

# 防火涂料

徐晓楠 周政懋 编著



化学工业出版社  
材料科学与工程出版中心

# 防 火 涂 料

徐晓楠 周政懋 编著



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

防火涂料/徐晓楠,周政懋编著. —北京:化学工业出版社, 2003.10  
ISBN 7-5025-4846-7

I. 防… II. ①徐…②周… III. 防火涂料-实用技术  
IV. U214.45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 089985 号

---

防 火 涂 料

徐晓楠 周政懋 编著

责任编辑: 顾南君

文字编辑: 林 媛

责任校对: 洪雅妹

封面设计: 关 飞

\*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行  
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

聚鑫印刷有限公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 14½ 字数 388 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4846-7/TQ·1840

定 价: 36.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 前 言

防火涂料是涂料化学、火灾化学、消防燃烧学、高分子材料、建筑材料等学科相互结合的产物。防火涂料在我国研究、开发始于20世纪60年代,虽然起步较晚,但发展较快。从1975年开始,我国防火涂料进入了开创性研究和初步发展时期;1985年后,我国防火涂料步入了蓬勃发展与系列化、标准化阶段。防火涂料的品种、类型、产量与应用范围、生产企业的数量与分布都有很大发展,并同步制定了产品标准与试验方法标准,防火涂料在产品系列化和标准化道路上迈出了可喜步伐。到目前为止,已研究开发出性能较好的饰面型防火涂料、钢结构防火涂料、电缆防火涂料、预应力混凝土楼板防火涂料、隧道防火涂料等具有不同特点、可满足不同使用用途的多类型防火涂料,并在我国一些大型建筑工程、电缆工程、古建筑防火保护工程中得到了广泛使用。

21世纪,随着钢材、混凝土材料、聚合物材料在建(构)筑物、动力工业以及石油化工企业的广泛使用,引入新的防火保护技术和产品,提高防火功能,杜绝恶性火灾事故已经成为未来发展的必然趋势。防火涂料的理论研究、产品开发、工程设计、施工管理以及现行国家标准也会随之不断充实和快速发展。为了适应现代社会的实际需要,解决在防火保护工程设计和应用中的有关问题,满足高等院校教学的发展。作者在多年从事教学、科研的基础上,查阅了大量相关资料,编写了这本《防火涂料》,以满足广大读者的需求。

本书共分6章,主要介绍了燃烧基础、典型物质的燃烧、防火涂料、防火涂料的施工、防火涂料燃烧性能的测试及有关标准、防火涂料现状、存在问题及发展前景等内容。本书在编写过程中注意吸收国内外防火涂料方面的先进技术和有益经验,突出实用性和可

操作性。

本书第1章、第2章、第3章、第5章、附录由徐晓楠编写，第4章、第6章由周政懋编写，全书由徐晓楠整理。

本书可供从事防火涂料研制、生产的工程技术人员和管理人员、建筑防火设计人员、工业企业防火设计审核人员、电气设计人员、企事业单位消防干部和技术人员使用，也可作为高等院校消防工程专业、安全工程、化学工程专业的课程教学用书。愿此书能为从事防火涂料技术工作的同行提供一些有益的参考。

由于作者水平所限，书中难免存在不足之处，恳请读者和同行批评指正，以臻完善。

**编著者**

**2003年8月5日**

## 内 容 提 要

本书全面而系统地讨论了燃烧的基本原理、典型物质在高温下的燃烧行为,论述了防火涂料的防火(阻燃)原理、制备,膨胀型防火涂料、非膨胀型防火涂料、水性防火涂料、溶剂性防火涂料、钢结构防火涂料、饰面型防火涂料、电缆防火涂料、水泥及混凝土基材防火涂料的配方、性能和应用,全面叙述了防火涂料的产品标准和试验方法标准以及评估测试方法的新发展,分析了防火涂料现状、存在问题及发展前景。

本书可供从事防火涂料研制、生产的工程技术人员和管理人员、建筑防火设计人员、工业企业防火设计审核人员、电气设计人员、企事业单位消防干部和技术人员参考,也可作为高等院校消防工程专业、安全工程、化学工程专业以及与涂料相关专业的课程教学用书。

