AISI4130钢最佳预热方法

——基于时间、效率、安全和成本的三种预热方法研究

J. WALKER D. HEBBLE R. HOLDREN Arc Specialties工程咨询公司

在石油和天然气行业，AISI4130钢是一种广泛使用的材料。为了达到强度和其他具体要求的性能，该材料经过了淬火和回火处理。当该材料经过焊接以后，热影响区的性能将受到不利影响，为了减小焊接对于4130钢的影响，预热是其焊接过程中的一项基本要求。而采用直接火焰加热是最常见的方法，其他常用的方法还包括感应加热和电阻加热。其中，电阻加热将有可能成为下一个最常用的工艺方法。

本研究的目的是为了从多方面比较感应加热、电阻加热以及直接火焰加热的优劣。这些比较是基于每种方法加热时测量相同部位获得的实际数据，而不是采用销售或预估数据。采用本研究的最终结论，可确定最有效和最高效率的预热方法。

方法论

由于其质量和状态与用于石油化工行业的阀门类似，所以选择一个阀单体作为研究对象。采用三种应用于工业中的典型方法预热该阀至500℉（1℉=5/9K，1℃=1K）以上。每种测试过程，均通过数据记录器监控和记录阀体内部外部温度。在三种测试中，数据记录器所用的热电偶保持在相同的位置，记录有关所用电力和温度读数的时间。针对每组试验，一旦温度达到500℉，保温1h，并记录所使用的能量。然后在没有热输入的情况下，记录随后1h的温度。当壁上保险丝断开以后，将福禄克®功率计安装到主输入线上，用于测量和记录感应加热源和电阻加热源的有效能量（单位为kW·h）。对于直接火焰加热方法，所用气体为丙烷。采用流量计测量丙烷的消耗量。

试验工艺

（1）感应加热 感应加热器采用水冷电缆传导高频电流，并在材料内部产生电磁感应涡流，该材料中产生的电磁电流引起的分子激发而产生热量。因此，感应加热热量产生于材料内部，而另外两种方法的热源来自外部且须经过其他部件传导。这将使通过部件整个厚度的热量更加均匀，预热部件热辐射流失更少。

首先，采用绝缘陶瓷纤维毯覆盖所有阀门表面。然后将感应加热电缆缠绕在阀门外包的绝缘陶瓷纤维毯上，感应加热线圈、计量和控制热电偶线的位置如图1所示。电缆线不与阀门上任何一处接触。感应加热时，电缆线由于水冷保持在室温附近。感应加热器采用热电偶监测温度并控制其输出。两个热电偶分别被放置在阀门的内侧和外侧，在靠近热电偶1/4 in（6 mm）区域均使用数据记录器记录数据。

感应加热器的程序设定以最快速度预热工件至500℉，保温1h。打开数据记录器，能量计开始进行记录，感应设备也被开始加热。与其他方法的测量一样，均采用数据记录器和能量计同时记录时间。一旦两个热电偶均达到500℉，加热设备即被设定保温1h，时间由数据记录器和能量计记录。1h以后，关闭感应加热器，继续记录接下来1h的温度。整个测试过程中，还需要记录设备安装和拆除的总时间。

（2）电阻加热 电阻加热器使用的加热毯由陶瓷块编制而成，具有抗弯的特性。这种结构使加热毯足够灵活，可以环绕部

件，当部件外形复杂时也可安置在其内部。这些陶瓷块内部含有高电阻的导体，当电源启动以后，陶瓷块迅速加热。陶瓷块既可以将热量传导至部件，也可保证通电时与部件绝缘。加热块仅通过热辐射和热传导对阀门进行加热，而且热传导仅发生在陶瓷块与阀门接触时。

先用紧固带将电阻加热毯与阀门保持在适当位置，电阻加热毯和热电偶的布置如图2所示，然后将整机覆盖绝缘陶瓷毯。两个预热区（带独立控制）均采用两个电阻加热毯，并将其布置在阀门两侧相反的两个区域。

