%CO	$\%CO_2$	$\%H_2$	% N_2	داده‌های جریان [2]
+30 to +65 (0 to +17)	11.8–14.1	11.8–14.1	0.4–1.1	38-42	37-46	نیتروژن / متانول با غنی‌سازی گاز طبیعی و / یا هوا

تذکر: یک کوره نوار نقاله مشبک 2000 پوند در ساعت (900 kg/hour)، عرض 48 اینچ (m1.2) تنظیم شده با پتانسیل کربن بین 0.45–0.20درصد کربن که بهصورت برقی گرم می‌شود.
جریان تقریبی گاز:600–800 cfh(17-23 m^3/hour) نیتروژن، 190 cfh(3 l/hour) متانول، 200–300cfh گاز طبیعی (6-9 m^3/hour)، 40–50cfh(1.0-1.5 m^3/hour) هوا

اتمسفرهای نیتروژن/متانول یا نیتروژن/هیدروژن

یک اتمسفر گاز گرماگیر معادل می‌تواند با کراکینگ متانول مایع (متیل الکل) و ترکیب آن با نیتروژن (معادله 1)، با استفاده از مخلوط 40 درصد نیتروژن و 60 درصد متانول (تجزیه شده) بدست آید.

$$CH_3OH + N_2 \rightarrow CO + H_2 + N_2 (1)$$

این واکنش شیمیایی به طور معمول در داخل کوره اتفاق می‌افتد، هنگامی که متانول مایع و نیتروژن گازی از طریق یک انژکتور مخصوص به نام اسپارگر (sparger) که مایع را اتمیزه کرده و آن را به محفظه، معمولاً روی یک هدف داغ مانند فن کوره می‌پاشد تنظیم می‌شود. برای کراکینگ متانول معادل 4 KW حرارتبه ازای هر گالن مورد نیاز است. یک گالن در ساعت (3785 میلی لیتر در ساعت) مایع متانول مقدار 241cfh (6.8 مترمکعب در ساعت) متانول تجزیه شده تولید می‌کند.

برای برخی از کاربردهای سخت‌کاری بی‌اثر (اتمسفر)، گازی با مقدار مونوکسیدکربن کمتری نسبت به اتمسفر گرماگیر معادل تولید می‌شود (جدول 3).

شایعترین مشکلات سیستم‌های نیتروژن/متانول مربوطبه عدم اتمیزه کردن مناسب است. قطرات بزرگ به درستی تجزیه نمی‌شوند و به مشکلاتی در کنترل کوره منجر می‌گردند. همچنین، متانول خورنده آلیاژهای نیکل مورد استفاده برای اجزای داخلی کوره (برای مثال، فن‌ها، لوله‌های تابشی، تسمه‌ها و غیره) است.

انواع دیگر اتمسفر مخلوط (**جدول 4**) تولید شده با نیتروژن و/یا هیدروژن کمتر رایج است امادر برخی از کاربردها استفاده شده‌اند. اتمسفر حاصل ممکن است حاوی دی‌اکسید کربن (CO_2) یا مونوکسیدکربن (CO) نباشد.

واکنش‌های گاز درگیر را می‌توان به چهار دسته کلی طبقه‌بندی کرد:

- واکنش‌های اکسیداسیون
- واکنش‌های احیا
- واکنش‌های کربوره کردن
- واکنش‌هایدکربوره شدن

جدول 4. مقایسه اتمسفرهای مصنوعی کوره.

اتمسفر	نوع	$\%N_2$	$\%H_2$	%CO	نقطه شبنم،°F (°C)
هیدروژن	خالص	100	0	0	-95 to -120 (-70 to -85)
آمونیاک تجزیه شده (DA)	تولید شده	75	25	0	- 40 to -50 (-40 to -75)
نیتروژن–DA	مخلوط شده	90	10	0	> -50
گرماگیر	تولید شده	40	40	20	+40 to -10 (3 to -23)
نیتروژن– اندو	مخلوط شده	12	82	6	< 0
نیتروژن– هیدروژن	مخلوط شده	3–75	97–25	0	-60 (-51)

واکنش‌های درگیر اکسیژن

در حضور اکسیژن، فولاد اکسید می‌شود. شدت این تمایل با افزایش دما زیاد می شود. علاوه بر این، اکسیژن باعث دکربوره شدن فولاد می‌گردد. اگر قرار باشد فولاد در طی عملیات حرارتی براق و عاری از دکربوره شدن بماند، اکسیژن آزاد (O_2)در اتمسفر کوره باید حذف شود.