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| <b>第 1 章 燃烧基础</b>         | 1  |
| 1.1 燃烧的本质和条件              | 1  |
| 1.1.1 燃烧的本质               | 1  |
| 1.1.2 燃烧的条件               | 1  |
| 1.2 燃烧的基本原理               | 3  |
| 1.2.1 燃烧的基本过程             | 3  |
| 1.2.2 燃烧的基本原理             | 5  |
| 1.3 燃烧参数                  | 15 |
| 1.3.1 闪点、燃点、自燃点、热分解温度、氧指数 | 17 |
| 1.3.2 燃烧速度、热释放速率          | 19 |
| 1.3.3 燃烧产物                | 25 |
| 1.3.4 烟浓度                 | 29 |
| 1.4 燃烧熄灭与中止的基本原理          | 35 |
| 1.4.1 热理论机理               | 35 |
| 1.4.2 连锁反应机理              | 36 |
| 1.5 阻燃及防火保护               | 37 |
| 1.5.1 阻燃                  | 38 |
| 1.5.2 防火涂料在火灾预防中的作用       | 44 |
| 参考文献                      | 47 |
| <b>第 2 章 典型物质的燃烧</b>      | 48 |
| 2.1 高聚物的燃烧                | 48 |
| 2.1.1 高聚物分解及燃烧过程          | 48 |
| 2.1.2 高聚物燃烧的特点及危害         | 53 |
| 2.1.3 高聚物的阻燃处理及防火保护       | 59 |
| 2.2 木材的燃烧                 | 69 |
| 2.2.1 木材的燃烧过程             | 69 |
| 2.2.2 木材的燃烧速度及其影响因素       | 72 |
| 2.2.3 木材燃烧的预防             | 76 |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 2.3 钢结构材料在燃烧中的行为 .....          | 80 |
| 2.3.1 钢结构材料在燃烧中的力学性能 .....      | 80 |
| 2.3.2 钢结构的耐火性能和火灾特点 .....       | 81 |
| 2.3.3 钢结构的耐火极限要求 .....          | 83 |
| 2.3.4 钢结构基材在燃烧中的保护措施 .....      | 84 |
| 2.4 混凝土材料在燃烧中的行为 .....          | 88 |
| 2.4.1 混凝土材料在燃烧中的力学性能及耐火性能 ..... | 89 |
| 2.4.2 钢筋混凝土的火灾特点 .....          | 91 |
| 2.4.3 混凝土基材在燃烧中的保护措施 .....      | 92 |
| 2.5 其他建筑材料在燃烧中的行为 .....         | 93 |
| 2.5.1 石材 .....                  | 93 |
| 2.5.2 黏土砖 .....                 | 93 |
| 2.5.3 硅酸盐砖 .....                | 94 |
| 2.5.4 砂浆 .....                  | 94 |
| 2.5.5 石膏 .....                  | 94 |
| 2.5.6 石棉水泥材料 .....              | 94 |
| 2.5.7 玻璃 .....                  | 94 |
| 参考文献 .....                      | 95 |