电阻加热控制器在每个区采用热电偶监控温度并控制该区域的热输出。每个区均有一个热电偶点焊在阀门的外部，控制热电偶连接到阀门上靠近计量热电偶1/4 in的区域。第二个热电偶位于另一面，即阀门的外部。放置一个热电偶在阀门内侧，用于数据记录器接近的1/4 in 区域，这一组数据仅作为参考。

电阻加热器的程序设定以最快速度预热工件至500℉，紧接着保持该温度1h。预试验表明，当设定机器预热至500℉时，内部需要比外部多需6h才能达到该温度，于是设定控制器阀门外部达到更高的温度，以保证热量尽快贯穿整个部件。由于内部表面和外部表面不存在足够大的温度差，所以认为这种现象确实发生。另外，考虑与阀门接触的陶瓷加热毯如此靠近热电偶，所以温度不可能远超500℉而造成温度差。打开数据记录器，开始记录能量输入，电阻加热的电源被设定为开始加热。与其他方法的测量一样，均采用数据记录器和能量计同时记录时间。一旦两个热电偶均达到500℉，加热设备即被设定保温1h，时间由数据记录器和能量计记录。1h以后，关闭感应加热器，继续记录接下来1h的温度。整个测试过程中，还需要记录设备安装和拆除的总时间。

（3）直接火焰加热　采用的Belchfire®加热炬连接一个100lb（1 lb=0.45kg）的丙烷钢瓶和压缩空气。当火焰加热阀门外表面时，将阀门放置在一个可旋转的转盘上（见图3）。

根据行业的典型操作方法，阀门根本不保持隔热。为了避免热电偶头缠结，将放置数据记录器设置在铆焊于阀门顶部的小管上。本测试中，仅使用两个数据记录热电偶。

打开数据记录器，火焰和旋转均被启动。一旦两个热电偶均达到500℉，记录时间并开始保温。预热维持由温度监控和手动开关加热炬决定，人为的因素会增加一定的偏差。经过1h的预热维持后，不施加额外热量，记录1h以后的温度。整个测试过程中，还需要记录设备安装和拆除的总时间。