واکنش‌های درگیر بخار آب

واکنش آب–گاز (معادله 2) مهمترین واکنش شیمیایی کوره–اتمسفر است. این معادله شامل اجزای اصلی تشکیل‌دهنده اتمسفر گازی است زیرا واکنش‌دهنده‌های تشکیل شده در هر طرف معادله را کنترل می‌کند. علامت مساوی تعادل شیمیایی را نشان می‌دهد – یعنی واکنش می‌تواند به هر دو جهت، تشکیل CO و بخار آب (H_2O) یا تشکیل CO_2 و هیدروژن (H_2)بسته به درصد نسبی هر یک در اتمسفر کوره به پیش برود.

$$CO_2 + H_2 = CO + H_2O \text{(واکنش آب و گاز)} \qquad (2)$$

بخار آب و CO_2 هر دو در این معادله ظاهر می‌شوند و می‌توان از این واقعیت برای کنترل پتانسیل کربن اتمسفر کوره استفاده کرد. به ساده‌ترین حالت، آنالیزکننده‌های نقطه شبنم به نسبت H_2O/H_2 در واکنش آب–گاز توجه می‌کنند. آنالیزکننده‌های مادون قرمز و دستگاه‌های پروب اکسیژن به نسبت CO/CO_2 در واکنش آب–گاز توجه می‌کنند.

بخار آب یک گاز به شدت دکربوره کننده است. هر جزء تشکیل‌دهنده‌ای مانند CO_2تمایل به ایجاد بخار آب دارد، بنابراین، CO_2نیز باید به دقت کنترل شود. علاوه بر این، برای جلوگیری از دکربوره شدن توسط بخار آب، CO و H_2 باید به مقدار کافی وجود داشته باشند تا شرایط تعادل در هر دما برآورده شود.

بخار آب و CO_2 فولاد را اکسید و دکربوره می‌کنند. هیدروژن هنگامی تشکیل می‌شود که بخار آب آهن را اکسید می‌کند. بنابراین، برای جلوگیری از اکسیداسیون و براق نگهداشتن آهن، برای هر دما یک مقدار H_2 اضافی نسبت به بخار H_2O مورد نیاز است.

واکنش‌های درگیر دی‌اکسید کربن

CO_2 یکی از محصولات واکنش هنگام سوختن سوخت هیدروکربن در هوا است. CO_2 در دمای بالا آهن را اکسید می‌کند. برای جلوگیری از اکسیداسیون، داشتن CO اضافی ضروری است. بنابراین، برای جلوگیری از اکسیداسیون، CO یک ماده تشکیل‌دهنده مطلوب است. CO_2 نه تنها اکسیدکننده فولاد است بلکه بسیار دکربوره‌کننده نیز می‌باشد. برای جلوگیری از دکربورهشدن، CO_2 باید بسیار با دقت کنترل شود. مقدار واقعی به محتوای CO، دما و میزان کربن فولاد بستگی دارد.

واکنش‌های درگیرمونوکسید کربن

CO یک عامل کربوره کننده قوی است. واکنش برگشت‌پذیر COدر تشکیل کربن (C) و CO_2 در اتمسفر کوره از اهمیت خاصی برخوردار است. CO پتانسیل کربن بالایی دارد و در دماهای بالا به صورت فزاینده‌ای پایدارتر می‌شود. CO فقط در دماهای پایین‌تر (900–1350°F (482–732°C)) است که کربن (معادله 3) را به شکل دوده در به اصطلاح واکنش برگشت کربن تأمین می‌کند. دوده باعث بیشترین مشکلات مربوط به نگهداری‌وتعمیر (نت) مولدهای گاز و کوره‌های عملیات حرارتی می‌شود.

$$2CO = C + CO_2 \qquad (3)$$

واکنش‌های درگیر نیتروژن

در زیر 1850°F (1010°C)، نیتروژن مولکولی (N_2) با سطح فولاد یا فولاد ضد زنگ واکنش نخواهد داد. اما، نیتروژن اتمی (N) که به طور معمول در اتمسفر کوره اتفاق نمی‌افتد، مگر اینکه با افزودن آمونیاک (NH_3) به طور عمدی وارد شود، با جذب شدن به سطح فولاد واکنش نشان می‌دهد.