### 第3章 防火涂料 .....

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 3.1 防火涂料的分类 .....           | 96  |
| 3.2 防火涂料的组成 .....           | 97  |
| 3.3 防火涂料的防火(阻燃)原理 .....     | 100 |
| 3.3.1 生成致密的膨胀炭层、阻止热传递 ..... | 100 |
| 3.3.2 黏稠熔融保护层隔绝氧气 .....     | 101 |
| 3.3.3 吸热降低基材的温度 .....       | 102 |
| 3.3.4 燃烧连锁反应的抑制、中止 .....    | 106 |
| 3.3.5 惰性气体的覆盖、稀释作用 .....    | 108 |
| 3.4 防火涂料的制备 .....           | 109 |
| 3.5 膨胀型防火涂料 .....           | 110 |
| 3.5.1 膨胀型防火涂料的膨胀阻燃体系 .....  | 110 |
| 3.5.2 膨胀型防火涂料 .....         | 134 |
| 3.5.3 无机膨胀型防火涂料 .....       | 164 |
| 3.5.4 其他膨胀型防火涂料 .....       | 167 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 3.6 非膨胀型防火涂料 .....          | 169 |
| 3.6.1 难燃性防火涂料 .....         | 170 |
| 3.6.2 不燃性防火涂料 .....         | 171 |
| 3.7 水性防火涂料 .....            | 172 |
| 3.7.1 水性防火涂料的配方举例 .....     | 173 |
| 3.7.2 水性防火涂料存在问题与解决途径 ..... | 177 |
| 3.8 溶剂型防火涂料 .....           | 178 |
| 3.9 钢结构防火涂料 .....           | 180 |
| 3.9.1 钢结构防火涂料分类 .....       | 180 |
| 3.9.2 厚涂型钢结构防火涂料 .....      | 181 |
| 3.9.3 薄涂型钢结构防火涂料 .....      | 189 |
| 3.9.4 超薄型钢结构防火涂料 .....      | 194 |
| 3.9.5 钢结构防火涂料应用 .....       | 207 |
| 3.10 饰面型防火涂料 .....          | 219 |
| 3.11 电缆防火涂料 .....           | 225 |
| 3.12 水泥、混凝土基材的防火涂料 .....    | 232 |
| 3.12.1 预应力混凝土楼板防火涂料 .....   | 232 |
| 3.12.2 隧道防火涂料 .....         | 236 |
| 参考文献 .....                  | 243 |

## 第4章 防火涂料的施工 .....

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 4.1 基材的处理 .....             | 249 |
| 4.1.1 基层处理的目的 .....         | 249 |
| 4.1.2 涂装对基层的一般要求 .....      | 249 |
| 4.1.3 基材的类型与特点 .....        | 250 |
| 4.1.4 基层处理的工序 .....         | 251 |
| 4.1.5 涂装防火涂料常用基材的处理 .....   | 252 |
| 4.2 防火涂料的施工 .....           | 256 |
| 4.2.1 涂料施工的一般方法 .....       | 256 |
| 4.2.2 常用防火涂料的施工要求 .....     | 258 |
| 4.2.3 防火涂料施工时防火要求 .....     | 268 |
| 4.2.4 国内外防火涂料施工比较 .....     | 271 |
| 4.3 防火涂料的包装、运输与贮存 .....     | 275 |
| 4.3.1 水性防火涂料的包装、运输与贮存 ..... | 275 |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 4.3.2 溶剂型防火涂料的包装、运输与贮存 .....         | 275        |
| 参考文献 .....                           | 275        |
| <b>第5章 新型评估测试方法在防火涂料研究中的应用 .....</b> | <b>277</b> |
| 5.1 锥形量热仪法 .....                     | 277        |
| 5.1.1 燃烧参数 .....                     | 278        |
| 5.1.2 在防火涂料中的应用研究 .....              | 279        |
| 5.2 热分析法 .....                       | 295        |
| 5.2.1 膨胀体系各组分分解及相互作用过程研究 .....       | 296        |
| 5.2.2 膨胀阻燃体系匹配过程研究 .....             | 299        |
| 5.2.3 基材树脂与膨胀阻燃体系的匹配研究 .....         | 301        |
| 5.2.4 防火涂料降解过程研究 .....               | 303        |
| 5.2.5 涂料体系其他组成对防火涂料性能的影响研究 .....     | 304        |
| 5.2.6 防火涂层阻火过程研究 .....               | 305        |
| 5.3 红外光谱分析法 .....                    | 306        |
| 5.3.1 确定物质的结构 .....                  | 307        |
| 5.3.2 研究涂料涂层的阻燃历程 .....              | 309        |
| 5.3.3 与热分析技术联用研究防火涂料的微观阻燃机理 .....    | 310        |
| 5.4 光电子能谱分析法 .....                   | 312        |
| 5.5 扫描电镜分析法 .....                    | 315        |
| 5.5.1 研究不同组成的膨胀型阻燃剂对成炭过程的影响 .....    | 315        |
| 5.5.2 研究防火涂料的炭层结构及其组成成分 .....        | 317        |
| 5.6 X射线衍射分析法 .....                   | 318        |
| 5.6.1 原材料物相分析 .....                  | 318        |
| 5.6.2 防火涂料形成炭层的物相分析 .....            | 320        |
| 5.6.3 与其他分析测试技术联用研究反应历程 .....        | 321        |
| 参考文献 .....                           | 324        |
| <b>第6章 防火涂料现状、存在问题及发展前景 .....</b>    | <b>327</b> |
| 6.1 防火涂料发展现状 .....                   | 327        |
| 6.1.1 防火涂料的研究、开发现状 .....             | 327        |
| 6.1.2 防火涂料性能评价和使用依据 .....            | 339        |
| 6.2 防火涂料使用中存在的主要问题 .....             | 342        |
| 6.2.1 防火涂料在应用中存在的问题 .....            | 342        |
| 6.2.2 防火涂料在应用中存在问题举例 .....           | 347        |