试验结果

（1）时间　基于预热至500℉时内部和外部时间的时间差，以及安装设备和拆除设备时间，对时间进行评估和分析。

第一，预热时间。分析预热时间表明，感应加热得到的结果最佳，阀门内外部均达到最低500℉的时间仅为0.6h。阀门外部达到最低500℉的时间为

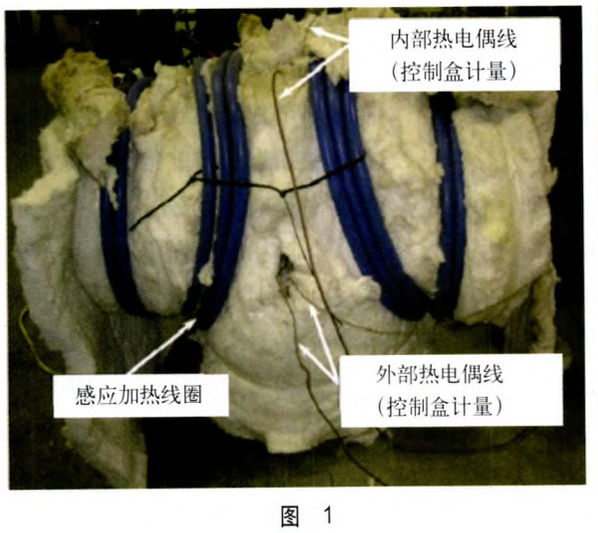


图 1

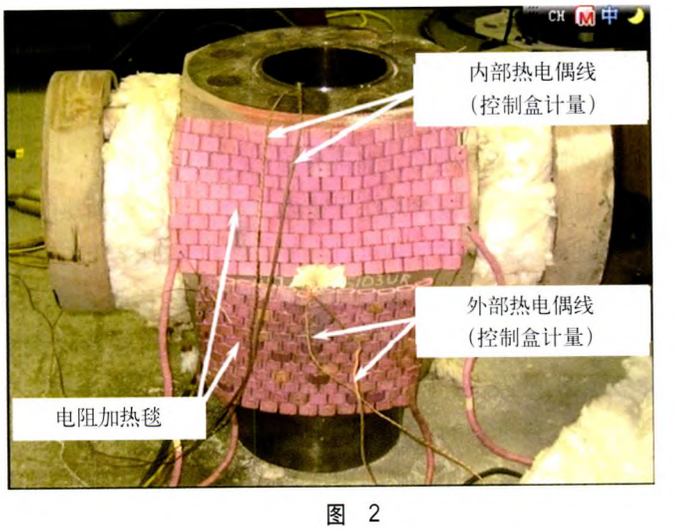


图 2

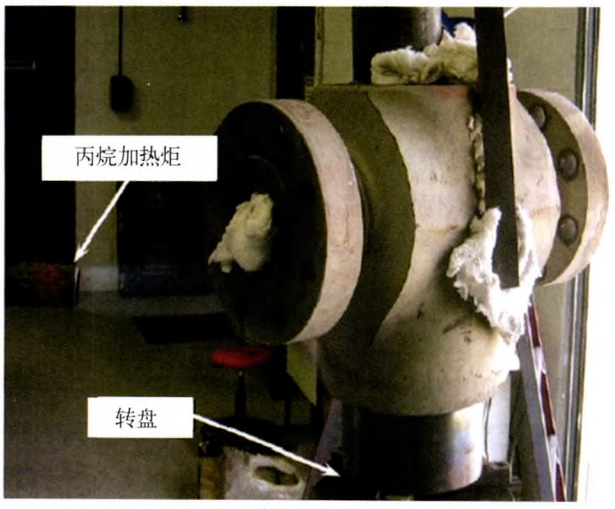


图3　直接火焰加热设置

0.5h。电阻加热和火焰直接加热产生的结果差别很小。采用丙烷加热，阀门外部达到最低500℉的时间为1.02h，内部达到最低500℉需要1.1h。电阻加热时，阀门外部达到最低500℉的时间为0.78h，内部达到最低500℉需要1.75h。因此，电阻加热达到全厚度预热需要的时间最多。总的来说，内外部达到目标时间最快的方法是感应加热。

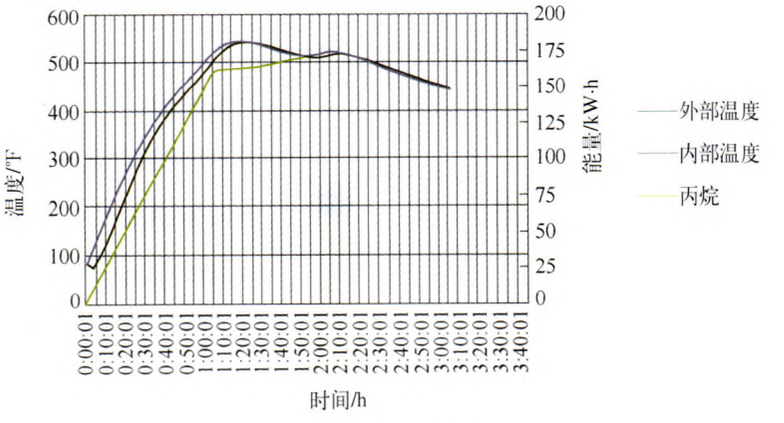
第二，设备安装和拆除时间。火焰直接加热法需要最少的安装和拆除时间，均仅需0.25h。感应加热需要的安装时间为0.58h，拆除时间为0.6h。电阻加热需要最长的时间，安装需要的时间是1.5h，拆除需要的时间为0.37h。本试验也考虑了安装和拆除的难易程度，直接火焰加热最容易。直接火焰法只需要阀门随着火焰炬的加热点进行旋转，而其他方法均需要更加复杂的准备。在直接火焰加热中，唯一受限的是丙烷，因其太重而不易移动。最复杂的方法是电阻加热，不仅需要操作员必须用线将加热毯固定在满意的位置，而且当加热完成时还需要处理高温的加热毯。感应加热明显比电阻加热的安装更简单，采用自支撑的线圈，且更具优势的是线圈不会发热。由此得出：三种方法中直接加热法最快，感应加热次之，电阻加热最慢。