واکنش‌های درگیر هیدروکربن‌ها

متان و سایر هیدروکربن‌ها (پروپان و/یا بوتان) عوامل کربوره کننده هستند. در دمای بالای کوره، متان (CH_4) به کربن (C) و H_2 تجزیه می‌شود. هرچه دمای کوره بالاتر باشد، تمایل به تجزیه CH_4 بیشتر است. به دلیل این تمایل، CH_4 و سایر گازهای هیدروکربنی به کوره وارد می‌شوند تا به تغییر اتمسفر از حالت بی‌اثر به اتمسفری با پتانسیل کربن بالا (نیروی محرکه کربن در سطح فولاد) کمک کنند.

الزامات حجم اتمسفر

در حین عملیات، حجم اتمسفر محافظ مورد نیاز برای استفاده ایمن در یک کوره مخصوص عملیات حرارتی و توانایی کنترل صحیح آن اتمسفر به میزان زیادی به موارد زیر بستگی دارد:

- نوع و اندازه کوره
- وجود یا عدم وجود درب‌ها و/یا پرده‌ها
- محیط (به ویژه مکش‌ها)
- اندازه، بارگذاری، جهت‌گیری و ماهیت کار در حال فرآوری
- فرآیند متالورژی مربوطه

در همه موارد، باید توصیه‌های سازنده برای ورود، تخلیه (پاکسازی)، و حذف گاز دنبال شود زیرا سازنده تجهیزات اصلی این فاکتورها را در هنگام طراحی تجهیزات در نظر گرفته است.

استاندارد 86 انجمن ملی حفاظت از آتش (NFPA)، "استاندارد برای کوره‌های صنعتی با استفاده از اتمسفر فرآوری ویژه"برای کلیه کوره‌ها بکار می‌رود، و رویه‌های ذکر شده در این استاندارد باید دنبال شود.

یک "اصل کلی" که باید بخاطر سپرد این است که برای پاکسازی جهت خارج کردن هوا از کوره قبل از ورود اتمسفر قابل احتراق کوره، حداقل به پنج تغییر حجم محفظه نیاز می‌باشد (**جدول5**). این کار به منظور اطمینان از آن است که اکسیژن محفظه قبل از ورود اتمسفر زیر 1 درصد می‌باشد.

جدول 5. تغییرات حجم مورد نیاز برای تخلیه (پاکسازی) ایمن کوره‌ها

تعداد تغییرات حجم	درصد (٪) هوای باقیمانده
0.1	90.48
0.2	81.87
0.3	74.08
0.5	60.65
1.0	36.79
2.0	13.53
3.0	4.98
4.0	1.83
5.0	0.67

احتیاط‌های مهم

برای تفسیر صحیح داده‌های کوره و اتمسفر، درک کامل تصویر، شامل دانستن نحوه جمع‌آوری داده‌ها و همچنین شناخت دقیق شرایط عملکرد کوره در زمان جمع‌آوری داده‌ها (برای مثال دمای مناطق و جریان گاز، فشار کوره، تنظیمات اگزوز خروجی، چرخش و سرعت فن و غیره) مهم است. در بخش دوم این مقاله تکنیک‌های کنترل اتمسفر مورد بحث قرار خواهد گرفت.

مراجع:

1. Herring, D. H., Understanding Furnace Atmospheres, Atmosphere Operation and Atmosphere Safety, Heat Treating Hints, Vol. 1 No. 7.
2. Mr. Thomas Philips, Air Products & Chemicals (www.airproducts.com), private correspondence.