|       |                                                     |     |
|-------|-----------------------------------------------------|-----|
| 6.2.3 | 解决防火涂料使用中存在问题的相应对策 .....                            | 355 |
| 6.2.4 | 选用防火涂料应注意的若干问题 .....                                | 359 |
| 6.3   | 防火涂料发展方向及前景 .....                                   | 362 |
| 6.3.1 | 阻燃剂的研究 .....                                        | 362 |
| 6.3.2 | 防火涂料研究 .....                                        | 365 |
| 6.3.3 | 防火涂料阻燃机理研究 .....                                    | 371 |
| 6.3.4 | 防火涂料的评估方法研究 .....                                   | 373 |
|       | 参考文献 .....                                          | 374 |
| 附录一   | 饰面型防火涂料通用技术条件(GB 12441—1998) .....                  | 377 |
| 附录二   | 钢结构防火涂料通用技术条件(GB 14907—2002) .....                  | 381 |
| 附录三   | 饰面型防火涂料性能分级及试验方法 防火<br>性能分级(GB 15442.1—1995) .....  | 395 |
| 附录四   | 饰面型防火涂料防火性能分级及试验方法 大板<br>燃烧法(GB 15442.2—1995) ..... | 397 |
| 附录五   | 饰面型防火涂料防火性能分级及试验方法 隧道<br>燃烧法(GB 15442.3—1995) ..... | 402 |
| 附录六   | 饰面型防火涂料防火性能分级及试验方法 小室<br>燃烧法(GB 15442.4—1995) ..... | 407 |
| 附录七   | 预应力混凝土楼板防火涂料通用技术条件<br>(GA 98—1995) .....            | 411 |
| 附录八   | 建筑构件防火喷涂材料性能试验方法<br>(GA 110—1995) .....             | 418 |
| 附录九   | 电缆防火涂料通用技术条件(GA 181—1998) .....                     | 433 |
| 附录十   | 水基型阻燃处理剂通用技术条件(GA 159—1997) .....                   | 439 |



## 1.1 燃烧的本质和条件

### 1.1.1 燃烧的本质

所谓燃烧，是指可燃物与氧化剂作用发生的放热反应，通常伴有火焰、发光和（或）发烟的现象。燃烧区的温度较高，使其中白炽的固体粒子和某些不稳定（或受激发）的中间物质分子内电子发生能级跃迁，从而发出各种波长的光；发光的气相燃烧区就是火焰，它的存在是燃烧过程中最明显的标志；由于燃烧不完全等原因，会使产物中混有一些微小颗粒，这样就形成了烟。

从本质上讲，燃烧是一种氧化还原反应，它服从于化学动力学、化学热力学的定律以及其他自然的基本定律（质量守恒、能量守恒），但其放热、发光、发烟、伴有火焰等基本特征表明它不同于一般的氧化还原反应。如果燃烧反应速度极快，则因高温条件下产生的气体和周围气体共同膨胀作用，使反应能量直接转变为机械功，在压力释放的同时产生强光、热和声响，这就是所谓的爆炸。它与燃烧没有本质差别，而是燃烧的常见表现形式。

现在，人们发现很多燃烧反应不是直接进行的，而是通过自由基团和原子这些中间产物在瞬间进行的循环链式反应。这里，自由基的连锁反应是燃烧反应的实质，光和热是燃烧过程中的物理现象。