（2）能量效率　基于能量（产生和消耗）及总消耗能量分析每种方法的效率。对于电阻加热和感应加热，记录采用kW·h。对于火焰加热方法，记录预热及预热维持阶段丙烷的消耗量，以磅为单位。为了比较三种方法的优劣，将消耗的丙烷量转换成Btu（1 Btu=1.055kJ），然后再转换成kW·h。为了每种方法的计算单位一致，因此其他两种方法随着时间的耗电量被转换成Btu。

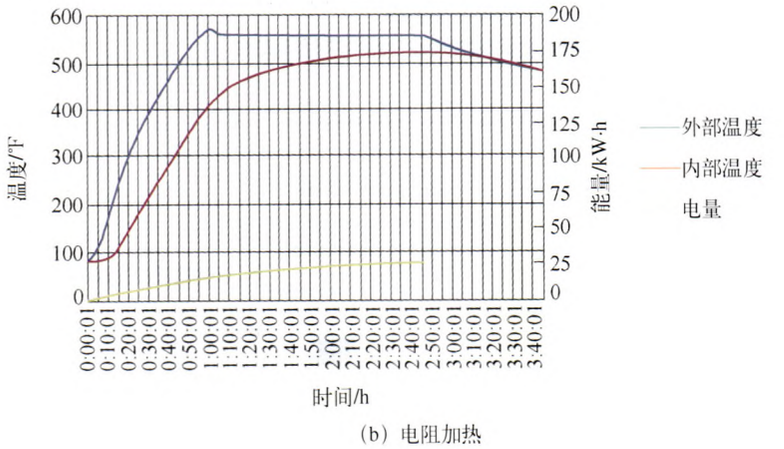
火焰预热的效率最低，使用了171kW·h和585 000Btu。一旦加热移除，火焰加热同时具有最快的温降，且内部和外部间有12℉的温度差。直接火焰加热最快的温降是很容易预测的，因为直接火焰加热没有隔热。感应加热方法效率最高，使用了21.5 kW·h和 73 000Btu，加热移除后具有最小的温降，且内部和外部间仅有4℉的温度差。电阻加热使用了24.5 kW·h和84 000Btu。外部比内部温降多34℉。该温降差与加温差有关，外部需要加热到550℉内部才能达到500℉。一旦加热移除，内部和外部温度均等化，如果温度一样，内部和外部均将开始降温。一个最显著的区别是火焰直接加热法能消耗掉585 000Btu，感应加热消耗掉73 000Btu，因此多达512 000Btu（87.5%）的能量被浪费。此外，理论上所有512 000Btu的能量进入到环境中，这就意味着在生产过程中，浪费的能量将导致该区域的焊工和其他工作人员更大的热暴露。感应加热被证明最有效率，使用最少的能量，以及具有最慢的温降。内部和外部温度升高与所用能量的比较如图4所示。

（3）安全　基于已存在及潜在的危害，分析每种方法以确定其安全程度。因为在生产环境中安全是主要问题之一，故需对安全进行评估。感应加热是三种方法中最安全的。部件不仅不需要旋转，减少了部分处理操作，而且感应线圈整个过程中保持室温，将部件包裹在一个绝缘的状态，使用者只有非常小的机会能够被高温部件烧伤。

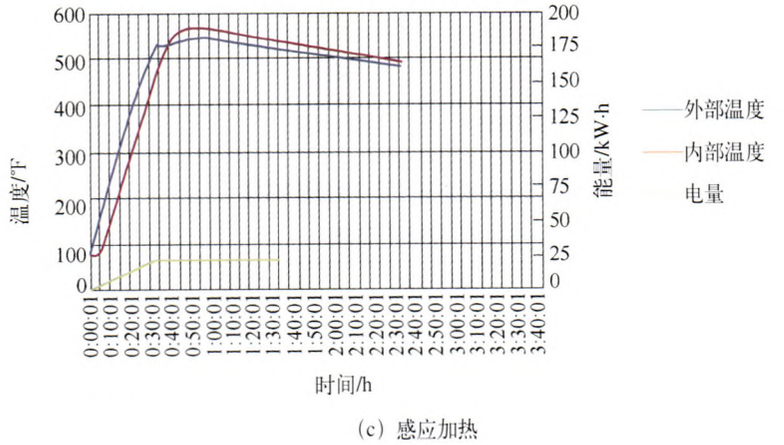
电阻加热和直接火焰加热因为多种原因是有危害的，其中火焰加热相对来说更危险。使用电阻加热和火焰加热时，加热部件和火焰炬在加热及预热后温度都极高，均仅被空气冷却。对于电阻加热方法，加热毯表面覆盖一