### 1.1.2 燃烧的条件

燃烧现象十分普遍，但其发生必须具备一定的条件。作为一种特殊的氧化还原反应，燃烧反应必须有氧化剂和还原剂参加，此外

还要有引发燃烧的能源。

(1) 可燃物 (还原剂) 凡是能与空气中的氧或其他氧化剂起燃烧反应的物质, 均称为可燃物, 如氢气、乙炔、酒精、汽油、木材、纸张、塑料、橡胶、纺织纤维、硫、磷、钾、钠等。

(2) 助燃物 (氧化剂) 凡是与可燃物结合能导致和支持燃烧的物质, 都叫做助燃物, 如空气 (氧气)、氯气、氯酸钾、高锰酸钾、过氧化钠等。空气是最常见的助燃物, 一般情况下, 可燃物的燃烧都是指在空气中进行的。

(3) 点火源 凡是能引起物质燃烧的点燃能源, 统称为点火源, 如明火、高温表面、摩擦与冲击、自然发热、化学反应热、电火花、光热射线等。

上述三个条件通常被称为燃烧三要素, 但是即使具备了三要素并且相互结合、相互作用, 燃烧也不一定发生。要发生燃烧还必须满足其他条件, 如可燃物和助燃物有一定的数量和浓度, 点火源有一定的温度和足够的热量等。燃烧能发生时, 三要素可表示为封闭的三角形, 通常称之为着火三角形, 如图 1-1 所示。

经典的着火三角形一般足以说明燃烧得以发生和持续进行的原理。但是根据燃烧的连锁反应理论, 很多燃烧的发生和持续有自由基作“中间体”。因此, 着火三角形应扩大到包括一个说明自由基参加燃烧反应的附加边, 从而形成一个着火四面体, 如图 1-2 所示。

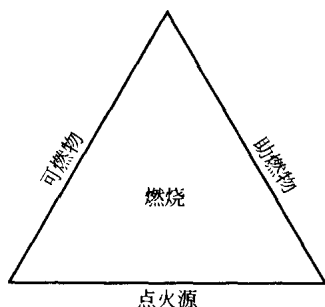


图 1-1 着火三角形

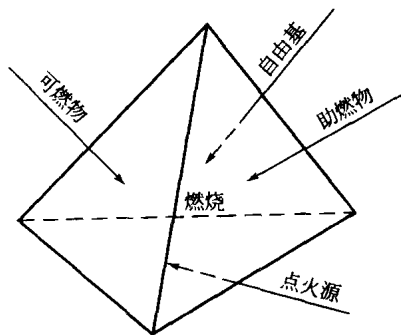


图 1-2 着火四面体

## 1.2 燃烧的基本原理

### 1.2.1 燃烧的基本过程

除组成、结构简单的可燃气体（如氢气）外，绝大多数可燃物质的燃烧不是物质本身在燃烧，而是物质受热分解出的气体或液体蒸气在气相中的燃烧，这个过程极其复杂，为了简化问题，只考虑最基本的燃烧过程，即物质因受热而发生的燃烧过程。可燃物质的受热燃烧过程如图 1-3 所示。

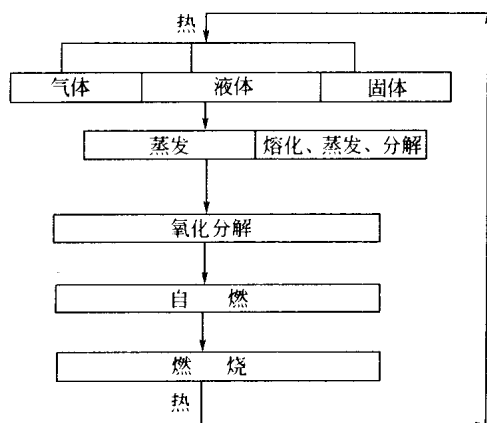


图 1-3 可燃物质的受热燃烧过程

由于可燃物质的聚集状态不同，其受热所发生的燃烧过程也不同。气体最容易燃烧，其燃烧所需的热量只用于自身的氧化分解，并使其达到燃点而燃烧；固态和液态可燃物的燃烧，实际上是在固体和液体表面上的凝聚相中开始，在气相火焰中结束；液体燃烧时，在火源作用下，首先使其蒸发成蒸气，然后蒸气被氧化、分解，而后在气相中燃烧；固体燃烧时，如果是硫、磷、萘等物质，它们首先受热熔化或升华，然后蒸发成蒸气，氧化后进行燃烧，其中没有分解过程；如果是复杂的化合物，如聚合物、木材、煤等在受热时首先分解，析出气态和液态产物，然后气态产物和液态产物的蒸气发生氧化后着火燃烧。

可燃物质的燃烧过程包括许多吸热和放热的化学过程以及传热的物理过程。物质受热燃烧，它的温度变化是很复杂的，燃烧过程的温度变化情况如图 1-4 所示。

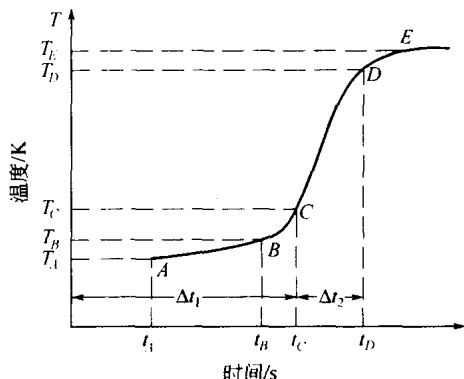


图 1-4 可燃物燃烧过程的温度变化情况

A 点的温度为  $T_A$ ，是可燃物开始加热时的温度，在这最初阶段，外界提供加热的热量主要用于可燃物的熔化、蒸发和分解，可燃物温度上升缓慢。

B 点的温度是  $T_B$ ，当可燃物温度达到  $T_B$  时，在凝聚相开始氧化并放热，但由于温度尚低，故氧化速度较慢，氧化所产生的热量还不足以抵消体系向周围环境散失的热量。此时若撤掉热源，可燃物将降低温度，燃烧不能发生；若继续在热的环境中加热，则因氧化反应速度逐步加快，使温度上升较快。

C 点的温度为  $T_C$ ，当可燃物温度升高至  $T_C$  时，可燃物氧化产生的热量与体系向环境散失的热量相等，也就是说，在  $T_C$  温度时体系产生的热量和向环境散失的热量达到平衡。若热源的温度稍有扰动，使体系的温度略高于  $T_C$ ，热平衡被打破，此时可燃物氧化产生的热量大于体系向环境散失的热量，体系产生热量积累，温度继续上升。因此  $T_C$  为体系从不燃烧到燃烧的转折点，即为可燃物的燃点。

D 点的温度为  $T_D$ ，当可燃物温度上升到  $T_D$  时，可燃物已发



生燃烧,同时出现火焰,并且温度继续上升。

$E$ 点的温度为 $T_E$ ,此时是可燃物经燃烧后,其产物达到的最高温度。

可燃物在 $T_A$ 和 $T_B$ 温度之间,是它的受热区域;在 $T_B$ 和 $T_C$ 温度之间是可燃物在凝聚相中的反应区域;在 $T_C$ 和 $T_D$ 温度之间是可燃物在气相中的反应区域; $T_D$ 温度以后,可燃物产生火焰,反应物变成了生成物,温度达到燃烧最高温度 $T_E$ 。

当燃烧失去控制而发生火灾时,将经历下列发展阶段。

① 初起阶段 可燃物在热的作用下蒸发析出气体、冒烟和阴燃,而后在起火部位及周围可燃物着火燃烧,火灾发展速度较慢,在发展过程中,火势不稳定,火灾发展时间因点火源、可燃物质和分布、通风条件影响差别很大。

② 全面发展阶段 火苗窜起,火势迅速扩大,火焰包围整个可燃物体,可燃物全面着火,燃烧面积达到最大限度,燃烧速度快,放出强大的辐射热,燃烧温度高,气体对流加剧,对室内火灾,将发生轰燃。