(a) 丙烷加热



(b) 电阻加热



(c) 感应加热

图 4

层保温毯，但是一旦部件预热完成以后很难移除加热毯。对于直接火焰加热方法，部件表面无任何覆盖，故大部分部件的温度高达预热温度，而工人无任何保护。此外，对于直接火焰加热法，具有完全暴露的火焰以及填充满可燃性气体的软管接入火焰炬，或者采用分管合流进入火焰炬。火焰炬可能会被打翻或者非故意的指向某物或者某人被烧毁。此外，直接火焰加热会导致不太理想的工作环境。感应加热是最安全的方法，具有不会发热的加热部件，当其包裹阀门在一个隔热的环境中加热时，根本不需要处理部件。另外，因为部件从内部开始加热，感应加热具有更少的热辐射散失。

（4）成本　基于人工、电能、丙烷以及人员花费分析每种方法的成本。假设劳动力消耗65美元/h、电费消耗0.064美元/kW·h、丙烷消耗0.652美元/lb（1 lb=0.45kg），电阻加热在预热阀门过程中成本最高，消耗287.57美元。预热阀门过程人工消耗164.67美元，设备安装和拆除消耗121.33美元以及电力消耗1.57美元。直接火焰加热费用仅次于电阻加热，共消耗187.68美元。其中预热阀门过程人工消耗137.58美元，设备安装和拆除消耗32.50美元以及丙烷消耗17.60美元。总的来说，感应加热成本最低，共花费150.34美元。其中预热阀门过程人工消耗72.04美元，设备安装和拆除消耗76.92美元以及电力消耗1.38美元。

如果车间有空调，需要额外的电力去驱散车间中由于燃烧丙烷而产生的512 000Btu热量，如果在额定范围内，驱散该总热量需要4.29美元。此外，如果不考虑预热的人工，即当预热一个部件的同时焊接另一个，直接火焰加热将变成最便宜的方法，其次是感应加热。

感应加热方法被证明是最有效的。感应加热使操作者的时间最佳应用，使用最少的电量，具有最快达到均匀加热的速度。

设备成本是计算预热阀门的另一个因素。感应加热设备成本39 000美元而电阻加热使用的设备成本15 000美元，直接火焰加热的设备成本为1 200美元。但

是从节约时间方面考虑，感应加热时间最短，成本抵消。一旦支付设备费用，感应加热预热每个部件将比直接火焰加热节约37美元，比电阻加热多花费137美元。包含预热设备成本时预热每个部件的成本如图5所示，扣除预热设备成本每个部件的预热成本如图6所示。

结论和建议

本研究表明，感应加热是最好的方法（见附表）。感应加热预热需要的时间最少，具有最高的热效率，最安全以及最经济有效。其使用的能源比电阻加热少，也比直接火焰加热的成本小。感应加热阀门最快，而且比电阻加热安装设备更快。感应加热方法对于使用者来说也是最安全的方法，因为过程中整个阀门被隔热以及加热的线圈并不发热。

如果采用离线加热，直接火焰加热（采用丙烷）是最便宜的，但是完全暴露的火焰增加了进入车间的热量，这将增加额外的成本、更多的安全隐患和造成较差的工作环境。如果预热人工不考虑，感应加热就成为第二便宜的方法。电阻加热速度最慢，考虑设备安装和预热所需的总时间来计算，其各方面成本最高。

也许本研究最重要的结论是需要考虑很多变量。虽然感应加热的设备成本比电阻加热和直接火焰都高，但是其提供的效率将抵消增加的成本。也许更重要的是感应加热方法为工人创造了一个更加安全的工作环境，这将有助于提高产品的质量和产量。

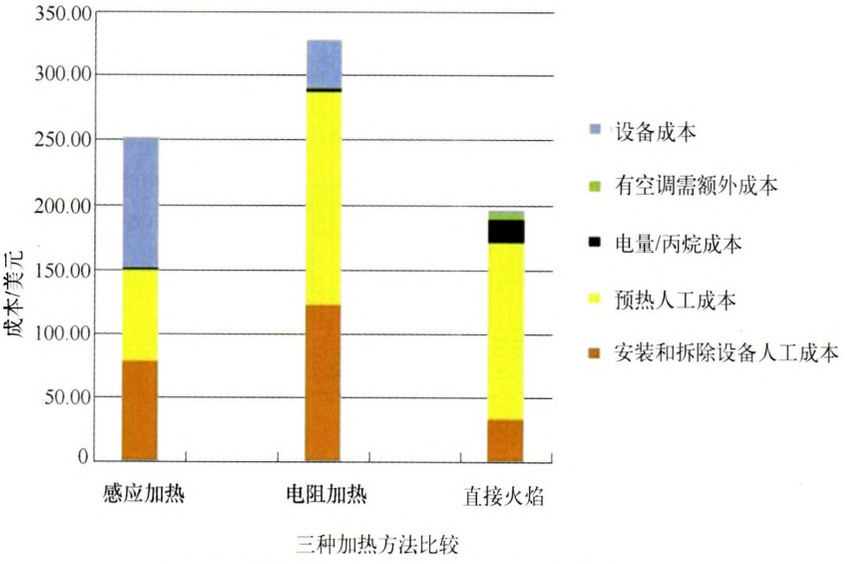


图5　包含预热设备成本时每个部件的预热成本

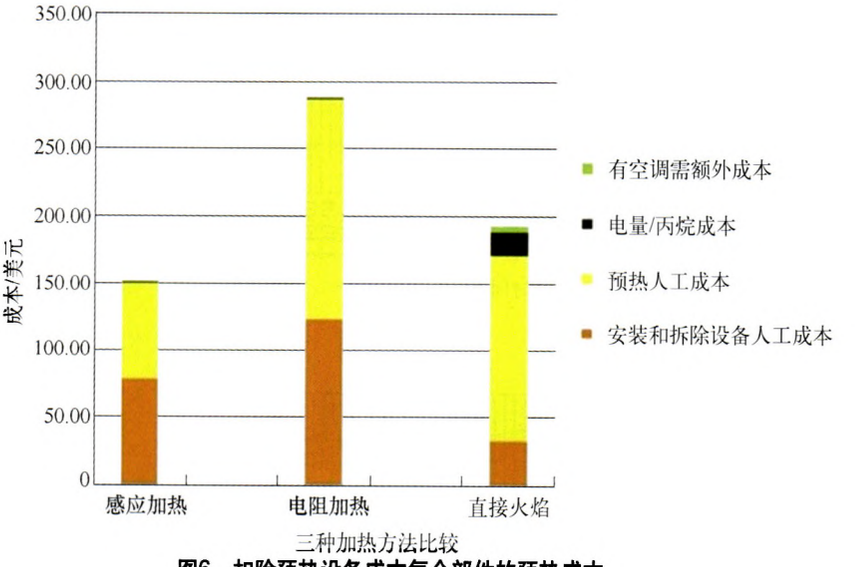


图6　扣除预热设备成本每个部件的预热成本

试验结果总结

方法	感应加热	电阻加热	火焰直接加热
设备名称	Miller Pro Heat 35	PDS Bartech	Belchfire火焰炬
总丙烷消耗/lb	N/A	N/A	27
总电量/kW·h	21.4	24.6	N/A
总能量消耗/Btu	73 000	84 000	585 000
1h内平均温降（外部温度/内部温度）/℃	36/4	56/34	76/12
当内部达到500℉时的温差时间/h	0.60	1.75	1.10
安装时间/h	0.58	1.50	3.62
拆除时间/h	0.60	0.37	0.25
总时间/h	1.78	3.62	1.60
总成本/美元	150.34	150.34	187.69

注：成本基于如下假设：人工，65美元/h；电能，0.064美元/kW·h；丙烷，0.652美元/lb。

（本文由美国焊接学会提供）MW 20140418