③ 熄灭阶段 可燃物质减少,火灾燃烧速度递减,温度逐渐下降,火势逐渐衰弱,终至熄灭。

## 1.2.2 燃烧的基本原理

### 1.2.2.1 燃烧的热理论

任何反应体系中的可燃物,一方面它会进行缓慢氧化而放出热量,使体系温度升高,同时体系又会通过器壁向外散热,使体系温度下降。热自燃理论认为,着火是反应放热因素与散热因素相互作用的结果。如果反应放热占优势,体系就会出现热量积累,温度升高,反应加速,发生自燃;相反,如果散热因素占优势,体系温度下降,不能自燃。

如果用 $\dot{q}_r$ 表示热生成速率, $\dot{q}_l$ 表示热损失速率,则有

$$\dot{q}_r = \Delta H_c V K_n c_A^k e^{-E/RT} \quad (1-1)$$

$$\dot{q}_l = hS(T - T_0) \quad (1-2)$$

式中, $\Delta H_c$ 为可燃物质的燃烧热,kJ/mol; $V$ 为可燃气体的

容积,  $\text{m}^3$ ;  $c_A^k$  为反应物的浓度,  $\text{mol}/\text{m}^3$ ;  $E$  为可燃物质的活化能,  $\text{kJ}$ ;  $T$  为反应体系的温度,  $\text{K}$ ;  $h$  为体系与环境的对流换热系数,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $S$  为容器的表面积,  $\text{m}^2$ ;  $T_0$  为环境温度,  $\text{K}$ ;  $K_n$  为反应速度常数。

由能量守恒方程可得

$$\dot{q}_g - \dot{q}_l = \frac{mcdT}{dt} = \frac{\rho c V dT}{dt} \quad (1-3)$$

式中,  $m$  为可燃物质的质量,  $\text{kg}$ ;  $c$  为可燃物质的比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。分析式 (1-1)、式 (1-2), 在可燃物组成确定后,  $\dot{q}_g$ 、 $\dot{q}_l$  分别是下列参量的函数。

$$\dot{q}_g = f(T, p) \quad (1-4)$$

$$\dot{q}_l = f(T, T_0, h) \quad (1-5)$$

为研究问题方便, 在三个变量  $p$ 、 $h$ 、 $T_0$  固定两个变量不变后, 就可以得到  $\dot{q}-T$  之间的两维函数关系。图 1-5、图 1-6、图 1-7 分别为保持压力  $p$ 、对流换热系数  $h$  不变, 改变环境温度  $T_0$  时的

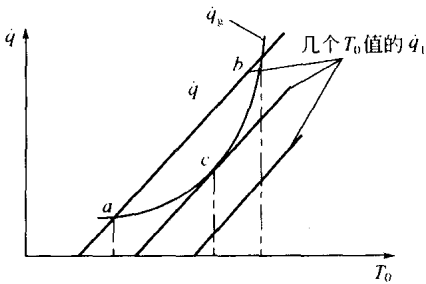


图 1-5 改变环境温度  $T_0$  时  $\dot{q}-T$  曲线

$\dot{q}-T$  曲线; 保持压力  $p$ 、环境温度  $T_0$  不变, 改变对流换热系数  $h$  时的  $\dot{q}-T$  曲线; 保持环境温度  $T_0$ 、对流换热系数  $h$  不变, 改变压力  $p$  的  $\dot{q}-T$  曲线。以图 1-5 为例, 对体系的放热和散热情况进行分析。

当环境温度较低, 放热曲线和散热曲线相交  $a$ 、 $b$  两点,  $T < T_a$ ,  $T$  上升至  $T_a$ ,  $T > T_a$ ,  $T$  下降到  $T_a$ , 因而  $a$  点是稳定点, 处于低温氧化态。  $T < T_b$ ,  $T$  下降至  $T_a$  点,  $T > T_b$ ,  $T$  继续上升, 因而  $b$  点是非稳定点, 但  $b$  点是热力学非自发状态。尽管  $a$ 、 $b$  两点是放热和散热方程的两个数值解, 但  $b$  点是虚解, 是实际上不存在的点, 所以, 当放热曲线和散热曲线处于相交状态时, 体系只能稳定在交点  $a$  处, 发生低